

# 电动汽车充电站选址研究进展

曹小曙, 胡培婷, 刘 丹

(中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

**摘 要:**在电动汽车产业高速发展的科技浪潮中,充电站选址未来将成为城市发展战略布局不可或缺的一部分,深受交通工程、电力能源、管理学等各领域学者的广泛关注。已有的综述类文章缺乏对充电站选址相关研究进行全面梳理,论文利用CiteSpace软件对电动汽车充电站选址文献进行梳理,一方面归纳总结2009—2017年间国内外该研究主题的研究现状和热点,对其进行可视化分析;另一方面梳理充电站选址影响因素、选址方法和选址的成本-效益评估等研究内容,同时对国内外充电站选址研究的趋势予以简要介绍,厘清研究发展脉络,为充电站选址在地理学中的研究和实践提供方法和指引。未来,随着各地新能源汽车充电站选址研究的不断发展,有望在充电站选址布局中识别多元化和精细化充电需求和服务、统筹不同主体间成本-效益目标等方面不断完善,从而优化城市交通网络及基础设施布局,为新一轮的城市规划提供指引。

**关键词:**电动汽车充电站;选址;研究进展;CiteSpace

从20世纪70至90年代,美国、法国、日本等发达国家在新能源汽车的应用和商业化开发方面,通过投入大量资金、研发新技术、立法、出台政策、设立专项补贴等手段支持新能源汽车行业发展,意图通过新能源的发展应用以降低对外部石油的依赖程度、确保国家的能源安全和减少温室气体的排放对全球气候的影响。2010年随着电池技术的逐渐成熟与应用、各国对新能源产业的大力推动、电动汽车的市场化推广,充电站选址已成为城市发展战略布局的一部分。中国前后有12个部委相继出台政策20多项,在科技攻关、产业布局、示范运行、鼓励政策、资金倾斜等方面给予了新能源汽车产业极大的支持(孙丽玮, 2012)。2015年中国新能源汽车呈现爆发式增长,据公安部交管局统计,截至2015年底,新能源汽车保有量达58.32万辆,与2014年相比增长169.48%。其中,纯电动汽车保有量33.2万辆,占新能源汽车总量的56.93%,与2014年相比增长317.06%<sup>①</sup>。

“充电站选址”孕育于快速发展的科技浪潮以

及不断推进的新能源产业发展中,自20世纪90年代初,国外学者开始关注替代能源汽车续航里程的选址问题,学者们根据替代能源(天然气、氢能等能源)汽车的特点首先提出截流模型,丰富了选址方法的研究。而伴随着大容量电池的研制成熟和使用,在21世纪初研究人员开始将经典的选址方法应用到电动车辆充电站选址研究中(Hodgson, 1990; Hodgson et al, 1992; Berman et al, 1998)。此后,在政府与市场双重推动下,新能源汽车充电站的选址开始成为设施选址下的一个热点,研究方法不断创新,研究内容更加丰富,研究体系更加完善。国内外均有学者对充电站选址布局的模型方法作了概括性的总结(Lim et al, 2010; 刘锴等, 2015),但主要是对选址模型方法的介绍。而充电站选址作为设施选址的一部分,还包括选址的因素分析以及选址评价等内容;同时,其作为设施选址研究中新的热点,具有与其他设施不同的特性,因此,需要从新的角度对“充电站选址”研究成果展开阶段性的梳理,识别充电站选址研究的知识聚类。

收稿日期:2018-01-16;修订日期:2018-10-25。

基金项目:国家自然科学基金项目(41171139)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41171139.]

第一作者简介:曹小曙(1970—),男,甘肃人,教授,博士生导师,主要从事地理与规划研究。E-mail: caoxsh@mail.sysu.edu.cn

① 资料来源:中华人民共和国公安部, <http://www.mps.gov.cn/n2254098/n4904352/c5141532/content.html>。

引用格式:曹小曙, 胡培婷, 刘丹. 2019. 电动汽车充电站选址研究进展 [J]. 地理科学进展, 38(1): 139-152. [Cao X S, Hu P T, Liu D. 2019. Progress of research on electric vehicle charging stations. Progress in Geography, 38(1): 139-152.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.012

目前的城市电动汽车以及充电站布局都还是未成熟的新兴事物,从地理学视角来看,城市发展电动汽车及配套充电站选址等问题,关系到城市交通方式及城市交通服务设施的变革,进一步对城市现有道路结构调整优化、城市未来规划都有着十分重要的影响,因此非常有必要对其进行深入研究。与此同时,充电站的选址布局也将为城市发展带来一系列的新问题:充电站与传统油气站的布局关系问题、不同选址策略对城市空间结构及形态的影响,以及选址布局如何与城市规划相协调等。文章尝试利用文献计量方法进行量化分析,借助知识图谱探寻国内外充电站选址领域的研究现状,更客观地揭示该研究领域研究态势,以便更好地进行深入研究,并为充电站选址领域研究前沿与热点的挖掘提供一种新思路。在此基础上探索充电站选址研究在地理学领域的应用,为今后的相关研究及问题解决提供参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

CiteSpace是一款分析、挖掘和可视化科研文献数据的应用软件,可以通过该软件分析研究领域中的核心文献、核心作者和研究热点,厘清研究领域的发展过程,预测未来发展动向。本文在Java 8环境下应用CiteSpace III的CNKI分析板块和Web of Science分析板块对文献进行知识图谱分析。

随着新能源汽车成为石油资源短缺、汽车尾气污染等不断凸显的问题的解决办法之一,各国极力推动新能源汽车产业发展、普及新能源汽车使用,因此不可避免地需要布局新能源汽车充电设施,即EVCS (Electrical Vehicle Charging Stations)。如何使充电站设施规划选址达到成本-效益的最优是新能源汽车普及推广的关键。本文关注新能源汽车充电站选址的全过程,包括充电站选址的影响因素、选址方法和模型、选址影响及评价等。由此确定检索的条目在CNKI数据库和Web of Science核心数据库中进行检索,检索篇名为电动汽车充电站/设施((electric vehicle) AND (station\* OR infrastructure\* OR facility\*)),主题为选址(location OR deployment OR sitting)、规划布局(planning),时间跨度为2000年1月至2017年12月,精确匹配检索。为保证分析的准确性和客观性,本文对检索出的相关文献和书的章节除重、整理,删除不相关条目,计

280篇相关文献作为此次研究的基础文献。

## 2 基于CiteSpace的充电站选址研究进展

### 2.1 发展阶段

梳理科学文献的发文量有助于我们了解研究领域的发展脉络。从图1中可以看出,近年来充电站选址研究发展迅猛,截至2017年12月充电站选址文献研究经历了缓慢增加—稳定发展—急剧发展三个阶段,随着各国极力推动新能源汽车产业发展、普及新能源汽车使用,充电站选址研究不断受到学者们的关注和重视。在技术条件逐步成熟、科技水平极大发展的背景下,面对充电站规划的现实需求,自2009年开始国内外的学者们在替换能源站选址、电动踏板车选址的基础上逐渐展开了电动汽车充电站选址的理论研究。到2017年,充电站选址研究国内外文献已达280篇,充电站选址成为目前设施选址研究的一个热点,一定程度上体现了研究的热度与政策导向的关系。

### 2.2 研究前沿与热点分析

首先借助CiteSpace筛选出国内外2009—2017年充电站选址研究被引排名前10的文献(表1、表2)。引用次数是判断文献影响力的一个常用测度指标,通过对表1和表2中高被引文献的分析与解读后发现,国外高被引文献的发表时间集中在2013年,国内集中在2009—2012年,高被引文献研究内容主要集中于充电站的最优选址布局和规划优化、充电站选址方法、充电站选址的评价等。

其次,如表1、表2和图2所示,充电站选址研究作为设施选址研究中的一部分,研究内容综合了各领域的研究成果,国外充电站选址的研究主要集中在

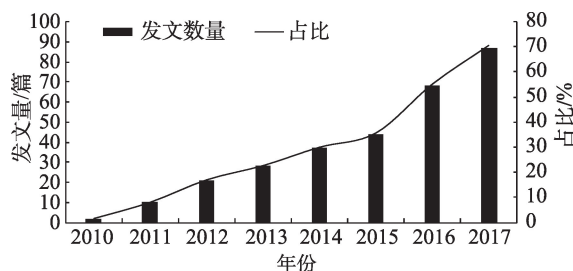


图1 2010—2017年充电站选址研究领域发文数量

Fig.1 The number of published articles on charging station location research, 2010–2017

表1 国外充电站选址研究高被引文献(前10)

| Tab.1 Highly cited articles of international research on charging station location (Top 10) |   |  |      |
|---|---|--|------|
| 文献  | 文献题目  | 发表期刊                                       | 被引频次 |
| He et al, 2013  | Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles   | <i>Transport RES B-METH</i>                | 96   |
| Liu et al, 2013   | Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems  | <i>IEEE Transactions on Power Delivery</i> | 84   |
| Dong et al, 2014  | Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data | <i>Transport RES C-EMER</i>                | 62   |
| Frade et al, 2011   | Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal                               | <i>Transport RES REC</i>                   | 57   |
| Mak et al, 2013   | Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping   | <i>Manage SCI</i>                          | 53   |
| Wang et al, 2013  | Traffic-constrained multi-objective planning of electric-vehicle charging stations  | <i>IEEE Transactions on Power Delivery</i> | 43   |
| Xi et al, 2013  | Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure                                 | <i>Transport RES D-TR E</i>                | 40   |
| Nie et al, 2013   | A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure  | <i>Transport RES B-METH</i>                | 36   |
| Sadeghi-Barzani et al, 2014   | Optimal fast charging station placing and sizing  | <i>Apply Energy</i>                        | 34   |
| Sathaye et al, 2013   | An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors                                   | <i>Transport RES E-LOG</i>                 | 32   |
| Guo et al, 2015   | Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective           | <i>Apply Energy</i>                        | 29   |

表2 国内充电站选址研究高被引文献(前10)

| Tab.2 Highly cited articles of domestic research on charging station location (Top 10) |   |             |      |
|--|---|-------------|------|
| 文献   | 文献题目                                      | 发表期刊        | 被引频次 |
| 徐凡等, 2009  | 电动汽车充电站布局规划浅析                             | 华东电力        | 262  |
| 刘志鹏等, 2012   | 电动汽车充电站的最优选址和定容                           | 电力系统自动化     | 196  |
| 刘自发等, 2012   | 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局                 | 中国电机工程学报    | 105  |
| 周洪超等, 2011   | 基于博弈论的电动汽车充电站选址优化模型研究                     | 科技与产业       | 73   |
| 刘柏良等, 2015   | 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究                 | 电网技术        | 71   |
| 李菱等, 2011  | 基于遗传算法的电动汽车充电站的布局规划                       | 华东电力        | 64   |
| 葛少云等, 2012   | 电动汽车充电站规划布局与选址方案的优化方法                     | 中国电力        | 47   |
| 张国亮等, 2011   | 多等级电动汽车充电站的选址与算法                          | 山东大学学报(工学版) | 42   |
| 冯超等, 2012  | Delphi 和 GAHP 集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用 | 电力自动化设备     | 39   |
| 徐青山等, 2016   | 考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划                 | 电力系统自动化     | 26   |
| 高亚静等, 2013   | 城市电动汽车充电站两步优化选址方法                         | 中国电力        | 23   |

在交通领域、能源领域、计算机科学领域和管理科学与工程领域,而国内的研究多集中在电力工程领域,相对较单一。国内外的充电站选址研究涉及交通、能源、电力工程三个领域,以不同的研究范式构建充电站选址问题,虽没有直接刊登在地学期刊中,但也在相关期刊中有较多的研究,如《Transport Research》期刊。三大领域的研究提供了不同资源要素约束下选址的方法和案例,这成为经济地理学研究充电站设施选址的理论基础。计算机科学领域和管理科学与工程领域提供精确的技术和方法解决充电站在空间布局和运行效率理论最优的问

题,利用计算机模拟现实路网、充电需求、驾驶员偏好,以使模型求解结果更契合现实需求,为地理学研究真实环境下充电站的选址提供参考。

文献关键词是研究思想核心内容的浓缩与提炼,在 CiteSpace III 中高频度出现的关键词反映了该领域的研究热点。利用 CiteSpace III 设置聚类词来源为标题(title)、摘要(abstract)、作者关键词(author keywords)和增补关键词(keywords plus);聚类词库选择为突现词(burst terms);节点类型为关键词(keyword);提取每个时区中被引频次最高的 50 个关键词,生成的国内外研究关键词图谱如图 3 所



示。2009—2017年中出现次数较高的关键词在图中显示为较大的节点,结合图3和表3的被引频次数据可以看出,出现频率最高的是“电动汽车”“充电站”和“基础设施”,已有研究首先将电动汽车充电站视为具有公共性的基础设施来进行研究。而模型(model)、优化(optimization)、影响(impact)是充电站研究领域的热点,并且近两年来开始从网络(network)和需求预测的角度研究充电站的选址,并更关注充电站选址背后的基础理论问题——选址问题(location problem)。深入到选址优化和选址模型的构建方面,充电站的选址问题是一个NP-hard问题(难以找到多项式算法的问题),因此如何更精确

站研究领域的热点,并且近两年来开始从网络(network)和需求预测的角度研究充电站的选址,并更关注充电站选址背后的基础理论问题——选址问题(location problem)。深入到选址优化和选址模型的构建方面,充电站的选址问题是一个NP-hard问题(难以找到多项式算法的问题),因此如何更精确



图2 充电站选址研究领域  
Fig.2 Focus category of charging station location research

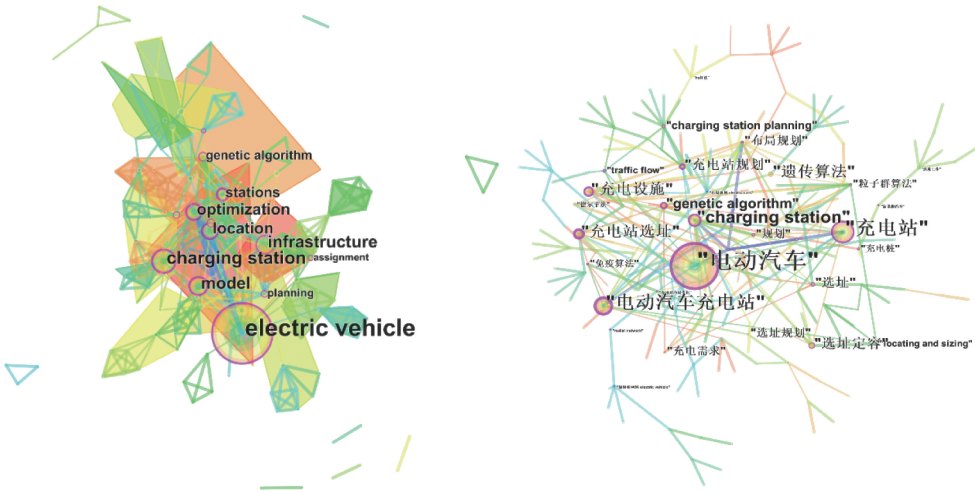


图3 2010—2017年充电站选址研究关键词图谱  
Fig.3 Keywords map of charging station location research, 2010–2017



表3 国内外充电站选址研究高频度关键词

Tab.3 High-frequency keywords of domestic and international research on charging station location

| 国外选址研究高频度关键词      |      |      |      | 国内选址研究高频度关键词 |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|--------------|------|------|------|
| 关键词               | 出现频次 | 中心性  | 出现年份 | 关键词          | 出现频次 | 中心性  | 出现年份 |
| electric vehicle  | 55   | 0.38 | 2011 | 电动汽车         | 81   | 0.63 | 2009 |
| charging station  | 15   | 0.21 | 2013 | 充电站          | 40   | 0.41 | 2009 |
| infrastructure    | 13   | 0.13 | 2013 | 充电设施         | 15   | 0.17 | 2011 |
| model             | 13   | 0.24 | 2012 | 布局规划         | 8    | 0.10 | 2009 |
| optimization      | 9    | 0.28 | 2011 | 充电需求         | 6    | 0.11 | 2016 |
| location          | 4    | 0.24 | 2011 | 规划           | 6    | 0.12 | 2013 |
| Stations          | 3    | 0.21 | 2012 | 充电需求预测       | 4    | 0.02 | 2011 |
| network           | 2    | 0.02 | 2014 | 规划布局         | 3    | 0.02 | 2017 |
| genetic algorithm | 2    | 0.20 | 2014 | 选址模型         | 3    | 0.00 | 2014 |
| Impact            | 2    | 0.07 | 2013 | 优化规划         | 2    | 0.03 | 2012 |

和快速地解决构建的模型需要不断改进算法,因此充电站选址研究中遗传算法(genetic algorithm)的应用和改进也成为研究的热点之一。

在国外文献的分析中将节点类型设置为被引用量(Cited reference)时(图4),表示在按引用量排序前50的文章的关键词网络中,更多地考虑充电公共设施在区域或城市尺度和电力系统、驾驶员行为、交通流量、道路网络、服务能力等因素下如何以最大化充电电流、优化电网负荷和服务容量等为目标进行充电站选址决策。

目前对于充电站选址研究的热点国家有美国、葡萄牙、中国、新加坡、加拿大、土耳其、马来西亚、澳大利亚等(图5),其中中国顺应国家新能源汽车产业发展战略,研究热度排名第三。本文采用文献出现的频率来反映期刊的热度,如图5所示热度前5位的国外期刊,分别为:《Energy Policy》《European Journal of Operational Research》《IEEE Transactions on Power Delivery》《Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review》《Transportation Research Part D: Transport and Environment》,研究仍集中在能源电力、管理科学和交通研究领域。国内研究成果多刊登在《华东电力》《电力系统自动化》《中国电机工程学报》等期刊上,主要集中在能源电力领域。

3 充电站选址研究内容

3.1 充电站选址影响因素研究

对选址影响因素进行研究是作出选址决策的基本前提,选址的影响因素会依据选址目标、发展

阶段和研究尺度上的差异而有所不同,通过对现有文献的梳理可以将影响充电站的选址因素归纳为充电基础设施、EV 驾驶行为、外部环境三大部分,即供给、需求和外部条件三大因素,其中EV 驾驶行为是众多研究的聚焦点,其决定了充电需求的产生和分布特征。

首先,EV 驾驶行为影响充电需求的产生,驾驶活动在充电需求产生的模拟中拆分为出行行为和充电行为两大因素,出行行为因素包括出行的次数、出行的距离、起讫点位置、停留时长等,充电行为因素包括电池行驶里程、电池剩余电能、充电站使用偏好等。土地利用、人口密度和交通流量等因素产生出行行为,Dong 等(2014)模拟司机的驾驶和充电行为,将停车时间较长的活动作为可能充电需求产生时段。在构建理论模型时均认为交通流量大、人口密度高的区域具有较大的充电需求(Sathaye et al, 2013; Yi et al, 2016),同时居住人口数和工作人口数作为产生静态需求的因素(Giménezgaydou et al, 2016)。还有研究认为住宅区、工作区、商务区、道路沿线等具有不同土地利用属性的区域产生不同类型的充电需求(Jia et al, 2014)。González 等(2014)通过对出行活动的分析得出,居住地会产生大量的充电需求,其次是工作活动,最后购物活动对于需求预测也很重要。其次,充电基础设施影响充电的供给,按充电站的类型将其分为插入式充电站和换电站;按权属类型分为公共充电站和私人充电站;按充电站大小可分为有容量限制及无容量限制;按充电等级分为1~4级充电站,在1级或2级(110~240伏)充电站,车辆需要等待2~8 h才能完全充电,在3级充电站,充电一次

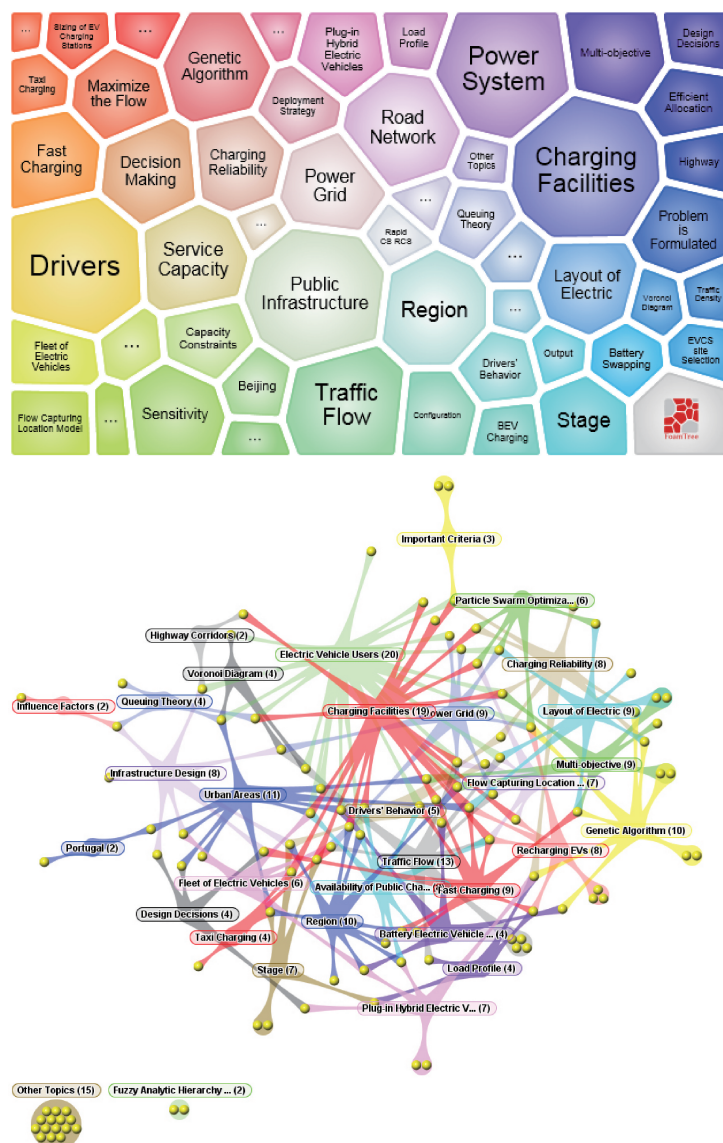


图4 2010—2017年基于被引用量的充电站选址研究关键词图谱

Fig.4 Keywords map of charging station location research based on cited references, 2010–2017

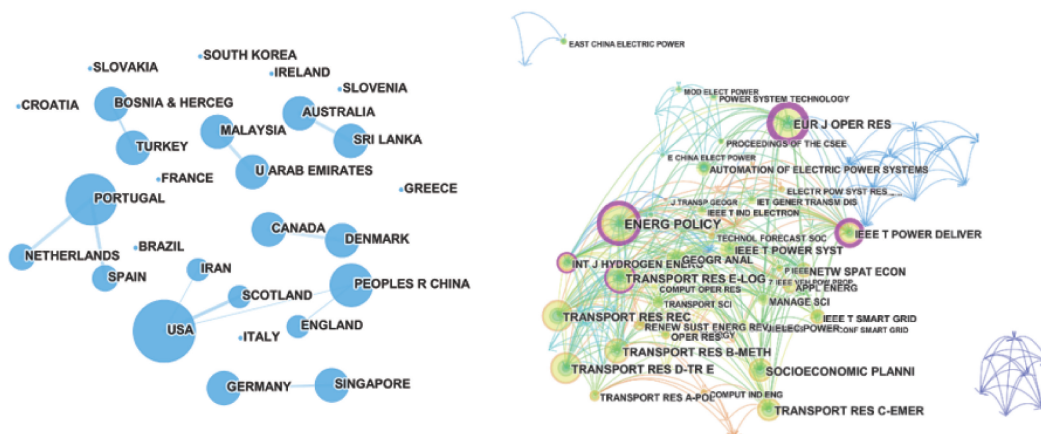


图5 新能源汽车充电站选址研究热点国家和期刊

Fig.5 Focus countries and journals of electric vehicle charging station (EVCS) location

需要 20~40 min (Wang et al, 2009)。以上 4 种分类方式互相补充, 根据不同的充电需求进行配置(图 6)。Hosseini 等(2015)认为充电时间是影响公众接受电动汽车的一个关键因素, 充电站的类型决定了充电时间。快速充电站可以被看作能源补充站, 在合理的时间内可以为电动汽车提供能源需求(Rajabi-Ghahnavieh et al, 2017), 并且可以提高电动汽车在城市间的机动性(Colmenar-Santos et al, 2014)。在布局慢速充电站时, Yang 等(2017)认为居住模式决定了充电站的选址。外部环境因素一般表述为建站的适宜性评估, 包括充电站的土地条件、交通条件、生态环境、与配电站间的距离等。Capar 等(2013)认为只有道路网络上的节点可以作为充电站的候选位置, 并且道路网络的贯通使得相对较少的充电站可以覆盖很大一部分的交通流量。Ghamami 等(2016)认为在州际公路上安装快速充电器对于城市间旅行至关重要。Liu 等(2012)提出了影响充电站选址的 2 个二级因素和 13 个三级因素。

对充电站选址因素的探讨是学者希望通过平衡充电需求和充电供给之间的关系, 使得充电站的选址在理论上达到充电供需平衡, 在实际中充电设施能顺利建成、取得预期效果, 但目前仅关注单方面影响因素的研究居多。

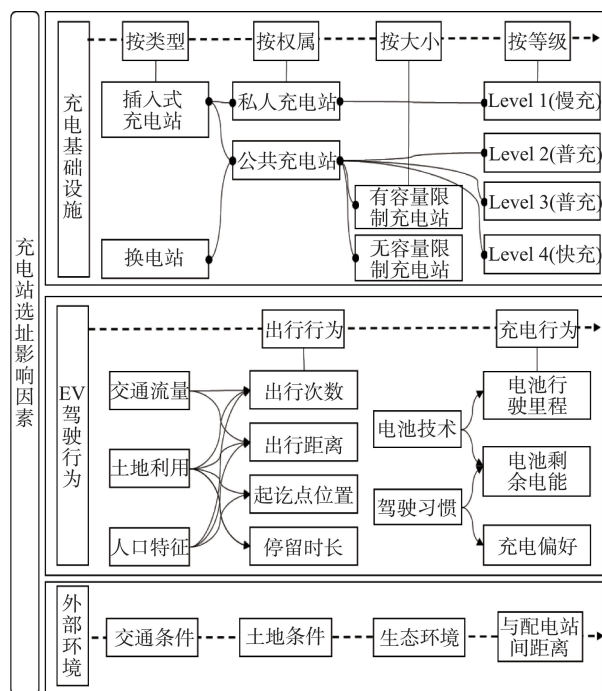


图 6 充电站选址影响因素

Fig.6 Influencing factors of electrical vehicle charging stations (EVCS) location

### 3.2 充电站选址方法研究

国内外对充电站选址的研究主要集中在选址方法上, 并且选址的定量方法是研究的热点。He 等(2014)和 Lam 等(2017)比对了不同定量选址方法的有效性, 认为不同的模型在建模条件、算法效率、解决方案质量等方面各有特点, 分别适用于不同情况。以下就充电站选址的模拟选址和定位决策两类方法展开论述。

#### (1) 模拟选址方法

在交通领域, 相关研究考虑了电动汽车有限行驶里程和较长充电时长的特性, 模拟充电需求的产生, 承袭经典设施选址研究将充电需求分为“点需求”和“流需求”, 也将解决问题的模型分为“点需求”模型(Toregas, 1971; Hsu et al, 1995)、“流需求”模型(Ghosh et al, 1987; Hodgson et al, 1990), 以及考虑两种需求类型的模型(Goodchild et al, 1987; Hodgson et al, 1992)(所谓的混合模型)。电动汽车充电的“点需求”被认为是充电需求集中的点、行驶里程有限的情况下不得不进行充电的点、因充电时长较长而需要长时间停车的点, 充电站选址方法中基于点需求的研究有最小化需求和设施之间的总出行成本(P-Median)、最小化最大出行成本(P-Center)(Hakimi, 1964; Jia et al, 2014)、给定数量设施的最大覆盖(MCLP)(Church, 1974; Goodchild et al, 1987; Farahani et al, 2010), 或者优化与点需求相关的一些其他目标(Current et al, 1998; He et al, 2014; Ghamami et al, 2016), 以及在现实世界中充电站的覆盖范围并不固定, 呈逐渐减弱的特征——基于时间满意的逐渐覆盖模型(褚玉婧等, 2015)。流需求假定消费者在去往目的地的旅行过程中搜索服务(Hodgson, 1990), 电动汽车充电的“流需求”被视为因行驶里程有限从而要求最少绕行的交通出行流、因里程限制从而分段的出行链, 因此充电站选址方法中, 基于流需求的研究需考虑到有限的行驶距离将截流选址模型(FCLM)扩展为给定站点数量的流续航选址模型(FRLM)(Kuby et al, 2009), 考虑车辆行程和范围的弧形路径特征提出的广义流续航选址模型(Capar, 2013), 考虑交通流到充电站的路径存在一定偏离而放宽对流续航选址问题(Flow Refueling Location Problem, FRLP)限制的选址模型(Kim, 2012)。此外, 还包括考虑充电站服务半径的截流选址模型(SR-FCLM模型)(杨珺等, 2006), 兼顾充电站运营商和EV用户双方利益的DFRLM改进模型(陆坚毅等, 2017), 考虑充电需求时空分布和充



电决策过程时空约束的布局优化模型(TSLM)(孙小慧等, 2012), 考虑 O-D 需求和流量依赖充电延迟实际模式的选址模型(Ghamami et al, 2016), 多周期多路径充电站选址模型(Li et al, 2016)。通过对以上方法的总结和分析发现, 各类模拟选址方法越来越注重电动汽车能源补充的实际情况, 并且开始关注人们的电动汽车出行行为特征, 但是仍然较少考虑随机产生的能源补充需求, 更多地采用了固定需求假设。

在电力工程领域, 充电站模拟选址方法在电力供给的角度基于网格、网络、网点三种电力负荷方式建立选址模型。基于网格, Ge 等(2012)提出最大限度减少电力损耗的充电站选址定容方法; 宫娅宁等(2017)构建考虑配电网经济成本-效益模型的电动汽车充电站选址定容模型。基于网络, Sadeghi-Barzani 等(2014)考虑车站开发成本、电能损耗以及变电站和城市道路的位置后提出了混合整数非线性(MINLP)优化方法。基于网点, Kang 等(2015)提出了一种用于充电/交换设备的联合规划模型, 同时解决了输电线路和变压器的投资策略问题。郭春林等(2013)应用负荷预测法研究了基于能量等效原则下的充电设施规划方法和模型。有学者同时兼顾交通和电力两大因素综合选址(Xiang et al, 2016; Sun et al, 2017), 或另从市场效益的角度优化选址(He et al, 2015; 张港等, 2015; Chen et al, 2017)。

## (2) 定位决策方法

充电站选址在模拟选址建模求解后得到理论最优位置仍存在较大的局限性, 是否能落地仍需考虑经济、环境等众多因素。但各因素之间关系模糊, 存在较大的不确定性, 属于典型的不相容问题, 不能仅依靠传统的人为主观判断, 因此众多学者通过定位决策方法基于一定的指标和权重对候选站址进行评估, 应用的方法包括博弈模型(Wang et al, 2011)、Delphi 法(冯超等, 2012)、熵权模糊物元法(吴丽霞等, 2016)等。此外, 随着研究的进一步深入, 定位决策基础方法被扩展为 Delphi 和 GAHP 的综合选址决策方法(Liu et al, 2012)、模糊 TOPSIS 方法(Guo et al, 2015)、模糊 Delphi 方法和模糊灰色关联分析(GRA)-VIKOR 方法(Zhao et al, 2016)、层次分析法和模糊评价法结合的综合方法(姚龙, 2015)、层次分析法和灰色评价法结合的综合方法(刘亮等, 2016)、信息不完全确定的 PROMETHEE 方法(Wu et al, 2016)等。定位决策方法综合各方面因素能够

较全面地进行选址方案选择, 但因素选择受研究人员自身知识结构、认知水平、情感因素的影响, 选址仍含有一定的主观性, 削弱了定量因素的比较性。

## 3.3 充电站选址的成本-效益评估

充电站实际落地时间不长, 建成后的影响仍无法全面显示, 因此充电站选址评价相关研究仍较为薄弱。目前充电站选址评价研究多从成本-效益角度出发, 评估充电站选址后给政府、企业和个人三方带来的影响(表 4)。如 Zhang 等(2016)提出了一种综合决策框架, 考虑包含市场、工程和运营三方面的优化模型, 对充电站选址布局模式的盈利能力进行评估。

国内的充电站建设作为公共基础设施的成分较大, 一般由政府主导建设, 因此学者也多站在政府和公众角度分析建站成本和效益。如张成等(2014)运用充电站负荷率、投资回收期、充电行驶里程和综合满意度 4 类评价指标对充电站的选址与整体经济性进行了评价。国外研究角度较为全面, Philipsen 等(2015)通过调查问卷构建了以用户为中心的包括 8 个主要评价标准的充电站基础社会规划评估体系, 也有 Guo 等(2015)从可持续性角度构建了包括与环境、经济和社会相关的 11 个子标准的 EVCS 选址评价指标体系, Zhao 等(2016)在多标准决策(MCDM)框架下确定了经济、社会、环境和技术 4 个重要的评价标准。

## 4 地理学视角下的充电站选址研究

目前, 在地理学领域中的充电站选址研究主要体现在考虑研究的尺度大小、区域差异、影响选址要素的选取上, 同时国内外地理学领域相关充电站选址研究存在明显差异。在研究尺度上, 国外充电站选址从区域的城市间高速路充电站选址到城市内充电站选址再到校园范围内充电站选址一应俱全, 国内充电站的选址文献仅探讨市内充电站的选址, 缺乏其他尺度的研究。在研究区域上, 国外将研究区域分为城市充电站选址和乡村区域充电站选址, 虽然研究城市充电站选址的文献较多, 但相较中国, 充电站的选址已普及到乡村地区。影响选址的要素多考虑人口分布和集聚程度、交通流的流量和流向、出行行为的差异和偏好这几类, 这些差异产生的原因在于国外研究充电站选址的区域经济发展水平较高, 城乡发展较为均衡, 而相较中国

表4 充电站选址评价研究  
Tab.4 Evaluation of charging station location

| 文献                      | 评价指标  | 评价方法                         |
|-------------------------|---|------------------------------|
| Liu et al, 2012         | 交通便利性(巷道口数、道路条件、主要道路)<br>运行经济性(建设总投资、年运行成本、运行损耗成本)<br>建造技术适宜性(地理水文条件、变电站容量、变电站距离、综合利用条件)<br>合理影响(社会影响、环境影响、电力电网安全性影响)   | GAHP                         |
| Wang et al, 2013        | 自然因素(天气条件、地质条件、水文条件),管理因素(政府规划、政治环境、电动汽车分布、交通条件、土地利用条件),公共设施因素(电网情况、站点谐波污染问题、防爆防火条件),经济因素(总投资成本、年度运营成本)   | 模糊 AHP                       |
| 张成等, 2014               | 充电站负荷率、投资回收期、充电行驶里程、综合满意度   |                              |
| Guo et al, 2015         | 环境指标(植物水文破坏程度、废弃物排放、减少温室气体排放、减少粉尘排放),经济指标(建设成本、年运营和维护成本、投资回报周期),社会指标(城市路网和电网发展规划协调性、交通便捷程度、服务能力、大众生活影响程度)   | 模糊 TOPSIS                    |
| Yagcitekcin et al, 2016 | 充电器数量、步行距离、变电站和停车区距离、人口和使用密度、可扩展性、可达性   | 排队-层次分析法 QT-AHP              |
| Philipsen et al, 2016   | 多重利用、可靠、可达、习惯兼容、驾驶员和乘客安全、车辆安全、公共交通接驳  | 问卷调查                         |
| Wu et al, 2016          | 经济因素(建设成本、运行和维护成本、投资回收周期),技术可行性(变电所距离、电力系统影响、资源可用度),服务有效性(交通便利用度、服务能力、服务半径),社会因素(未来扩张能力、当地居民态度、当地政府支持),环境因素(生态环境影响、废物处置空间可用性、节能效益、粉尘排放降低),土地因素(地形、土壤地质类型)   | PROMETHEE<br>ANP             |
| Zhao et al, 2016        | 经济指标(投资回报周期、总建设成本、年经济利润、内部回报率、土地获取成本、年运营和维护成本、拆迁成本、道路造价),社会指标(服务区域 EV 保有量、服务区人口、服务半径、服务容量、居民专业性、居民消费习惯、交通便捷程度、居住生活水平影响、城市发展规划协调水平、公共设施水平),环境指标(水资源恶化、土壤和植物退化、废物排放、噪音污染、大气颗粒排放减少、工业电磁场、无线电干扰、温室气体排放、生态影响),技术指标(变电所容量允许、变电所距离、电能质量影响、电能平衡水平、电网安全影响、变压器载荷比、界面处电流裕度、电压波动、电力系统频率、谐波污染) | 模糊 Delphi<br>Fuzzy GRA-VIKOR |

幅员辽阔、区域经济水平发展不一、城乡发展水平不均的情况,研究自然有所滞后。充电站选址研究处于交通工程、电力工程、能源利用及经济地理多学科研究的交叉领域,交通工程、电力工程及能源利用领域中的充电站选址需基于地理环境布局,同时又作为制约要素影响地理学这个综合学科下的充电站选址布局。交通工程领域研究关注充电需求,利用交通流量识别充电需求。电力工程及能源利用领域关注充电供给,研究如何在电力供应系统下进行充电站布局。在现有研究中,初步考虑了人口分布、交通流量、交通系统、电力系统对充电站的大小及布局的影响,但仍缺乏从整体城市系统角度研究城市空间结构和形态对充电站选址布局的影响。地理学科研究可广泛汲取其他学科研究的丰富成果,结合地理学科综合性的特点,充分考虑选址影响要素,完善充电站选址研究,指导充电站选址布局。具体从以下几点来思考:

(1) 电动汽车与生态城市。科技的发展为人类社会带来了更加可持续的能源及利用方式,电动汽车的发展也必将为城市发展带来一场绿色革命。

因此,解决了尾气排放问题的电动汽车,是实现城市环境保护、可持续发展的重要部分。那么电动汽车的使用在多大程度上能够减少城市环境问题?随着电动汽车使用成本的下降,是否会增加城市居民的汽车拥有量,从而加剧交通拥堵问题?

(2) 充电站选址与城市规划。电动汽车充电站作为城市基础设施的重要部分,无论是宏观布局,还是微观选址都对未来的城市规划有着重要的影响。随着电动汽车的普及,未来的城市规划必须将汽车充电站的选址布局纳入城市规划的考虑范围。那么面对城市土地利用趋紧的现状,如何利用规划解决充电需求递增与城市用地不足之间的矛盾,充电站选址与现有的传统油气站能否合并或邻近布局?

(3) 充电站布局与城市结构。充电站的布局与城市结构是一个相互影响的动态过程。一方面,充电站的布局能够引导汽车出行的方向、商娱设施的布局,从而影响城市结构;另一方面,不同的城市结构也决定着充电设施的布局方式。因此,探讨二者在不同区域、不同城市中相互作用的具体形式,对于城市的规划发展意义深远。



## 5 结论与展望

电动汽车充电站选址是科学技术发展浪潮和环保问题共同推动下的产物,政府通过规划充电站空间布局,优化城市服务环境,引导资金、技术、劳动力等要素合理分配和继续发展;企业通过优化充电站空间选址,减少建设成本与匹配充电需求,实现效益目标。充电站选址相关研究为政府与企业提供理论指导和技术保障。作为设施选址理论的一个新的热点,充电站选址理论深受传统设施选址理论的影响,但同时又因充电站、电动汽车自身存在的特性,以致于充电站选址影响因素、选址的模型与方法等与一般设施选址存在差异。本文采用知识图谱分析方法,发现充电站选址研究遵循一定的研究趋势:

(1) 充电站选址研究从静态选址逐渐演变为动态选址,一是充电需求的动态转变,从将充电需求视为“点”到视为“流”来理解;二是选址的阶段,将充电站作为一步到位的基础设施进行建设到将充电站进行多周期多路径动态选址,优先满足核心集聚的需求,再满足边缘分散的需求。

(2) 新能源汽车充电站选址的相关研究不断趋向于对现实世界的仿真模拟,不断注入如地理环境、道路网络、充电需求到电能消耗等因素的影响。研究伊始,充电站选址模拟均使用简单的算例网络,并在此之上进行模型和算法的创新。随着充电站建设的现实需求不断凸显、技术的成熟和电动汽车的投入使用,研究不断切合实际,采用真实道路网络、车辆充电时长、车辆行驶里程等各种数据进行仿真模拟,使得充电站的选址不断接近现实世界的要求。

(3) 数据采集技术和存储技术的换代升级催生了海量的数据,在大数据下人的出行行为更易于被模拟,因此也更具科学性。充电站的选址通过对数据的分析得出充电需求,在研究初期多以虚构的道路流量和基于人口估算的新能源汽车采用量来进行充电站选址研究,或者通过出行调查数据构建出行OD矩阵,模拟车辆行驶轨迹。但随着GPS车辆的投入使用以及通信基站数据的可获得性,越来越多的研究使用浮动车轨迹数据和手机信令数据模拟需求“点”和需求“流”的产生及分布,使得充电站选址更科学合理。

纵观国内外相关研究,国内外研究同期发展,国外研究主要集中在交通技术、能源领域和管理科学与工程领域,从满足充电需求的角度构建服务需求最大化的充电选址模型;国内研究则较多集中在电力领域,更多考虑不影响电网系统均衡性下的充电站最优选址。但在城市地理学领域,国内外充电站选址研究还较少。其次,已有研究在选址方法和模型上均有一定贡献,以平衡公平和效率为主线,以定量方法进行研究为主,仍较少融入人文主义思想,对充电汽车充电站使用者观察和行动研究不够深入,较少利用定性方法为充电站选址决策和评价提供依据。最后,国内充电站选址研究较少应用于具体案例,建站的影响尚缺乏实证研究支撑。从微观视角来看,未来在有关识别多元化和精细化的充电需求和服务、统筹不同主体间成本-效益目标的充电站布局等主题,仍需给予更多关注。一是随着电动汽车的不断推广应用,以及消费者充电需求的扩大和服务要求的提高,单纯考虑充电站在网络中的选址和满足充电需求远远不够。充电时间长的缺点导致部分消费者越来越希望娱乐、餐饮、体育等设施能够和充电站邻布局,以便在等候车辆充电时获得其他服务。二是电动汽车充电站既具有公共服务设施提供充电服务公平的一面,又有为满足充电需求兼顾效率和经济的一面。目前国内充电站发展仍处于政府主导阶段,在选址时多考虑电力系统对充电站承受能力,对个人充电行为和企业建站收益考虑不足。因此未来研究可综合政府、企业、个人三者之间不同的成本-效益目标布局充电站点。充电站选址如何与社会发展同步,从消费者需求出发,更加注重周边环境、消费者行为、人文社会等因子的作用,由科学高效的选址发展为体现人文情怀的多元化、微观化选址,仍是值得未来继续探讨的研究课题。从城市发展的宏观视角来看,电动汽车的普及推动充电站的布局建设,从而影响城市交通发展,进而影响城市的空间结构及形态。作为城市基础设施的一部分,电动车充电站选址本身就是值得深入探讨的城市发展问题,而随着其研究的不断深入以及实践的不断探索,对城市的发展规划可能带来的一系列新问题也值得深入探讨。

### 参考文献(References)

褚玉婧, 马良, 张惠珍. 2015. 时间满意逐渐覆盖电动汽车充电站选址及算法 [J]. 数学的实践与认识, (10): 101-106.



- [Chu Y J, Ma L, Zhang H Z. 2015. Location-allocation and its algorithm for gradual covering electric vehicle charging stations. *Mathematics in Practice and Theory*, (10): 101-106. ]
- 高亚静, 郭艳东, 李天天. 2013. 城市电动汽车充电站两步优化选址方法 [J]. *中国电力*, 46(8): 143-147. [Gao Y J, Guo Y D, Li T T. 2013. Optimal location of urban electric vehicle charging stations using a two-step method. *China Electric Power*, 46(8): 143-147. ]
- 冯超, 周步祥, 林楠, 等. 2012. Delphi和GAHP集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用 [J]. *电力自动化设备*, 32(9): 25-29. [Feng C, Zhou B X, Lin N, et al. 2012. Application of comprehensive evaluation method integrating Delphi and GAHP in optimal siting of electric vehicle charging station. *Electric Power Automation Equipment*, 32(9): 25-29. ]
- 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 2012. 电动汽车充电站规划布局与选址方案的优化方法 [J]. *中国电力*, (11): 96-101. [Ge S Y, Feng L, Liu H, et al. 2012. An optimization approach for the layout and location of electric vehicle charging stations. *China Electric Power*, (11): 96-101. ]
- 宫娅宁, 秦红. 2017. 基于电动汽车充电需求的充电站选址定容研究 [J]. *通信电源技术*, 34(3): 57-62. [Gong Y N, Qin H. 2017. Research on locationing and sizing of electric vehicles charging stations based on power-charging demand of electric vehicles. *Telecom Power Technology*, 34(3): 57-62. ]
- 郭春林, 肖湘宁. 2013. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型 [J]. *电力系统自动化*, (13): 70-75. [Guo C L, Xiao X N. 2013. Planning method and model of electric vehicle charging infrastructure. *Automation of Electric Power Systems*, (13): 70-75. ]
- 李菱, 李燕青, 姚玉海, 等. 2011. 基于遗传算法的电动汽车充电站的布局规划 [J]. *华东电力*, (6): 1004-1006. [Li L, Li Y Q, Yao Y H, et al. 2011. Layout planning of electric vehicle charging stations based on genetic algorithm. *East China Electric Power*, (6): 1004-1006. ]
- 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 2015. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究 [J]. *电网技术*, (2): 450-456. [Liu B L, Huang X L, Li J, et al. 2015. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations. *Power System Technology*, (2): 450-456. ]
- 刘锴, 孙小慧, 左志. 2015. 电动汽车充电站布局优化方法研究综述 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, (3): 523-528. [Liu K, Sun X H, Zuo Z. 2015. Review on location optimization of recharging stations for electric vehicles. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, (3): 523-528. ]
- 刘亮, 周羽生, 周文晴, 等. 2016. 电动汽车充电站选址规划评价体系研究 [J]. *电测与仪表*, (18): 1-5. [Liu L, Zhou Y S, Zhou W Q, et al. 2016. Research on siting planning evaluation system of electric vehicle charging station. *Electrical Measurement & Instrumentation*, (18): 1-5. ]
- 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 2012. 电动汽车充电站的最优选址和定容 [J]. *电力系统自动化*, (3): 54-59. [Liu Z P, Wen F S, Xue Y S, et al. 2012. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations. *Automation of Electric Power Systems*, (3): 54-59. ]
- 刘自发, 张伟, 王泽黎. 2012. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局 [J]. *中国电机工程学报*, (22): 39-45. [Liu Z F, Zhang W, Wang Z L. 2012. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm. *Proceeding of the CSEE*, (22): 39-45. ]
- 陆坚毅, 杨超, 揭婉晨. 2017. 考虑绕行特征的电动汽车快速充电站选址问题及自适应遗传算法 [J]. *运筹与管理*, (1): 8-17. [Lu J Y, Yang C, Jie W C. 2017. An adaptive-self genetic algorithm for solving electric vehicle fast recharging location problem with detour characteristic. *Operations Research and Management Science*, (1): 8-17. ]
- 孙丽玮. 2012. 中国新能源汽车发展现状与对策研究 [J]. *中国科技信息*, (7): 135-141. [Sun L W. 2012. Research on the development status and countermeasures of China's new energy vehicles. *China Science and Technology Information*, (7): 135-141. ]
- 孙小慧, 刘锴, 左志. 2012. 考虑时空限制的电动汽车充电站布局模型 [J]. *地理科学进展*, 31(6): 686-692. [Sun X H, Liu K, Zuo Z. 2012. A spatiotemporal location model for locating electric vehicle charging stations. *Progress in Geography*, 31(6): 686-692. ]
- 吴丽霞, 王贝贝, 胡静, 等. 2016. 基于熵权模糊物元的电动汽车充电站选址研究 [J]. *公路与汽运*, (6): 45-47. [Wu L X, Wang B B, Hu J, et al. 2016. Study on the location of ev charging station based on entropy weight fuzzy matter-element. *Highways & Automotive Applications*, (6): 45-47. ]
- 徐凡, 俞国勤, 顾临峰, 等. 2009. 电动汽车充电站布局规划浅析 [J]. *华东电力*, (10): 1678-1682. [Xu F, Yu G Q, Gu L F, et al. 2009. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations. *East China Electric Power*, (10): 1678-1682. ]
- 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 2016. 考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划 [J]. *电力系统自动化*, (4): 59-65. [Xu Q S, Cai T T, Liu Y J, et al. 2016. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers behaviors and travel chain. *Automation of Electric Power Systems*, (4): 59-65. ]
- 杨珺, 张敏, 陈新. 2006. 一类带服务半径的服务站截流选址-分配问题 [J]. *系统工程理论与实践*, (1): 117-122.

- [Yang J, Zhang M, Chen X. 2006. A class of the flow capturing location-allocation model with service radius. *System Engineering—Theory and Practice*, (1): 117-122. ]
- 姚龙. 2015. 基于层次分析法和模糊评价法的电动汽车充电站选址研究 [J]. 黑龙江电力, (4): 313-317. [Yao L. 2015. Research on site selection for electric vehicle charging stations based on AHP and fuzzy evaluation method. *Heilongjiang Electric Power*, (4): 313-317. ]
- 张成, 滕欢. 2014. 电动汽车充电站规划模型及评价方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, (1): 49-52. [Zhang C, Teng H. 2014. Planning model and evaluation method for electric vehicle charging station. *Journal of Power System and Automation*, (1): 49-52. ]
- 张港, 李明, 潘浩, 等. 2015. 市场化的电动汽车充电站规划布局研究 [J]. 陕西电力, (4): 40-44. [Zhang G, Li M, Pan H, et al. 2015. Marketization of electric vehicle charging station layout research. *Shaanxi Electric Power*, (4): 40-44. ]
- 张国亮, 李波, 王运发. 2011. 多等级电动汽车充电站的选址与算法 [J]. 山东大学学报(工学版), (6): 136-142. [Zhang G L, Li B, Wang Y F. 2011. Location and algorithm of multi-level electric vehicle charging stations. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, (6): 136-142. ]
- 周洪超, 李海峰. 2011. 基于博弈论的电动汽车充电站选址优化模型研究 [J]. 科技和产业, (2): 51-54. [Zhou H C, Li H F. 2011. Optimization model of electric vehicle charging station siting based on game theory science. *Technology and Industry*, (2): 51-54. ]
- Baouche F, Billot R, Triguí R, et al. 2014. Electric vehicle charging stations allocation model [R]. *Transport research arena (TRA) 5th conference: Transport solutions from research to deployment*.
- Berman O, Krass D. 1998. Flow intercepting spatial interaction model: A new approach to optimal location of competitive facilities [J]. *Location Science*, 6(1-4): 41-65.
- Capar I, Kuby M, Leon V J, et al. 2013. An arc cover-path-cover formulation and strategic analysis of alternative-fuel station locations [J]. *European Journal of Operational Research*, 227(1): 142-151.
- Chen Z, Liu W, Yin Y. 2017. Deployment of stationary and dynamic charging infrastructure for electric vehicles along traffic corridors [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77: 185-206.
- Church R, ReVelle C. 1974. The maximal covering location problem [J]. *Papers of the Regional Science Association*, 32: 101-118.
- Colmenar-Santos A, de Palacio C, Borge-Diez D, et al. 2014. Planning minimum interurban fast charging infrastructure for electric vehicles: Methodology and application to Spain [J]. *Energies*, 7(3): 1207-1229.
- Current J, Ratick S, Revelle C. 1998. Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 110(3): 597-609.
- Dong J, Liu C, Lin Z. 2014. Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38(1): 44-55.
- Farahani R Z, Steadieseifi M, Asgari N. 2010. Multiple criteria facility location problems: A survey [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 34(7): 1689-1709.
- Frade I, Ribeiro A, Goncalo A G, et al. 2011. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2252: 91-98.
- Ge S Y, Feng L, Liu H, et al. 2012. The planning of electric vehicle charging stations in the urban area [C]// *Electric & Mechanical Engineering and Information Technology Conference*. China: 1598-1604.
- Ghamami M, Zockaie A, Yu N. 2016. A general corridor model for designing plug-in electric vehicle charging infrastructure to support intercity travel [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68: 389-402.
- Ghosh A, MacLafferty S L. 1987. *Location strategies for retail and service firms* [M]. Lexington Books.
- Giménezgaydou D A, Ribeiro A S N, Gutiérrez J, et al. 2016. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(5): 393-405.
- González J, Alvaro R, Gamallo C, et al. 2014. Determining electric vehicle charging point locations considering drivers' daily activities [J]. *Procedia Computer Science*, 32: 647-654.
- Goodchild M F, Noronha V T. 1987. *Location-allocation and impulsive shopping: The case of gasoline retailing* [M]// Ghosh A, Rushton G. *Spatial analysis and location-allocation models*. Van Nostrand Reinhold, New York: 121-136.
- Guo S, Zhao H R. 2015. Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective [J]. *Applied Energy*, 158: 390-402.
- Hakimi S L. 1964. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph [J]. *Operations Research*, 12(3): 450-459.
- He F, Wu D, Yin Y, et al. 2013. Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles [J].

- Transportation Research Part B: Methodological, 47: 87-101.
- He F, Yin Y, Lawphongpanich S. 2014. Network equilibrium models with battery electric vehicles [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 67(3): 306-319.
- He F, Yin Y, Zhou J. 2015. Deploying public charging stations for electric vehicles on urban road networks [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 60: 227-240.
- Hodgson M J. 1990. A flow-capturing location-allocation model [J]. Geographical Analysis, 22(3): 270-279.
- Hodgson M J, Rosing K E. 1992. A network location-allocation model trading off flow capturing and p-median objectives [J]. Annals of Operations Research, 40(1): 247-260.
- Hosseini M, Mirhassani S A. 2015. Selecting optimal location for electric recharging stations with queue [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 19(7): 2271-2280.
- Hsu V N, Daskin M, Jones P C, et al. 1995. Tool selection for optimal part production: A Lagrangian relaxation approach [J]. IIE Transactions, 27(4): 417-426.
- Jia L, Hu Z, Liang W, et al. 2014. A novel approach for urban electric vehicle charging facility planning considering combination of slow and fast charging [C]// 2014 IEEE International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: 3354-3360.
- Kang N, Feinberg F M, Papalambros P Y. 2015. Integrated decision making in electric vehicle and charging station location network design [J]. Journal of Mechanical Design, 137(6): 061402.
- Kim J G, Kubly M. 2012. The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 37(6): 5406-5420.
- Kubly M, Lines L, Schultz R, et al. 2009. Optimization of hydrogen stations in Florida using the flow-refueling location model [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 34(15): 6045-6064.
- Lam A Y S, Leung Y W, Chu X. 2017. Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(6): 2846-2856.
- Li S, Huang Y, Mason S J. 2016. A multi-period optimization model for the deployment of public electric vehicle charging stations on network [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 65: 128-143.
- Lim S, Kubly M. 2010. Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the flow-refueling location model [J]. European Journal of Operational Research, 204(1): 51-61.
- Liu Y, Zhou B X, Feng C, et al. 2012. Application of comprehensive evaluation method integrated by Delphi and GAHP in optimal siting of electric vehicle charging station [C]// 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology. Shenyang, China: 88-91.
- Liu Z, Wen F, Ledwich G. 2013. Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 28(1): 102-110.
- Mak H Y, Rong Y, Shen Z J M. 2013. Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping [J]. Management Science, 59(7): 1557-1575.
- Nie Y, Ghamami M. 2013. A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 57: 172-190.
- Philipsen R, Schmidt T, Heek J V, et al. 2016. Fast-charging station here, please! User criteria for electric vehicle fast-charging locations [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology & Behaviour, 40: 119-129.
- Philipsen R, Schmidt T, Ziefle M. 2015. A charging place to be-users' evaluation criteria for the positioning of fast-charging infrastructure for electro mobility [J]. Procedia Manufacturing, 3: 2792-2799.
- Rajabi-Ghahnavieh A, Sadeghi-Barzani P. 2017. Optimal zonal fast charging station placement considering urban traffic circulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66(1): 45-56.
- Sadeghi-Barzani P, Rajabi-Ghahnavieh A, Kazemi-Karegar H. 2014. Optimal fast charging station placing and sizing [J]. Applied Energy, 125(2): 289-299.
- Sathaye N, Kelley S. 2013. An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors [J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review, 59(11): 15-33.
- Sun Z H, Zhou X S, Du J, et al. 2017. When traffic flow meets power flow: On charging station deployment with budget constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66(4): 2915-2926.
- Toregas C, Swain R, Revelle C, et al. 1971. The location of emergency service facilities [J]. Operations Research, 19(6): 1363-1373.
- Wang G B, Xu Z, Wen F, et al. 2013. Traffic-constrained multi-objective planning of electric-vehicle charging stations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 28(4): 2363-2372.
- Wang M, Liu K. 2011. Optimization of electric vehicle charging station location based on game theory [C]// International Conference on Transportation, Mechanical, and Electri-



- cal Engineering. Changchun, China: 809-812.
- Wang Y W, Lin C C. 2009. Locating road-vehicle refueling stations [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(5): 821-829.
- Wu Y N, Yang M, Zhang H B, et al. 2016. Optimal site selection of electric vehicle charging stations based on a cloud model and the promethee method [J]. *Energies*, 9(3): 157. doi: 10.3390/en9030157.
- Xi X, Sioshansi R, Marano V. 2013. Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure [J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 22(4): 60-69.
- Xiang Y, Liu J Y, Li R, et al. 2016. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates [J]. *Applied Energy*, 178: 647-659.
- Yagcitekcin B, Uzunoglu M, Karakas A. 2016. A new deployment method for electric vehicle charging infrastructure [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3): 1292-1305.
- Yang J, Dong J, Hu L. 2017. A data-driven optimization-based approach for siting and sizing of electric taxi charging stations [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77: 462-477.
- Yi Z G, Bauer P H. 2016. Optimization models for placement of an energy-aware electric vehicle charging infrastructure [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91: 227-244.
- Zhang C, Cheng Y. 2016. Research on joint planning model for EVs charging/swapping facilities [C]// 2016 China International Conference on Electricity Distribution. Xi'an, China: 1-8.
- Zhao H, Li N. 2016. Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective [J]. *Energies*, 9(4): 270. doi: 10.3390/en9040270.

## Progress of research on electric vehicle charging stations

CAO Xiaoshu, HU Peiting, LIU Dan

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** In the rapid development of electric vehicle industry, location planning of charging stations will become an indispensable part of the strategic planning of urban development, and it is deeply concerned by scholars in various fields such as traffic engineering, power and energy, management, and so on. Existing reviews lack a comprehensive inventory of related research on charging station location. In this study, we used CiteSpace to analyze literatures on charging station location of new energy vehicles. This article, on the one hand, summarizes and visualizes the research status and hotspots on this topic in China and internationally from 2009 to 2017. On the other hand, it examines the research contents including influencing factors, siting methodologies, and cost-benefit evaluation of charging station siting. It also briefly introduces the research trends of charging station location in China and abroad, clarifies the research development context, and provides methods and guidelines for research and practice. In the future, with the continuous development of research on the location of new energy vehicle charging stations, it is expected that the diversified charging requirements and refined services can be identified and the balancing of cost-benefit objectives among different subjects can be comprehensively improved in the location and siting of charging stations.

**Keywords:** electric vehicle charging stations; location; research progress; CiteSpace