

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
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	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

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

施晓清¹, 孙赵鑫¹, 李笑诺¹, 李金香², 杨建新¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048)

摘要: 燃油机动车尾气排放是导致城市包括雾霾在内的大气环境问题的主要来源之一。以电动汽车替代传统燃油车是当前各国解决城市大气污染问题的重要举措。北京于 2011 年启动了电动出租车推广计划。为比较北京市迷迪电动汽车和现代燃油车生命周期的环境影响, 运用生命周期评价方法, 基于 GaBi4.4 软件, 选用 CML2001 和 EI99 影响评价模型对两款车的生产、使用和报废回收全生命周期过程的环境影响进行了定量评价, 并针对汽车报废里程和电力能源结构进行了敏感性分析。结果表明, 从全生命周期视角, 根据 EI99 评价模型, 迷迪电动汽车环境影响总体上优于现代燃油车, 尤其在削减化石能源消耗方面优势凸显, 但在生态系统质量影响及人体健康影响方面却略有增大的趋势; 利用 CML2001 模型对比分析得出迷迪电动汽车比燃油出租车在对非生物资源消耗、全球变暖以及臭氧层损耗等方面有明显改善; 但在生产阶段尤其是动力系统生产方面在非生物资源消耗、酸化、富营养化、全球变暖、光化学臭氧合成、臭氧层损耗、生态毒性等生态环境影响却均有增大趋势。使用阶段电力生产是迷迪电动汽车非生物资源消耗、酸化、富营养化、全球变暖、光化学臭氧合成、生态毒性等环境影响的主要来源; 而现代燃油出租车使用阶段的环境影响主要来源于尾气排放和汽油生产, 其中尾气排放是造成现代燃油车在富营养化和全球变暖等方面影响潜值较大的主要原因; 基于清单数据库, 针对致霾因子影响分析得出, 在 2010 年北京市电力能源驱动下, 迷迪电动车明显增加了超细颗粒物 ($PM_{2.5}$)、氮氧化物 (NO_x)、硫氧化物 (SO_x)、挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 等因子的全生命周期的排放, 而同时降低了氨气 (NH_3) 的排放量, 使用阶段排放的差别是造成上述趋势的主要原因。对关键因素敏感性分析发现, 随着报废里程以及清洁能源比例的增加, 迷迪电动汽车相对现代燃油车的单位里程碳减排量呈现增加的趋势。清洁电力能源的使用可大幅降低迷迪电动汽车致霾污染物的排放量。根据分析结果, 为北京市电动车的推广提出了对策建议。

关键词: 低碳交通; 生命周期评价; 环境影响; 电动汽车; 低碳转型

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1105-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.046

Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing

SHI Xiao-qing¹, SUN Zhao-xin¹, LI Xiao-nuo¹, LI Jin-xiang², YANG Jian-xin¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: Tailpipe emission of internal combustion engine vehicle (ICEV) is one of the main sources leading to atmospheric environmental problems such as haze. Substituting electric vehicles for conventional gasoline vehicles is an important solution for reducing urban air pollution. In 2011, as a pilot city of electric vehicle, Beijing launched a promotion plan of electric vehicle. In order to compare the environmental impacts between Midi electric vehicle (Midi EV) and Hyundai gasoline taxi (ICEV), this study created an inventory with local data and well-reasoned assumptions, and contributed a life cycle assessment (LCA) model with GaBi4.4 software and comparative life cycle environmental assessment by Life cycle impact analysis models of CML2001 (Problem oriented) and EI99 (Damage oriented), which included the environmental impacts of full life cycle, manufacture phase, use phase and end of life. The sensitivity analysis of lifetime mileage and power structure was also provided. The results indicated that the full life cycle environmental impact of Midi EV was smaller than Hyundai ICEV, which was mainly due to the lower fossil fuel consumption. On the contrary, Midi EV exhibited the potential of increasing the environmental impacts of ecosystem quality influence and Human health influence. By CML2001 model, the results indicated that Midi EV might decrease the impact of Abiotic Depletion Potential, Global Warming Potential, Ozone Layer Depletion Potential and so on. However, in the production phase, the impact of Abiotic Depletion Potential, Acidification Potential, Eutrophication Potential, Global Warming Potential, Photochemical Ozone Creation Potential, Ozone Layer Depletion Potential, Marine Aquatic Ecotoxicity Potential, Terrestrial Ecotoxicity Potential, Human Toxicity Potential of Midi EV

收稿日期: 2014-08-15; 修订日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71173208, 71373259)

作者简介: 施晓清 (1966), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为城市及产业生态学、城市生态管理, E-mail: shixq@rcees.ac.cn

were increased relative to Hyundai ICEV because of emissions impacts from its power system especially the battery production. Besides, in the use phase, electricity production was the main process leading to the impact of Abiotic Depletion Potential, Acidification Potential, Eutrophication Potential, Global Warming Potential, Photochemical Ozone Creation Potential, Marine Aquatic Ecotoxicity Potential, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, Human Toxicity Potential. While for Hyundai ICEV, gasoline production and tailpipe emission were the primary sources of environmental impact in the use phase. Tailpipe emission was a significant cause for increase in Eutrophication Potential and Global Warming Potential, and so forth. On the basis of inventory data analysis and 2010 Beijing electricity mix, the comparative results of haze-induced pollutants emissions showed that the full life cycle emissions of $\text{PM}_{2.5}$, NO_x , SO_x , VOCs of Midi EV were higher than those of Hyundai ICEV, but the emission of NH_3 was lower than that of Hyundai ICEV. Different emissions in use phase were the chief reason leading to this trend. In addition, by sensitivity analysis the results indicated that with the increase of lifetime mileage and proportion of cleaning energy, the rate of GHG (Green House Gas) emission reduction per kilometer of Midi EV became higher with respect to Hyundai ICEV. Haze-induced pollutants emission from EV could be significantly reduced using cleaner power energy. According to the assessment results, some management strategies aiming at electric car promotion were proposed.

Key words: low carbon transportation; life cycle assessment; environmental impact; electric vehicle; low carbon transformation

燃油机动车尾气排放是各国城市交通污染的主要成因之一。全球 59% 的 CO 排放以及 43% 的 NO_x 排放来自交通运输业,一些发达国家汽车排放的污染物占其大气污染物的 30% ~ 60%^[1]。因此,以电动汽车为代表的新能源汽车正成为美国、日本及欧盟等发达国家解决城市交通污染及低碳转型的重要举措之一。2013 年北京机动车保有量已达 520 万辆。据统计机动车碳排放占全市碳排放的 25%,灰霾来自机动车的影响比例大约为 31.1%^[2]。为应对汽车行驶导致的碳排放及大气环境问题,我国于 2009 年开启“十城千辆”示范工程,北京市作为首批试点城市之一,积极推动电动车在环卫、公交、出租等领域示范应用,2011 年启动纯电动出租车推广计划。据统计,截止 2013 年北京市已经上路运营的电动出租车有 950 辆,分别在延庆、房山、大兴等 8 个远郊区县上路运营。预计到 2017 年总数将达到 5 000 辆^[3]。

仅从使用阶段车辆行驶比较,电动汽车较传统燃油车具有以下可能的优点:化石能源消耗量低、能源利用效率高,行驶过程接近零排放等。然而从全生命周期角度比较,有研究表明电动汽车将某些环境影响从使用阶段转移到了生产以及电力供应阶段^[4, 5]。为全面比较电动汽车相对传统燃油车环境影响,自 20 世纪 90 年代以来,国内外学者开展了积极而广泛的研究。研究内容主要涉及燃料生命周期、动力系统生命周期、相关部件生命周期、整车全生命周期等。在燃料生命周期研究方面,国内外的研究主要是运用 GREET 模型、CA3EM 模型等分析模型对不同电力供给及汽车燃料进行全生命周期节能减排情况进行对比分析^[6~11];而国内外在动力系统生命周期方面的研究还较缺乏,大多结合车辆全生命周期研究而开展,一些学者利用 Recipe 及

CML2001 影响评价方法对电动汽车和燃油汽车动力系统全生命周期的环境影响进行了综合比较^[12~16];在汽车其他相关部件生命周期评价方面,国内外的研究涉及了汽车轮胎、刹车、电动汽车蓄电池等部件,主要分析了这些部件全生命周期内在富营养化、全球变暖、人体毒性、光化学烟雾等的环境影响状况^[17, 18]。上述三方面的研究关注的焦点都为汽车某类关键部件或能源,并未全面地反映新能源汽车整车的情况,而全面详细了解电动汽车的环境影响是科学决策的基础。国内外已开始进行相关研究,如艾江鸿等^[4]、Humphreys 等^[19]学者对电动汽车全生命周期节能减排情况进行了分析;张磊^[5]运用 GaBi4.4 软件和 EI99 影响评价方法对电动汽车整车的全生命周期综合环境影响进行了模拟和评价;Hawkins 等^[12]、Bartolozzi 等^[20]、王成^[21]采用 LCA 方法以 Ecoinvent 数据库为基础对电动汽车与其他类型汽车全生命周期环境影响进行了比较分析。

综上所述,当前关于电动汽车生命周期评价研究取得了积极的进展,特别是通过燃料生命周期评价研究使用阶段碳排放消减的贡献及其某些环境影响方面取得了共识。但从全生命周期三阶段开展评价还显不足,特别是在清单数据,评价模型及各生命周期影响分析等方面仍亟待完善:①由于电动汽车清单数据受到时间及地点等因素的影响,决定了电动汽车全生命周期清单数据库具有时空分异特征,而目前大多研究是以背景数据为主要数据来源,欠考虑生命周期评价数据的时空分异性,评价结果的不确定性较大;②当前评价结果解释主要针对各生命周期阶段的影响,缺乏导致各影响的具体过程的深入分析,不利于有针对性的管理措施的制定;③缺乏基于本地化清单数据支持的电动汽车全生命周

期评价的深入研究.

本研究将挖掘整理本地化的电动汽车生命周期清单数据,构建面向低碳交通转型的电动汽车全生命周期环境影响评价方法,在考虑背景数据(如电能结构)时空差异的基础上,从生态环境问题及影响损害两方面,对电动出租车和燃油出租车全生命周期的资源利用及其环境影响进行深入系统的比较研究,辨识其在全生命周期、生命周期各阶段和关键过程中的差异,探究其变化规律及根源,以期为北京市低碳交通政策的制定提供方法支持及科学依据.

1 范围与数据

1.1 系统边界

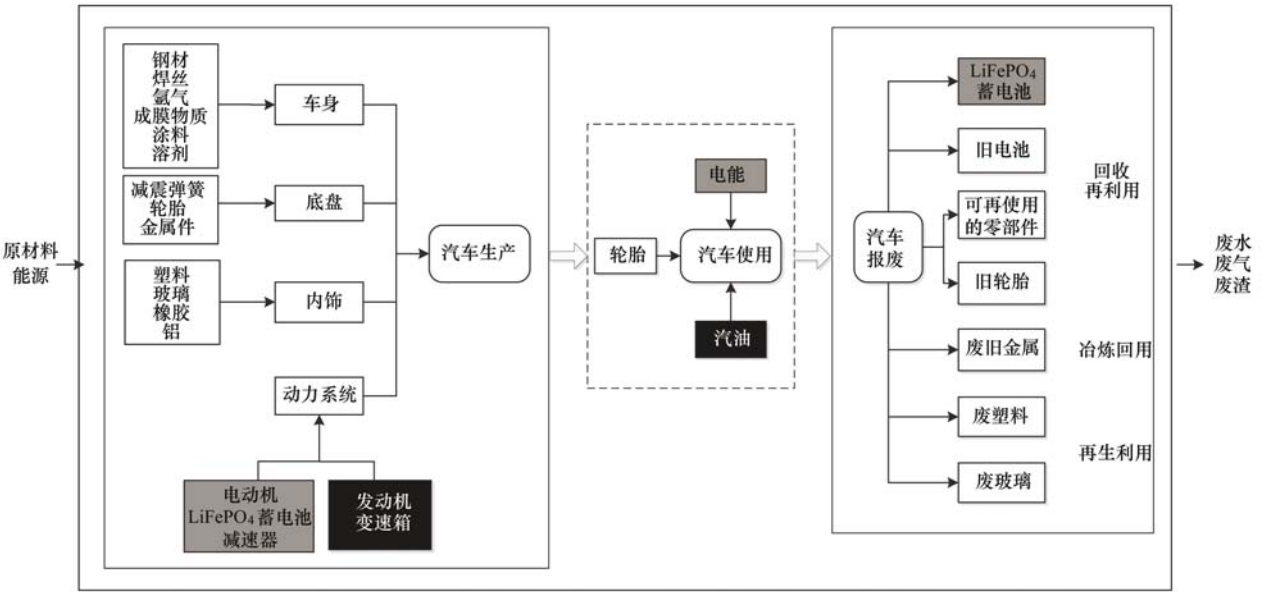
本研究以北京迷迪电动出租车及现代燃油出租车为研究对象,两款车的主要特征参数如表 1 所示.功能单位是确定研究范围时需要考虑的重要因素之一,用以度量系统功能时所采用的一个标准,在对系统输入输出方面给出量化的基准,本研究的功能单

表 1 迷迪电动汽车和现代燃油车参数

Table 1 Parameters of electric vehicle-Midi and gasoline vehicle-Hyundai		
项目	迷迪电动汽车	现代燃油车
整车质量	1 550 kg	1 250 kg
电动机(发动机)特征	永磁同步电机	1.6 L 排量
蓄电池类型	磷酸铁锂蓄电池	—
电池充电效率	90% ^[22]	—
输电(输油)效率	94% ^[22]	95%
实际电耗(油耗)	25.4 kW·h·(100 km) ⁻¹	8.9 L·(100 km) ⁻¹
尾气排放标准	—	欧 V
报废里程	50 万 km	50 万 km

位确定为 1 km.

本研究的系统边界包括从原材料获取、汽车生产制造、汽车使用与汽车回收全生命周期过程.其中考虑了电池、轮胎更换以及轮胎使用过程中磨损所致的排放物.但由于数据所限,运输、维护及销售活动暂作忽略.具体的生命周期评价的系统边界见图 1.



灰底框表示迷迪电动汽车特有的过程,黑底框表示现代燃油车特有过程,白底框表示二者都包含的过程

图 1 生命周期评价的系统边界

Fig. 1 System boundary of LCA

1.2 清单数据解析

1.2.1 清单数据

通过企业调研、文献调研、行业报告等收集汽车及主要部件在生命周期各个阶段的输入和输出数据,两款汽车全生命周期的相关数据结构如表 2 所示.其中两款汽车生产阶段制造工艺过程、动力系统生产过程,使用阶段能源生产过程及能耗,以及汽车拆解过程等都是本研究的关键环节,其数据分别

来自汽车生产企业调查数据、参考文献[13,14]、GaBi4.4 背景数据内的中国数据、国内汽车拆解企业调查数据.此外,由于可获数据的限制,汽车生产所用的钢、铁、铝等材料的生产数据来自 GaBi4.4 数据库中国外的数据.这可能会对各款车生产阶段的评价结果具有一定影响,但由于两款车所耗的同种材料的生产数据相同,因此,对二者比较结果带来影响较小.

表 2 迷迪电动汽车与现代燃油车主要部件

Table 2 Major components of Midi EV and Hyundai ICEV

项目	迷迪电动汽车		现代燃油车	
动力系统	电池	磷酸铁锂蓄电池	发动机	钢、铁、铝为主要材料
	电动机	无刷直流永磁电动机	变速箱	铝、钢、铜为主要材料
	减速器	铝、钢为主要材料		
车体	车架	钢铁为主要材料	车架	钢铁为主要材料
	底盘	减震弹簧和金属零部件	底盘	减震弹簧和金属零部件
	车轮	子午线轮胎	车轮	子午线轮胎
	内饰	座椅、车窗、仪表盘等	内饰	座椅、车窗、仪表盘等

1.2.2 数据估算及分配

对于电池和轮胎更换采用以下方法进行估算：根据参考文献[3]得知电动汽车磷酸铁锂电池生命周期可行驶里程为 15 万 km,故迷迪电动汽车全生命周期总行驶里程 50 万 km 内共需 4 块电池；根据参考文献[23]得到轮胎的使用寿命为 8 万 km,故一辆车生命周期内需要消耗 28 个轮胎。

汽车生命周期内耗电根据具体情况选用不同来源：使用阶段和回收阶段采用北京市 2010 年的电网电能数据,生产阶段采用 2010 年中国平均电能数据。依据《2011 北京能源发展报告》,北京市 2010 年电能结构中火力发电、天然气发电、抽水蓄水发电、风能发电、水力发电、余热发电比例依次为 78.57%、10.43%、4.30%、2.56%、3.69%、0.26%；依据《2011 中国电力年鉴》,2010 年中国平均电能结构中,火电、水电、核电、风电比例分别为 80.81%、16.24%、1.77%、1.18%。

对涉及的数据分配问题,本研究选取“重量比例”和“表面积比例”作为分摊的比例。在汽车车身生产过程中的冲压、焊接阶段所消耗电、钢铁等原材料的量按照重量比例进行分配,而涂装工序消耗的表调剂、脱脂剂、底涂涂料等原材料的量以及主要接纳涂装工序产生的废水处理工序接纳的 COD、BOD、 Zn^{2+} 、 PO_4^{3-} 、石油类等量是按照表面积比进行分配；此外汽车其他零部件的生产、最后的总装及汽车拆解过程中输入、输出数据也是根据“重量比例”进行数据分配。

2 研究方法

2.1 评价方法

研究采用以目标与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释^[24]为一体的 LCA 方法框架,并利用 GaBi 软件辅助构建评价模型及分析。基于 GaBi 基础数据库结构及补充增加本土化的数据构建了北京市电动出租车及燃油出租车全生命周期数

据清单,包括了两款车生命周期过程(原材料开采及加工、产品制造、使用及报废)中能源投入、资源消耗及各种环境负荷物质(废气、废水、固体废弃物)数据。在评价影响损害及生态环境问题的基础上,系统分析了造成损害和问题的关键过程及物质。

2.2 环境影响评价模型及指标

当前生命周期评价有两类基本的评价模型：面向损害及面向问题。EI99 方法是面向损害的影响评价模型,损害类型分为人类健康、生态系统质量和资源耗损 3 类。其中生态系统质量通过每年每平方公里内物种的相对减少(PDF)进行衡量；人体健康采用健康指数残疾调整生命年(DALYs)评估有毒物质暴露导致健康损害；资源消耗通过附加能量表示由于人为消耗使资源数量和质量降低,进而导致将来开采时需要额外付出的能量^[25]。该方法考虑的影响类型主要有酸化/富营化(acidification/nutrification)、生态毒性(ecotoxicity)、土地使用(land-use)、土地功能转化(land conversion)、致癌效应(carcinogenic effects)、气候变化(climate change)、电离辐射(raditioan)、臭氧层损耗(ozone layer depletion)、呼吸系统的影响(respiratory)、化石燃料(fossil fuels)和矿产资源(minerals)开采等 11 种^[5]。EI99 评价因子计算有以下 3 个步骤：第一步为针对不同影响类别的数据清单计算污染物或资源使用损害因子的影响大小；第二步为不同损害类别中损害因子的标准化；第三步为 3 种损害类型的权重和 EI99 损害因素加权的计算^[26],计算得到的末端的单一指标表征清单物质对研究系统的最终环境影响^[25]。CML2001 是面向问题的评价方法,该方法考虑的环境影响分为非生物资源消耗(abiotic depletion potential, ADP)、酸化(acidification potential, AP)、富营养化(eutrophication potential, EP)、淡水生态毒性(freshwater aquatic ecotoxicity potential, FAETP)、全球变暖(global warming potential, GWP)、人类毒性(human toxicity

potential, HTP)、海水生态毒性 (marine aquatic ecotoxicity potential, MAETP)、臭氧层损耗 (ozone layer depletion potential, ODP)、光化学臭氧合成 (photochem. ozone creation potential, POCP)、陆地生态毒性 (terrestrial ecotoxicity potential, TETP) 等 10 类^[14]。其主要的计算过程包括分类和特征化, 分类是将清单分析中得到的输入和输出数据归入不同的环境影响类别; 特征化, 即通过把各种类别的环境影响的强度或程度归纳为一定的指标对其进行量化, 对于归入某种环境影响的清单数据则通过采用科学预设的特征化因子计算其影响的强度和程度^[27]。

本研究将上述两类模型结合, 针对影响损害及生态环境问题, 分别利用 EI99 及 CML2001 模型展开比较评价。并利用清单数据, 对雾霾的致导因子展开比较评价。利用 CML2001 模型评价的结果分析了碳排放效益对电力结构及报废里程的敏感性。

3 结果与分析

通过迷迪电动汽车和现代燃油车全生命周期 (包括生产阶段、使用阶段、回收阶段) 过程的系统分析, 利用 GaBi4.4 软件构建了两款车的生命周期评价模型并计算获得生命周期清单, 采用 EI99 及 CML2001 评价模型对比分析了两款车的环境影响, 并对关键过程及关键因子敏感性进行了分析讨论。

3.1 清单分析

从物质输入清单分析, 两款车能源物质的消耗有所差别, 如图 2 所示, 迷迪电动汽车消耗的硬煤与天然气量分别比现代燃油车大 73.30% 和 51.19%, 而消耗的原油量则比现代燃油车小 98.08%; 此外某些原材料消耗也存在一定差别, 以 Li 为例, 迷迪电动汽车消耗了一定的锂 (Li) 而现代燃油车并未消耗该物质。从物质输出清单分析, 迷迪电动汽车在二氧化碳 (CO₂)、一氧化碳 (carbon monoxide, CO)、氨气 (NH₃)、生化耗氧量 (biochemical oxygen demand, BOD)、悬浮物 (SS)、氯化物 (chloride) 等环境排放物的排放量上低于现代燃油车。

根据清单数据, 针对致霾因子: PM_{2.5}、NO_x、SO_x、VOCs、NH₃^[28] 进行分析。如图 3 所示, 从全生命周期的角度来看迷迪电动汽车 PM_{2.5}、NO_x、SO_x、VOCs 的排放量都大于现代燃油车的排放量, 增加的比例分别为 93%、75%、63%、16%, 只有 NH₃ 的排放量比现代燃油车降低了 16%。这主要是由两款汽车使用阶段排放量的差异造成的, 虽然迷迪电

动汽车在行驶阶段实现了污染物的零排放, 但其驱动能源 (电力) 生产过程排放的致霾污染物的强度比现代燃油车驱动能源生产与尾气排放两个过程排放量的总和大, PM_{2.5}、NO_x、SO_x、VOCs 的排放量分别增加了 97%、75%、56%、6%, 而此阶段 NH₃ 的排放量比现代燃油车降低了 100%。此外, 在生产阶段, 由于迷迪电动汽车总的用电量大于现代燃油车 (主要因电池生产引起), 导致迷迪电动汽车 6 种致霾污染物的排放量均大于现代燃油车, PM_{2.5}、NO_x、SO_x、NH₃、VOCs 排放量增加的比例分别为 60%、64%、100%、100%、54%; 而回收阶段, 由于材料的再生利用两款车 6 种致霾污染物的排放量均呈现负值, 表示污染物减排量, 其值越小表明减排量越大。在这个阶段, 在回收得到二次钢材相差不大的情况下, 现代燃油车由于发动机生产时耗用了铝量较大使得回收得到的可利用的铝比迷迪电动汽车多, 因此导致迷迪电动汽车的致霾污染物减排量均小于现代燃油车。

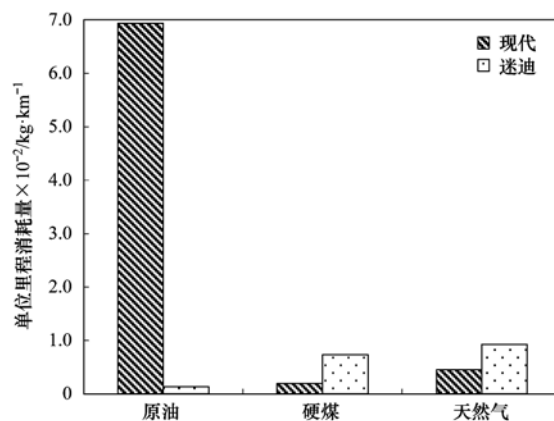


图 2 迷迪电动汽车和现代燃油车全生命周期主要能源消耗
Fig. 2 Main energy consumption of the full life cycle of Midi EV and Hyundai ICEV

3.2 影响评价

3.2.1 CML2001 方法评价

(1) 全生命周期环境影响比较分析

两款车全生命周期各影响类型特征化结果, 按比例形式呈现, 如图 4 所示。迷迪电动汽车全生命周期的 ADP、GWP、ODP 这 3 种影响类型的影响潜值小于现代燃油车, 3 种影响类型的潜值分别是现代燃油车的 22%、51% 和 60%, 得出迷迪车对这 3 类影响具有明显的改善作用。而对 AP、EP、FAETP、HTP、MAETP、POCP、TETP 等 7 种影响类型比较结果则显示迷迪电动汽车的影响潜值大于现代燃油车, 7 种影响类型中现代燃油车的潜值分别是迷迪电动汽车的 42%、50%、90%、24%、23%、

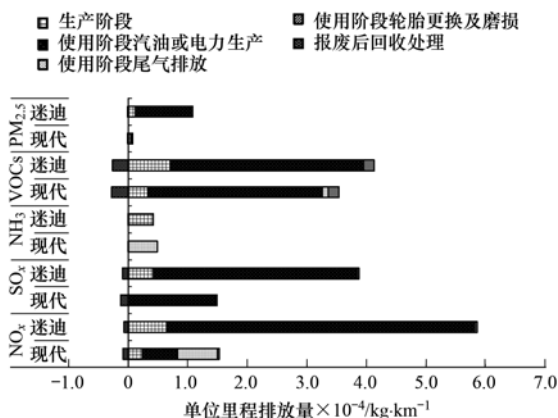
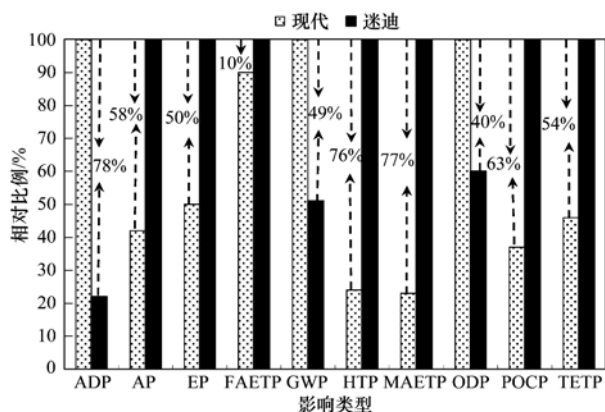


图3 迷迪电动汽车和现代燃油车全生命周期致霾污染物排放

Fig. 3 Key haze-induced pollutants in the full life cycle of Midi EV and Hyundai ICEV



以各影响类别中特征化值大的车为基准 100%, 另一款车的特征值除以基准车的特征值即为相对比例, 图 5、图 6 与此相同

图4 迷迪电动汽车和现代燃油车全生命周期特征化结果比较

Fig. 4 Comparative characterization impacts of the full life cycle of Midi EV and Hyundai ICEV

37%、46%, 由此得出, 除了 FAETP, 迷迪车对其他六类影响都有增大的趋势。

(2) 生产阶段环境影响比较分析

两款车生产阶段各影响类型特征化值比较结果如图 5 所示, 迷迪电动汽车生产阶段在 FAETP 和 TETP 方面的影响小于现代燃油车, 而在 MAETP、HTP、AP、EP、GWP、POCP、ODP 等方面, 其环境影响则大于现代燃油车, 其中 GWP 的影响潜值相差了 50%。另外, 影响潜值相差比例占 50% 以上的影响类型还有 AP、EP 以及 FAETP。深入分析原因可知, 电力消耗量的差别是引起两款车上上述影响潜值相差较大的原因。对比两款车生产阶段电力消耗可知, 现代燃油车生产阶段的耗电量为迷迪燃油车动力系统生产过程耗电量的 86.41%, 而中国电网以煤电为主, 煤电发电过程中排放的 SO₂、NO_x、

CO₂、甲烷(CH₄)等是造成 AP、EP、GWP 的主要影响物质, 因此使得耗电量较大的迷迪电动汽车的 AP、EP、GWP 和 ADP 影响远大于现代燃油车。

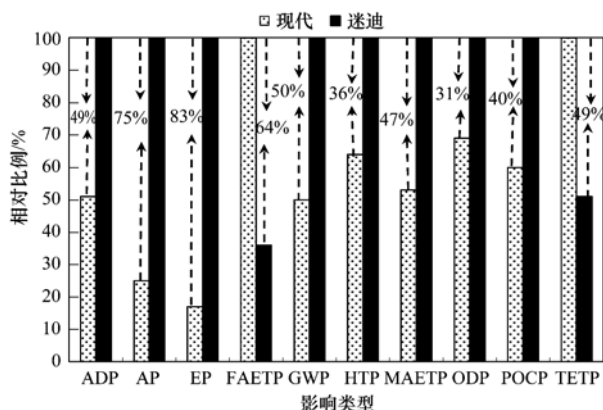


图5 迷迪电动汽车和现代燃油车生产阶段特征化结果比较

Fig. 5 Characterization impacts of the manufacturing phase of Midi EV and Hyundai ICEV

(3) 使用阶段环境影响比较分析

两款车使用阶段各影响类型特征化值比较结果如图 6 所示, 可以看出, 迷迪电动汽车的 ADP、GWP、ODP 值较现代燃油车低, 在此阶段, 迷迪电动汽车相较于现代燃油车实现了 55% 的碳减排。而在 FAETP、MAETP、HTP、TETP、POCP 方面迷迪电动汽车的潜值较现代燃油车的高。分析各影响类别差别的原因可知, 行驶过程中有无尾气排放以及驱动能源的不同是造成差别的原因, 在使用阶段迷迪电动汽车行使 1 km 消耗驱动能源电力的量为 0.86 MJ, 电力生产过程中主要消耗的一次能源是硬煤和天然气, 排放的主要污染物质有 SO₂、NO_x、CO₂、CH₄、非甲烷类挥发性有机物 (non methane volatile organic compounds, NMVOC) 以及三价钒离子 (V³⁺)、二价镍离子 (Ni²⁺)、锡 (Se) 等多种重金属及其离子, 而现代燃油车则消耗汽油 0.06 kg, 汽油的上游生产过程消耗的主要能源为原油, 排放的主要污染物质为 CH₄、SO₂、NO_x、NMVOC、V³⁺、Ni²⁺、钡 (Ba) 等。此外, 在尾气排放所致污染物排放方面, 较之现代燃油车, 迷迪电动汽车没有尾气排放。

(4) 报废回收阶段环境影响差异分析

两款车报废回收阶段各影响类型特征化值比较结果如图 7 所示, 现代燃油车与迷迪电动汽车在各环境影响类型下的环境影响均为负值, 产生了环境效益, 这是由于两款车在此阶段对钢、铁、铝、铜、塑料、橡胶、玻璃等可再生材料以及旧轮胎、旧电

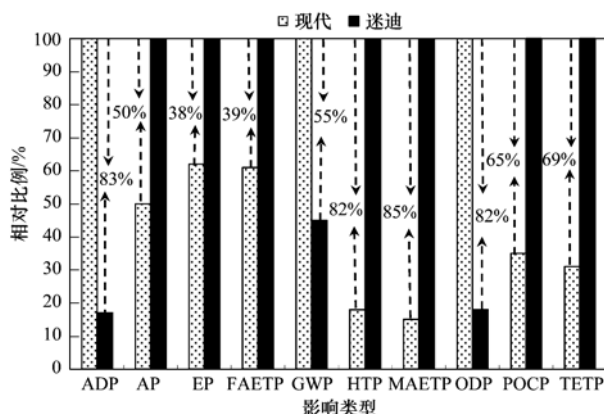
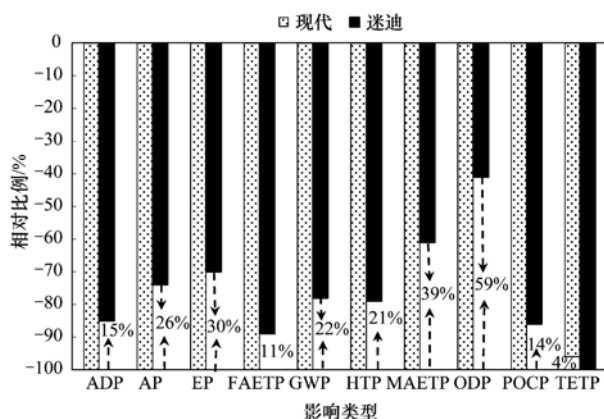


图6 迷迪电动汽车和现代燃油车使用阶段特征化结果比较

Fig. 6 Characterization impacts of the using phase of Midi EV and Hyundai ICEV

池等部件进行了回收,避免了相应原生材料的消耗。对比两款汽车回收阶段的环境表现可知,除 TETP 外的各环境影响类别都呈现现代燃油车的环境效益(负的环境影响)大于迷迪电动汽车,与迷迪电动汽车相比,现代燃油车的 ADP、AP、EP、FAETP、GWP、HTP、MAETP、ODP、POCP 等环境影响值降低的比例分别为 15%、26%、30%、11%、22%、21%、39%、59%、14%,这是由于钢材和铝材的回收是两款车产生环境效益的主要贡献源,而在回收得到二次钢材相差不大的情况下,现代燃油车由于发动机生产时耗用了铝量较大使得回收得到的可利用的铝比迷迪电动汽车多。



结果以各影响类别中特征化值小的车为基准 100%,另一款车的特征值除以基准车的特征值为相对比例;负的环境影响值在图中表示为负的比例值,负值越小表示环境效益越大

图7 迷迪电动汽车和现代燃油车回收阶段特征化结果比较

Fig. 7 Characterization impacts of the recycling phase of Midi EV and Hyundai ICEV

(5) 碳排放差异分析

在各环境影响类型中,需要着重关注 GWP 环

境影响类型,它表征了两款汽车碳排放的情况,可直接为低碳交通的实现提供参考。从上述各生命周期阶段的 GWP 的特征化值比较情况来看,就全生命周期而言,迷迪电动汽车比现代燃油车降低了 49%,其中使用阶段迷迪电动汽车比现代燃油车碳排放量降低 55%,而生产阶段和回收阶段则呈现相反的趋势,由于迷迪电动汽车生产阶段的总耗电量大于现代燃油车,使得迷迪电动汽车生产阶段将比现代燃油车碳排放量增加 50%;此外,回收阶段由于迷迪电动汽车回收的主要材料量小于现代燃油车使得其碳减排量比现代燃油车低了 78%。

(6) 生命周期及关键过程贡献分析

研究将两款车全生命周期生产阶段动力系统生产、生产阶段非动力系统生产、使用阶段汽油或电力生产、使用阶段尾气排放、使用阶段轮胎更换及磨损、报废后回收处理这 6 个过程定义为关键过程,对其环境影响贡献进行分析。

对 ADP、AP、EP、FAETP、POCP、HTP、TETP、GWP 等环境影响类型而言,使用阶段两款车环境影响潜值均占全生命周期总值的 50% 以上(图 8)。而在 ODP 方面,生产阶段是两款车环境影响的主要贡献阶段;在 MAETP 方面,现代燃油车影响主要贡献阶段为生产阶段,迷迪电动汽车影响的主要贡献阶段为使用阶段。此外,两款车各影响类型回收阶段对整个生命周期环境影响的贡献量都为负值,表现为环境效益。

将汽车生产阶段分为动力系统生产和非动力系统生产两部分。如图 8 所示,两款车动力系统和非动力系统生产过程对整个生命周期环境影响的贡献量有所差别。其中,动力系统生产是迷迪电动汽车生产阶段各类型环境影响的主要来源,其带来的 ADP、AP、EP、FAETP、GWP、HTP、MAETP、POCP、ODP 等环境影响均占该款车生产阶段总环境影响的一半以上,其中 AP、EP 的环境影响占该款车生产阶段总环境影响的比例高达 80% 以上,这主要源于电池生产制造过程中污染物 SO_2 、 NO_x 等的排放,而 HTP、MAETP、POCP、TETP 的影响主要来自电池组装工艺过程消耗的电力生产;而现代燃油车生产阶段各类型环境影响主要来自非动力系统生产过程,其中该过程产生的 ADP、AP、EP、GWP、HTP、POCP 等环境影响均占该款车生产阶段总环境影响的 80% 以上,车身生产中的涂装过程是造成 AP、EP、GWP、HTP、POCP 等环境影响类别的主要贡献过程,而底盘生产时消耗的钢、铝等

材料的生产及消耗过程是产生 ADP、MAETP 等影响的主要贡献过程。

两款车的使用阶段分为 3 个关键过程:汽油或电力生产、尾气排放、轮胎更换及磨损。使用阶段两款车造成各类影响的主要过程不同。就迷迪电动车而言,其行驶过程中尾气排放为零,造成影响的主要过程为电力生产过程,该过程产生 ADP、AP、EP、FAETP、GWP、HTP、MAETP、POCP、TETP 的影响大小均占该车使用阶段总影响的 90% 以上,对于现代燃油车来说,尾气排放过程尤其是 CO_2 、 NO_x 的排放是造成 EP、GWP 的主要原因,其影响大小分别占使用阶段的 69% 和 84%;而汽油生产的工艺过程则是造成 ADP、AP、FAETP、HTP、MAETP、ODP、TETP 等影响的主要过程,造成影响大小分别占使用阶段的 99%、53%、96%、59%、91%、90%、95%。

两款车各影响类型回收阶段的影响对整个生命周期环境影响的贡献量都为负值,表现为正的环境效益,这是由于两款车对一些可再生材料进行了回收,避免了相应原生材料的消耗。两款车回收了钢、铁、铝、铜、塑料、橡胶、玻璃等材料以及旧轮胎、旧电池等部件,但两款车回收得到的上述材料的量不尽相同,且迷迪电动汽车较现代燃油车而言多了磷酸铁锂蓄电池回收处理的环节,因此各环境影响类别的正效益有所差别。在 ADP、GWP 上,迷迪电动汽车回收阶段的贡献大于现代燃油车,而在 AP、EP、FAETP、MAETP、HTP、ODP、POCP、TETP 等方面,呈现相反的趋势。

有一点值得关注,现代燃油车的尾气排放过程对 POCP 的影响潜值为负值,这可能是由于现代燃油车尾气中含有 NO ,其对臭氧的分解作用导致 POCP 方面的影响为负值。

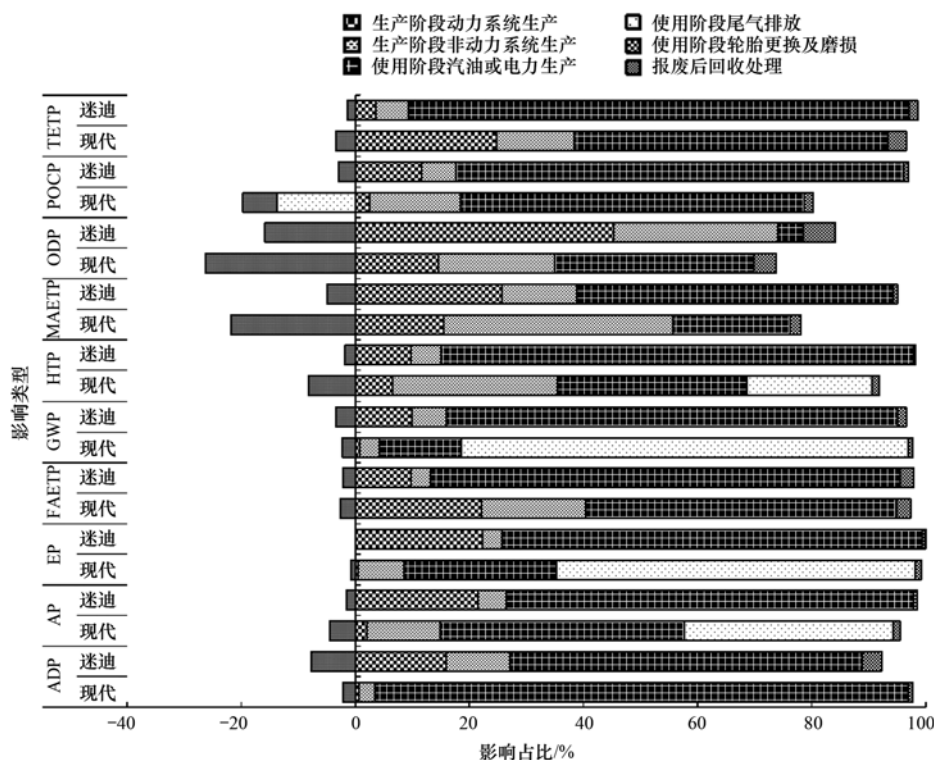


图 8 不同关键过程对迷迪电动汽车和现代燃油车全生命周期影响的贡献

Fig. 8 Contributions of the key processes to the full life cycle of Midi EV and Hyundai ICEV

3.2.2 EI99 方法评价结果

采用 EI99 评价方法对迷迪电动汽车和现代燃油车进行生命周期损害影响的评价,从图 9 得出,现代燃油车比迷迪电动汽车影响分值高出 33.30%。对比两款车在生态系统质量、人体健康、资源消耗方面的影响,现代燃油车对资源的环境影响分值比迷迪电动汽车高出了 79%,而在生态系统质量和人

体健康影响方面则小于迷迪电动汽车,其降低比例分别为 61% 和 48%。可以看出,两款车在资源消耗方面的差别是导致全生命周期环境表现不同的主要原因。

深入分析可知,如图 10 所示,在资源消耗方面,对现代燃油车与迷迪电动汽车产生影响最大的因素均是化石能源消耗,迷迪电动汽车比现代燃油车环

境影响分值降低了 80.77%, 这是由两款车使用阶段驱动能源的差别引起的。此外, 矿物消耗方面, 则呈现出迷迪电动汽车的环境影响比现代大 83.69%, 这主要是迷迪电动汽车电池生产过程增加了锂等金属材料的消耗。两款车对生态系统质量影响最大的因素有所差异, 现代燃油车的最大影响因素是酸化/富营养化, 而迷迪电动汽车的则为生态毒性。这是因为造成两款车该类影响的关键过程及其排放物质存在差别, 动力系统及电力生产过程中重金属可能是导致其生态毒性的主要污染物质, 汽油生产和尾气排放过程中产生的 NO_x 、 SO_x 、 NH_3 等是导致其酸化富营养化的主要污染物。而在人体健康影响方面, 气候变化和无机物致呼吸系统损伤是两款车该类影响的主要因素, 其对两款车人体健康影响的贡献率均在 90% 以上, 其中差别最大的因素为无机物致呼吸系统损伤, 由于迷迪电动汽车使用过程中耗电背后的燃煤发电过程产生的大量颗粒物引起了对人体呼吸道的的影响比现代燃油车造成的该类影响大了 73.60%, 使得最终迷迪电动汽车对人体健康的影响大于现代燃油车。

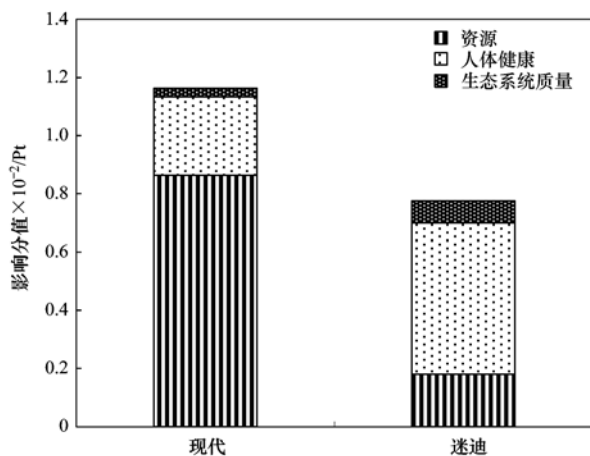


图9 迷迪电动汽车与燃油汽车全生命周期环境影响分值

Fig. 9 Environmental impacts of the full life cycle of Midi EV and Hyundai ICEV

3.3 关键因素敏感性分析

报废里程和电能结构是本研究开展生命周期评价的关键因素, 其大小将直接影响汽车单位里程的环境影响值。本节针对温室气体和致霾污染物排放, 展开这两个关键因素的敏感性分析。

3.3.1 报废里程敏感性分析

本研究设定的报废里程为出租车的规定报废里程 50 万 km, 但出租车的实际报废里程会在 0 ~ 50 万 km 范围内随具体情况而不同。选取 10 万 km、

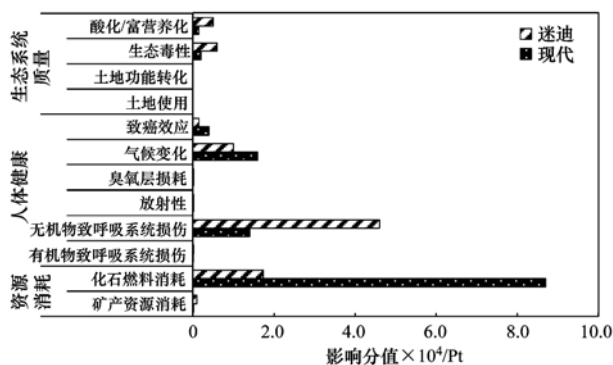


图10 迷迪电动汽车与燃油汽车全生命周期各类环境影响分值

Fig. 10 Environmental impacts of the full life cycle of Midi EV and Hyundai ICEV

15 万 km、20 万 km、25 万 km、30 万 km、35 万 km、40 万 km、50 万 km 等 8 种报废里程开展敏感性分析。

从图 11 可见, 随着报废里程的增加, 迷迪电动汽车和现代燃油车的单位里程碳排放 (greenhouse gas emissions, GHG emissions) 都呈降低趋势, 但二者降低的幅度有所差别。当汽车的报废里程从 10 万 km 上升到 50 万 km 时, 迷迪电动汽车的单位里程碳排放从 0.19 kg 降至 0.12 kg, 降低了 35.29%; 而现代燃油车的单位里程碳排放则从 0.26 kg 降至 0.24 kg, 降低比例为 7.34%。由此可见, 报废里程的变化对迷迪电动汽车的单位里程碳排放的影响大于对现代燃油车。这主要是由于从全生命周期的角度而言, 随着报废里程的增加, 生产阶段和回收阶段对汽车单位里程碳排放的贡献量逐渐下降, 相反使用阶段的贡献会加大。前文研究表明, 与现代燃油车相比, 迷迪电动汽车生产阶段的碳排放强度更大, 而使用阶段的单位碳排放量则小很多。因此, 报废里程的增加使迷迪电动汽车的碳排放环境效益得以更加显现。如图 12 所示, 当报废里程从 10 万 km 变化到 50 万 km 的同时, 迷迪电动汽车相对现代燃油车碳减排比例也从 28% 增加到 49%。

当行驶里程都为 15 万 km 时, 本研究的迷迪电动汽车单位里程碳排放为 0.16 kg, 而 Hawkins 等^[12]的研究结果为 0.19 kg。两者的数值差别主要是由电力结构以及评价范围和假设的不同造成的。然而, 在报废里程敏感性分析方面, 两者的分析结果呈现相同的趋势, 即随着报废里程的增加电动汽车和燃油车的单位里程碳排放都有所下降, 此外, 在电动汽车相对燃油车碳减排效益随报废里程变化趋势方面, 两个研究结果趋势也一致, 即随着报废里程的增加电动汽车相对燃油车的碳减排效益逐渐上升。

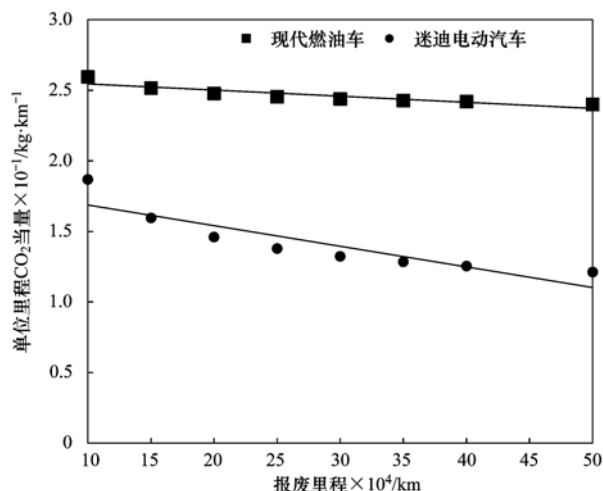


图 11 迷迪电动汽车和现代燃油车碳排放量随报废里程的变化

Fig. 11 Trends in the full life cycle GHG emissions over the lifetime of Midi EV and Hyundai ICEV

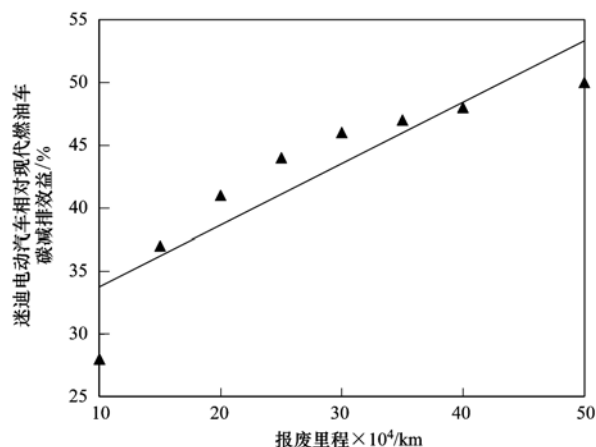


图 12 迷迪电动汽车碳减排效益随报废里程的变化

Fig. 12 Trends in the full life cycle GHG reduction over the driving mileage of Midi EV and Hyundai ICEV

3.3.2 电力能源结构敏感性分析

(1) 碳排放随电力能源结构变化分析

电力能源结构是电动车生命周期环境影响的重要作用因素。选择基准年份 2010 年、《北京市“十二五”能源发展规划》中目标年份 2015 年以及北京市预计关闭所有燃煤机组的目标年份 2017 年作为 3 个时间点,并结合各年份外调电的比例设置 3 种情景进行敏感性分析,情景 1 为 2010 年北京市实际的电能结构:火力发电、天然气发电、抽水蓄水发电、风能发电、水力发电、余热发电、生物质能比例依次为 78.57%、10.43%、4.30%、2.56%、3.69%、0.26%、0.19%;情景 2 为规划中北京市 2015 年电能结构:火力发电、天然气发电、风能发电、水力发电、太阳能发电、生物质能比例依次为

67.55%、24.75%、3.13%、3.03%、0.77%、0.77%;情景 3 为预测的北京市 2017 年电能结构:火力发电、天然气发电、风能发电、水力发电、太阳能发电、生物质能比例依次为 60.55%、30.94%、3.36%、3.23%、0.96%、0.96%。

如图 13 所示,情景 1 中迷迪电动汽车单位里程的碳排放为 $0.121 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$,其相对现代燃油车的碳减排比例为 49%;情景 2 中单位里程碳排放为 $0.108 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$,碳减排比例为 55%;情景 3 中单位里程碳排放为 $0.105 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$,碳减排比例为 56%。从情景 1 到情景 3 火力发电的比例逐渐下降,新能源及可再生能源的比例逐渐升高,根据趋势分析得出随着火力发电比例的降低及新能源与可再生能源比例的升高,迷迪电动汽车全生命周期单位里程的碳排放量呈现下降的趋势,迷迪电动汽车相对现代燃油车的碳减排效益将逐步提高。

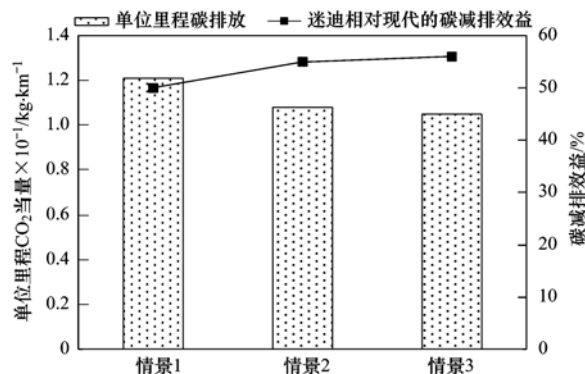


图 13 迷迪电动汽车碳减排效益随电能结构的变化

Fig. 13 Trends in the effective full life cycle GHG reduction over the electricity mix of Midi EV

(2) 致霾污染物排放随电力能源结构变化分析

前文研究表明,以 2010 年北京本地发电为驱动能源时,迷迪电动汽车全生命周期中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x 、 VOCs 等致霾污染物的排放量均大于现代燃油车,只有 NH_3 的排放量比燃油车小。为进一步分析不同电能结构下两款汽车 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x 、 VOCs 排放量的变化趋势,本节在上述 3 个情景的基础上,依据 2017 年北京市本地发电结构设置情景 4,其具体结构为:天然气发电、风能发电、水力发电、太阳能发电、生物质能比例依次为 80.41%、3.31%、2.76%、2.76%、2.76%。

4 种情景下迷迪电动汽车致霾物质的排放量减去现代燃油车相应物质的差值如图 14 所示。从中可以看到,4 个情景下迷迪电动汽车排放的 NO_x 、 SO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 与现代汽车的差值均为正,表明

迷迪电动汽车上述 4 种致霾物质的排放量均大于现代燃油车。然而,从情景 1 到情景 4,随着火电比例的下降,迷迪电动汽车全生命周期排放的 NO_x 、 SO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 与现代燃油车相应各物质排放量的差值逐渐降低,其情景 4 的降低幅度最大,这是由于情景 4 中没有火力发电,电力结构更优化;4 个情景中 VOCs 的排放量差值减小的趋势并不明显,这主要是由于天然气发电与火力发电产生的 VOCs 相差

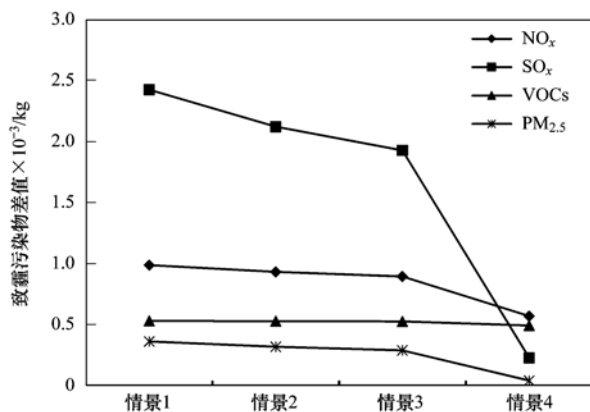


图 14 迷迪电动汽车与现代燃油车致霾物质排放量差值随电能结构的变化

Fig. 14 Trends in full life cycle key haze-induced pollutants emissions over the electricity mix of Midi EV and Hyundai ICEV

4 结论

(1) 从整个生命周期来看,迷迪电动车推广具有明显改善 ADP、GWP、ODP 等三类环境影响的潜力。尤其对碳减排将起积极的促进作用,相对现代燃油车,单位里程碳排放量可降低约一半左右。但同时应加强对矿物资源消耗,无机物致呼吸系统损伤及生态毒性潜在影响趋势的监管。

(2) 使用阶段的电力生产及生产阶段的动力系统生产是控制迷迪电动车生态环境隐患的关键过程。

(3) 随着报废里程的增加,迷迪电动汽车单位里程碳排放呈现大幅降低及碳减排效益呈现逐渐增大的规律,可为电动车报废管理提供参考。

(4) 提高发电的清洁能源比例将有助于控制车辆全生命周期致霾因子的排放。

(5) 清洁的发电能源组合,节能的电力驱动,清洁的动力系统生产是保障电动车转型取得良好生态环境效益的关键。

(6) 未来研究将在此基础上开展电动汽车的全生命周期管理研究,并进一步完善本地数据清单。

致谢:感谢北京市环境保护局刘贤淑处长,王宣同高级工程师,北京合理用能评估中心赵志军主任,课题组吕彬老师,丁宁博士等同学提供的大力帮助。GaBi4.4 教育软件提供的支持。

参考文献:

- [1] 郭本峰. 以交通污染物排放量最优为目标的交通管理优化方法[D]. 南京: 东南大学, 2008. 1.
- [2] 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析正式发布[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2014-10/31/content_2773436.htm, 2014-04-06.
- [3] 到2017年北京将拥有5000辆电动出租车[EB/OL]. <http://www.china-nengyuan.com/news/53742.html>, 2013-10-31.
- [4] 艾江鸿, 李海峰, 林鉴军. 电动汽车的全寿命周期环境影响分析[J]. 技术经济, 2010, 29(3): 35-39.
- [5] 张磊. 基于 GaBi4 的电动汽车生命周期评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. 74-131.
- [6] Baptista P, Ribau J, Bravo J, et al. Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis[J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 4683-4691.
- [7] Deluchi M A. Emissions of greenhouse gases from the use of transportation fuels and electricity[R]. Washington: Argonne National Lab. Energy Systems Div., 1991. 1-3.
- [8] Hackney J, de Neufville R. Life cycle model of alternative fuel vehicles: emissions, energy, and cost trade-offs[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(3): 243-266.
- [9] 欧训民, 张希良, 覃一宁, 等. 未来煤电驱动电动汽车的全生命周期分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 169-172.
- [10] 伍昌鸿, 马晓茜, 陈勇, 等. 汽车制造、使用及回收的生命周期分析[J]. 汽车工程, 2006, 28(2): 207-211.
- [11] 胡志远, 浦耿强, 王成焘. 代用能源汽车生命周期评估[J]. 汽车研究与开发, 2002, (5): 49-53.
- [12] Hawkins T R, Singh B, Majeau-Beteez G, et al. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles[J]. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(1): 53-64.
- [13] 顾国刚. 电动汽车与内燃机汽车动力系统生命周期评价对比研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. 39-49.
- [14] 张雷, 刘志峰, 王进京. 电动与内燃机汽车的动力系统生命周期环境影响对比分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 931-940.
- [15] Röder A. Integration of life-cycle assessment and energy planning models for the evaluation of car powertrains and fuels[D]. Swiss: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [16] Wagner U, Eckl R, Tzschentschler P. Energetic life cycle assessment of fuel cell powertrain systems and alternative fuels in Germany[J]. Energy, 2006, 31(14): 3062-3075.
- [17] 徐杰峰. 子午线轮胎生命周期评价研究[D]. 西安: 西北大学, 2010. 35-57.
- [18] 汪祺. 基于生命周期评价的锂电正极材料对比分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. 54-55.
- [19] Humphreys K, Placet M, Singh M. Life-cycle assessment of electric vehicles in the United States[A]. In: IECEC 96,

- proceeding of the 31st intersociety energy conversion engineering conference[C]. Washington, DC: IECEC, 1996. 2124-2127.
- [20] Bartolozzi I, Rizzi F, Frey M. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy[J]. Applied Energy, 2013, **101**: 103-111.
- [21] 王成. 电动汽车发展对能源与环境影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. 47-54.
- [22] 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.
- [23] 黄菊文, 李光明, 贺文智, 等. 轮胎生命周期的能量分析[J]. 汽车工程, 2012, **34**(3): 277-281.
- [24] 李兴福, 徐鹤. 基于 GaBi 软件的钢材生命周期评价[J]. 环境保护与循环经济, 2009, **29**(6): 15-18.
- [25] 施晓清, 李笑诺, 杨建新. 基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟生态网络系统为例[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6398-6410.
- [26] 段宁, 程胜高. 生命周期评价方法体系及其对比分析[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(32): 13923-13925.
- [27] 陈伟强, 万红艳, 武娟妮, 等. 铝的生命周期评价与铝工业的环境影响[J]. 轻金属, 2009, (5): 3-10.
- [28] 贺泓, 王新明, 王跃思. 大气灰霾成因与控制[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 344-352.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行