

城市电动汽车规模化发展的大气环境影响研究

贺晓婧¹, 廖诗武², 赵子潇¹, 游 丽¹, 王海鲲^{1*}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏南京 210023; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

【摘 要】 发展电动汽车被认为是有效缓解城市交通污染的重要措施, 但大规模的电动汽车发展不仅有增加电力部门排放的风险, 而且可能影响电网运营的稳定性。本研究以南京市为例, 综合应用充电行为模式调研、蒙特卡洛模拟、COPERT 模型、排放因子法等方法, 系统研究了私家车、出租车和公交车三种类型电动汽车的充电特征及其对区域交通和电力部门排放的影响。结果表明, 当三种车型的电动化率分别达到 50%、100% 和 100% 时, 城市的 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 VOCs 和 CO_2 排放量将分别比基准情景减少 378t、305t、20 223t、3649t 和 480 万 t。但是, SO_2 排放增加了 1152t, 并且导致南京市电网的夏季峰值负荷增加 10%。为更好地改善中国城市环境空气质量, 应综合考虑电动汽车有序充电、协同促进清洁电力等发展策略, 最大限度地实现电动汽车的环境效益。

【关键词】 电动汽车; 充电特性; 排放清单; 大气污染

【中图分类号】 F206; X51

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2020) 03-0077-08

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.03.077

引言

2018 年我国民用汽车保有量达到 2.32 亿辆, 约是 2010 年的 3 倍, 道路交通已经成为我国城市大气污染的主要来源^[1,2]。电动汽车作为一种清洁的交通工具, 可以有效减缓交通排放带来的大气污染, 纯电动汽车甚至可以实现道路交通部门的“零排放”^[3,4]。然而, 大规模的电动汽车充电将带来新一轮的电力负荷增长, 可能加剧电网峰谷不平衡, 影响电网稳定运行^[5,6]。此外, 从某种意义上来说, 电动汽车的发展相当于将交通部门的排放转移到电力生产部门^[3], 甚至可能加重某些区域的大气污染^[7,8]。

国内外学者已经针对电动汽车发展带来的能源与环境问题开展了相关研究。关于电动汽车对电力系统的影响, 确定充电负荷是关键, 现有研究主要基于传统燃油汽车的行驶数据和假设参数估计未来电动汽车充电负荷^[9-11], 或者探讨通过电动汽车充放电的有序调度来改善电网负荷水平^[12-14]。此类研究多是基于对用户充电行为的假设或是直接使用其他国家和地区的调查研究数据, 仅有少部分采用实际充电数据来研究特定城市 (如深圳) 某类车辆 (如出租车) 的充电负荷, 缺乏针对城市不同类型电动汽车实际充电负荷的本地化数据研究。此外, 关于电动汽车的环境影响, 目前的研究侧重于电动汽车运行过程^[7,11,15]、燃料生命

周期^[16-18]以及整车全生命周期^[19-21]的温室气体和污染物排放评估, 研究结论在不同国家和地区呈现较大差异。可见, 由于不同国家和城市的电动汽车类型、数量、充电特征、电力结构、气候条件 (如温度) 等因素存在较大差异, 有必要采用本地化数据, 同时开展电动汽车规模化发展的能源与环境影响研究, 为城市改善环境空气质量综合决策提供科学支撑。

作为长三角城市群的中心城市, 南京市 2018 年民用汽车保有量已经达到 258 万辆, 其中私家车占到 80%; 全市环境空气质量达到二级标准的天数为 251 天, 达标率为 68.8%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值为 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[22]。自 2014 年入选全国第二批新能源汽车推广应用示范城市以来, 南京市政府制定了《南京市“十三五”电动汽车充电基础设施规划》《南京市“十三五”新能源汽车推广应用实施方案》《南京市打造新能源汽车产业地标行动计划》等支持政策推广使用电动汽车, 提出了到 2020 年以电动汽车为主的新能源汽车超过 13 万辆标准车的目标。截至 2018 年, 南京市新能源汽车发展总量为 40 337 辆, 其中新能源公交 5587 辆、出租车 1000 辆、各类小型乘用车 24 151 辆^[23]。本研究以南京市为例, 依据规划策略设置不同电动汽车发展情景, 在对电动汽车充电行为等数据实地调研的基础上, 应用蒙特卡洛模拟, 建立了电动汽车充电负荷

作者简介: 贺晓婧 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市交通污染控制与管理, E-mail: hexiaojing725@163.com。

*** 责任作者:** 王海鲲 (1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大气环境风险管理, E-mail: wanghk@nju.edu.cn。

动态变化曲线,并结合 COPERT 模型和排放因子法分别评估了不同电动汽车发展情景下,车辆使用过程中交通和电力部门的排放变化。研究结果不仅能为全面评估城市电动汽车发展的大气环境影响提供研究框架,也对合理制定电动汽车发展策略、优化电网运行和调度、改善城市环境空气质量具有现实意义。

1 方法与数据

1.1 研究对象、范围和情景设置

本研究以 2018 年为研究基准年,南京市为研究区域,以南京市实际的机动车构成和排放为基准情景,依据电动汽车渗透率及其充电模式设置了不同发展情景(表 1)。由于未来电力结构和燃料消耗率难以预测,通过假设在 2018 年达到各情景设置的电动汽车渗透率,即各情景机动车总量均为 2018 年水平,来展开电动汽车规模化发展的大气环境影响评估和探讨。对于南京市以天然气为主的出租车和电动化程度已达到 60% 的公交车,考虑其 100% 的电动化。对于私家车(本文指私人微型和小型客运汽车),依据《南京市“十三五”新能源汽车推广应用实施方案》《南京交通发展白皮书》等相关规划,分别考虑私家车 5%、20% 和 50% 三种电动化情景。对于充电模式,除了电动汽车无序充电,本研究还依据南京市峰谷电价(21:00~8:00 为低谷)考虑了电动汽车有序充电情景,即将电动汽车夜间开始充电时间推迟到 21:00。

表 1 电动汽车不同发展情景设置

情景设置	私家车		公交车		出租车	
	渗透率	充电模式	渗透率	充电模式	渗透率	充电模式
BAU	1.6%	无序	62%	无序	12.5%	无序
情景 1	5%	无序	100%	无序	100%	无序
情景 2	20%	无序	100%	无序	100%	无序
情景 3	50%	无序	100%	无序	100%	无序
情景 4	50%	有序	100%	无序	100%	无序
情景 5	50%	有序	100%	有序	100%	有序

1.2 研究方法

1.2.1 电动汽车充电负荷模拟

本研究主要考虑私家车、出租车和公交车三种城市道路主要车型,通过对相关行业的调研获取电动汽车电池类型和容量等信息,以问卷和现场调查等形式,了解用户充电行为和车辆出行模式(日行驶里程、往返时间)等。首先,在收集电动汽车相关参数的基础上,依据不同发展情景各类型车辆的电动化渗

透率(表 1),确定相应情景下各类型电动汽车的保有量;其次,采用蒙特卡洛模拟对不同类型电动汽车的运行日期类型(工作日和休息日)、日行驶里程(对于公交和出租车则为充电持续时间)随机抽样。假设私家车每次充电都会充满,根据日行驶里程和电池特性确定其初始负荷状态(state of charge, SOC)和持续充电时长,结合充电功率和随机抽取的起始充电时间,得到单辆电动汽车的日充电负荷;进而对不同类型电动汽车日负荷曲线进行预测,最后叠加不同类型电动汽车的充电负荷曲线得到电动汽车总充电负荷曲线。不同情景下的电动汽车总充电负荷计算流程如图 1 所示。

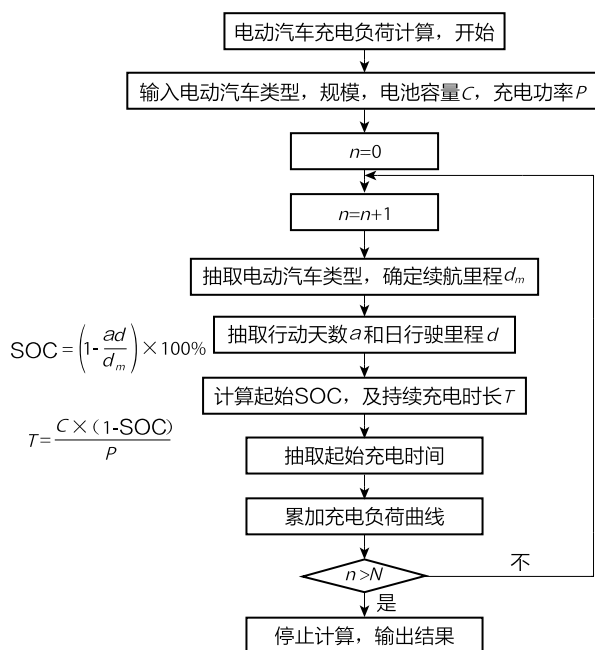


图 1 基于蒙特卡洛法的规模化电动汽车充电负荷计算流程

1.2.2 电动汽车对交通及电力部门排放影响

COPERT 模型已经被国内研究者广泛用于估算道路机动车排放^[24-27]。本研究在课题组已有研究基础上^[28, 29],采用 COPERT 模型评估了不同情景下(表 1)南京市道路机动车大气污染物排放。COPERT 模型主要的参数输入包括车队组成(分车型、燃料、排放标准等)、年均行驶里程和累计行驶里程、燃料参数(含硫量、雷德蒸气压等)、气象参数(最高/低温度,平均相对湿度等)、市区/乡村/高速平均车速及占比,考虑的排放类型包括发动机热稳定运行排放、冷启动过程尾气排放和燃料蒸发排放。交通部门排放主要考虑 SO₂、CO、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 VOCs 六种污染物以及 CO₂ 的排放。

对于不同情景下电力部门的排放，主要考虑 SO₂、NO_x、PM（包括 PM_{2.5} 和 PM₁₀）和 CO₂ 的排放量。研究采用自下而上的排放因子法计算，即“活动水平”乘以对应的“排放因子”，计算公式如下式：

$$E_{i,j} = EC_i \times EF_j \quad (1)$$

其中， $E_{i,j}$ 表示在情景 i 下电力部门污染物 j 的排放量，单位为 g ； EC_i 表示情景 i 下电力部门总用电量，单位为 $kW \cdot h$ ； EF_j 表示单位用电量污染物 j 的排放，单位 $g / (kW \cdot h)$ ，由南京市 2018 年电力系统基础负荷和排放数据计算得到。

1.3 数据来源

研究采用的数据通过问卷调查、文献资料调研以及交通和电力部门调研等多种方式获取，关于数据来源的具体说明见表 2。

2 结果与讨论

2.1 电动汽车充电特征

表 3 给出了各类型电动汽车出行及充电特征的汇总。由表 3 可知，从一周使用频次看，南京市有 89% 的电动私家车在工作日会出行（其余 11% 处于停滞状态），上班高峰在 8:00~9:00，下班高峰出现在 18:00~19:00，日均行驶里程 32.59 km，工作日充电频率为两天一次，通常到达目的地就开始充电；私家车休息日的出行相对随机，平均每天有 64% 车辆出行，日均行驶里程 67.91 km，充电频率为一天一次。通过对私家车到达目的地的时间及日行驶里程进行统计分析，发现私家车起始充电时间基本服从正态随机

分布，日行驶里程服从对数正态分布。电动私家车绝大多数时段处于停驶状态，20% 的用户选择在工作单位（工作日）或商场（休息日）充电，充电功率通常为 7 kW；80% 的用户在家充电，充电功率为 3 kW。

南京市电动出租车日均行驶里程为 265km，运营模式为单班制。市面上主要的电动出租车类型为比亚迪 e6，其最大续航里程约 300 km，多数已经使用 4~5 年，需要一天两充以满足运营需求。出租车充电集中在午餐时间及晚上下班后，起始充电时间分别满足正态随机分布 $N(12.5, 1.1^2)$ 和 $N(20.3, 3.1^2)$ 。南京市电动出租车充电桩的充电功率均为 40 kW，采用快速充电方式。

电动公交车每日行驶里程集中在 150~200 km。尽管电池续航里程基本能满足需求，但是由于电池老化及司机的里程焦虑，公交车充电频率通常为一日两充，除了午餐时间统一在各公交车站充电外，所有公交车会在结束当日行程后回到公交总站再次充电。其中，60% 的电动公交车起始充电时间满足正态分布 $N(18.4, 0.8^2)$ ，其余 40% 符合正态分布 $N(13.14, 1.4^2)$ 。南京市电动公交车的电池容量为 250~350 kW·h，通常采用 80 kW 直流充电桩充电。

2.2 电动汽车充电负荷预测

图 2 展示了各类型电动汽车的充电负荷变化规律，其中，图 2a 展示了情景 3 情况下电动私家车工作日和休息日的充电负荷变化，图 2b 展示了 100% 渗透率下无序充电（情景 1~4）的充电负荷变化。如图 2a，电动私家车工作日充电需求高峰相对集中，在上午 8:00~10:00 以及晚上 19:00~22:00。由于 80% 的

表 2 研究数据获取方法及来源

数据	方法	来源 / 说明
私家车日行驶里程、出行时间等信息	问卷调查	问卷调查覆盖了南京市主城区、新城及副城在内的所有区域，主要选取商场、游乐场等人群密集区域开展，于 2018 年 8—11 月共计发放问卷 500 份
电动私家车电池容量及充电功率	文献调研	Chen 等, 2018 ^[11]
电动出租车开始充电时间、持续充电时长、充电功率	问卷调查	主要选取了南京市固定电动出租车充电站点进行调研（如赛虹桥充电站、红山动物园充电站等），共计发放问卷 400 份
电动公交车开始充电时间、持续充电时长、充电功率	部门调研	南京公共交通集团有限公司
南京市 2018 年气象参数	数据资料	中国气象科学数据共享服务网 ^[30]
车队组成和活动水平	统计资料 文献调研	《南京统计年鉴 2019》 《南京市 2018 年国民经济和社会发展统计公报》 Wang 等, 2010 ^[28] Zhao 等, 2015 ^[29]
南京市 2018 年电力系统基础负荷和排放数据	部门调研	中国电网江苏省电力有限公司电力科学研究院

表3 电动汽车出行及充电特征汇总

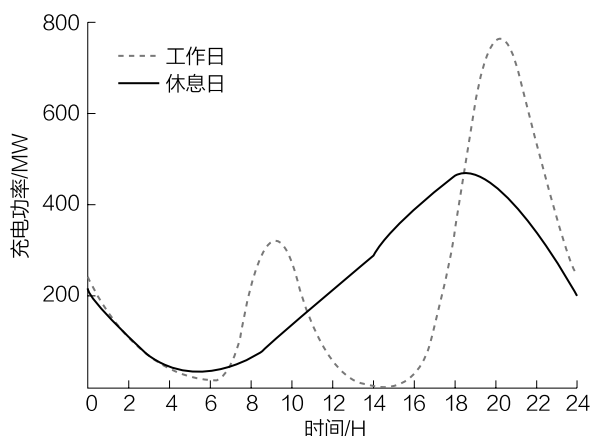
车辆类型	出行日	充电次数 / d	充电模式	充电位置	到达（开始） 时间 / h	充电 比例	平均行驶 里程 /km	充电持续 时长 /min	充电功 率 /kW	电池容量 / （ kW · h ）
私家车	工作日	0.5	慢充	公司	$N\left(8.4,1^2\right)$	10%	32.59	—	7	32
				家	$N\left(18.6,1.3^2\right)^{*}$	40%			3	
	休息日	1		商场	$N\left(11.1,2.8^2\right)$	20%	67.91	—	7	
				家	$N\left(17.1,3.2^2\right)$	80%			3	
公交车	—	2	快充	公交站	$N\left(12.6,1.4^2\right)$	100%	—	$N\left(104,56^2\right)$	80	250 ~ 350
					$N\left(18.4,0.8^2\right)$	60%	—	$N\left(133,57^2\right)$		
					$N\left(21.9,1.4^2\right)$	40%	—	$N\left(135,49^2\right)$		
出租车	—	2	快充	充电站	$N\left(12.5,1.1^2\right)$	100%	—	$N\left(59,21^2\right)$	40	~ 80
					$N\left(20.3,3.1^2\right)$	100%	—	$N\left(71,24^2\right)$		

注: 18.6是指平均到达时间为下午 18:36, 36 分由 0.6×60 得出。1.3²是指到达时间的标准差为 78min, 即到达时间的主要范围为下午 18:36 前后各 78min (1.3 小时), 依此类推

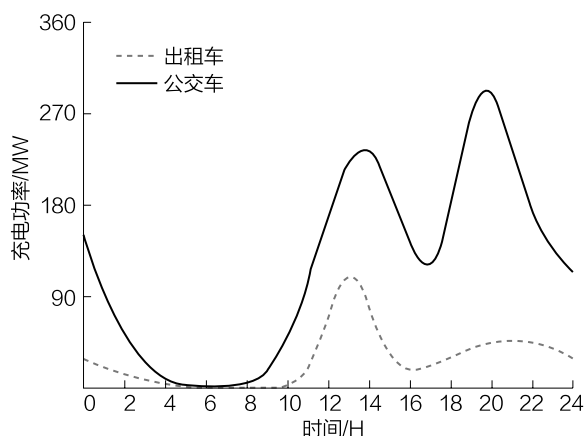
用户选择在回家后充电, 电动私家车充电负荷峰值出现在晚上 20:30 左右。在私家车 50% 电动化渗透率情景下, 工作日最高充电功率达到 770 MW, 约占南京市夏季 (8 月份) 最大负荷电量的 8%。私家车休息日充电需求相对分散, 峰值出现在 18:30 左右, 峰值充电功率约为 470 MW, 为工作日充电负荷峰值的 61%。如图 2b, 由于一天两充, 电动出租车充电需求有两个峰值, 在中午 (12:00~14:00) 比较集中, 峰值约为 113 MW; 晚上比较分散, 高峰出现在 20:00~22:00, 与电动私家车工作日夜间充电高峰期基本重叠 (图 2b)。公交车充电需求高峰出现在下午 12:00~15:00 以及晚上 19:00~21:00, 夜间峰值接近 300 MW (图 2b), 远高于出租车负荷峰值, 与电动出租车相比, 电动公交车具有更高的电池容量及充电功率。尽管出租车和公交车数量相比私家车较少, 但是其对电网负荷 (特别是峰值负荷) 的影响是不可忽略的。

将 2018 年南京市三种类型电动汽车充电负荷进

行叠加, 得到不同情景下电动汽车充电的总负荷曲线 (图 3), 其中南京市电网基准负荷曲线选择了代表性的工作日和休息日。就南京市的基准负荷来看, 工作日和休息日的负荷高峰均出现在夜间 21:00 左右, 2018 年电网最大负荷为 10 818 MW。在无序充电情景下 (情景 1~3), 随着私家车电动化程度的增加, 电动汽车的充电负荷也逐步上升, 三种情景的差异代表由于增加的电动私家车带来的充电负荷变化。工作日电动汽车充电负荷最高峰出现在 20:30 左右, 这一时期为私家车、出租车和公交车的充电高峰, 叠加后形成一个更为明显的峰值负荷, 在私家车 50% 渗透率情景下 (情景 3) 达到 1070 MW, 占到全年最高负荷的 10%, 谷值出现在凌晨 6:00 左右。由于三种车型在休息日的充电负荷相对分散, 其用电高峰也比较低 (在情景 3 下为 800 MW)。值得注意的是, 在无序充电情景下, 无论是工作日还是休息日, 电动汽车负荷高峰均与电网用电高峰重合, 导致电网负荷 “峰上加峰”,



a.情景3电动私家车工作日和休息日充电负荷变化



b.100%渗透率下（情景1~4）电动出租车和公交车无序充电负荷变化

图2 不同情景下各类型电动汽车充电负荷变化

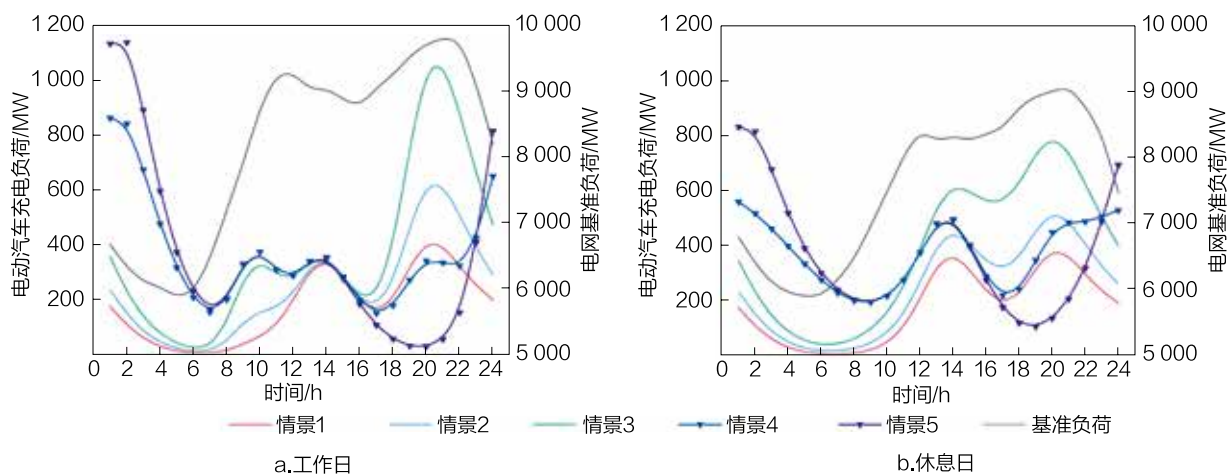


图3 不同情景下电动汽车充电总负荷变化

加重了电网负担。但是，如果考虑私家车有序充电（情景4），电动汽车充电负荷高峰将右移到凌晨1:00，可以起到“削峰填谷”的效果，减少电网运行波动。若进一步考虑所有类型电动汽车有序充电（情景5），20:00左右电动汽车充电负荷将进一步降低，有利于电网的稳定运行。

2.3 不同情景下交通及电力部门排放

不同电动汽车发展情景下，南京市2018年交通及电力部门污染物排放如图4所示。本研究采用平均排放因子计算电力部门排放，无法体现有序充电导致不同电厂机组出力改变带来的排放变化，因此情景4和情景5的排放与情景3相同。交通部门主要排放的污染物为CO和NO_x，在BAU情景下分别排放了6.1

万t和3.9万t，CO₂排放量为2403万t。随着私家车电动化程度的增加，交通部门的排放量也随之减少。在情景3下，交通部门SO₂、CO、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀和VOCs的减排量（相对于BAU情景）分别为49t、20223t、2568t、434t、773t和3649t，相应的减排比率分别为33%、33%、7%、23%、25%及35%。其中，CO和VOCs的减排效果较为显著，主要是由于该情景下私家车电动化比例高，而私家车是这两种污染物的主要排放源^[31]。相比于其他污染物，NO_x的减排比率较低，因为其主要来源为重型柴油车，本研究并未考虑该类车的电动化。情景3下，CO₂减排799万t，相比BAU情景减少了33%。

在BAU情景下，南京市2018年电力部门NO_x、SO₂、PM_{2.5}和PM₁₀的排放量分别为39207t、21504t、

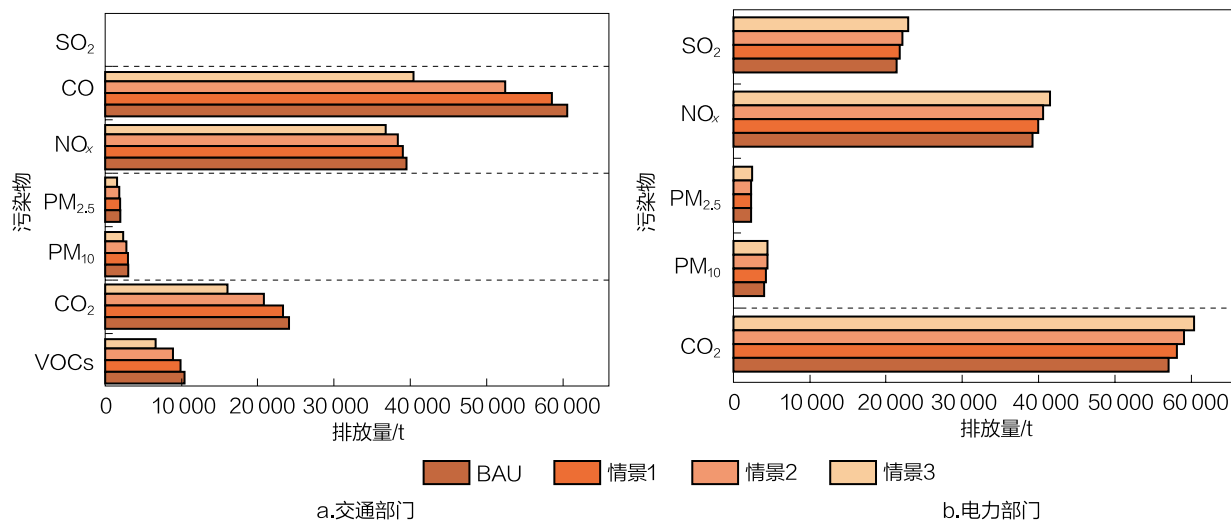


图4 南京市2018年不同情景下交通及电力部门污染物排放量

注：为使图展示更为直观，CO₂单位为kt

2294 t 和 4153 t, CO₂ 排放量为 5710 万 t。在无序充电情景下,随着电动化程度的提升,电动汽车充电所需的电量增加,电力系统产生的污染物排放总量呈现上升趋势。在情景 3 下,电厂各类污染物排放量相比 BAU 情景增加 5.6%。

总体来看,车辆电动化可以大幅减少交通部门的排放,但会增加电力部门排放,总体排放变化决定城市电动汽车发展的环境影响。就南京市而言,在所有情景下,城市 SO₂ 排放总量均会增加,情景 3 的 SO₂ 增加最多,达到 1152 t。这是因为相对于电厂,机动车的 SO₂ 排放量很小,其电动化所带来 SO₂ 的减排有限(图 5)。情景 1 下,CO₂ 和 NO_x 排放略有增加,

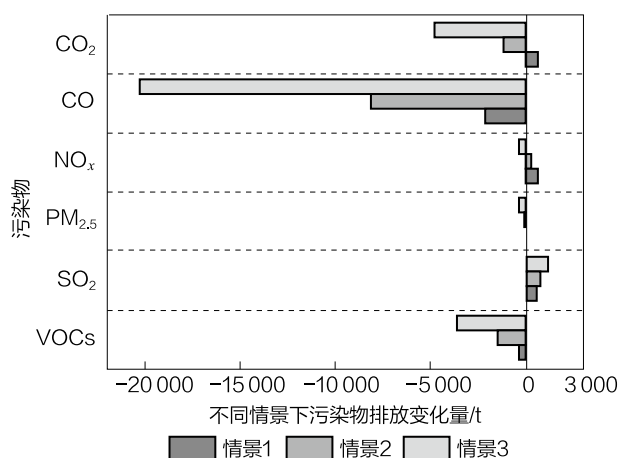


图5 不同情景下电力及交通部门总排放变化

注:为使图展示更为直观,CO₂ 单位为 kt

这是因为南京市目前已有超过一半公交车为电动公交车、90% 的出租车为天然气出租车,进一步将出租车和公交车的电动化率提升到 100% 显著增加了电网负荷,但对交通部门 CO₂ 和 NO_x 的减排效果有限。情景 3 下的减排效果最好,除 SO₂ 外,NO_x、PM_{2.5}、CO、VOCs 和 CO₂ 的总体排放量分别减少 378t、305t、20 223 t、3649 t 和 480 万 t。

关于城市电动汽车发展带来的排放影响,已有研究表明电动汽车对于 SO₂ 的减排效果并不显著,甚至可能增加 SO₂ 的排放^[7,15],这与本研究的评估结果相一致,主要由于我国目前的电力结构仍是以燃煤发电为主,电力部门是 SO₂ 的主要排放来源。对于其他污染物及 CO₂ 排放的影响,不同的区域和研究方法得到的结果存在差异。Huo 等评估比较了 2008 年和 2030 年中国电动汽车和燃油车的排放影响,认为在 2008 年电动汽车会使 NO_x 排放翻倍,但随着燃煤发电占

比下降和脱氮设备安装率的增加,到 2030 年电动汽车 NO_x 排放将等于甚至低于燃油车^[17];Chen 等综合考虑了北京市私家车、出租车和公交车三种车型电动化,在不考虑风电渗透下,到 2020 年会增加 2.7% 的 CO₂ 排放,但可以减少 11% 的 NO_x 排放。在 40% 的风电渗透率下,车辆电动化可以分别减少 31% 的 CO₂ 排放和 27% 的 NO_x 排放^[11]。不同研究由于研究区域、电动汽车类型、数量、充电特征及电力结构等多种因素的影响,其大气环境影响评估结果与本研究存在一定差异。

3 结论与建议

本研究以南京市为例,综合应用充电行为模式调研、蒙特卡洛模拟、COPERT 模型、排放因子法等方法,系统分析了私家车、出租车和公交车三种类型电动汽车的充电特征及其对城市交通和电力部门排放的影响。研究发现,在现有的电力系统下,电动汽车的充电会加重电网负担,可能导致“峰上加峰”,但当私家车电动化水平提高到 50% 时,可以显著减少城市除 SO₂ 之外的所有其他污染物的排放。而且,通过调整优化电动汽车充电时间,还可以达到“削峰填谷”的效果,提升电网运营的稳定性。

通过发展电动汽车减缓城市大气污染的关键影响因素之一是电力部门的排放水平。一方面,近年来我国通过实施超低排放标准显著改善了燃煤电厂的污染,截至 2017 年底已有 71% 的机组达标^[32],因此可以持续推进电力部门超低排放改造,并大力淘汰关停环保、能耗不达标的中小燃煤机组,降低传统电力部门(特别是我国煤电为主的火力发电)的排放水平^[33];另一方面,风能、太阳能都是清洁能源,但是由于电网消纳能力差、电力需求侧峰谷差较大,导致了“弃风”“弃光”现象,通过电动汽车入网技术(Vehicle-to-Grid, V2G),利用大量电动汽车的储能作为电网和可再生能源的缓冲,不仅可以减少清洁能源的“浪费”,而且可以实现电动汽车真正的超低排放甚至零排放。

大规模电动汽车发展在带来环境效益的同时,可能给电网稳定运行带来新的挑战。城市管理部门需要综合考虑电动汽车发展的能源与环境影响,可以通过峰谷电价等政策和智能调控等技术措施对电动汽车充电时间进行调控,综合提升城市电动汽车发展带来的能源和环境效益。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报(2017) [EB/OL]. (2017-06-03). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201706/t20170603_415265.htm.
- [2] 单丽, 江飞, 贺晓婧, 等. 中国道路交通源大气污染的健康影响评估[J]. 中国环境管理, 2018, 10(5): 59-64.
- [3] KE W W, ZHANG S J, WU Y, et al. Assessing the future vehicle fleet electrification: The impacts on regional and urban air quality[J]. Environmental science & technology, 2017, 51(2): 1007-1016.
- [4] PENG W, YANG J N, LU X, et al. Potential co-benefits of electrification for air quality, health, and CO₂ mitigation in 2030 China[J]. Applied energy, 2018, 218: 511-519.
- [5] FERNÁNDEZ L P, SAN ROMAN T G, COSSENT R, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE transactions on power systems, 2011, 26(1): 206-213.
- [6] CLEMENT-NYNS K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution Grid[J]. IEEE transactions on power systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [7] HUO H, ZHANG Q, WANG M Q, et al. Environmental implication of electric vehicles in China[J]. Environmental science & technology, 2010, 44(13): 4856-4861.
- [8] LI N, CHEN J P, TSAI I C, et al. Potential impacts of electric vehicles on air quality in Taiwan[J]. Science of the total environment, 2016, 566-567: 919-928.
- [9] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
- [10] KIM J D, RAHIMI M. Future energy loads for a large-scale adoption of electric vehicles in the city of Los Angeles: Impacts on greenhouse gas (GHG) emissions[J]. Energy policy, 2014, 73: 620-630.
- [11] CHEN X Y, ZHANG H C, XU Z W, et al. Impacts of fleet types and charging modes for electric vehicles on emissions under different penetrations of wind power[J]. Nature energy, 2018, 3(5): 413-421.
- [12] 吴涵, 易弢, 贾丽娟, 等. 电动车充电负荷建模及对配电网的影响分析[J]. 计算机仿真, 2015, 32(5): 186-189, 238-238.
- [13] LÓPEZ M A, DE LA TORRE S, MARTÍN S, et al. Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2015, 64: 689-698.
- [14] WANG J H, LIU C, TON D, et al. Impact of plug-in hybrid electric vehicles on power systems with demand response and wind power[J]. Energy policy, 2011, 39(7): 4016-4021.
- [15] WU Y, ZHANG L. Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries?[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2017, 51: 129-145.
- [16] HUO H, CAI H, ZHANG Q, et al. Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S.[J]. Atmospheric environment, 2015, 108: 107-116.
- [17] HUO H, ZHANG Q, LIU F, et al. Climate and environmental effects of electric vehicles versus compressed natural gas vehicles in China: A life-cycle analysis at provincial level[J]. Environmental science & technology, 2013, 47(3): 1711-1718.
- [18] HE X Y, ZHANG S J, WU Y, et al. Economic and climate benefits of electric vehicles in China, the United States, and Germany[J]. Environmental science & technology, 2019, 53(18): 11013-11022.
- [19] 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.
- [20] 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 等. 北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1105-1116.
- [21] NICHOLS B G, KOCKELMAN K M, REITER M. Air quality impacts of electric vehicle adoption in Texas[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2015, 34: 208-218.
- [22] 南京市统计局. 南京统计年鉴 [M]. 2009.
- [23] 南京市节能与新能源汽车产业及推广应用情况[EB/OL]. (2019-12-16). <http://kuaibao.qq.com/s/20191216A09P8M00?refer=spider>.
- [24] WANG H K, FU L X, BI J. CO₂ and pollutant emissions from passenger cars in China[J]. Energy policy, 2011, 39(5): 3005-3011.
- [25] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 319-326.
- [26] 李荔, 张洁, 赵秋月, 等. 基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 3976-3986.
- [27] 谢绍东, 宋翔宇, 申新华. 应用 COPERT III 模型计算中国机动车排放因子[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 415-419.
- [28] WANG H K, FU L X, ZHOU Y, et al. Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005[J]. Environmental pollution, 2010, 158(2): 394-400.
- [29] ZHAO Y, QIU L P, XU R Y, et al. Advantages of a city-scale emission inventory for urban air quality research and policy: the case of Nanjing, a typical industrial city in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2015, 15(21): 12623-12644.
- [30] Nanjing, People's Republic of China Weather History | Weather Underground Weather underground of Nanjing, China[EB/OL]. (2020-01-09). <https://www.wunderground.com/history/monthly/ZSNJ/date/2018-1>.
- [31] WU Y, ZHANG S J, HAO J M, et al. On-road vehicle emissions and their control in China: A review and outlook[J]. Science of the total environment, 2017, 574: 332-349.

[32] ZHANG Q, ZHENG Y X, TONG D, et al. Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the united states of

America, 2019, 116(49): 24463-24469.

[33] 李莉, 徐健, 安静宇, 等. 长三角经济能源约束下的大气污染问题及对区域协作的启示 [J]. 中国环境管理, 2017, 9(5): 9-18.

The Impact of Large-Scale Development of Urban Electric Vehicles on the Atmospheric Environment

HE Xiaojing¹, LIAO Shiwu², ZHAO Zixiao¹, YOU Li¹, WANG Haikun^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Resource Institution, Nanjing 211103, China)

Abstract: The development of electric vehicles is considered as an important measure to effectively alleviate urban traffic pollution. However, large-scale connection of electric vehicles may not only increase the emissions in power sector, but also affect the stability of power grid operation. Take Nanjing as an example, this study comprehensively applied charging behavior survey, Monte Carlo simulation, COPERT model and emission factor method to evaluate the charging characteristics of electric private cars, taxis and buses as well as the impact of electric vehicles on emissions from transportation and power sectors. The results show that when the electrification rate for three kinds of electric vehicles reach 50%, 100% and 100%, the emissions of NO_x, PM_{2.5}, CO, VOCs and CO₂ are reduced by 378 t, 305 t, 20 223 t, 3649 t and 4.8 Mt, respectively. However, SO₂ emissions increase slightly with 1152 t and lead to a 10% increase of the summer peak load in Nanjing. In order to better improve the air quality of urban environment in China, it is necessary to comprehensively consider the development strategies of orderly charging of electric vehicles and coordinated promotion of clean electricity, so as to maximize the environmental benefits of electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; charging characteristics; emissions inventory; air pollution