

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁夏山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析

林晓丹¹, 田良^{1,2*}, 吕彬³, 杨建新³

(1. 海南大学环境与植物保护学院, 海口 570228; 2. 海南大学旅游学院, 海口 570228; 3. 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)

摘要: 纯电动公交车因行驶阶段零排放而成为城市地面常规公交车的重点发展方向, 但是从其全生命周期来看, 其实际的节能减排效益受到多种因素影响, 仍需综合权衡. 本研究采用生命周期评价方法(LCA), 综合考虑公交车载客能力与不同区域的电网发电结构等因素, 开展纯电动公交车的节能减排效益评价. 结果表明, 由于现有纯电动公交车的载客能力较柴油公交车低 15% 左右, 所以选取出行服务作为功能单位能够更合理地核算纯电动公交车的实际节能减排效益. 同时, 由于我国不同区域电网的发电结构仍存有较大差异, 相对于柴油公交车, 不同区域电网结构下发展纯电动公交车所获取的节能减排效益差别较大. 具体而言, 纯电动公交车在华北、华东、华中、东北、西北和南方等不同电网结构下的节能效益分别为 7.84%、11.91%、26.90%、11.15%、19.55% 和 20.31%; 除华北电网由于煤电占比较高无减排效益外, 其余电网结构下发展纯电动公交车所获取的综合减排效益分别为 3.46%、26.81%、1.17%、13.74% 和 17.48%. 因此, 发展纯电动公交车时, 建议将提高纯电动公交车的载客能力作为技术研发的重点, 同时充分考虑不同电网发电结构对纯电动公交车的环境影响, 合理进行发展规划.

关键词: 生命周期评价方法; 出行服务; 纯电动公交车; 节能效益; 综合减排效益

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3515-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.050

Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services

LIN Xiao-dan¹, TIAN Liang^{1,2*}, LÜ Bin³, YANG Jian-xin³

(1. College of Environment and Plant Protection, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Tourism, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Battery Electric Bus (BEB) has become one of prior options of urban buses for its “zero emission” during the driving stage. However, the environmental performance of electric buses is affected by multi-factors from the point of whole life cycle. In practice, carrying capacity of BEB and power generation structures can both implement evident effects on the energy consumption and pollutants emission of BEB. Therefore, take the above factors into consideration, in this article, Life Cycle Assessment is employed to evaluate the energy conservation and emissions reduction benefits of BEB. Results indicate that, travel service is more reasonable as the functional unit, rather than mileage, since the carrying capacity of BEB is 15% lower than the diesel buses. Moreover, compared with diesel buses, the energy conservation and emissions reduction benefits of battery electric buses are all different due to different regional power structures. Specifically, the energy benefits are 7.84%, 11.91%, 26.90%, 11.15%, 19.55% and 20.31% respectively in Huabei, Huadong, Huazhong, Dongbei, Xibei and Nanfang power structure. From the point of comprehensive emissions reduction benefits, there is no benefit in Huabei power structure, as it depends heavily on coal. But in other areas, the comprehensive emissions reduction benefits of BEB are separately 3.46%, 26.81%, 1.17%, 13.74% and 17.48% in Huadong, Huazhong, Dongbei, Xibei and Nanfang. Therefore, it suggests that, enlargement of carrying capacity should be taken as the most prior technology innovation direction for BEB, and the grids power structure should be taken into consideration when the development of BEB is in planning.

Key words: life cycle assessment; travel service; battery electric bus; energy conservation benefits; emissions reduction benefits

近年来,随着我国城市公交行业的快速发展,城市公交车拥有量增长迅速,运营数量由 1990 年的 6.2 万辆增长到 2010 年的 38.3 万辆,20 年增长率高达 517.74%^[1],其背后带来了城市客运出行能耗及环境污染物排放的迅速增长. 发展新能源公交车是削减城市公共交通环境影响的有效手段,其中纯电动车是解决当前城市交通环境问题的重要车型^[2~4]. 纯电动公交车的动力源于电池

存储的电能,行驶阶段属于“低能耗、零排放”,然而电力生产过程,特别是当前我国以燃煤为主的火力发电过程大量消耗资源能源和排放 SO₂、NO_x 和 PM 等污染物. 因此,从生命周期角度来看,纯

收稿日期: 2014-12-13; 修订日期: 2015-04-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05140200)

作者简介: 林晓丹(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向环境规划与评价,E-mail: danlin1215@126.com

* 通讯联系人,E-mail: tianliang0606@163.com

电动公交车并非实现真正的“零排放”,并且不同发电结构可能将对纯电动公交车的环境表现产生显著影响。

由于公交车的本质是提供出行服务,若选择单位里程作为功能单位,难以体现不同类型公交车之间的服务功能差异和环境表现差异。所以,选择更符合车辆实际运营情况的功能单位进行比较,将能更加准确真实的反映纯电动公交车的环境表现。此外,当前针对纯电动公交车生命周期环境影响的研究均主要围绕能耗及温室气体排放的定性或定量分析^[5-9],较少关注其他类型的环境污染物,例如 CO、NO_x 和 PM 等。

因此,本研究拟采用生命周期评价方法,以“一定量的出行服务”作为功能单位,核算纯电动公交车生命周期不同阶段的能耗及多种污染物的排放。同时结合我国华北、华东、华中、东北、西北和南方等不同电网结构进行多种情景比较,核算纯电动公交车的全生命周期能耗及排放,评价不同能源发电结构下的纯电动公交车的节能减排效益,以期为不同区域纯电动公交车的发展规划提供科学的支持和参考借鉴。

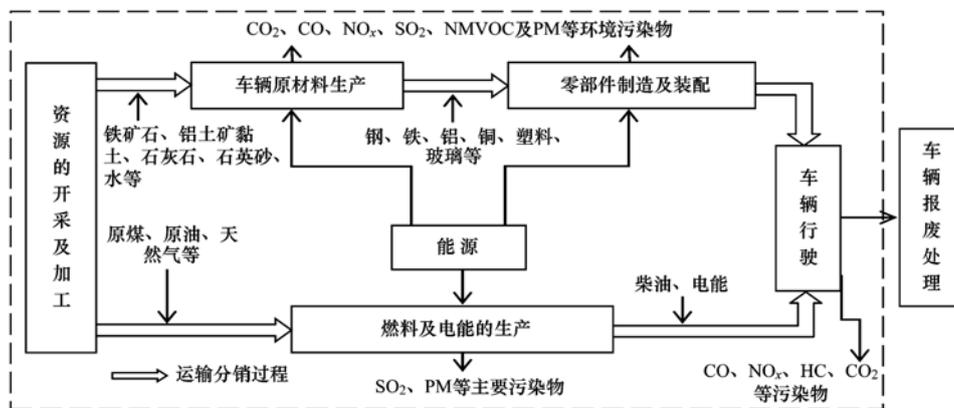


图1 系统边界

Fig. 1 System boundary

1.1.3 功能单位

功能单位是进行产品或系统生命周期环境影响评价的重要度量单位,其目的在于提供标准化的输入和输出数据,并确保评价结果可以进行比较,合理的功能单位更能体现评价结果的客观性和准确性。

当前关于电动汽车环境影响的多数研究中,选取的功能单位一般为单辆车或里程^[6-9,13]。而本研究认为公交车的基本功能是为乘客的出行提供服务,选取出行服务量(人·km)作为功能单位更为合理。

1 材料与方法

1.1 研究范围及数据来源

1.1.1 研究对象

本研究选取的研究对象类型为由磷酸铁锂电池供电的纯电动公交车及传统的柴油公交车,均为 12 m 长公交车,该类车型占据到全国运营公交车总量的 60% 以上^[10],是全国大中城市主干线路的重点车型。用于采集数据的具体产品为 2012 年全国销售量第一的某品牌城市客车,其市场占有率达 28%^[11],各车型的整备质量、额定载客量等技术参数均参考公交车出厂公共技术参数^[12]。

1.1.2 系统边界

研究范围包括车辆原材料生产、零部件制造及装配、运输分销、车辆行驶、燃料及电能生产等 5 个阶段(图 1)。因基础设施(公交车站等基础设施、能源生产基础设施等)建立后运行的年限较长^[9],分配至单辆车的生命周期环境影响较小,因此本研究不将其列入评价范围。此外,鉴于当前我国纯电动公交车尚未规模化进入报废阶段,报废处理工作尚不规范,数据可得性较差,同样未列入评价范围。

因此,本研究选取满足 10 000 人·km 的日出行服务(日有效生产率)作为功能单位。其中,日有效生产率是指一辆车在 1 d 内所能完成的客运周转量,即交通运输工具 1 d 内乘客的数量与出行距离的乘积。

1.1.4 数据来源

基础数据收集是开展生命周期清单分析及影响评价的前提条件。本研究的基础数据来源主要包括:国内某汽车企业生产数据、PE-Gabi 数据库、Ecoinvent2.1、统计年鉴以及其他公开发表的研究数据,详见表 1。

表 1 生命周期数据来源
Table 1 Data source of life cycle

生命周期	数据类别	数据来源
原材料生产阶段	钢、铁、铝、铜、镁、塑料、玻璃、橡胶、油漆等材料	文献[9,13]; 相应的输入输出清单来源 Gabi6 数据库和 Ecoinvent2.1
零部件制造及装配阶段	车身、电动机、发电机、减速装置、底盘、发动机以及变速箱等零部件制造及整车组装	国内某汽车企业生产数据(包括冲压、焊装、涂装和总装 4 个过程)
	铅蓄电池和磷酸铁锂动力电池	文献[9,14~16]
运输及分销阶段	从矿产资源区到原材料生产厂到零部件及整车制造厂再到公交车场站等过程	文献[17]
能源生产及车辆行驶阶段	能源生产(柴油及电能) 行驶阶段的能耗数据	Gabi6 数据库(中国数据) 文献资料[6,18,19]

纯电动汽车生命周期环境影响的大小主要随能源发电结构而变化。中国各个区域电网的能源发电结构存在显著差异^[20],如表 2 所示。因此,本研究将依据我国 6 大区域电网结构针对纯电动公交车的生命周期环境影响设置对比情景分析。其中,火力发电主要包括燃煤、燃油和燃气等类别,本研究根据中国电力行业统计资料以及每一区域电网的能源

消耗情况将火力发电比重折算成燃煤、燃油和燃气这 3 个类别。

由于柴油公交车生命周期能耗和排放强度在一定空间内是相对稳定的,因此,本研究取全国平均值进行分析。此外,行驶阶段的柴油公交车和纯电动公交车的能耗值分别取平均值 $0.4 \text{ L}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

表 2 2010 年全国不同区域电网能源发电结构/%

Table 2 Power generation structure in different regions in 2010/%

能源类型	华北电网	华东电网	华中电网	东北电网	西北电网	南方电网	全国电网
燃煤	90.44	80.16	58.66	83.66	72.53	67.57	76.25
燃油	0.15	0.3	0.09	0.11	0.03	1.56	0.38
燃气	7.66	7.49	4.02	5.54	2.77	4.26	1.84
水电	0.61	7.41	37.59	5.54	23.05	21.67	16.24
核电	—	4.21	—	—	—	3.66	1.77
新能源	1.14	0.44	0.14	5.14	1.62	1.40	1.17

1.2 评价工具及方法

本研究应用德国 PE 公司开发生命周期环境影响评价软件 Gabi6 进行建模,并开展纯电动公交车出行服务的生命周期能耗及(CO₂、CO、NO_x、SO₂、PM)排放评价。

同时,通过针对生命周期物质输入输出清单的分析,选取上述能耗及排放指标,与柴油公交车进行对比分析,评估在完成相同出行服务量时所能获取的节能减排效益。相应的核算方法为:

$$EC_{ij} = (Ed_j - Ee_{ij})/Ed_j \times 100\% \quad (1)$$

式中,EC_{ij}为第*i*发电区域纯电动公交车在满足一定出行服务所获取的第*j*类节能减排效益;Ed_j为柴油公交车在满足一定出行服务所产生的第*j*类能耗或排放;Ee_{ij}为第*i*区域发电结构纯电动公交车在满足一定出行服务所产生的第*j*类能耗或排放;其中,*i*表示全国平均电网或不同区域电网(华北、华东、华中、东北、西北、南方);*j*表示能耗或(CO₂、CO、

NO_x、SO₂、PM)排放等 6 类影响指标。

1.3 生命周期参数分析

评价城市公交车出行服务的生命周期环境影响,需要确定满足一定出行服务量所需的公交车服务数量和服务里程,以及确定环境负荷系数来合理量化车辆原材料生产、零部件制造及装配和运输分销等阶段的实际环境影响。

满足一定出行服务所需公交车的服务数量为:

$$N = X/(l \times a \times p) \quad (2)$$

式中,*N*为在一定时间内,满足一定出行服务量所需公交车的出行服务数量(辆);*X*为在一定时间内,满足一定出行的服务量(人·km);*l*为一定时间内,公交车的出行服务运营里程(km);*a*为平均满载系数;*p*为公交车的额定载客量(人)。

满足一定出行服务所需公交车的服务里程为:

$$L = X/(p \times a) \quad (3)$$

式中,*L*为一定时间内,满足一定出行服务量公交车

所需运营的服务里程(km); X 为在一定时间内, 满足特定出行的服务量(人·km); p 为公交车的额定载客量(人); a 为平均满载系数。

生命周期环境影响负荷系数为:

$$\delta = s/S \times 100\% \quad (4)$$

式中, δ 为生命周期环境负荷系数; s 为在一定时间内, 公交车的运营服务里程(km); S 为(公交车/磷酸铁锂电池)在使用寿命内完成报废的运营里程(km)。除了当前锂电池技术寿命较短外(生命周期报废里程仅为 13 万 km)^[6,9], 本研究假设当前公交车的其他部件报废里程可达到机动车的报废里程(40 万 km)。

根据商务部最新机动车报废标准^[21], 可得城市公交客车的报废里程为 40 万 km。根据城市公交行业管理规范, 结合调研^[22-24], 假设当前城市公交车平均满载系数(a)为 0.5。当前中国城市公交车的年均运营里程约为 70 000 km^[25], 即日平均运营里程(s)为 195 km。根据平均满载系数为有效载客量与额定载客量的比值可测算各型公交车的有效载客量(Q), 日出行服务(W)则通过有效载客量(Q)与日均出行服务里程(s)的乘积求得。因此, 结合公式(2)~(4)可整理纯电动公交车和柴油公交车在满足 10 000 人·km 日出行服务的相关参数(表 3)。

表 3 各型公交车在满足 10 000 人·km 的日出行服务参数¹⁾

Table 3 Travel service parameters of 10 000 passenger-kilometer per day of different buses

公交车 车型	有效载客量(Q) /人次	日出行服务(W) /人·km	总服务数量(N) /辆	总服务里程(L) /km	环境负荷系数(δ) 公交车/电池
BEB	43.50	8482.50	1.18	229.88	0.05%/0.15%
CDB	50.00	9750.00	1.03	200.00	0.05%/0.05%

1) 纯电动公交车(battery electric bus, BEB)和柴油公交车(conventional diesel bus, CDB), 下同

2 结果与分析

2.1 生命周期不同阶段能耗及排放

结合生命周期清单数据, 核算全国平均电网发电结构下的纯电动和柴油公交车在满足相同出行服

务时的生命周期不同阶段的能耗及排放强度(图 2)。

由图 2 可知, 燃料生产是纯电动公交车的主要生命周期阶段, 占据 78%~92%; 其次为原材料生产阶段和零部件制造及装配阶段, 分别占据 2%~

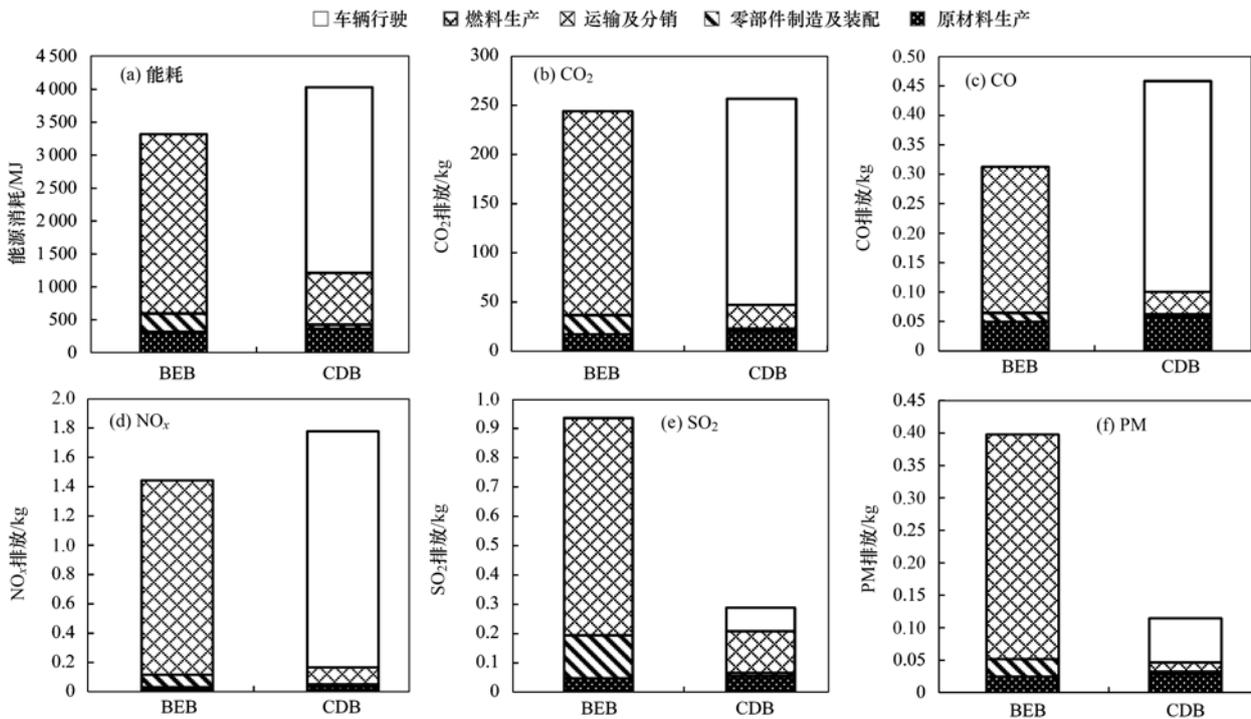


图 2 纯电动和柴油公交车生命周期不同阶段能耗及排放

Fig. 2 Energy consumption and emissions of battery electric buses and diesel buses in different the life cycle stages

16% 和 4% ~ 16%, 运输及分销阶段环境影响较小, 低于 1%。柴油公交车除 SO₂ 外, 其他能耗及排放主要产生于车辆行驶阶段, 占据 60% ~ 90% 左右, 其次为原材料生产阶段, 占据 2% ~ 25%, 燃料生产阶段占据 6% ~ 20%; SO₂ 主要产生于燃料生产阶段, 占 49.23%, 车辆行驶阶段占 27.72%, SO₂ 原材料生产阶段占 19.48%; 零部件制造及装配阶段和运输分销阶段环境影响较小, 不到 3%。

由图 2 同样可知, 纯电动公交车在能耗、CO₂、CO 和 NO_x 等的减排效果较好, 主要原因可能在于柴油公交车行驶过程大量消耗化石能源和排放 CO₂、CO 和 NO_x 等气体, 使得柴油公交车全生命周期能耗、CO₂、CO 和 NO_x 排放均高于纯电动公交车。同样地, 由于电能生产过程排放大量 SO₂ 和 PM, 造成纯电动公交车全生命周期 SO₂ 和 PM 排放远高于柴油公交车, 不具减排效益。

此外, 结合参数分析可知, 纯电动公交车在车辆原材料生产、零部件制造及装配和运输分销阶段的

总能耗及排放均高于柴油公交车。究其原因在于纯电动公交车的载客能力较柴油公交车低 15% 左右, 在完成相同的出行服务需求时所需车辆运营服务数量较多。因此, 开展纯电动公交车载客性能技术研发以提高载客能力对实现节能减排不容忽视。

2.2 不同区域电网结构下的节能减排效益

结合中国 6 大区域电网结构分别核算不同能源发电结构下发展纯电动公交车在满足 10 000 人·km 出行服务的能耗及排放强度(表 4 和表 5)。

2.2.1 全生命周期节能效益

由表 4 可知, 相对于柴油公交车, 不同电网结构下发展纯电动公交车均具有不同程度的全生命周期节能效益。其中, 华中地区发展纯电动公交车所产生的全生命周期能耗最低, 节能效益达 26.92%; 其次为南方、西北地区, 分别为 20.31%、19.55%; 华东、东北和华北地区的节能效益较差, 究其原因主要在于当前我国于华东、东北和华北地区电网发电结构的火力发电占比高于华中、南方和西北地区。

表 4 纯电动和柴油公交车全生命周期能源消耗

Table 4 Energy consumption of battery electric buses and diesel buses in the whole life cycle

项目	华北 BEB	华东 BEB	华中 BEB	东北 BEB	西北 BEB	南方 BEB	全国 CDB
能耗/MJ	3 622.91	3 462.91	2 872.91	3 492.91	3 162.91	3 132.91	3 931.32

2.2.2 全生命周期污染物减排效益

由表 5 可知, 在满足 10 000 人·km 出行服务时, 当前华北电网结构下发展纯电动公交车以替代柴油公交车出行未能获得 CO₂ 减排效益, 而华东、华中、东北、西北和南方电网结构下发展纯电动公交车均能获取不同程度的 CO₂ 减排效益。同样地, 不同发展区域提倡纯电动公交车替代柴油公交车出行均能

产生更少的 CO 和 NO_x 排放, 特别是华中地区因能源发电结构相对较好, 相应 CO 和 NO_x 的减排效益分别可达 43.34% 和 36.24%。然而当前全国不同发展区域的能源发电结构仍主要以火力发电为主, 使得各个区域发展纯电动公交车的 SO₂ 和 PM 排放均远高于柴油公交车, 基于全生命周期视角下纯电动公交车完全没有 SO₂ 和 PM 减排效益。

表 5 纯电动和柴油公交车生命周期环境排放

Table 5 Environmental emissions of battery electric buses and diesel buses of the whole life cycle

环境排放指标	CO ₂ /kg	CO/g	NO _x /g	SO ₂ /g	PM/g
华北 BEB	287.57	362.11	1 685.29	1 058.21	351.95
华东 BEB	260.57	330.11	1 505.29	968.21	314.95
华中 BEB	197.57	254.11	1 125.29	749.21	236.95
东北 BEB	266.57	338.11	1 565.29	992.21	327.95
西北 BEB	232.57	298.11	1 365.29	881.21	287.95
南方 BEB	222.57	286.11	1 285.29	853.21	269.95
CDB	272.09	448.46	1 764.94	278.49	84.83

2.3 生命周期污染物排放综合评价

各种产品或服务在生命周期过程都将产生能耗及排放, 而且污染物排放是一个多指标的评价问题, 在对比不同类型(纯电动和柴油)公交车出行的污染物排放指标时, 均有可能存在优势与劣势, 难以确

定哪一车型更有利于减少污染物排放。因此, 本研究通过归类、特征化、归一化加权等步骤进行生命周期污染物排放综合评价。

首先, 将清单分析所得到的上述主要大气污染物排放归类到相应的环境影响类别; 其次, 结合特

征化因子折算并累加一起算出环境影响潜值,如生命周期中各种温室气体(CO₂和CH₄等)可折算成CO₂当量并累加为全球变暖,酸化包括SO₂和NO_x,光化学烟雾包括NO_x、CH₄和CO,烟尘粉尘为PM,本研究的特征化核算由Gabi6软件执行;最后,针对特征化结果进行归一化加权,算出纯电动公交车和柴油公交车的全生命周期综合环境影响潜值并进行比较.本研究归一化与加权参考文献[26,27]构

建了大气污染物环境影响当量指标,并按照各当量物质的价格确定相应的权重针对当前主要大气污染物排放进行综合评价.相应地全球变暖、酸化、光化学烟雾和烟尘粉尘的价格权重分别为0.8%、4.6%、93.5%和1.1%.

因此,通过以上步骤可核算出不同电网结构下的纯电动和柴油公交车的生命周期综合环境影响潜值(表6).

表6 不同电网结构的生命周期综合环境影响潜值/g

Table 6 Comprehensive environment impact potentials of life cycle under different power structures/g

华北 BEB	华东 BEB	华中 BEB	东北 BEB	西北 BEB	南方 BEB	全国 CDB
2 460.68	2 228.81	1 689.77	2 281.77	1 991.54	1 905.07	2 308.71

由表6可看出,在不同电网结构下,纯电动公交车全生命周期综合环境影响潜值与能耗强度基本相似.除华北地区外,其他区域发展纯电动公交车以替代柴油公交车出行在综合减排效益方面均有优势.其中,华中地区因发电能源结构较为完善,相应的综合减排效益最好,可以兼顾充电基础设施的发展情况,积极推广纯电动公交车;而华北地区在能源发电结构达不到其他区域电网结构的水平时,尚不应积极推广纯电动公交车.

2.4 不确定性及敏感性分析

平均满载系数是核算公交车出行服务环境影响的一个关键参数,其数值的变动对公交出行服务质量存在较大影响,且各区域之间具有差异.因此,以纯电动公交车的生命周期节能效益为例,进行平均满载系数的不确定性及敏感性分析.当平均满载系数分别变化 $\pm 10\%$ 时,各个区域电网结构下的纯电动公交车生命周期节能效益如表7所示.

表7 平均满载系数的不确定性分析/%

Table 7 Uncertainty analysis of the average load factor/%

变动幅度	华北电网	华东电网	华中电网	东北电网	西北电网	南方电网
+10	7.7	11.7	26.8	11.2	19.7	20.1
-10	7.7	11.7	26.8	11.1	19.5	20.3

由表7可知,虽然平均满载系数是影响公交出行服务质量的关键参数,但对本研究评价纯电动公交车生命周期节能减排效益不存在显著影响.因此,本研究选取的公交车平均满载系数对本评价目标是合理可行的.

3 讨论

本研究通过模拟当前纯电动公交车的实际出行状况,基于生命周期的两个关键影响因素,与柴油公交车的能耗及排放进行对比分析.如载客能力的高低直接影响所需的公交车辆数和公交运营里程,进而影响全生命周期的能耗及排放;能源发电结构的优劣直接影响电能生产阶段的能耗及排放.

通过文献[6,7]对我国纯电动公交车的碳排放进行研究,结果表明,基于运营里程的视角下,纯电动公交车的减排效果优于本文的研究结果.原因主要有两点:其一该研究重点考虑燃料生产和车辆行驶阶段

的碳排放,而本研究同时考虑了车辆原材料生产、零部件制造及装配等阶段,且纯电动公交车在车辆原材料生产、零部件制造及装配等阶段的能耗和碳排放强度均高于柴油公交车的相应生命周期阶段;其二本文以出行服务作为功能单位,同时考虑了公交车的服务数量和服务里程,造成行驶过程所减少的碳排放被车辆生产过程多产生的碳排放所抵消.

已有研究主要以全国平均电网结构对城市纯电动公交车进行生命周期节能减排效果评价^[6,7],并以此作为纯电动公交车在全国各大城市推广的参考依据.当前中国各大区域电网发电结构存在显著差异因此,较全国平均电网的核算结果,基于各个区域电网发电结构核算纯电动公交车的生命周期节能减排效益可能更具准确、科学的参考价值.

此外,因本研究的重点是基于当前的实际情况评价纯电动公交车的节能减排效益,重点考虑了载客量和不同能源发电结构两个关键影响因素,然而

影响城市公交车运行过程节能减排的实际参数还有多个,例如运速和加载空调运营情况,鉴于公交车运行过程模拟设置和数据收集的耗时和难度,本研究尚未针对后两个参数进行探讨。

4 结论及建议

(1)在满足相同出行服务时,虽然纯电动公交车行驶阶段“低能耗、零排放”,但电能生产为纯电动公交车的生命周期的主要能耗及排放阶段,其值可达燃油公交车行驶阶段的能耗及排放强度。

(2)由于本研究选取一定出行服务量为功能单位,需要同时考虑公交车出行的服务数量和服务里程,因当前纯电动公交车的载客能力低于柴油公交车,造成车辆行驶过程所产生的节能减排效益受到部分抵消。

(3)华北、华东、华中、东北、西北和南方等不同区域电网结构下,发展纯电动公交车替代柴油公交车均具有较好的节能效益,分别可达 7.84%、11.91%、26.90%、11.15%、19.55%和 20.31%。

(4)相对于柴油公交车,纯电动公交车在单独比较 CO₂、CO、NO_x、SO₂ 和 PM 等主要污染物减排上均存有优势与劣势。通过比较污染物综合减排效益发现,除华北地区不存在减排效益外,华东、华中、东北、西北和南方地区发展纯电动公交车均具有不等的减排效益,分别为 3.46%、26.81%、1.17%、13.74%和 17.48%。

(5)建议应加强纯电动公交车的载客技术研发,提高有效载客能力以加大纯电动公交车的节能减排空间。同时,应结合华北电网结构的改造升级,合理有序地发展纯电动公交车;其他地区,则可加快向纯电动公交车方向转型。

参考文献:

- [1] 中国交通运输协会. 中国交通年鉴 2013[M]. 北京: 中国交通出版社, 2013.
- [2] Fischer M, Wathew M, Schwartz P V. Batteries: higher energy density than gasoline? [J]. *Energy Policy*, 2009, **37**(7): 2639-2641.
- [3] Van Mierlo J, Maggetto G. Fuel cell or battery: electric cars are the future[J]. *Fuel Cells*, 2007, **7**(2): 165-173.
- [4] Wathew M, Fischer M, Schwartz P V. Batteries: lower cost than gasoline? [J]. *Energy Policy*, 2009, **37**(7): 2465-2468.
- [5] Wu Y, Yang Z D, Lin B H, et al. Energy consumption and CO₂ emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China[J]. *Energy Policy*, 2012, **48**: 537-550.
- [6] 王宁, 龚在研, 马钧. 基于经济与排放效益的混合动力和纯电动公交车发展前景分析[J]. *中国软科学*, 2011, (12): 57-65.
- [7] Ou X M, Zhang X L, Chang S Y. Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations [J]. *Energy Policy*, 2010, **38**(1): 406-418.
- [8] Ally J, Pryor T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, **170**(2): 401-411.
- [9] Sánchez J A G, Martínez J M L, Martín J L, et al. Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008-2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of electric, hybrid diesel-electric, fuel cell hybrid and diesel bus of the Madrid transportation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, **74**: 332-343.
- [10] 和讯网. 2012 年前五月十大城市公交市场剖析[EB/OL]. <http://auto.hexun.com/2012-07-09/143340715.html>, 2012-07-09.
- [11] 慧眼看车. 2012 年中国客车企业销量排名(全年) [OL]. <http://www.yanglihui.com/kec/kepq2012.html>, 2014-07-15.
- [12] 中国汽车网. 城市公交车[EB/OL]. http://www.chinacar.com.cn/keche/chengshigongjiao_5, 2014-02-15.
- [13] Sánchez J A G, Martínez J M L, Martín J L, et al. Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system[J]. *Energy*, 2012, **47**(1): 174-198.
- [14] 唐邦强. 合肥市纯电动公交车工况及能量控制策略研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011. 19-20.
- [15] 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. 16-24.
- [16] Sullivan J L, Gaines L. Status of life cycle inventories for batteries[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, **58**: 134-148.
- [17] 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.
- [18] Zhang Q Y, Tian W L, Zheng Y Y, et al. Fuel consumption from vehicles of China until 2030 in Energy Scenarios [J]. *Energy Policy*, 2010, **38**(11): 6860-6867.
- [19] Huo H, He K B, Wang M, et al. Vehicle technologies, fuel-economy policies, and fuel-consumption rates of Chinese vehicles [J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 30-36.
- [20] 国家电网公司年鉴编辑委员会. 国家电网公司年鉴 2011 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [21] 中华人民共和国商务部. 机动车强制报废标准规定(征求意见稿)[S]. 北京: 中华人民共和国商务部, 2011.
- [22] 石磊, 王岐东, 付明亮. 应用居民出行状况估算北京市机动车污染排放量[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2009, **27**(2): 112-116.
- [23] 杨薇, 谭英嘉, 葛宏伟. 公交线路规划与服务评价中满载率指标的应用研究[J]. *公路*, 2014, (3): 12-15.
- [24] 刘欢, 李文权. 城市公交调度中满载率问题的研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2008, **6**(4): 104-109.
- [25] Huo H, Zhang Q, He K B, et al. Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend [J]. *Energy Policy*, 2012, **43**: 6-16.
- [26] 毛显强, 邢有凯, 胡涛, 等. 中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 748-756.
- [27] 高玉冰, 毛显强, 杨舒茜, 等. 基于 LCA 的新能源轿车节能减排效果分析与评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(5): 1504-1512.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggy Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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