

第1章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 气候变化与低碳交通

气候变化是当今人类社会面临的最严峻挑战之一。人类的经济社会活动排放出的温室气体造成了“温室效应”,使全球温度不断升高。随之而来的是一系列的温升灾害,如热浪、山火、海平面上升等,严重威胁了人类的生命健康和财产安全。为了应对气候变化,各国在经过多年的讨论协商后,于2016年签署了《巴黎协定》,承诺将全球平均气温较工业化时期上升幅度控制在 2°C 以内,并尽量控制在 1.5°C 以内^[1]。为了实现这一目标,许多国家都基于本国国情提出了一系列的降低温室气体排放的政策规划。其中最具代表性的规划之一,就是在2020年第七十五届联合国大会一般性辩论上,习近平主席提出我国要在2030年前实现二氧化碳排放达峰,争取在2060年前实现碳中和(包括所有温室气体排放)^[2-5]。

交通部门是全球碳排放的主要来源之一。根据联合国政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告估计,2019年全球交通部门的直接温室气体排放达到89亿吨二氧化碳当量,占当年全球总温室气体排放的15%以及能源相关温室气体排放的23%^[1]。因此,发展低碳交通是应对气候变化问题和实现可持续发展目标的至关重要的环节。道路交通是交通部门的温室气体排放的最大来源,2019年占全球交通部门温室气体排放的69%。降低道路交通温室气体排放是实现低碳交通的首要任务^[1]。为此,需要大力推进车辆电动化和能源低碳化转型。车辆电动化即使用新能源汽车(new energy vehicle, NEV),主要是用电动汽车(electric vehicle, EV)替代传统内燃机汽车。能源低碳化即使用清洁可再生一次能源如太阳能、风能等进行发电或制氢等作为新能源汽车的能量来源。这一转型路径已成为世界各国政府、学术界和产业

界的共识。

根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)的统计,目前全球已有超过 20 个国家和地区提出了实现新能源汽车 100% 渗透率的目标(部分国家限定为电动汽车或零排放汽车)^[6]。我国作为世界最大的汽车产销国从 2008 年开始出台了一系列的国家和地方政策,对新能源汽车产业给予支持。2020 年,我国工业和信息化部发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》中提出,到 2025 年,我国新能源汽车新车销售量要占汽车销售总量的 20% 左右;到 2035 年,纯电动汽车要成为新销售车辆的主流,并且实现公共领域用车全面电动化,燃料电池汽车实现商业化应用^[7-8]。另一个全球主要汽车市场——美国在 2021 年提出了它的首个新能源汽车产业目标,旨在 2030 年将新能源汽车的销量渗透率提高到 50% 以上,并在全美布置超过 50 万个公共充电桩。其余国家和地区如欧盟、挪威、瑞典、英国等也都提出了在 2025—2035 年前后,通过对传统燃油车禁售等方式达到零排放汽车 100% 销量渗透率的目标^[7,9-10]。

在政策激励和技术进步的推动下,全球电动汽车市场经历了快速发展。2022 年全球电动汽车销量达到 1074 万辆,相比于 2011 年 4 万辆的销量,在 11 年间实现了 260 倍的增长,如图 1.1 所示^[6,11]。2022 年电动汽车销量占全球汽车总销量的 13%,是 2019 年市场份额的 7 倍。2022 年全球汽车销量的所有净增长都来自电动汽车。其中,我国 2022 年的电动汽车销量比 2019 年增长了 4 倍,达到 689 万辆,占全球销量的 64%。欧洲 2022 年的电动汽车销量同比增长了 13%,达到 260 万辆,占全球销量的 24%^[12]。在新冠疫情对全球经济活动造成剧烈冲击和对电动汽车产业的财政刺激力度减退的大背景下,电动汽车产业仍然能保持了高增长态势,说明电动汽车产业已经迈入大规模市场化的拐点。在轻型车领域,电动汽车对传统燃油车的替代形势已经明朗。

1.1.2 低碳交通转型对关键材料的依赖

以车辆电动化为代表的低碳交通转型将给整个能源系统和社会经济结构带来深远的影响,其中之一是在汽车制造产业链方面。车辆电动化使得汽车的动力装置从“油箱+发动机”结构转变为“电池+电机”结构。可用于汽车动力电池的产品包括锂电池(lithium-ion battery, LIB)、镍氢电池和铅酸电池等。锂电池相比镍氢电池和铅酸电池有着高能量密度、长循环寿命等多项产品性能方面的优势。因此,现阶段锂电池占据着电动汽车动力装

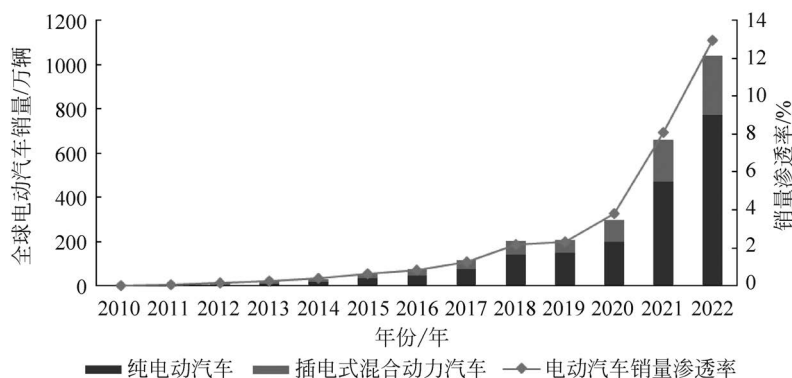


图 1.1 全球电动汽车销量和渗透率(2010—2022 年)(见文前彩图)

置的近 100% 的市场渗透率^[13]。虽然钠电池、铝电池、镁电池等新型电池有替代锂电池的潜力,但是目前这些电池都还处于研发阶段,其迈入市场规模化推广的时间节点有着很大不确定性。锂电池在汽车动力电池领域的主导地位有望在中短期内一直保持。锂电池同时也是手机、电脑等消费电子设备的储能设备。此外,锂电池在用于调节风力和太阳能发电的固定式储能装置中的市场占比也越来越高,如图 1.2 所示^[14]。

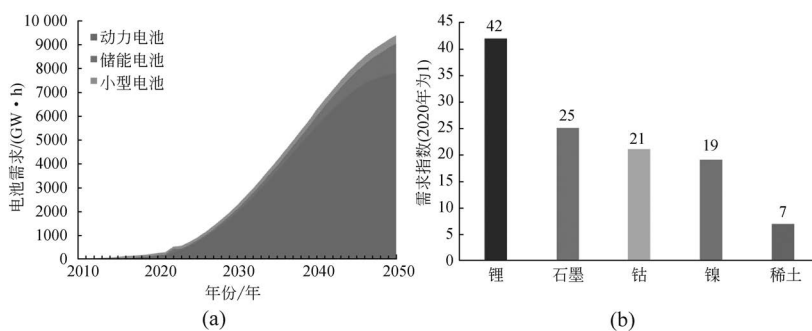


图 1.2 锂电池及关键材料未来需求预测^[15-16](见文前彩图)

(a) 电池需求预测; (b) 2040 年关键材料需求预测

作为大宗消费商品,汽车的单体电池载量远超锂电池的其他应用领域。一辆特斯拉 Model 3 的锂电池载量是一部 iPhone 手机的一万倍左右^[17],因此电动汽车的大规模普及势必引发电池需求的暴增。2022 年全球锂电池出货量为 782GW·h,其中动力电池出货量达到 518GW·h,占 66%^[18]。根据 Huang 等^[16]的预测结果,随着电动汽车的普及和可再生能

源发电规模的扩大,全球 2050 年锂电池消费量将达到 $9\sim 10\text{TW}\cdot\text{h}$,其中动力电池消费量将达到 $8\text{TW}\cdot\text{h}$ 左右,占比达 90%,如图 1.2(a)所示。锂电池市场规模的扩大,一方面使电池在交通部门和国民经济中的重要性与之俱增,另一方面将会对许多资源的供需系统产生巨大冲击。传统内燃机汽车动力系统的制造主要使用钢铁、铝等大宗金属商品。而锂电池的制造则还需要用到锂、钴、镍、锰、石墨这五类“关键材料”(critical material)^[19-20]。这些材料被定义为“关键材料”是因为它们对微观最终消费产品的性能表现和宏观国民经济都有至关重要的作用,并且它们的供给还具有相对较高的潜在中断风险,需要被高度关注和保护(详见 1.1.3 节)^[21]。根据 IEA 的测算,平均一辆轻型电动汽车中的关键材料用量约为 210kg,是一辆同级别传统内燃机汽车的 5 倍左右^[15]。如图 1.3 所示,电动汽车所需的关键材料中 75%用于锂电池。根据 IEA 预测,随着电动汽车和锂电池消费规模的扩大,在电池化学体系保持在现有水平的条件下,全球 2040 年对锂、钴、镍、石墨等关键材料的需求将比 2020 年增长 20~40 倍,如图 1.2(b)所示^[15]。锂电池将成为这些材料最主要的消费领域,电动汽车和锂电池的市场动态会对关键材料的供需系统产生决定性的影响^[22]。

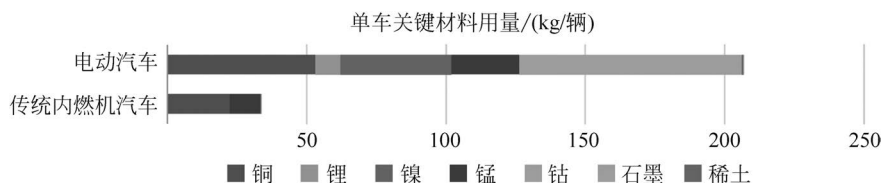


图 1.3 电动汽车关键材料需求强度^[15](见文前彩图)

锂电池主要由四部分组成:正极、负极、隔膜和电解质。锂电池所需要的关键材料主要是在正负极中应用,其中锂、钴、镍、锰在正极中使用,石墨在负极中使用。锂电池于 1991 年最早由索尼企业实现商用化。当时的电池产品使用钴酸锂(LiCoO_2 、LCO)作为正极材料,天然石墨作为负极材料^[23]。凭借着高能量密度和高充电电压等优势,此类 LCO 锂电池迅速取代了镍氢电池和镍镉电池占领了手机、电脑等小型消费电子设备的市场。但是,那时的 LCO 锂电池有成本过高、稳定性差等问题,不适合应用于汽车领域。在之后的 30 年,随着电池技术研发的不断投入,磷酸铁锂(LiFePO_4 、LFP)、镍钴锰酸锂($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ 、NCM)、镍钴铝酸锂($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$ 、NCA)和锰酸锂(LiMn_2O_4 、LMO)等正极材料被开

发出来并实现了商用化。而锂电池的负极则一直主要使用天然石墨和人造石墨材料。因此,不同电化学体系的锂电池之间的产品性能差异主要源于正极材料。各类型化学体系的锂电池在能量密度、安全性、价格、寿命等方面各有优劣^[24]。一般将 NCM 电池和 NCA 电池合称为三元电池,它们的能量密度具有显著优势。使用三元电池的电动汽车会有更高的续航里程,更受到电动汽车制造商的青睐。由于掌握 NCA 电池技术的企业相对较少,因此 NCM 电池是使用比例最高的电池技术。LFP 电池能量密度低于三元电池,但是成本更低,安全性和循环稳定性更好。LFP 电池一直都是中低级别乘用车和中重型商用车领域的主流动力电池类型。LMO 电池则因为其在能量密度、安全性、寿命等方面较为平衡,主要应用在电动自行车、电动工具等领域。

2022 年,NCM 电池占市场主导地位,占全球电动汽车电池装机量的 68%^[25]。然而,在过去的 3 年里,LFP 电池市场出现了重大的复苏,占 2022 年全球电动汽车电池装机量的 32%,比 2020 年的 7%增长了 3 倍。我国轻型车的 LFP 需求份额已经从 2020 年的 11%增加到了 2022 年的 54%^[26]。尽管 LFP 电池的能量密度比 NCM 电池低,但是在近期电池关键材料价格暴涨的背景下,不含高价金属材料的 LFP 电池的成本优势凸显。另一个主要原因是电池系统技术创新,主要为 cell-to-pack(CTP)技术^[27],其消除了电池包中容纳电池的模组系统,减轻了电池组中结构件的自重,进而大幅提高了 LFP 电池的能量密度。根据主流研究预测,未来在动力电池领域,NCM 和 LFP 仍将长期作为锂电池产品的主流正极材料技术路线^[27]。因此,动力电池对锂、钴、镍、锰等关键材料的依赖有望长期保持。锂、钴、镍、锰等关键材料的组合除了决定着锂电池的产品性能之外,还对锂电池成本和可持续性起着决定性作用。根据美国阿岗国家实验室的 BatPac 模型测算,在 2022 年正极材料占据锂电池 49%的制造成本,如图 1.4 所示^[28]。而正极材料的成本则完全由锂、钴、镍、锰等关键材料决定。因此锂电池关键材料供需系统的稳定性对锂电池成本竞争力至关重要,决定了电动汽车的市场竞争力。在过去一个多世纪以来的燃油车时代,石油一直是全球交通的命脉。而在未来,石油的地位则会被电池和关键金属资源所取代。锂电池关键材料产业链的稳定与否是决定电动汽车能否按预期实现对传统内燃机汽车的替代、交通行业能否可持续发展的最核心因素之一^[29-33]。

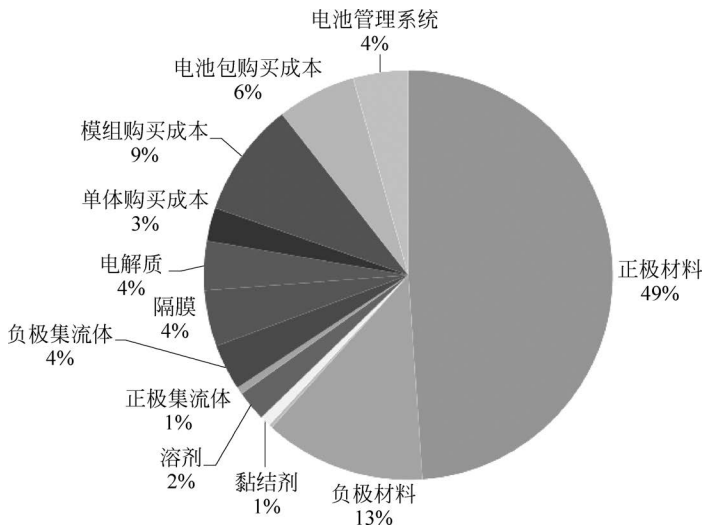


图 1.4 锂电池成本结构(2022 年)

1.1.3 锂电池关键材料供给挑战

和已经十分成熟的化石能源和钢铁等传统大宗商品的产业链不同，锂电池关键材料的产业链正处于迅速演变的发展阶段。现阶段全球锂电池关键材料产业链由分布在世界各地的多个复杂加工和制造环节所组成，如图 1.5 所示^[34]。产业链的最上游环节为矿物冶炼，即从矿山和卤水等矿藏当中提取必要的矿物原料。然后通过精炼环节将这些矿物提炼形成足够纯度的化学品，如碳酸锂、硫酸钴等。这些基础化学原料再进一步合成为锂电池的必要组件，如正极、负极、电解液等。组件进入电池制造工厂被组装为锂电池，随后被集成组装到电动汽车中。在经过一段时间的使用之后，电动汽车达到寿命终点进入报废环节，被回收、再利用或者用于其他市场用途，比如，电动汽车中报废的锂电池可以再用作固定式储能设备。其余未被回收的产品会被人为填埋、焚烧或者自然耗散到环境中。

现今的国际能源和资源安全机制的焦点是化石能源，特别是石油供应的安全问题，旨在为潜在的供给中断、价格暴涨和地缘政治事件等风险事件提供一定的保障。在可再生能源大规模替代化石能源的能源转型驱动下，传统意义上的能源安全水平有望持续提升。但是，随着更多太阳能和风能发电装置及电动汽车的部署，这些新型能源技术的产业链又引发了新的资

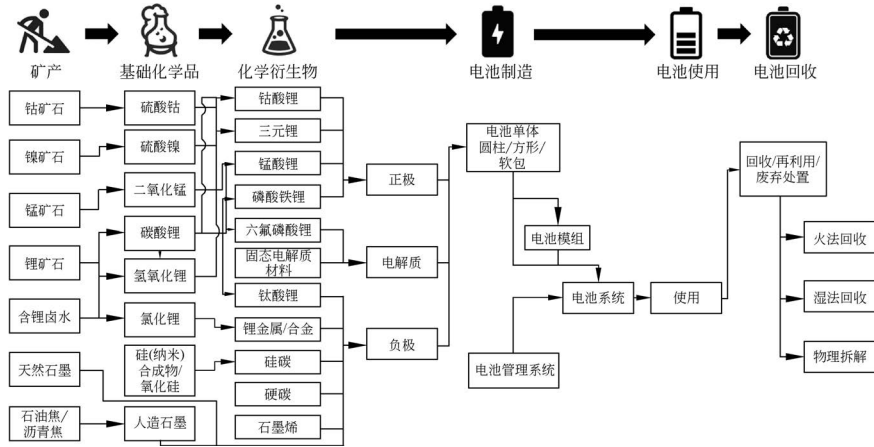


图 1.5 锂电池产业链结构示意图

源安全问题。其中,锂电池产业链中存在的潜在安全问题尤为复杂,在很多方面要比化石能源产业链的安全问题还严重。锂电池产业链安全所面临的主要挑战包括原料的高供给集中度、严峻的环境、社会 and 治理 (environment, social and governance, ESG) 约束、不完善的回收系统、国际关系恶化导致的复杂地缘政治等问题^[35-36],具体如下所述。

1. 高供给集中度挑战

锂电池关键材料的矿产资源高度集中在少数国家,各国的资源禀赋有着极大的差异。锂矿主要从卤水和伟晶岩中提取。锂卤水是具有高锂含量的浓缩盐水,主要位于南美洲玻利维亚、阿根廷和智利的高海拔地区。锂伟晶岩包括锂辉石、锂云母和透锂长石^[37]。其中锂辉石是目前锂的最主要来源,储量主要分布在澳大利亚。除了这两种常规矿物来源之外,从黏土、地热卤水和海水等非常规资源中提锂也具备潜在可行性,不过这些来源都还没有被大规模商用化,因此没有被计入锂资源的经济可采储量(reserve)中。根据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)统计,2021 年全球锂资源储量为 2200 万吨,其中智利(920 万吨)、澳大利亚(570 万吨)、阿根廷(220 万吨)和中国(150 万吨)为主要锂资源储量拥有国^[38]。钴矿主要是作为镍矿和铜矿的伴生矿产品开采出来的^[39]。2021 年,约有 65% 的钴从铜矿中开采,30% 的钴从镍矿中开采得到。根据 USGS 统计,2021 年全球钴资源储量为 760 万吨,刚果(金)(350 万吨)和澳大利亚(140 万

吨)占据着绝大多数的高品位的钴矿储量^[38]。镍主要存在于两种类型的矿床中——硫化镍矿床和红土镍矿床。硫化镍矿床主要位于俄罗斯、加拿大和澳大利亚。硫化镍矿床往往含有较高品位的镍。它更容易加工成高纯度的电池级镍(1级镍)^[40]。红土镍矿床则具有较低品位的镍,主要分布于印度尼西亚、菲律宾和新喀里多尼亚。据 USGS 统计,2021 年全球镍矿可采资源储量为 9500 万吨,主要分布在澳大利亚(2100 万吨)、印度尼西亚(2100 万吨)和巴西(1600 万吨)^[38]。锰矿的储量分布最为分散。根据 USGS 统计,2021 年全球锰矿可采储量为 1 亿 5000 万吨,其中南非(6400 万吨)、美国(2700 万吨)、澳大利亚(2700 万吨)和乌克兰(1400 万吨)是主要的锰矿储量拥有国^[38]。

资源储量分布的不均衡造成了矿物供给的高度集中。矿物产量受到各国矿冶技术水平、基础设施水平和地缘政治等因素的影响,其分布不完全与资源储量分布一致。比如,智利是锂资源储量的第一大拥有国,但是锂矿的第一大生产国是澳大利亚。矿物生产的分布仍与资源储量分布的特征较为一致,处于高度集中的状态。锂电池关键材料的矿物供给集中度要远高于化石能源。2021 年前三大石油生产国是美国、沙特阿拉伯和俄罗斯,三个国家占全球石油总产量的 42%;前三大天然气生产国是美国、俄罗斯和伊朗,三个国家占全球天然气总产量的 46%^[15]。而如图 1.6 所示,前三大锂矿生产国是澳大利亚、智利和中国,产量份额分别为 54%、21%和 13%,三个国家共计占据 88%的产量^[41]。类似地,三个主要的镍矿开采国是印度尼西亚、菲律宾和俄罗斯,分别占据全球镍矿总产量的 31%、12%和 11%,共计 54%。在钴矿开采的全球份额中,刚果(金)占主导地位,产量份额为 70%,其次为俄罗斯和澳大利亚,分别占 5%和 4%。这三个国家共占全球钴矿产量的 79%^[41]。这种高供给集中度蕴含着极高的潜在供给中断风险,因为当少数主要生产国的供给受到自然灾害、地缘政治等因素而发生中断时,整个全球的市场供需平衡都会遭受严重破坏。此外,从历史矿物产量趋势来看,这种高供给集中度的情况随着总市场规模的扩大趋于更加严重的状态。例如,2000 年钴矿前三大生产国的总生产份额为不到 50%,而 2022 年则接近 90%^[42]。未来随着锂电池市场规模的增长,此类趋势还可能继续延续。

锂电池关键材料产业链的高供给集中度不仅仅体现在上游的矿冶环节,在下游的精炼和制造环节同样存在,甚至许多加工环节的供给集中度比矿冶环节还要高。这主要是由于我国在加工和制造环节的产能统治力导致

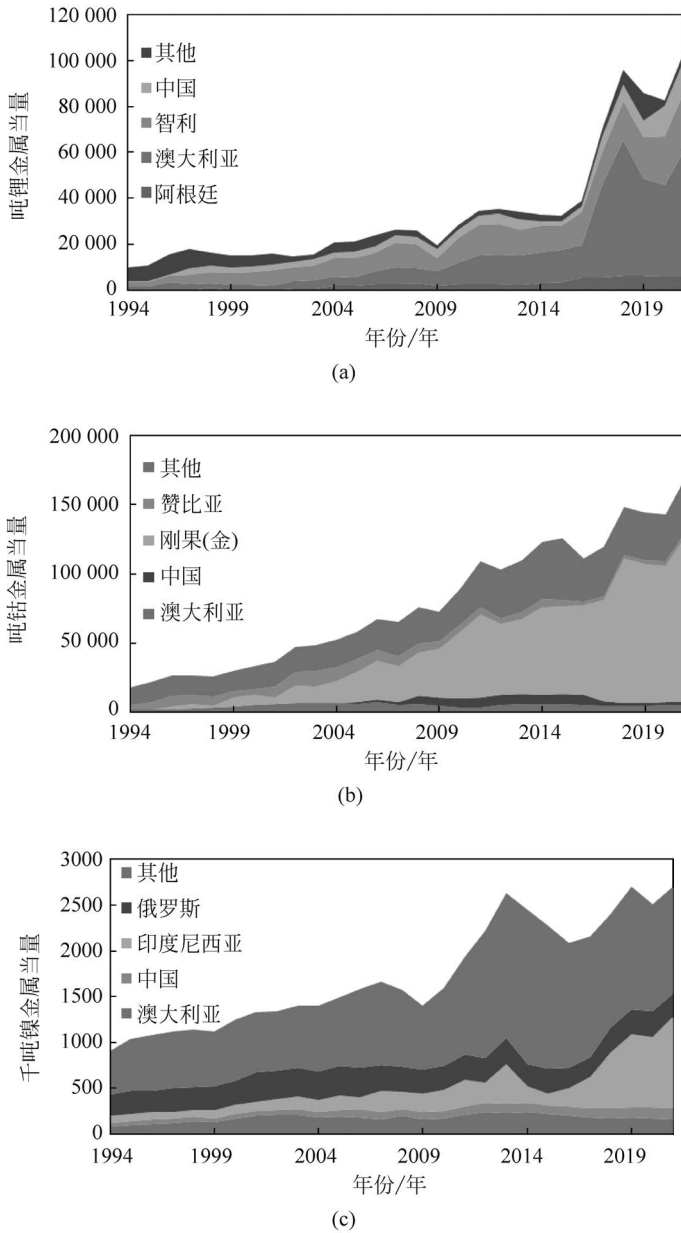


图 1.6 全球电池关键金属资源矿产量(1994—2021 年)(见文前彩图)

(a) 锂矿产量; (b) 钴矿产量; (c) 镍矿产量; (d) 锰矿产量

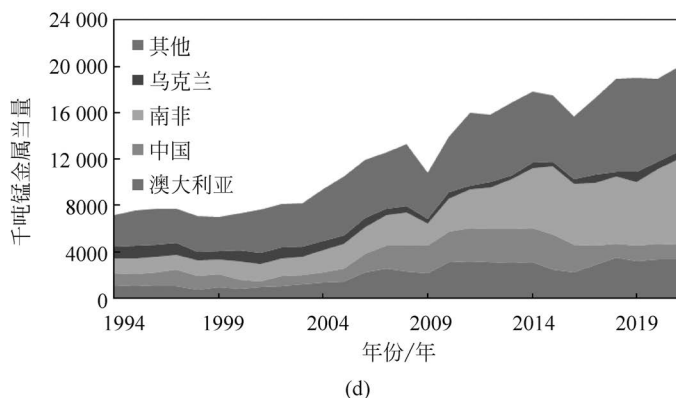


图 1.6 (续)

的。如图 1.7 所示,在从化工精炼到锂电池正负极材料生产,再到锂电池制造的整个锂电池产业链中下游环节,我国都是第一大生产国,生产份额远超其他国家。2020 年,在锂盐、钴盐等基础化学品生产方面,我国占据着全球 60%~75% 的生产份额。在锂电池正极材料和负极材料生产上,我国占据着全球 55%~90% 的生产份额^[44]。此外,我国还占据着全球 70% 的锂电池产量。这使得全球前三生产国在锂、钴、镍三种锂电池关键材料的精炼加工份额分别达到了 95%、79%、57%^[44]。作为对比,前三大生产国占全球石油精炼加工的份额为 44%^[25]。可见,对锂、钴、镍等锂电池关键材料来说,精炼加工等下游生产环节的供给集中度也显著高于化石能源产业链。

锂电池产业链的高供给集中度不仅存在于国家层面,还存在于负责实际生产开发的企业层面。2021 年,前五大锂矿供应商约占全球锂产量的 50%。主要的锂矿供应商包括 SQM(智利)、Pilbara(澳大利亚)、Allkem(澳大利亚)、Livent(美国)、赣锋锂业(中国)^[46]。镍矿的生产不如锂矿那么集中,前 9 大企业占据全球镍矿产量的 50%。主要的镍矿供应商包括金川集团(中国)、必和必拓集团(澳大利亚)、淡水河谷(巴西)、青山镍业(中国)、亚洲镍业(菲律宾)、嘉能可(瑞士)^[47]。在钴矿生产方面,前五大钴矿生产企业占全球 56% 的产能。其中,嘉能可(瑞士)是全球最大的生产商,约占 30% 的钴矿产量。其他主要钴供应商包括金川集团(中国)、中国铝业(中国)和 Chemaf(刚果(金))^[48]。此外,除了由企业进行的专门生产之外,在刚果(金),由闲散组织和人员进行的手工和小型采矿(又称手抓矿)的