

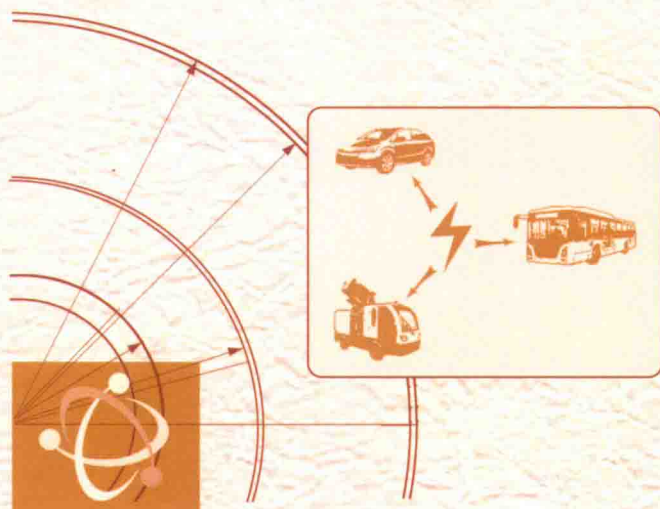


清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

中国电动汽车的发展规模及其 能源环境资源影响研究 ——方法、模型和应用

METHODOLOGY DEVELOPMENT AND CASE STUDY OF
ELECTRIC VEHICLE DEVELOPMENT AND THE IMPACT ON ENERGY,
ENVIRONMENT AND RESOURCE IN CHINA

欧训民 彭天铎 张茜 等◎著



非
外
借



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

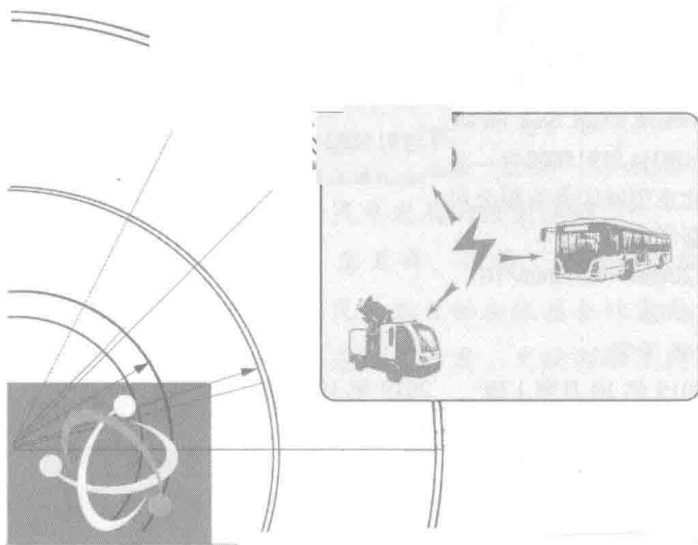
本书承蒙清华大学—张家港

氢能与先进锂电技术联合研究中心经费支持出版

中国电动汽车的发展规模及其 能源环境资源影响研究 ——方法、模型和应用

METHODOLOGY DEVELOPMENT AND CASE STUDY OF
ELECTRIC VEHICLE DEVELOPMENT AND THE IMPACT ON ENERGY,
ENVIRONMENT AND RESOURCE IN CHINA

欧训民 彭天铎 张 茜 等◎著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

中国电动汽车的发展规模及其能源环境资源影响研究——方法、模型和应用/欧训民等著. —北京: 经济管理出版社, 2019. 9

ISBN 978 - 7 - 5096 - 6826 - 9

I. ①中… II. ①欧… III. ①电动汽车—产业发展—研究—中国 IV. ①F426.471

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 165938 号

组稿编辑: 郭丽娟

责任编辑: 郭丽娟 乔倩颖

责任印制: 黄章平

责任校对: 董杉珊

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn

电 话: (010) 51915602

印 刷: 北京玺诚印务有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm × 1000mm/16

印 张: 14.75

字 数: 265 千字

版 次: 2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5096 - 6826 - 9

定 价: 69.00 元

· 版权所有 翻印必究 ·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

前言

在降低石油进口依存度、应对气候变化、治理城市空气污染和促进相关产业发展的背景下，发展电动汽车成为国家重要的战略部署，探索相关方法学和模型，识别中国电动汽车的市场渗透规律，预测中国电动汽车未来发展规模并分析相应的能源、GHG 排放、金属资源需求的综合影响，具有重要的理论和现实意义。

过去几年，我们对中国电动汽车的发展规模及影响开展多维度、综合性的研究，从方法、模型和案例等方面深入探讨中国电动汽车市场渗透规律及发展带来的能源环境资源影响，为消费者、企业和政府提供决策参考。本书是对我们过去相关研究成果的进一步总结和提升，重点围绕电动汽车，针对消费者选择和市场渗透规律、微观全生命周期能耗和 GHG 排放表现、宏观能源环境资源影响三个重要问题构建了相应的分析模型和评估方法并进行了全面的案例分析，实现了对未来中国电动汽车发展的“经济—能源—环境—资源”多视角综合研究。基于上述研究，本书提出了促进中国电动汽车发展的政策建议。

本书作者团队成员包括欧训民、彭天铎、张茜、任磊、欧阳丹华、袁志逸、袁杰辉和杨玺。全书研究工作由欧训民、彭天铎和张茜合作完成，任磊、欧阳丹华、袁志逸、袁杰辉、杨玺参与了部分模型开发、文献调研及数据整理和分析工作。第一章由欧训民、任磊、杨玺执笔；第二章、第三章由张茜、欧训民、欧阳丹华执笔；第四章、第五章、第六章由欧训民、彭天铎、任磊、袁杰辉执笔；第七章、第八章、第九章由彭天铎、欧训民、袁志逸、任磊执笔；全书由欧训民、彭天铎、张茜负责统稿。清华大学能源环境经济研究所的老师、同学在本书研究和写作过程中提供了诸多建议和支持。本书研究工作得到了国家自然科学基金委员会、中华人民共和国科学技术部、中国工程院、国家发展和改革委员会的大力支持和帮助。经济管理出版社郭丽娟编辑为本书的出版做了大量细致的工作。在



此一并表示感谢。

相关研究同时得到了清华大学—张家港氢能与先进锂电技术联合研究中心、国家自然科学基金项目（71774095、71690244）、教育部人文社会科学重点研究基地重大项目（17JJD630005）、科技部国际科技合作计划项目（2016YFE0102200）、中国工程院重点咨询研究项目（2015 - XZ - 36）、中国清洁发展机制基金赠款项目（2014095）的经费支持。

本书在编写过程中力求科学、严谨，但由于笔者水平所限，书中难免出现不足之处，敬请各位专家和读者给予批评指正。

全体作者

2019年6月于清华园

摘 要

面对汽车保有量快速增长带来的严重的石油安全、环境污染和 GHG 排放等重大挑战,中国正积极采取应对措施,推动道路交通的电动化转型。为了描述中国电动汽车发展规模及市场渗透规律,探讨电动汽车发展带来的能源环境资源综合影响,需从多重维度和视角对电动汽车开展综合分析。

本书构建了中国电动汽车市场渗透与能耗碳排放分析模型 (EV-PEC),揭示了中国电动汽车的市场渗透规律,刻画了购买决策的影响因素与消费者选择行为之间的关系;开发了中国车用燃料全生命周期分析模型 (Tsinghua-LCA),实现了从微观视角对中国电动汽车的全生命周期能源消耗和 GHG 排放的测算以及节能减排效果评估;建立了中国分省区道路交通能源需求和 GHG 排放分析模型 (CPREC),能够从宏观角度分析电动汽车规模化发展下中国汽车交通能源需求和 GHG 排放并探讨电动汽车的石油替代和 GHG 减排效益,同时系统评估电动汽车动力电池产业发展对关键金属原材料的需求及原材料供给的可持续性。采用上述构建的模型,依托相关案例研究,本书量化研究了不同规模城市电动汽车的市场渗透规律,定量分析了未来中国电动汽车发展的能源消耗、GHG 排放和关键金属资源需求量,可支持国家政策制定和产业界技术路线选择。

主要结论如下:①电动汽车的市场渗透呈现出市场导入期、市场适应期和市场成熟期的三阶段特征,影响各阶段电动汽车市场渗透的关键因素分别是电动汽车成本、充电基础设施完善程度和使用成本,收入水平、土地资源、居住停车条件等与城市特征相关的因素的差别使电动汽车的市场渗透呈现区域化特征。②基于当前能源结构和技术水平,从全生命周期角度看,中国纯电动汽车 (BEV) 和插电式混合动力汽车 (PHEV) 化石能耗比传统汽油车 (GICEV) 分别降低 44% 和 33% 左右, GHG 排放分别削减 29% 和 27% 左右。不同国家和地区的电动汽车相对 GICEV 均具有一定的 GHG 减排优势 (29% ~ 80%), 由于电力系统结构和



电力生产技术水平存在差异,不同区域 GHG 减排效益有较大波动。③电动汽车规模化发展有利于道路交通部门降低石油依赖和减少 GHG 排放,促进能源需求和 GHG 排放提早达峰。与无政策情景相比,多种电动汽车发展情景下的能源需求和 GHG 排放达峰时间均提早 5 年左右,直接能源需求和 GHG 排放峰值分别下降 11%~21% 和 44%~84%,全生命周期化石能耗和 GHG 排放峰值分别下降 8%~15% 和 9%~18%。④中国锂资源储量能够有效支撑电动汽车的大规模快速发展,但镍和钴资源给未来的资源安全以及电动汽车的大规模推广带来很大风险,促进资源循环再生利用十分必要。

关键词: 电动汽车;市场渗透率;综合影响分析;全生命周期分析;案例分析

Abstract

The rising vehicle population has increased energy (especially oil) consumption and caused significant greenhouse gas (GHG) emissions globally. To tackle the challenge of national energy security and global climate change, many countries are actively taking measures to promote strategic transformation of conventional vehicles. In order to explore market penetration pattern of electric vehicles (EVs) in China, and to estimate the comprehensive impact of energy, environment and resources brought about by the development of electric vehicles, it is necessary to conduct a comprehensive analysis of EVs from multi - dimensions and multi - perspectives.

This study presents several practical and achievable analysis models to quantitatively evaluate the comprehensive impact of the development of EVs. Based on these models, key issues for the development of EVs in China are analyzed as following: ①the market penetration of EVs are explored and the key factors affecting the market penetration are identified; ②the life - cycle energy consumption and GHG emissions of China's EVs are estimated from a micro perspective; ③taking the future EVs prospect into consideration, the energy consumption and GHG emissions of transport sector are examined, and the evaluation of oil substitution and the benefits of GHG emissions reduction of EVs are conducted; ④the demand and sustainability of the key metal resources are analyzed in the context of EV industry development.

There are four key conclusions of this study: ①The penetration of electric vehicles in the urban private passenger vehicle market shows regional characteristics and is characterized by stages, the key factors that influence the market penetration of electric vehicle in each stage are electric vehicle cost, charging infrastructure and operation cost; ②in contemporary China's energy structure and technical level, the life - cycle energy



consumption of battery electric vehicle (BEV) and plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) are about 44% and 33% lower than that of traditional gasoline internal combustion engine vehicle (GICEV). And life-cycle GHG emissions are reduced by about 29% and 27% respectively. The GHG emissions reduction effect of EVs is highly variable geographically because of significant differences in electricity grid mix and GHG emissions intensity of grid electricity; ③the large-scale use of EVs is conducive to reducing oil dependence and GHG emissions, and to promoting the energy demand and GHG emissions to peak ahead of schedule. Compared with the no policy (NP) scenario, the peaking time of vehicle energy demand and GHG emissions under the four EV development scenarios are about 5 years earlier, and the peak direct energy demand and GHG emissions are decreased by 11% - 21% and 44% - 84% respectively. The peak life-cycle energy consumption and GHG emissions are reduced by 8% - 15% and 9% - 18% respectively; ④China has abundant lithium carbonate reserves, which can effectively support the large-scale and rapid development of EVs. However, the insufficient resources of nickel and cobalt brings great risks to the future resource security and the large-scale promotion of EVs in China. Therefore, promoting recyclable and renewable resources is extremely necessary.

Key Words: Electric vehicle; market penetration; comprehensive impact; life-cycle analysis; case study

目 录

第一章 引 言	1
第一节 研究背景	1
一、发展电动汽车成为国家重要的战略部署	1
二、中国电动汽车发展驱动因素及效果亟待研究	3
三、电动汽车发展相关的能源、环境和资源影响备受关注	4
第二节 主要研究问题	6
第三节 全书结构	7
第二章 中国电动汽车市场渗透率分析模型开发	9
第一节 文献综述	9
一、情景假设方法	10
二、创新扩散理论方法	10
三、总持有成本方法	11
四、离散选择模型方法	12
五、先进技术市场渗透研究方法小结	19
第二节 建模思路	20
第三节 电动汽车发展影响因素识别	21
一、已有消费者调查发现的影响因素	22
二、开展消费者调查研究私人乘用车消费关注点	26
三、相关研究中所采用的影响因素	31
第四节 模型结构和计算原理	34
一、渗透率模块	34



二、保有量模块	44
三、能源消费模块	46
四、环境影响模块	47
第三章 中国电动汽车市场渗透率案例研究	48
第一节 北京市电动汽车发展案例研究	48
一、案例背景	48
二、情景设计	49
三、情景结果分析	57
第二节 不同规模城市电动汽车发展研究	61
一、案例背景	61
二、城市差异参数	62
三、情景设计	63
四、情景分析结果	68
五、城市间差异的原因分析	77
第三节 本章主要结论	78
第四章 中国车用燃料全生命周期分析模型构建	80
第一节 文献综述	80
第二节 模型构建	83
一、系统边界	83
二、影响指标和功能单位	84
三、模型概述	85
四、计算原理	87
第五章 中国电动汽车全生命周期分析及多种车用燃料路线比较分析	91
第一节 关键数据与重要假设	91
一、终端能源基础数据	91
二、车用燃料基础数据	95
三、不同燃料/车辆技术组合的燃料消耗率	98
第二节 结果分析与讨论	100
一、中国 2015 年终端能源全生命周期强度清单	100

二、多种车用燃料路线基于热值的全生命周期能耗和 GHG 排放 ...	101
三、多种车用燃料路线 WTW 分析与对比	103
四、拓展研究边界对结果的影响	105
第三节 相似研究对比	107
第四节 本章主要结论	108
第六章 多国电动汽车全生命周期 GHG 排放对比分析	110
第一节 关键数据与重要假设	110
一、电力生产结构和电力传输损耗	110
二、GHG 排放因子	112
三、BEV 和 PHEV 充电效率	113
四、车辆燃料消耗率	113
第二节 计算结果	114
一、车辆运行过程的直接能耗	114
二、电网全生命周期 GHG 排放强度	115
三、电动汽车全生命周期温室气体排放	115
第三节 关键问题讨论	117
一、电力结构区域差异性对分析结果的影响	117
二、未来电力系统低碳化带来的影响	117
三、PHEV 运行模式的影响	118
第四节 相似研究对比	118
第五节 本章主要结论	120
第七章 中国分省区汽车交通能源需求和 GHG 排放分析模型开发	121
第一节 文献综述	122
一、未来汽车保有量研究	122
二、汽车交通能源消费和 GHG 排放	123
第二节 模型构建	125
一、模型概述	125
二、计算方法	128
第八章 中国电动汽车规模化发展的能源需求和 GHG 排放分析	133
第一节 关键数据和重要假设	133



一、汽车保有量增长驱动因素	134
二、车辆行驶特征	139
三、车用燃料技术展望	142
第二节 电动汽车未来发展情景设计	146
第三节 结果分析与讨论	148
一、汽车保有量	148
二、道路交通能源需求和 GHG 排放	152
三、电动汽车发展的石油替代和 GHG 减排效益	162
第四节 相似研究对比	165
一、汽车保有量预测	165
二、电动化背景下道路交通能源需求预测	166
第五节 本章主要结论	167
第九章 中国电动汽车动力电池关键金属资源需求分析模型开发与应用	169
第一节 文献综述	169
第二节 中国电动汽车动力电池关键金属资源需求分析模型	171
一、模型概述	171
二、计算原理	173
第三节 关键数据和重要假设	176
一、未来电动汽车销量预测	176
二、电池装机结构	177
三、关键金属资源需求强度	180
四、动力电池梯次利用和资源循环再生路径	182
第四节 结果分析与讨论	184
一、未来动力电池装机和退役量	184
二、未来关键金属资源需求	187
第五节 相似研究对比	193
第六节 本章主要结论	194
第十章 研究总结与展望	196
第一节 研究总结	196
第二节 研究结论	197



一、电动汽车在城市私人乘用车市场的渗透具有阶段性特征， 各个阶段的关键影响因素不同	197
二、电动汽车在不同规模城市私人乘用车市场的渗透规律、 保有量以及产生的减排效果呈现出区域化差异	197
三、在当前能源结构和技术水平下，从全生命周期角度看， 电动汽车的推广应用相比于传统内燃机汽车具有显著 的节能减排效益	198
四、未来中国汽车保有规模将持续增长，2050 年之前达到饱和， 乘用车是汽车保有量增长的主要驱动力	198
五、电动汽车规模化发展有利于道路交通部门降低石油依赖和 减少 GHG 排放，实现能源需求和 GHG 排放提早达峰	198
六、电动汽车快速发展面临一定的关键金属资源约束形势和 供给风险	199
第三节 政策建议	199
一、大力发展电动汽车，促进道路交通电动化转型	199
二、因地制宜地制定相关政策，充分考虑区域差异性	199
三、促进电动汽车与清洁电力能源协同发展	200
四、促进锂、钴、镍等关键金属矿产资源的合理开发和 有效利用	200
第四节 研究展望	200
一、持续提升数据质量	200
二、进一步完善模型功能	201
三、进一步校核关键技术参数和关键假设	201
四、进一步拓展研究边界	201
五、关注电动汽车发展带来的其他相关影响	201
参考文献	202

第一章 引言

第一节 研究背景

一、发展电动汽车成为国家重要的战略部署

因为存在高速增长、高频使用和高度聚集的使用特征，中国汽车成为石油消耗和空气污染的重要来源。1990 年以来，中国汽车年均增长接近 15%，远高于世界同期平均水平；国内外研究普遍认为中国汽车保有量仍将继续增长，预计 2025 年前后，中国将超过美国成为全球汽车保有量最大的国家，届时进口原油依存度很可能接近甚至超过 70%。2010~2017 年中国汽车产销量发展历程见图 1-1。

与此同时，当前中国的空气污染形势依然十分严峻：主要区域的污染物浓度水平远高于世界卫生组织的健康标准；空气污染对于居民健康的威胁越发严重，污染导致的人力成本及经济成本上升也越来越明显。汽车污染物排放高度集中在中国东部的大城市和城市群，使这些地区的机动车污染物排放强度远高于全国平均水平和欧美国家现有水平。

汽车是“零件数以万计、年产量以千万计、保有量以亿计”的百年不衰的商品。中国汽车工业增加值占制造业增加值的比重约为 5%，是制造业的重要支柱，其快速发展促进了中国制造业产业结构转型升级，为制造业的稳步发展提供诸多支持。另外，汽车产业因其产业链长、覆盖面广、关联的上下游产业众多，在国民经济中扮演着十分重要的角色，其自身发展能够带动产业链上下游相关产业共同发展。

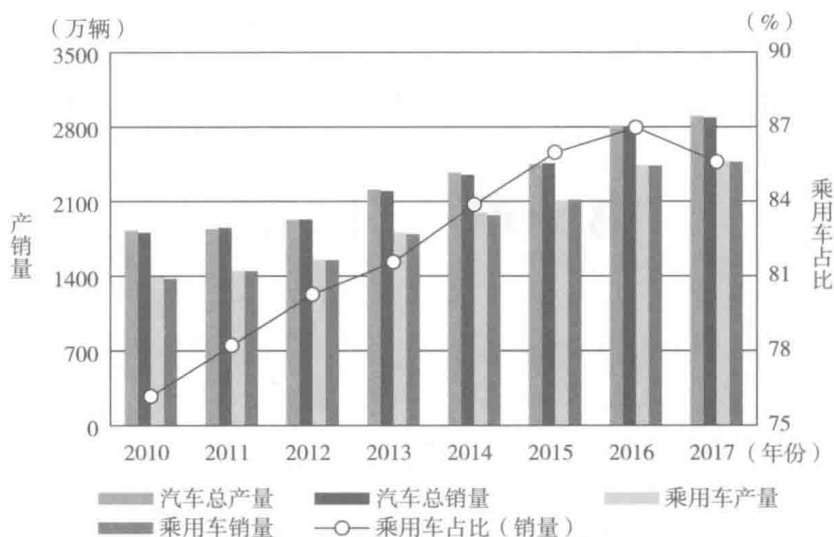


图 1-1 中国汽车产销量的发展历程^①

近年来中国大力发展电动汽车，也制定了远大的发展目标。2013 年起，电动汽车销售市场出现“井喷式”的增长。尤其是 2015 年以来，针对电动汽车不限购、不限行、充电设施建设等全方位的支持政策相继出台，电动汽车发展将进入提速阶段。如图 1-2 所示，根据中国汽车工业协会的统计，2015 年电动汽车在汽车总销量中占比首次超过 1%，达到 1.35%；电动乘用车在乘用车总销量中的占比接近 1%。2015 年电动汽车销量中，62% 为乘用车，其他为大客车以及其他车型。2016 年新能源汽车（主要是电动汽车）产销分别完成 51.7 万辆和 50.7 万辆，同比分别增长 51.7% 和 53%。2017 年产销量均超过 77 万辆，年增速保持在 53%，市场份额约占 2.7%。截至 2017 年底，我国电动汽车的累计销量达到 172.8 万辆，在汽车总保有量中的占比仍然较小，不足 1%。

中央政府提出了未来发展目标：《节能与新能源汽车产业发展规划（2012 ~ 2020）》中对于未来电动汽车市场和充电设施的发展提出了明确的目标。如表 1-1 所示，到 2020 年，电动汽车销量占汽车总销量的 7% ~ 10%，电动汽车保有量超过 500 万辆；充换电站数量超过 1.2 万个，充电桩数量超过 500 万个；实现车与车、车与基础设施之间的信息化互联，建立若干个无线充电示范区域或线路。到 2025 年，电动汽车销量占汽车总销量的 15% ~ 20%，电动汽车保有量超

^① 资料来源：工信部装备工业司。

过 2000 万辆；充换电站数量超过 3.6 万个，充电桩数量超过 2000 万个；完成电动汽车和智能电网整体联网的区域试点，完成无线充电技术的较大规模示范。到 2030 年，电动汽车销量占汽车总销量的 40% ~ 50%，电动汽车保有量超过 8000 万辆；充换电站数量超过 4.8 万个，充电桩数量超过 8000 万个；全面实现电动汽车与智能电网、智能社区的联网运行。

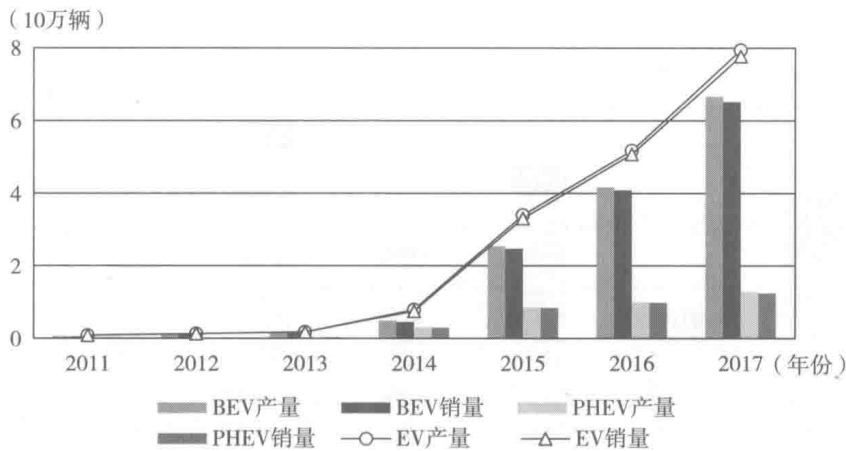


图 1-2 2011 ~ 2017 年中国电动汽车年产量①

表 1-1 中国电动汽车发展的分阶段目标

目标	单位	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
电动汽车在汽车总销量中占比	%	1.5	7 ~ 10	15 ~ 20	40 ~ 50
电动汽车保有量	万辆	50	大于 500	大于 2000	大于 8000
充电桩保有量	万个	5.7	大于 500	大于 2000	大于 8000
充电站保有量	万座	0.36	大于 1.2	大于 3.6	大于 4.8

二、中国电动汽车发展驱动因素及效果亟待研究

实践中，中国电动汽车发展目前遇到私人市场扩大受阻、激励政策效果不如预期的问题。现有用户反映出存在续航里程短、充电不方便和运行故障较多等诸多不足，影响了电动汽车市场尤其是私人市场的进一步扩大。研究人员发现电动

① 资料来源：汽车工业协会、工信部装备工业司。