

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析

郝旭¹, 王贺武^{1, 2, 3*}, 李伟峰¹, 欧阳明高¹

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学中国车用能源研究中心, 北京 100084; 3. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100084)

摘要: 中国电网火电比例的空间差异与插电式混合动力汽车(PHEV)驱动能源的二元性增加了研究PHEV二氧化碳排放的复杂性. 使用上海市50辆PHEV汽车13万km的数据, 研究了基于PHEV实际运行数据的二氧化碳排放评估方法, 分析了PHEV纯电驱动里程比例及其影响因素, 获得了纯电续航里程、充电频率、电网构成对PHEV二氧化碳排放强度的影响, 展望了2020年PHEV技术水平的二氧化碳减排效果. 结果表明, 我国一线城市PHEV乘用车出行主要集中在50 km以内的范围, 占日常出行频次的70%; 在2016年全国平均电网结构下, 续航里程超过50 km的PHEV比传统燃油车少排放15%以上的二氧化碳; 在高比例可再生能源电网结构的地区, PHEV碳排放可降至100.0 g·km⁻¹以下, 相比平均电网结构下碳排放水平降低幅度在28%以上; 在2016年平均电网结构及技术水平下, 纯电续航里程增加(50~100 km)、充电频率增加(0.5~2次·d⁻¹)对碳排放的改善幅度不明显; 与2016年相比, 2020年PHEV燃油经济性和电耗水平的改善可降低32%的碳排放.

关键词: 插电式混合动力乘用车(PHEV); 碳排放; 出行特征; 纯电里程比例; 电网结构

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1705-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806058

Analysis of PHEV CO₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities

HAO Xu¹, WANG He-wu^{1, 2, 3*}, LI Wei-feng¹, OUYANG Ming-gao¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Automotive Energy Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Collaborative Innovation Center for Electric Vehicles, Beijing 100084, China)

Abstract: Spatial-domain changes in the proportion of thermal power in the power grids of China and the duality of PHEV-driven energy have increased the complexity of research on the CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs). 130 000 km of driving data from 50 PHEV vehicles operating in Shanghai is studied to derive methods to evaluate the carbon dioxide emission of PHEV vehicles. The electric drive distance ratio of the PHEV and its influencing factors are analyzed. The effects of the electric range, charging frequency, and power grid composition on the carbon emission intensity of PHEV are analyzed, and the effect of the level of progress for PHEV in 2020 on CO₂ emission reductions is forecast. The results of the study show that the daily vehicle kilometers travelled by PHEV passenger cars in China's first-tier cities are mainly concentrated within a range of 50 km, accounting for 70% of total trips. Under the national grid structure in 2016, PHEVs with a driving range of more than 50 km emit at least 15% less carbon dioxide than conventional vehicles. In areas with a high proportion of renewable energy grid structure, PHEV carbon dioxide emissions can be reduced to below 100.0 g·km⁻¹, which is more than 28% lower than that achieved using the national grid structure. Based on the national grid structure and technical level in 2016, increasing the all-electric range (50-100 km) and the charging frequency (0.5 times·d⁻¹ to 2 times·d⁻¹) has no obvious effect on reducing CO₂ emissions. The PHEV fuel economy and electricity consumption levels in 2020 could reduce carbon dioxide emissions by 32% compared to those in 2016.

Key words: plug-in hybrid electric vehicle (PHEV); carbon dioxide emissions; travel pattern; electric distance ratio; grid structure

降低汽车行业污染物及二氧化碳排放是我国实现减排的重要举措^[1~3], 但传统内燃机汽车(internal combustion engine vehicle, ICEV)减排空间有限, 新能源汽车是实现低碳减排的有效手段^[4~6]. 交通运输行业碳排放是我国碳排放增长的主要驱动产业之一, 1996~2010年期间, 交通运输行业碳排放增加了9.78%^[1]; 预计到2030年, 交通运输行业的碳排放将达到全国碳排放总额的9%^[3]. 因此降低汽车行业的二氧化碳排放是降低我国二氧化碳排放的关键之一. 但同时, 传统内燃

机汽车通过提高燃油经济性、淘汰黄标车等措施减排的空间有限^[4]. 2015~2016年我国乘用车行业平均节能减排效果中, 由ICEV节能技术提升带来的二氧化碳减排仅占1/3, 而新能源汽车导致节能减排幅度占2/3^[5].

收稿日期: 2018-06-06; 修订日期: 2018-10-19

基金项目: 国家国际科技合作专项(2016YFE0102200); 国家重点研发计划项目(2018YFB0106404)

作者简介: 郝旭(1993~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为新能源汽车出行特征、能耗排放分析, E-mail: haox15@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wanghw@tsinghua.edu.cn

新能源汽车实际的减排效果不仅受到车辆使用过程中能耗与排放的影响,也受到电力生产环节能耗与排放的影响。目前对于车辆碳排放的标准各国存在差异,有些考虑发电环节的碳排放(如新加坡^[7]),有些则不考虑(如欧盟认为电动汽车为零碳排放车辆^[8]),考虑发电环节的碳排放对于新能源汽车和传统车是比较公平的做法。在这种情景下,新能源车与传统车碳排放的比较经常会成为某些社会群体和学者的讨论热点^[3,9~11],本研究为探究我国电网构成条件下的插电式混合动力乘用车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)二氧化碳排放水平及碳减排空间,参考新加坡法规,将发电环节的碳排放计入车辆的排放。

对于我国而言,可再生能源发电量在各省区电网中所占比例不同^[12],由此带来的碳排放差异较大。我国西南、西北地区水电、风电和太阳能发电所占比例远高于全国平均水平,如四川省 2017 年全部可再生能源电力占本省用电量的比例达 84%,青海省可再生能源发电比例为 65%^[13]。相对应地,四川省、青海省电网的碳排放水平也较低^[14,15]。

作为新能源汽车市场的重要组成部分之一,PHEV 近年来发展迅速,在各国呈现了不同的增长态势。根据国际电动汽车联合会(EVI)的统计数据,2015 年全球 PHEV 保有量为 52 万辆,占新能源汽车总量的 42%。在欧美等西方国家,如美国、加拿大、挪威、瑞典、英国、德国等,PHEV 的接受程度更高,比纯电动汽车(battery electric vehicle, BEV)具有更大的市场增长率,如 2015~2016 年间,美国的 PHEV 和 BEV 轻型车的增长幅度分别是 70% 和 22%、英国的增幅分别为 42% 和 4%^[16]。而在中国,由于国家政策的倾向性引导,PHEV 的发展呈现了与国外不同的市场表现。2017 年中国 PHEV 乘用车销量 10.7 万辆,占到当年新能源乘用车销量的 19%,同比增长 48%,与此相对应的纯电动乘用车的增长率 84%^[17]。

在中国新能源汽车双积分政策和补贴政策的背景下,PHEV 不仅得到了市场一定程度的认可,也日益受到企业在产品研发与车型产业化过程中的重视。如上汽集团将以智能电驱变速箱为核心的插电混动系统先后广泛应用于荣威品牌旗下多款车型^[18];比亚迪汽车在插电式混合动力领域的长期深耕,宋 DM 在 2017 年上市后成为当年插电式混合动力乘用车市场销量的第一名^[19];长安汽车的“香格里拉计划”计划推出以逸动 PHEV 为代表的一系列 PHEV 车型^[20]。

PHEV 车辆的能源来源多元化带来了排放源头

的多样性。对于 ICEV,车辆使用过程中仅有单一的汽油或柴油燃烧产生排放;对于 BEV 或氢燃料电池汽车,车辆使用中仅消耗电能,只需要考虑发电端或氢气制备阶段的二氧化碳排放^[3,10,21,22]。但对于 PHEV,车辆使用中部分里程实现了零排放;但仍然存在部分里程由于汽柴油燃烧产生传统污染物排放和二氧化碳排放。当进一步考虑发电端的排放时,受运行工况、行驶距离、驾驶习惯、充电习惯、电网结构等多因素影响,综合污染物和二氧化碳排放随着用电和用油比例的变化呈现了个体间的差异性,从而导致了综合污染物和二氧化碳排放评价的复杂性^[23]。

国内外的研究均表明,PHEV 汽车对传统内燃机汽车在碳减排方面存在一定的优势,且强烈依赖于电网的构成和车辆出行、充电特征^[24~40]。其中,基于车辆出行特征对 PHEV 进行碳排放的研究经历了多个阶段,难点主要在于 PHEV 电驱动里程比例的确定。早在 2008 年,Stephan 等^[24]率先对比了 PHEV 与 ICEV 的碳排放,研究中假设 PHEV 的能耗水平是与出行无关的确定值($0.92 \text{ MJ} \cdot \text{km}^{-1}$),类似的方法在早期采用仿真方法对车辆建模研究 PHEV 碳排放的研究中较为常见^[25,26]。随着对 PHEV 驱动特性的研究,PHEV 的电驱动里程比例成为评价其碳排放的重要参数之一。这一比例被设置为常数(如 0.5)^[27]或 PHEV 的纯电续航里程(all electric range, AER)与传统车平均日出行里程的固定比值^[9,28],虽然大幅度简化了 PHEV 碳排放的计算,但无法反映车辆出行分布规律,与实际运行情况差别较大。

目前,利用传统车真实出行特征计算不同续航里程 PHEV 的纯电里程比例,也即电能利用的效用因子(utility factor, UF),进而研究车辆使用环节的能耗与其带来的二氧化碳排放,是研究 PHEV 车辆碳排放最常见的方法。Onat 等^[29]使用美国 50 个州的交通出行调查结果,比较对应于不同地区的出行里程分布及对应的 UF 的 PHEV 碳减排空间,Wu 等^[30]和 Requia 等^[31]分别采用相近的方法研究了美国和加拿大的 PHEV 二氧化碳排放情况,在此基础上文献[32~34]又进一步研究了充电行为、道路等级等影响出行特征的因素对 PHEV 碳排放的影响。在中国,Wang 等^[23,35]使用北京市传统车出行特征估计了北京市 PHEV 车辆推广的二氧化碳减排效果,结果表明在 2010 年电网结构下,续航里程为 64 km 的 PHEV 的二氧化碳排放水平约为 $200 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ ^[36]。使用 UF 极大提升了 PHEV 碳排放研究的准确度,但考虑到 PHEV 出行特征与传统车出行

特征的差异^[37]及 PHEV 的实际使用特征(如充电行为),使用 PHEV 车辆实际运行数据是准确评价 PHEV 碳排放的重要基础。

随着 PHEV 市场化的普及,实际投入使用的 PHEV 车辆的出行习惯已渐趋稳定,为开展实际 PHEV 车辆出行特征的研究提供了现实基础,也为研究用户的充电习惯、驾驶习惯等提供了可能性。

受益于 PHEV 的市场化推广政策,我国积累了海量的 PHEV 车辆用户群体数据,并对 PHEV 用户进行了问卷调查,如北京市交通研究院、上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心(EVDATA)等机构使用问卷调查的方式对中国多个城市 PHEV 汽车车主进行调研发现,一线城市上海市、二线城市四川省成都市和三线城市山东省临沂市三地的 PHEV 日均出行里程分别为 27.9、36.2 和 45.4 km^[41]。2016 年之后对于新能源汽车实施监测的企业平台与地方性平台逐步对接,企业根据《电动汽车远程服务与管理系统技术规范》(GB/T 32960)要求上传数据^[42],形成了海量 PHEV 车辆监控数据,通过对监控数据的深度分析,可以得到准确的 PHEV 行驶里程、实现电驱动里程和油驱动里程的分离,为精确评估 PHEV 的排放和能源消耗提供了海量数据的基础。EVDATA^[41]、北京电动车监控服务平台^[43]等地方性平台均可在一定程度上为研究提供相应的数

据支持。我国目前已有一定基于实际 PHEV 车辆运行数据的出行特征研究^[44],但基于实际 PHEV 车辆运行数据的能耗与碳排放研究还不够。

为了评估 PHEV 车辆二氧化碳排放,分析车辆纯电续驶里程、充电频率及电网结构、PHEV 技术水平对 PHEV 二氧化碳排放强度的影响,本研究基于上海数据中心的监控平台,对采集的在上海市运行的 50 辆 PHEV 汽车 13 万 km 实际运行数据进行分析,探索了数据分析方法,实现了 PHEV 车辆二氧化碳排放的较准确评估。研究过程包括 PHEV 监控数据的清洗、切割,行驶里程的统计、电池荷电状态(state of charge,SOC)的提取,并据此计算纯电里程比例;在考虑电力和汽油生产与使用环节的二氧化碳排放的前提下,对 PHEV 二氧化碳排放进行了估算,讨论了不同续驶里程、充电频率及不同电网结构、PHEV 技术水平对二氧化碳排放的影响。

1 材料与方法

研究的框架如图 1 所示,具体流程包括:通过对原始数据进行数据挖掘后得到 PHEV 出行特征,基于单日出行里程分布及充电频率可以计算得到 UF、车辆油耗(fuel consumption,FC)和电耗(electricity consumption,EC);油耗和电耗水平进一步结合电网排放计算 PHEV 二氧化碳排放水平。

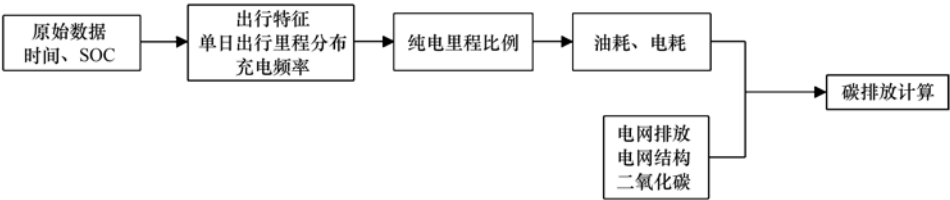


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

1.1 数据采集与处理

数据采集监控平台依据 2016 年公布的文献[42]采集行车数据,包括全球定位系统(GPS)数据、速度、出行里程、电池 SOC,数据采集频率为 0.1 Hz。

本研究的对象为中国企业生产的某款 AER 为 70 km(根据文献[45]中规定工况测试)的插电式混合动力汽车(PHEV70),车辆的基本参数如表 1 所示。该车整备质量为 1 720 kg,装载的电池容量为 13 kW·h,根据中国的插电式混合动力汽车平均油耗计算方法的综合百公里油耗为 1.6 L,动力系统包括一台功率为 113 kW 的内燃机和最大功率为 110 kW 的驱动电机。

数据采集的时间段为 2014 年 4 月至 2014 年 12

月,车辆数量为 50 辆,车辆运行范围为上海市区和郊区,总运行里程为 13.8 万 km。

表 1 车辆基本信息

Table 1 Vehicle attributes

参数	数据
长×宽×高/mm	4 740×1 770×1 480
整备质量/kg	1 720
动力电池能量/kW·h	13
电动机最大功率/kW	110
内燃机排量/L, 功率/kW	1.5,113
工况综合百公里油耗/L	1.6
工况纯电动续驶里程/km	70

从监控数据库导出的数据首先进行了必要的预处理和数据切分,进而形成了每日出行里程信息数据库。数据处理主要包括下列内容和步骤如下。

(1)格式归一化 数据格式转换统一,并针对数据传输过程中可能出现的顺序颠倒按照时间顺序进行调整.

(2)数据清洗 过滤由于数据传输丢失或数据溢出造成的缺失点.

(3)切分单次出行 对数据进行切分,本研究中停车时间超过 30 min 的两个相邻数据点被切分为两次出行.

(4)删除不合理出行 根据文献[46],连续行车 4 h 须停车休息,因此单次出行在 480 km 以上的数据予以删除(按 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 限速).同时删去出行时间小于 5 min 或者出行里程小于 1 km 的个别点.

(5)日出行里程 出发时间在同一天出行被定义为同一天出行,将同一天出行的多次出行里程累加得到日出行里程.

(6)充电判据 初始数据采集集中不包含充电状态及停车时 SOC 数据,因此根据 SOC 与运行数据进行充电行为的划分.界定相邻两次出行间隔大于等于 30 min 小于 48 h 且 SOC 上升幅度超过 10% 时为 1 次充电行为.关于一天两次充电,也即充电频率为 $2 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$,定义为相邻两次充电行为发生在 24 h 以内;每日一次充电(充电频率为 $1 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$),定义为相邻两次充电行为发生在 24 ~ 48 h 以内,依此类推.

利用数据处理得到的日出行里程数据,可描述其出行分布规律,用来表征出行特征,包括出行里程概率分布和累积概率.同时,根据出行里程对应日期的充电行为,可以获得充电频率与日均出行里程分布的对应关系.

1.2 纯电里程比例

纯电里程比例是指车队或者单车多天的行驶里程中使用电力驱动行驶里程占总里程的比例,用于衡量区域内车辆的零排放里程比例.基于区域内车辆的出行里程分布,可以从理论上计算得到不同纯电续航里程的插电式混合动力汽车在理想充电行为下的数值,美国汽车工程师协会(SAE)将其定义为效用因子(UF),从物理意义上,是指电网对燃油的替代率(utility).

根据 SAE 的定义和提供的算法,将一共 N 天的每日出行里程按照从小到大的顺序排列,得到如图 2 所示的里程分布,在每天出行前电池充满的条件下,对于纯电续航里程为 D 的 PHEV 车辆,日出行里程低于 D 共计 N_D 天(A_1 区域),车辆完全由电驱动;日出行里程高于 D 的 $(N - N_D)$ 天,每日出行里程中里程 D 由电驱动,如区域 A_2 ,其余部分为油

驱动或油电混合驱动,如区域 A_3 .

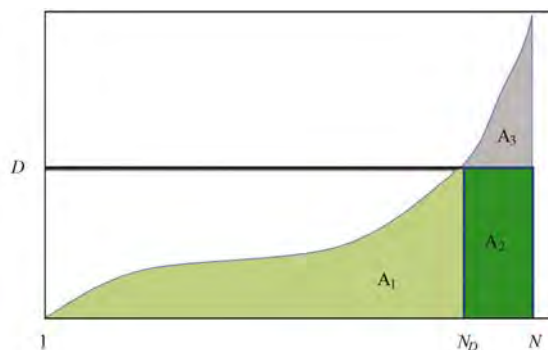


图 2 UF 含义及示意

Fig. 2 UF definitions and schematic diagram

UF 即 A_1 和 A_2 区域之和占总区域 (A_1 、 A_2 、 A_3) 的比例.亦可用函数表示:

$$UF(D) = \left[\sum_{d_k} \min(d_k, D) \right] \cdot \left(\sum_{d_k} d_k \right)^{-1} \quad (1)$$

式中, D 为 PHEV 纯电续航里程,单位为 km; d_k 为第 k 日的日出行里程,单位为 km; $\min(d_k, D)$ 指在日出行里程和纯电续航里程中取较小值^[47]. $\min(d_k, D)$ 对里程积分即为图 2 中 A_1 和 A_2 的面积.

由式(1)可知,影响 UF 的因素有日出行里程与纯电续航里程 D .

在车辆纯电续航里程 D 不变的情况下,车辆的日出行里程越长,对应的 UF 越小.在实际使用过程中, PHEV 车辆的出行里程分布规律由车主出行需求决定,通常比较稳定.

对于固定出行里程分布规律的不同续航里程的 PHEV(也即 D 不同),可以直接使用标称的 AER 计算 UF.特别地,计算不同充电频率的 UF 时,可以使用折合里程作为 D 计算对应的 UF,折合里程定义为标称里程与充电频率的乘积,如充电频率为 $0.5 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$,折合里程为标称里程乘以 0.5.可知, PHEV 出行里程分布规律不变,充电频率越高, D 越长,对应的 UF 越大.在实际使用过程中,充电频率由出行计划决定.充电频率及电量一定意义上由计划行驶里程决定,同时受到充电基础设施推广情况、电价、消费者个人偏好等因素影响.

1.3 车辆能量消耗

采用工况测试能耗对车辆能量消耗进行估算.我国对 PHEV 车辆能耗测试采纳文献[45]中规定的方法,其中关于 PHEV 能耗测试分为条件 A(储能装置通过车辆行驶放电至发动机自行启动)和条件 B(以最低储能状态进行工况循环测试).针对本款 PHEV 车辆,条件 A 的油耗为 0.依据上述计算方法,将 PHEV 在运行时两次充电的间隔里程 D_{av} 认为是固定值 25 km,因此根据测试结果燃料消耗

量可表述为:

$$C = \frac{D_e \times c_1 + D_{av} \times c_2}{D_e + D_{av}} \approx \frac{25 \times c_2}{D_e + 25} \quad (2)$$

式中, C 为官方公布的车辆燃料消耗量, 单位为 $L \cdot (100 \text{ km})^{-1}$; c_2 为条件 B 下试验中所得燃油消耗量, 单位为 $L \cdot (100 \text{ km})^{-1}$, 对应为油驱动里程百公里油耗水平; D_e 为车辆公布的纯电动续航里程, 单位为 km [45]。

这样, 根据车型公示的百公里油耗值 C 和纯电动续航里程 D_e , 可以得到燃油驱动阶段的油耗:

$$FC = \frac{C \times (D_e + 25)}{25} \quad (3)$$

在车辆实际运行阶段, 平均充电里程并非固定值 (25 km)。因此可以参照前述方法得到的纯电比例计算得到比较接近实际的车辆综合油耗水平:

$$FC_{\text{overall}} = FC \times (1 - UF) \quad (4)$$

关于纯电行驶阶段的百公里电耗, 参照车型参数中的电池容量和纯电续航里程, 进行近似估算, 从理论上讲, 该估算值低于实际的测试百公里电耗 (由于电池容量尚未耗尽, 发动机的启动终止了纯电里程的测试)。根据电池容量 Q 和 D_e 测试值估算车辆电耗的公式如式 (5):

$$EC = \frac{Q}{D_e} \times 100 \quad (5)$$

车辆综合电耗水平则为:

$$EC_{\text{overall}} = EC \times UF \quad (6)$$

针对本研究的车型参数 (表 1), 综合百公里电耗为 1.6 L、纯电续航里程为 70 km、电池容量 13 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 估算的燃油运行阶段的百公里油耗 FC 为 6.1 L、纯电行驶阶段的百公里电耗 EC 为 18.6 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

1.4 能源生产与车辆使用环节的二氧化碳排放

基于电里程比例、百公里电耗和油耗, 可以计算包含发电环节与车辆使用环节的 PHEV 的每 km 二氧化碳排放水平。PHEV 的碳排放包括电里程碳排放和油里程碳排放, 分别对应了电力生产阶段和车用燃料燃烧阶段。针对每 km 的碳排放:

$$CO_{2E} = EC_{\text{overall}} \times CO_{2e} \quad (7)$$

$$CO_{2F} = FC_{\text{overall}} \times CO_{2f} \quad (8)$$

式中, CO_{2e} 为每度电的二氧化碳排放强度, 单位为 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; CO_{2f} 为每升汽油的二氧化碳排放强度, 单位为 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

包括煤炭热力发电、天然气热力发电在内的火力发电是我国的主要发电形式, 从结构看, 中国火电在总装机容量与发电量中占比高, 在满足能源电力需求上发挥了重要作用, 燃煤发电长期占据总装

机容量和总发电量的 70% 左右, 2016 年我国发电量 6 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 其中火电量超过 4 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ [48]。火电占总发电量的比例随着其他发电方式的增加而呈现逐年下降趋势, 从 2007 年 83%, 下降到 2016 年的 66% [49], 十年间降低了 17 个百分点。

据统计, 2016 年全国火电发电二氧化碳排放强度为 822 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ [49], 当考虑其他非化石燃料发电量对电网综合碳排放强度的影响, 我国当年电网上网端的综合碳排放强度为 610 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。将高压输送与变电站的损失 6.5% 计算在内, 我国电力用户端的用电二氧化碳排放强度为 650 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。由于电动汽车采用快速充电会导致较大的电力损失, 当快充损失按 10% 考虑时, 电动汽车用电的隐形二氧化碳排放强度可以按 720 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 来进行估算。

对于传统的车用燃料, 使用碳平衡法计算获得的车用汽油完全燃烧的二氧化碳排放强度是 2 300 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 出行与充电特征

本研究的对象在 8 个月的运行时间中, 共出行 8 096 次、充电 1 901 次。平均单日出行 1.9 次, 平均单日出行里程为 33.2 km, 平均充电间隔时间为 2.2 d。图 3 给出了每日出行里程的概率分布。从全部样本量可知平均意义上, 上海地区 PHEV 日出行里程概率随出行里程的增加呈现先增后减的变化规律, 其转折点在 20 km 左右, 这表明出行范围集中于较短里程区间, 从累积概率分布上看, 70% 的出行不超过 50 km, 日出行里程少于 70 km 的比例在 85% ~ 90%。

图 3 还给出了不同充电行为下的日出行里程分布。本研究对象的充电行为表现出了较大的差异性, 充电频率高于 2 次 $\cdot \text{d}^{-1}$ 的比例为 28%, 充电频率为 1 次 $\cdot \text{d}^{-1}$ 的比例为 30%, 0.5 次 $\cdot \text{d}^{-1}$ 的比例为 14%, 充电间隔超过 3 d 的比例为 28%。由图 3 及表 2 所示, 充电频率为 0.5 次 $\cdot \text{d}^{-1}$ 时, 日均出行里程为 37.6 km, 超过 100 km 的里程比例为不足 8%; 充电频率为 1 次 $\cdot \text{d}^{-1}$ 时, 日均出行里程为 40.6 km, 超过 100 km 的里程比例为 8%; 而充电频率为 2 次 $\cdot \text{d}^{-1}$ 及以上时日均出行里程进一步增加到 50.0 km, 超过 100 km 的里程比例达到了 9%。从数据统计结果来看, 日均出行里程越长, 其对应的长里程出行比例较高。这一现象表明, 消费者对纯电行驶有一定的偏好性, 当有较长出行计划时, 会通过有计划地增加充电次数, 满足更高比例纯电

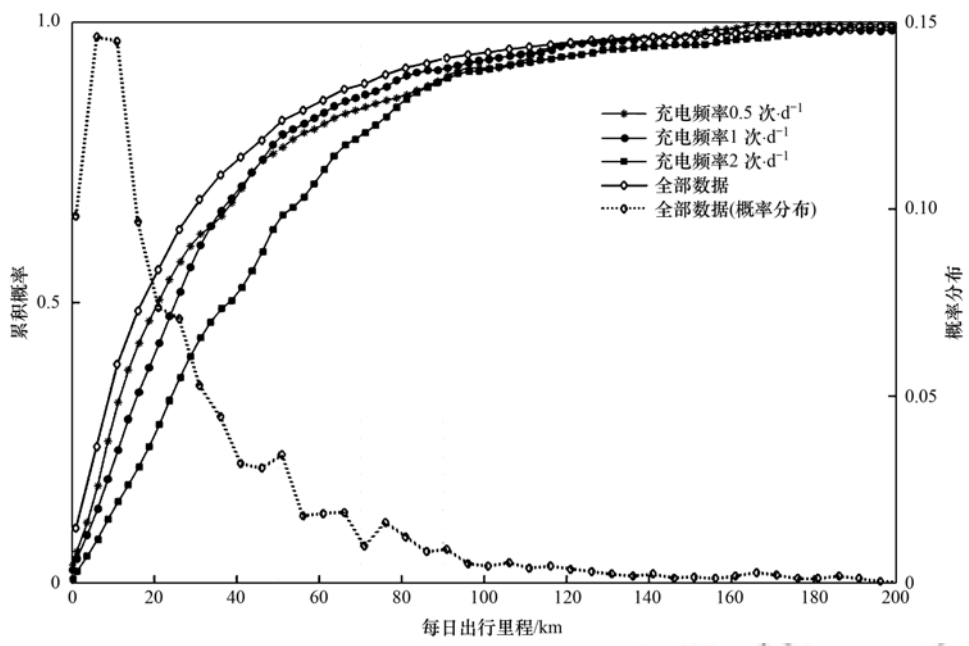


图3 日出行里程分布及充电行为的影响

Fig. 3 Distribution of daily vehicle kilometers travelled and impact of charging behavior

表2 日均出行里程累积分布

Table 2 Cumulative distribution of daily vehicle kilometers travelled				
单日出行里程 /km	充电频率/次·d ⁻¹			全部数据
	0.5	1	2	
20	0.41	0.32	0.19	0.49
50	0.75	0.74	0.57	0.79
70	0.83	0.86	0.77	0.88
90	0.88	0.91	0.88	0.93
100	0.92	0.92	0.91	0.94
120	0.95	0.95	0.93	0.96
150	0.97	0.97	0.96	0.97
200	1.00	0.99	0.99	0.99

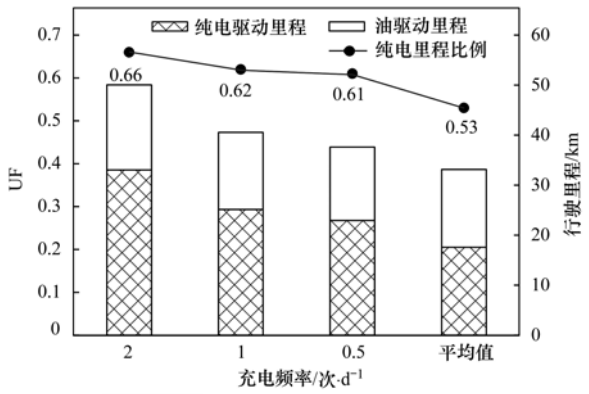


图4 上海市 PHEV70 充电行为对纯电里程比例的影响

Fig. 4 Effect of PHEV70 charging behavior on the electric distance ratio in Shanghai

驾驶的需求.

2.2 纯电里程比例

基于研究对象在上海地区的出行里程分布, 可以获得该款车型的 UF. 如图 4 所示, 上海地区该款 PHEV70 基于全部样本的 UF 为 53%. 同时也可以看出, 随着充电间隔时间的减小, 尽管日均出行里程增加, 但 UF 增加. 充电频率为 0.5 次·d⁻¹ 的情况下, UF 为 61%; 充电频率为 1 次·d⁻¹ 的情况下, UF 为 62%; 充电频率为 2 次·d⁻¹ 及以上时, UF 为 66%.

结合单日平均出行里程, 可以进一步估算电驱动里程与燃油驱动里程. 如图 4 所示, 随着充电频率增加, 每日平均电驱动里程分别是: 22.9、25.1 和 33.0 km; 而燃油里程相对稳定, 保持在 15~17 km 之间.

为了预判不同纯电续驶里程的 PHEV 在上海推广应用的效果, 以相同的出行特征为假设前提, 基于图 3 的日出行里程分布, 可以获得不同纯电续驶

里程 PHEV 车辆的 UF, 如图 5 所示. 从中可知, 随着续驶里程 D 的增加, 纯电里程比例呈现不断上升的趋势, 但上升幅度逐步减小. 以充电频率为每天一次为例, 纯电续驶里程为 50 km 的 PHEV 车辆, 其 UF 为 54%, 比本研究对象 (PHEV70) 的 UF (62%) 低 8%; 当纯电续驶里程增加到 90 km 时, 纯电里程比例增加到 68%, 纯电续驶里程增加了 20 km, 仅提高了 6% 的 UF, 低于上述同样 20 km 变化 (50~70 km) 导致的纯电里程比例的增幅.

2.3 能量消耗

随着充电频率增加, PHEV 的纯电里程比例增加, 百公里油耗降低、电耗增加. 如表 3 所示, 充电频率为 1 次·d⁻¹ 时, 百公里油耗为 2.3 L, 百公里电耗为 11.5 kW·h. 随着充电频率降低, UF 下降, 百公里油耗从 2.1 L 增加至 2.9 L, 百公里电耗从 12.3 kW·h 降低至 9.8 kW·h. 而增加充电频率则会

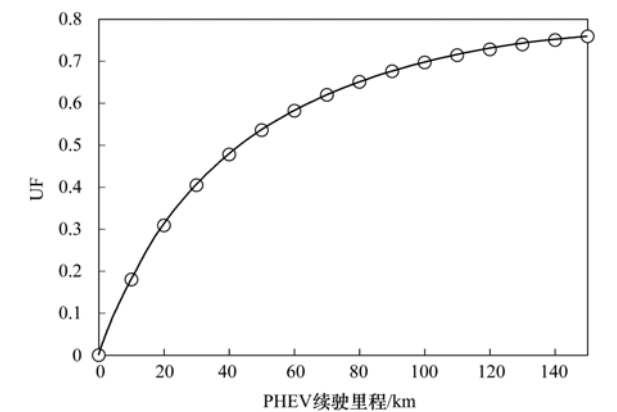


图5 PHEV 纯电里程比例曲线

Fig. 5 Utility factor curve of PHEV

因为 UF 的上升而导致平均油耗的降低和平均电耗的增加,如充电频率为 2 次·d⁻¹及以上,平均百公里油耗为 2.1 L,平均百公里电耗则上升到 12.3 kW·h.

表3 充电行为对油耗与电耗的影响

Table 3 Effect of charging behavior on energy consumption

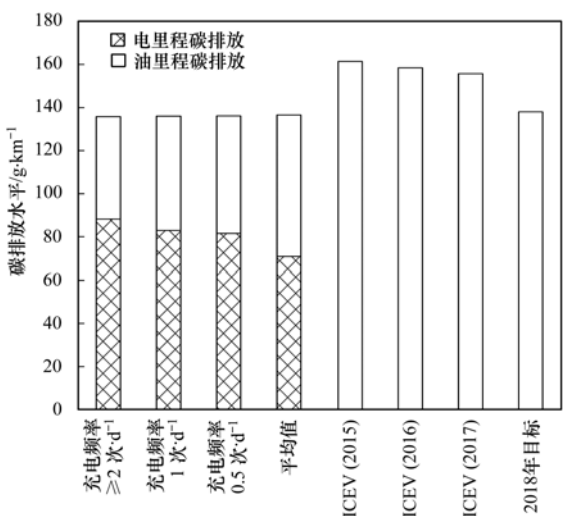
充电频率	百公里油耗/L	百公里电耗/kW·h
每天多次充电(≥2次·d ⁻¹)	2.1	12.3
每天充一次电(1次·d ⁻¹)	2.3	11.5
每两天充一次电(0.5次·d ⁻¹)	2.4	11.3
平均值	2.9	9.8

2.4 PHEV 碳排放水平

根据 PHEV 能耗可以得到 PHEV 的每 km 二氧化碳排放量. 如图 6 所示(其中平均值对应的碳排放水平),对于本研究的 PHEV70 车辆,平均二氧化碳排放为 136.6 g·km⁻¹,其中,来自于发电的排放为 70.9 g·km⁻¹,汽油燃烧的碳排放为 65.7 g·km⁻¹. 作为比较,图 6 中还给出了 ICEV 近几年的碳排放量. 与 2015~2017 年全国乘用车平均百公里油耗(7.0、6.9 和 6.8 L^[5])相对应的碳排放水平分别是 161.5、158.5 和 155.7 g·km⁻¹. 与此相比, PHEV70 的碳排放分别降低了 24.9、21.9 和 19.1 g·km⁻¹,降低幅度达到 19%~14%;进一步分析表明, PHEV70 的碳排放量也低于 2018 年国家油耗目标(百公里油耗为 6.0 L^[50])相对应的碳排放水平,分别是 136.8 g·km⁻¹和 138.0 g·km⁻¹.

2.4.1 充电频率的影响

图 6 还给出了充电频率对 PHEV 碳排放的影响. 从中可见,随着充电频率增加, PHEV 碳排放小幅度下降,排放量在 135.8~136.6 g·km⁻¹之间,变化幅度小于 0.6%. 尽管充电频率增加, UF 增加,但综合考虑我国电网 2016 年碳排放强度、 PHEV 油耗和电耗水平相互作用,增加充电频率,碳排放减排幅度较小.



ICEV 碳排放基于 2015~2017 年全国乘用车平均百公里油耗(7.0、6.9 和 6.8 L)计算; 2018 年目标碳排放基于 2018 年国家百公里油耗目标(6.0 L)计算.

图6 PHEV 与 ICEV 碳排放的比较

Fig. 6 Carbon emissions of PHEV and ICEV

2.4.2 续驶里程的影响

如图 7 所示,在每天充一次电的情况下,续驶里程为 50、70 和 100 km 的 PHEV 车辆的碳排放分别为 136.6、136.0 和 135.6 g·km⁻¹,变化幅度在 0.3%~0.7%. 由此可见,在目前的电网碳排放强度下,纯电续驶里程对 PHEV 碳排放的影响十分有限并呈现边际收益递减的趋势,续驶里程超过 90 km 时,每增加 10 km 续驶里程,碳排放降低幅度不足 0.1 g·km⁻¹. 因此,仅从二氧化碳减排的角度,在目前的水平下,不宜采用更高的纯电续驶里程.

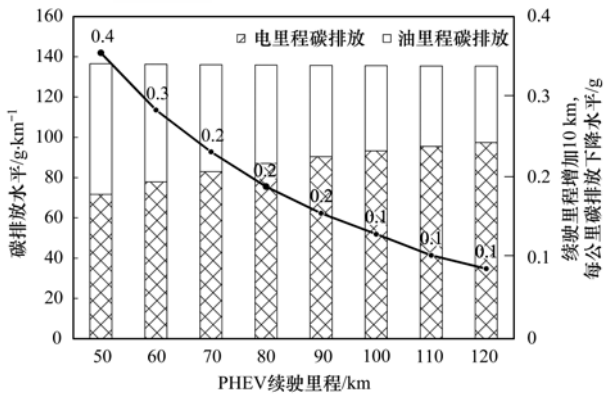


图7 不同续驶里程 PHEV 碳排放水平

Fig. 7 Carbon emissions of PHEV with different ranges

3 讨论

3.1 区域电网结构对 PHEV 碳排放的影响

在其他因素(火电二氧化碳排放强度、输电损失、快充损失)不变的条件下,2017 年我国电网碳排放强度估计为 704 g·(kW·h)⁻¹,而由于区域电网中高比例的可再生能源,青海省和四川省的电网碳排放强度估计可降至 336 g·(kW·h)⁻¹和 158

$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$.

由于 PHEV 车辆目前四川与青海地区的销量有限,无法直接获得相关区域的稳定出行特征,缺乏里程分布规律,仅使用平均出行里程无法直接用于计算纯电里程比例.本研究仍采用上海的里程分布规律作为替代方案开展比较性研究,待相关地区形成并获取稳定的 PHEV 出行特征后,可开展基于当地实际出行特征的碳排放研究.在此情景下,青海地区 PHEV 的碳排放强度为 $98.8 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,四川地区 PHEV 的碳排放强度为 $81.3 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,相比 2016 年上海市 PHEV 碳排放降低了 28% 和 41%.

充电频率和续驶里程对碳排放的影响在电网较

低的碳排放条件下也会显现出来.如图 8 所示,在青海和四川省,随着充电频率从 $0.5 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$ 提高到 $1 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$,UF 上升,PHEV70 的碳排放强度分别从 $92.6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $72.4 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 降低到 $88.7 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $66.9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,降幅为 4.4% ~ 8.3%.另一方面,在同样充电频次下($1 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$),随着 PHEV 续驶里程从 50 km 增加到 90 km,UF 同样上升,碳排放强度分别从 $98.0 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $80.2 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 降低到 $87.2 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $64.7 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,降幅为 12.4% ~ 23.9%.无论充电频率还是续驶里程,在低碳强度的电网条件下,均对 PHEV 的碳排放具有显著影响.

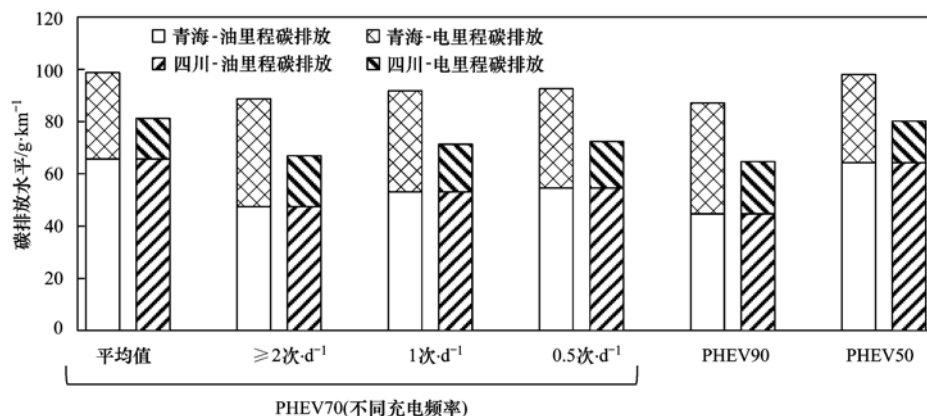


图 8 区域电网结构对 PHEV 碳排放的影响

Fig. 8 Influence of the regional grid structure on the carbon emissions of PHEV

3.2 车辆技术水平的影响

PHEV 技术进步的主要指标是能耗水平,包括燃油阶段的油耗和电驱动阶段的电耗,根据文献[5],2020 年我国 PHEV 在燃油阶段的百公里油耗水平应达到 5.0 L,纯电驱动时百公里电耗为 13 $\text{kW} \cdot \text{h}$.以此为评价依据研究技术水平对 PHEV 的碳排放的影响.

如图 9 所示,在此技术水平下,PHEV70 的碳排放水平可从目前的 $136.6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 降至 $103.7 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,降低了 $32.9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,降幅为 32%;其中电里程二氧化碳减排 $21.3 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,油里程减排 $26.6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$.燃油经济性和电耗水平的改善对于碳排放降低的效果相近.

同时,从图 9 可以看出,在此车辆技术水平和电网排放水平下,充电频率和纯电续驶里程的增加,也即纯电里程比例的增加,对 PHEV 碳排放强度的影响仍然不明显.随着充电频率从 $0.5 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$ 提高到 $2 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$,PHEV70 的碳排放强度从 $101.9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 降低到 $100.9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,降幅为 1%.另一方面,在同样充电频次下($1 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$),随着 PHEV 续驶里程从 50 km 增加到 90 km,碳排放强度从

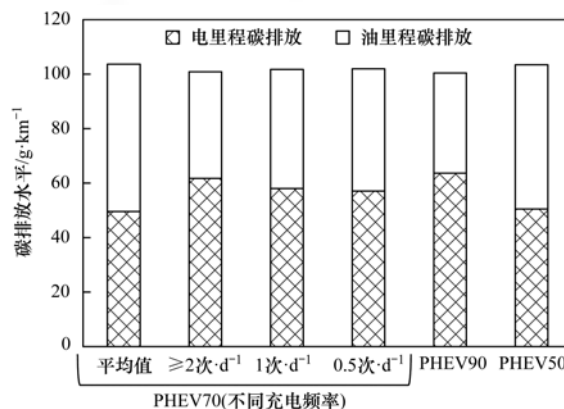


图 9 车辆技术进步对 PHEV 碳排放的影响

Fig. 9 Effect of vehicle technology progress on the carbon emissions of PHEV

$103.4 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 降低到 $100.4 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,降幅为 3%.

4 结论

(1) 在 2016 年全国平均电网结构下,充电频率和纯电续驶里程的影响较小,续驶里程超过 50 km 的 PHEV 比传统燃油车少排放 15% 以上的二氧化碳.

(2) 在高比例可再生能源电网结构的青海和四

川等地区, PHEV 乘用车二氧化碳排放可降至 $100.0 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 以下, 比汽油车降低 28% 以上。

(3) 与 2016 年相比, 2020 年 PHEV 燃油经济性和电耗水平的改善可降低 32% 的碳排放, 燃油经济性和电耗水平的改善起到了同等的效果。

(4) 我国一线城市 PHEV 乘用车出行主要集中在 50 km 以内的范围, 在近期的电网结构下, 纯电续航里程的增加对二氧化碳减少效果不明显, 90 km 是边际效益的临界点。

致谢: 感谢上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心对本研究提供的支持!

参考文献:

- [1] 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 等. 中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4378-4386.
Jiang J J, Ye B, Ji J P, *et al.* Research on contribution decomposition by industry to China's carbon intensity reduction and carbon emission growth[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4378-4386.
- [2] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2498-2504.
Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, *et al.* Socio-economic factors influencing the spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in China: an exploratory analysis[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2498-2504.
- [3] 施晓清, 李笑诺, 杨建新. 低碳交通电动汽车碳减排潜力及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 385-394.
Shi X Q, Li X N, Yang J X. Research on carbon reduction potential of electric vehicles for low-carbon transportation and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 385-394.
- [4] 卢亚灵, 周佳, 程曦, 等. 京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2566-2575.
Lu Y L, Zhou J, Cheng X, *et al.* Emission reduction benefits when eliminating yellow-label vehicles in the Jing-Jin-Ji region[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2566-2575.
- [5] 能源与交通创新中心(iCET). 中国乘用车燃料消耗量发展年度报告 2017[R]. 北京: 能源与交通创新中心, 2017. 1-47.
- [6] 黄成, 胡馨遥, 鲁君. 轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3110-3117.
Huang C, Hu Q Y, Lu J. Measurements of OC and EC emission factors for light-duty gasoline vehicles[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3110-3117.
- [7] National Environment Agency. New vehicular emissions scheme to replace carbon-based emissions vehicle scheme from 1 January 2018 [EB/OL]. <http://www.nea.gov.sg/corporate-functions/newsroom/news-releases/new-vehicular-emissions-scheme>, 2018-05-29.
- [8] Europe's Energy Portal. Carbon Dioxide Emissions of Cars in Europe 2009 [EB/OL]. <https://www.energy.eu/car-co2-emissions>, 2018-05-29.
- [9] Peng T D, Ou X M, Yan X Y. Development and application of an electric vehicles life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions analysis model[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, **131**: 699-708.
- [10] Peng T D, Zhou S, Yuan Z Y, *et al.* Life cycle greenhouse gas analysis of multiple vehicle fuel pathways in China[J]. Sustainability, 2017, **9**(12): 2183.
- [11] 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.
- [12] 赵云泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 1999~2007 年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3145-3152.
Zhao Y T, Huang X J, Zhong T Y, *et al.* Spatial pattern evolution of carbon emission intensity from energy consumption in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3145-3152.
- [13] 国家能源局. 国家能源局关于 2017 年度全国可再生能源电力发展监测评价的通报 国能发新能[2018]43 号[EB/OL]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201805/t20180522_3179.htm, 2018-05-29.
- [14] 秦雨, 张强, 李鑫, 等. 中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5289-5295.
Qin Y, Zhang Q, Li X, *et al.* Patterns of mortality from air pollutant emissions in china's coal-fired power plants[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5289-5295.
- [15] 林晓丹, 田良, 吕彬, 等. 基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3515-3521.
Lin X D, Tian L, Lü B, *et al.* Energy conservation and emissions reduction benefits analysis for battery electric buses based on travel services[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3515-3521.
- [16] Global EV outlook 2017: two million and counting[R]. International Energy Agency, 2017. 1-71.
- [17] Wang H W, Hao X. Data base of electric vehicle production in China[R]. Beijing: State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, 2018. 1-5.
- [18] 荣威汽车(上海)官方网站. 上汽新能源技术获 2017 年度国家科学技术进步奖[EB/OL]. <http://www.roewe.com.cn/html/news/20180110/2411.html>, 2018-01-10.
- [19] 比亚迪汽车. 厉害了宋 DM! 荣获 CCPC 插电混 SUV 组综合性能金奖[EB/OL]. <http://www.bydauto.com.cn/news-id-2832.html>, 2018-01-15.
- [20] 长安汽车. 发力新能源 长安汽车推出“香格里拉计划”全新战略[EB/OL]. 长安汽车, https://www.sohu.com/a/199143391_134123, 2017-10-19.
- [21] 林婷, 吴烨, 何晓旖, 等. 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO_2 排放[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3946-3953.
Lin T, Wu Y, He X Y, *et al.* Well-to-Wheels fossil energy consumption and CO_2 emissions of hydrogen fuel cell vehicles in China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- [22] 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.
Shi X Q, Sun Z X, Li X N, *et al.* Comparative life cycle environmental assessment between electric taxi and gasoline taxi in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1105-1116.
- [23] Wang H W, Zhang X B, Ouyang M G. Energy and environmental life-cycle assessment of passenger car electrification based on Beijing driving patterns[J]. Science China Technological Sciences, 2015, **58**(4): 659-668.
- [24] Stephan C H, Sullivan J. Environmental and energy implications of plug-in hybrid-electric vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(4): 1185-1190.

- [25] Raykin L, MacClean H L, Roorda M J. Implications of driving patterns on well-to-wheel performance of plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (11): 6363-6370.
- [26] Ma H R, Balthasar F, Tait N, *et al.* A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles[J]. *Energy Policy*, 2012, **44**: 160-173.
- [27] Wolfram P, Lutsey N. Electric vehicles; literature review of technology costs and carbon emissions[EB/OL]. <http://www.theicct.org/lit-review-ev-tech-costs-co2-emissions-2016>, 2016-07-18.
- [28] Samaras C, Meisterling K. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (9): 3170-3176.
- [29] Onat N C, Kucukvar M, Tatari O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States[J]. *Applied Energy*, 2015, **150**: 36-49.
- [30] Wu X, Avquzzaman M, Lin Z H. Analysis of plug-in hybrid electric vehicles' utility factors using GPS-based longitudinal travel data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, **57**: 1-12.
- [31] Requia W J, Adams M D, Arain A, *et al.* Carbon dioxide emissions of plug-in hybrid electric vehicles: a life-cycle analysis in eight Canadian cities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **78**: 1390-1396.
- [32] Kelly J C, MacDonald J S, Keoleian G A. Time-dependent plug-in hybrid electric vehicle charging based on national driving patterns and demographics[J]. *Applied Energy*, 2012, **94**: 395-405.
- [33] MacPherson N D, Keoleian G A, Kelly J C. Fuel economy and greenhouse gas emissions labeling for plug-in hybrid vehicles from a life cycle perspective[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, **16** (5): 761-773.
- [34] Faria R, Marques P, Moura P, *et al.* Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **24**: 271-287.
- [35] Wang H W, Zhang X B, Ouyang M G. Energy consumption of electric vehicles based on real-world driving patterns: a case study of Beijing[J]. *Applied Energy*, 2015, **157**: 710-719.
- [36] Zhang X B, Wang H W. Utility factors derived from Beijing passenger car travel survey[R]. Netherlands: The FISITA 2014 World Automotive Congress, 2014. 1-10.
- [37] Davies J, Kurani K S. Moving from assumption to observation: implications for energy and emissions impacts of plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Energy Policy*, 2013, **62**: 550-560.
- [38] Tarroja B, Shaffer B, Samuelsen S. The importance of grid integration for achievable greenhouse gas emissions reductions from alternative vehicle technologies[J]. *Energy*, 2015, **87**: 504-519.
- [39] Hu X S, Zou Y, Yang Y L. Greener plug-in hybrid electric vehicles incorporating renewable energy and rapid system optimization[J]. *Energy*, 2016, **111**: 971-980.
- [40] Shiau C S N, Samaras C, Haufler R, *et al.* Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles[J]. *Energy Policy*, 2009, **37** (7): 2653-2663.
- [41] 上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心. 上海市新能源汽车产业大数据研究报告(2017)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017. 135-268.
- [42] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于征求推荐性国家标准《电动汽车远程服务与管理系统技术规范》(征求意见稿)意见的通知[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1653100/n3767755/c4810837/content.html>, 2018-04-25.
- [43] Zou Y, Wei S Y, Sun F C, *et al.* Large-scale deployment of electric taxis in Beijing: a real-world analysis[J]. *Energy*, 2016, **100**: 25-39.
- [44] Hao X, Wang H W, Ouyang M G. Electric distance ratio of PHEV in China mega city—Based on mass driving and charging data[R]. Busan, Korea: FISITA, 2016.
- [45] GB/T 19753-2013, 轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S].
- [46] 胡锦涛. 中华人民共和国道路交通安全法[R]. 中华人民共和国主席令第47号, 全国人民代表大会常务委员会, 2011.
- [47] SAE J2841, Utility factor definitions for plug-in hybrid electric vehicles using travel survey data[S].
- [48] 杨倩鹏, 林伟杰, 王月明, 等. 火力发电产业发展与前沿技术路线[J]. *中国电机工程学报*, 2017, **37** (13): 3787-3794.
- [49] Yang Q P, Lin W J, Wang Y M, *et al.* Industry development and frontier technology roadmap of thermal power generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, **37** (13): 3787-3794.
- [50] 中国电力企业联合会. 中国煤电清洁发展报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017. 51.
- China Electricity Council. Clean development of coal-fired power in China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017. 51.
- 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会, 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016. 63-86.
- Energy and New Energy Vehicle Technology Roadmap Strategy Advisory Committee, China Automobile Engineering Society. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016. 63-86.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)