

# 锂离子电池 回收

面向绿色未来的市场  
及创新趋势

## 前言

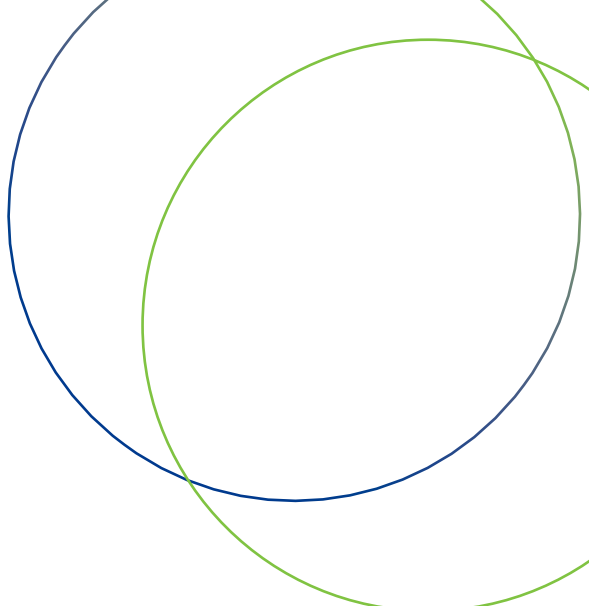
随着对可持续能源解决方案需求的日益增长,锂离子电池回收行业已成为全球创新和经济转型的焦点。随着电动汽车、可再生能源储存和电气化消费兴起,锂离子电池的回收利用成为解决资源匮乏和环境挑战的关键。为了应对高速发展的行业需求,CAS美国化学文摘社和德勤中国携手发布了本报告,从商业和科学视角全面、深入地就锂离子电池回收行业进行分析。

CAS美国化学文摘社是美国化学会(ACS)旗下分支机构,作为科学信息解决方案的专家,以其独特的科学知识管理技术,提供前沿的科学解决方案,并持续构建覆盖150余年科学发现的CAS内容合集 (CAS Content Collection™)。德勤中国通过卓越的专业水平、跨行业的洞察力和智能技术解决方案,帮助各行各业的客户和合作伙伴抓住机遇,应对挑战。CAS和德勤利用各自在科学和商业领域的优势,对锂离子电池回收行业进行全面探索,希望为业界提供可行性见解和解决方案,以应对当今的紧迫挑战并塑造未来的创新。

如您对新材料、绿色能源、药物开发或可持续发展等关键领域感兴趣,欢迎联系我们。

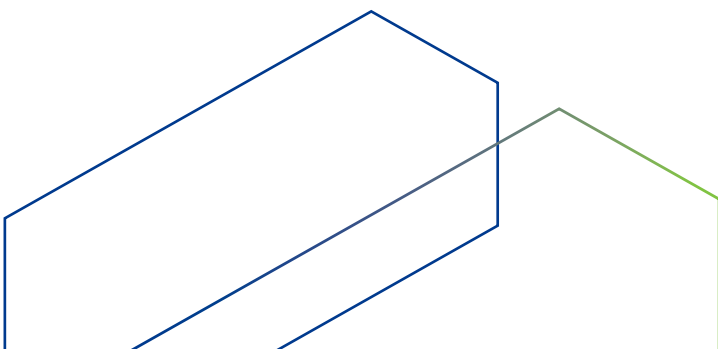
德勤中国: [CNERI@deloittecn.com.cn](mailto:CNERI@deloittecn.com.cn)

美国艾赛思国际有限公司北京代表处: [china@acs-i.org](mailto:china@acs-i.org)



# 目录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 内容摘要                   | 2  |
| 主要驱动因素                 | 3  |
| 1. 相关法规和合规要求持续收紧       | 3  |
| 2. 汽车制造商将供应链脱碳列为优先事项   | 5  |
| 3. 电池退役潮将至             | 6  |
| 4. 回收利用以弥补关键原材料的潜在供应缺口 | 7  |
| 市场格局                   | 8  |
| 1. 回收市场预测              | 8  |
| 2. 产业链                 | 10 |
| 技术创新                   | 12 |
| 1. 了解全球领导者和技术创新趋势      | 12 |
| 2. 在选择回收工艺时，价值比质量更重要   | 15 |
| 3. 锂电池回收仍以火法冶金和湿法冶金为主导 | 17 |
| 4. 锂电池正极材料回收的重要价值      | 18 |
| 5. 锂电池回收工艺综合对比         | 22 |
| 前景展望                   | 23 |
| 1. 借助回收技术创新解决成本和安全问题   | 23 |
| 2. 利用数字工具提高可追溯性和回收效率   | 24 |
| 3. 通过跨产业链合作扩大业务规模      | 25 |
| 4. 电池回收行业实现盈利的战略路径     | 27 |
| 案例研究: 广东邦普循环科技有限公司     | 29 |
| 参考资料                   | 30 |



# 内容摘要

电动汽车市场的快速发展促进了对电池回收可持续解决方案的需求。本报告通过整合CAS的数据和科学专业知识以及德勤的市场和商业洞察，探讨了影响电池回收行业发展的政策、市场和创新趋势。

## 主要发现如下：

- 政策驱动：**

随着生产者责任延伸、危险废物管理、报废要求和新电池回收材料含量要求等强制性法规持续收紧，以及税收抵免和政府资助等激励措施不断出台，电池回收行业迎来蓬勃发展。
- 产能扩张：**

全球各地区的锂电池回收产能都在迅速提升。目前，现有设施的回收产能约为160万吨/年。待规划设施建成后，预计未来几年回收产能将超过300万吨/年。
- 技术创新：**

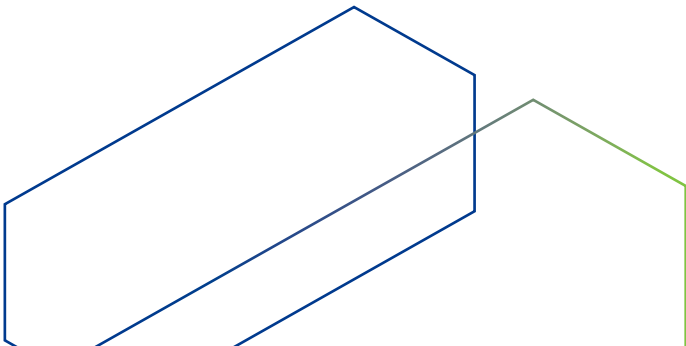
湿法冶金、火法冶金和直接回收三大回收技术的文献出版趋势显示，电池回收专利数量均显著高于学术期刊发表量，凸显了这一研究领域的商业潜力。
- 数字解决方案：**

数字孪生、区块链、云计算和人工智能等技术正在重塑电池回收行业，这些技术可以用于进行材料全生命周期追踪、优化回收流程和开发数字产品护照，从而提高回收效率、增强可追溯性、确保监管合规并推动循环经济发展。
- 跨产业链合作：**

材料供应商、电动汽车制造商、汽车品牌和回收公司之间的合作日益紧密，重点合作领域包括建立闭环回收系统、协同实现监管合规、推动回收技术创新以及确保可持续材料供应。
- 盈利途径：**

电池回收盈利的战略途径要求根据回收材料价值选择适宜的回收工艺，通过自动化和本地回收优化成本，并利用规模化经济。成功实现短期内来自高价值金属材料的经济回报以及长期可持续性和技术创新之间的平衡。

回收技术的创新迭代和数字解决方案正在革新电池回收行业，推动回收率、作业效率和环境效益不断提升。由于电动汽车及其他电池驱动产品的需求持续攀升，推动电池回收行业迈向可持续未来已经势在必行。随着越来越多的电池达到报废年限，实现高效回收变得至关重要，这不仅关乎削减废弃物，还有助于回收高价值材料并最大限度降低环境影响。通过实施扶持政策、扩大先进技术投资和推动协同合作，电池回收行业可以建立循环经济模式，以此应对资源短缺问题并助力减少碳排放。



# 主要驱动因素

电池回收市场的发展主要受以下因素推动：环境法规持续收紧、电动汽车行业提出供应链脱碳需求、退役电池数量日益增加以及锂、钴、镍等关键原材料的需求不断上升。随着各国政府推行更加严格的可持续发展准则，以及行业自身寻求减少碳足迹，回收利用已经成为稳定稀缺资源供应和建立可持续未来的重要举措。

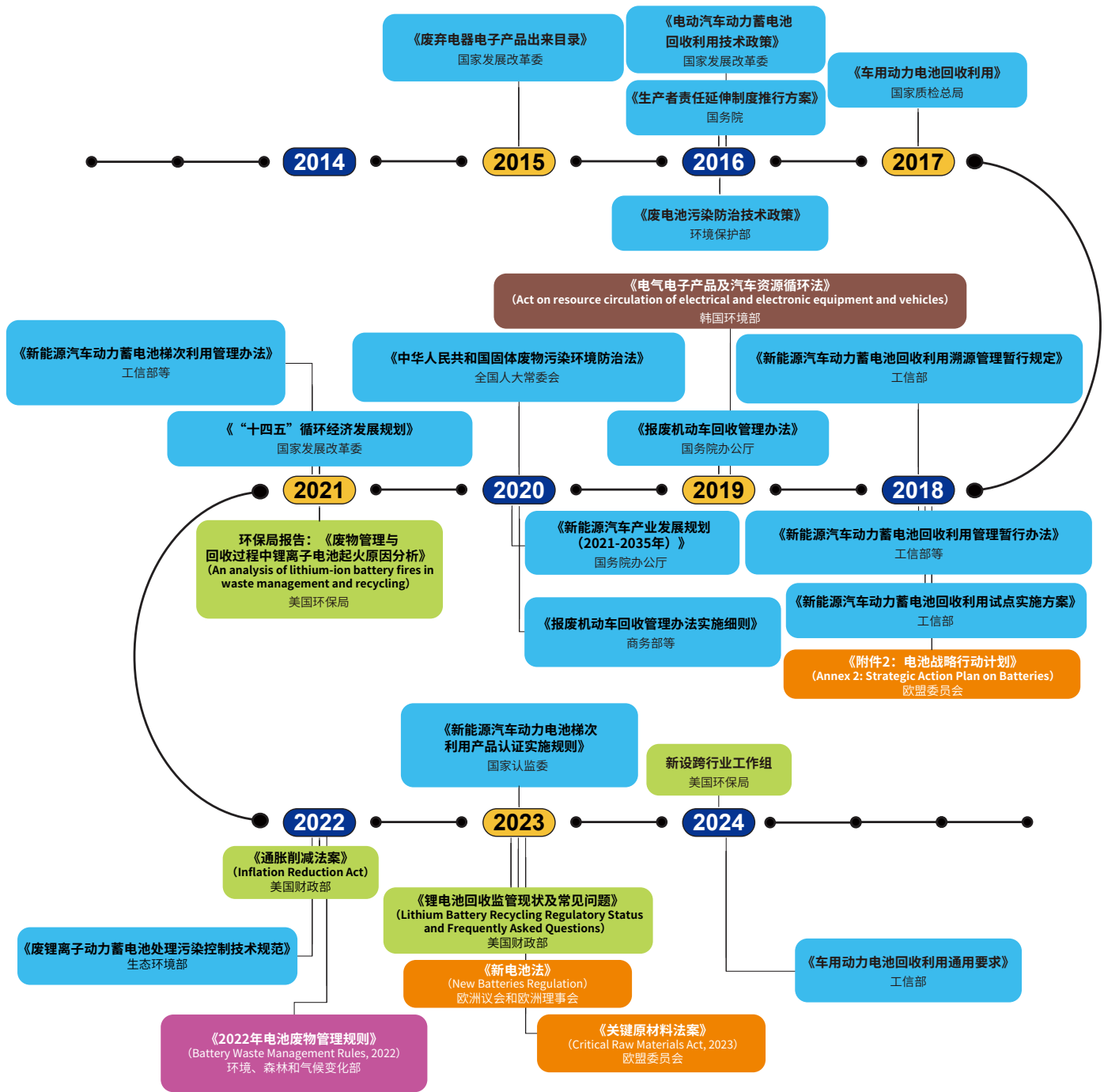
## 1. 相关法规和合规要求持续收紧

相关法规和合规要求的收紧推动了全球电池回收行业的发展。生产者责任延伸、危险废物管理和报废回收等强制性要求对行业产生了直接影响。健全完善的回收政策可以预防废旧锂电池带来的安全问题，避免可复用材料的损失，同时促进稀缺资源回收，助力实现循环经济<sup>1</sup>。此外，循环经济政策、行业标准和政府资助也为行业发展提供了动力。本节将概述美国、欧盟和亚洲国家（中国、日本、韩国和印度）在过去十年中针对锂电池回收推行的重要政策（图1）。

欧盟一直致力通过不同的政策和法规来推动可持续、循环和安全电池技术的发展。2018年，欧盟委员会通过了《电池战略行动计划》（Strategic Action Plan on Batteries）<sup>2</sup>，“制定了一个融合监管和非监管措施的综合框架，旨在全面支持电池价值链的所有环节”<sup>3</sup>，包括锂电池回收。2023年，欧盟出台了《新电池法》（New Battery Regulations），涵盖了电池从设计到报废的整个生命周期<sup>4</sup>。这项“从摇篮到坟墓”的法规强调了循环经济和生产者责任延伸，明确了生产商的废弃电池回收目标，并设定了废电池锂回收率到2027年底达到50%和到2031年底达到80%的目标。该法规要求企业申报电池产品碳足迹，并在2025年前达到特定的回收材料含量目标，同时规定在2027年前指定类型的电池产品必须配有数字护照，其中包含的详尽信息将提高产品透明度和可追溯性。欧盟《新电池法》强化了电池行业的可持续发展标准，并建立了有效的全生命周期监督机制，将对电池从生产到回收的整个价值链产生影响。

美国政府也在多措并举推动锂电池的回收利用。美国联邦环保局根据《资源保护与回收法》（Resource Conservation and Recovery Act）制定了一系列联邦废物管理和回收法律。2021年，美国联邦环保局发布了一份报告<sup>5</sup>，分析了锂电池回收不当的潜在影响。此外，报告还指出，“根据《美国联邦法规》（Code of Federal Regulations）第40篇第273部分《资源保护与回收法》危险废物特殊规定，锂电池可以作为通用废物进行管理”。2023年，美国发布了一份备忘录形式的联邦指引<sup>6</sup>，旨在“阐明通用废物和回收方面的危险废物相关规定如何适用于锂电池”。然而，截至目前，美国尚未出台针对锂电池回收的联邦政策，但美国联邦环保局已宣布其正在制定一项拟议指引，计划将锂电池从现行通用废物指引中分离出来，列为一个全新且独立的通用废物类别，该指引预计将于2025年中发布<sup>7</sup>。

纵观世界各国，中国一直是应对锂电池回收问题的积极行动者，提出并落实了多项政策。图1列举了其中大部分重要政策，例如《废电池污染防治技术政策》（2016年），其涵盖了锂电池从收集、贮存、利用到处理、运输和处置的整个生命周期<sup>8</sup>。值得注意的是，中国工信部在2018年针对废旧锂电池问题推出了废电池处理指引和电池回收技术标准等多项政策，明确了电动汽车制造商的回收责任，确保了电池回收的可追溯性，并指定了电池回收试点区域<sup>9</sup>。《固体废物污染环境防治法》（2020年）确立了汽车动力电池生产者责任延伸制度，并禁止了固体废物进口<sup>10, 11</sup>。《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》（2020年）推动了动力电池回收领域的立法进程<sup>12</sup>。《循环经济发展规划》（2021年）聚焦于资源回收、再制造和再利用，旨在推动循环经济成为2021至2025年期间的国家优先事项<sup>13</sup>。中国工信部还发布了《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件（2024年本）》，针对开展废旧电池梯级利用或再生利用业务的企业提出多项要求，现正公开征求意见<sup>14</sup>。此外，印度和韩国等其他亚洲国家也在积极构建锂电池回收生态系统<sup>15-18</sup>。



资料来源：CAS根据公开信息整理

图1：各国/地区的锂电池回收相关政策大事年表。注：颜色代码 - 中国（蓝色）、美国（绿色）、欧洲（橙色）、印度（紫色）、韩国（棕色）



2. 汽车制造商将供应链脱碳列为优先事项

虽然电动汽车在行驶过程中不会因使用燃料产生直接的尾气排放而往往被视为清洁环保，但锂电池的生产却是一个高碳排放过程。锂电池生产约占电动汽车制造过程碳排放总量的40%-60%。

面对不断提升的来自监管机构、投资者和利益相关者在

削减碳足迹方面的压力，领先汽车制造商正在迅速推进其净零战略，并将关键材料（尤其是电池）作为关注焦点（图2）。例如，大众集团碳中和战略的核心目标之一是到2030年实现乘用车及部分商用车使用阶段平均碳足迹较2018年减少30%。为此，大众集团于2021年初启用了汽车电池回收示范工厂，并计划对其上游电池供应商采用特定的循环经济绩效指标。

|         | 净零目标 |                                  | 电池供应链脱碳                  |  |
|---------|------|----------------------------------|--------------------------|--|
|         | 年份   | 电池碳足迹管理                          | 电池回收合作                   |  |
| 比亚迪     | /    | /                                | 建立年回收产能高达1.3GWh的回收设施     |  |
| 特斯拉     | /    | 采用LCA碳足迹核算方法                     | 2023年向回收合作伙伴发运了3GWh的电池材料 |  |
| 宝马      | 2050 | 通过共享数据生态系统Catena-X追踪点至组件和原材料的碳足迹 | 与华友循环合作，实现闭环回收           |  |
| 广汽      | 2045 | /                                | 与Greenmax合作，进行电池回收       |  |
| 大众      | 2050 | 针对电池生产设定特定的循环经济KPI               | 在萨尔茨吉特建立汽车动力电池回收试点工厂     |  |
| 上汽      | 2050 | /                                | 与宁德时代合作，推动电池回收           |  |
| 理想      | /    | 对全系车型进行碳足迹核算，且在C-GCAP测试中名列前茅     | 委托合格供应商回收电池              |  |
| 梅赛德斯·奔驰 | 2039 | 在未来十年内追踪并计量供应链碳足迹                | 在生产过程中广泛使用回收材料和可再生能源     |  |
| 长安      | 2045 | 加入国际EPO乘用车PCR标准工作组               | 与回收公司成立合资企业，开展电池回收业务     |  |
| 吉利      | 2045 | 自主开发碳管理信息平台                      | 建立以汽车制造商为核心的产业联盟回收模式     |  |

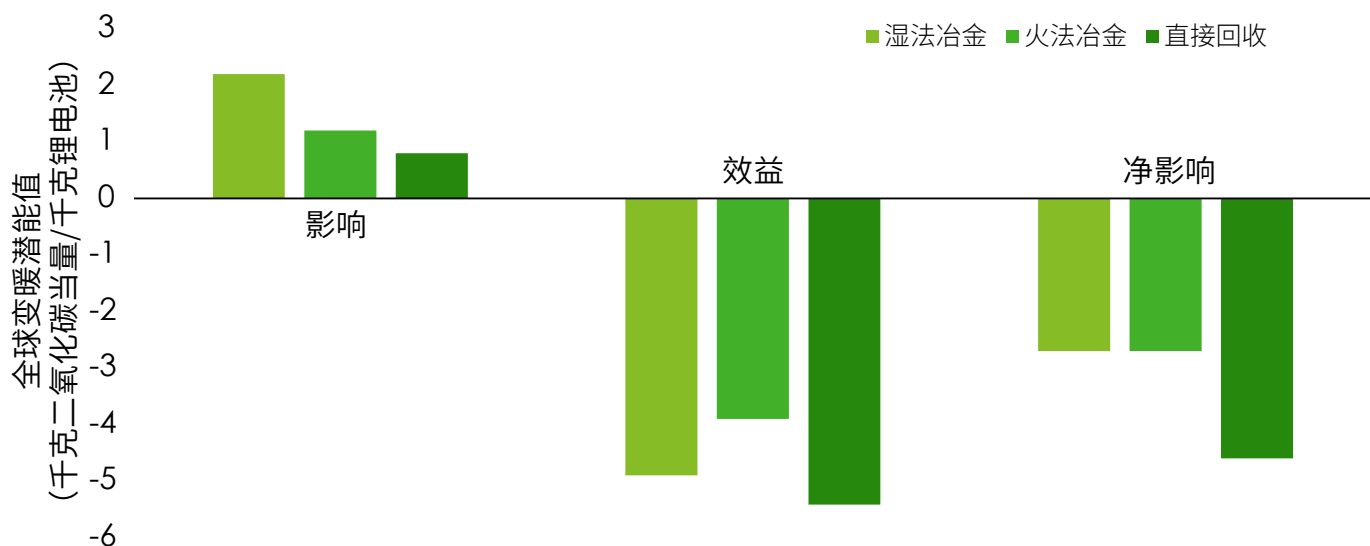
Clean Technica评选出的2023年十大电动汽车制造商

资料来源：公司网站、公开信息、德勤分析

图2：领先电动汽车制造商的净零战略及电池相关举措

动力电池中含有锂、镍、钴等多种矿物，这些矿物的开采和精炼过程会排放大量的二氧化碳。因此，电池回收和原材料再生是实现脱碳的重要一环。此外，电池回收还有助于减少运输、制造等环节的能源消耗和碳排放。根据弗劳恩霍夫材料周期和资源策略研究所（Fraunhofer

IWKS）在2023年发表的一篇研究论文，通过评估三种主要电池回收工艺的全生命周期环境影响，研究估计，每回收1千克锂电池可以减少2.7至4.6千克二氧化碳当量排放<sup>19</sup>。在三种电池回收工艺中，直接回收的环境效益最高（图3）。



资料来源：弗劳恩霍夫材料周期和资源策略研究所 (Fraunhofer IWKS)

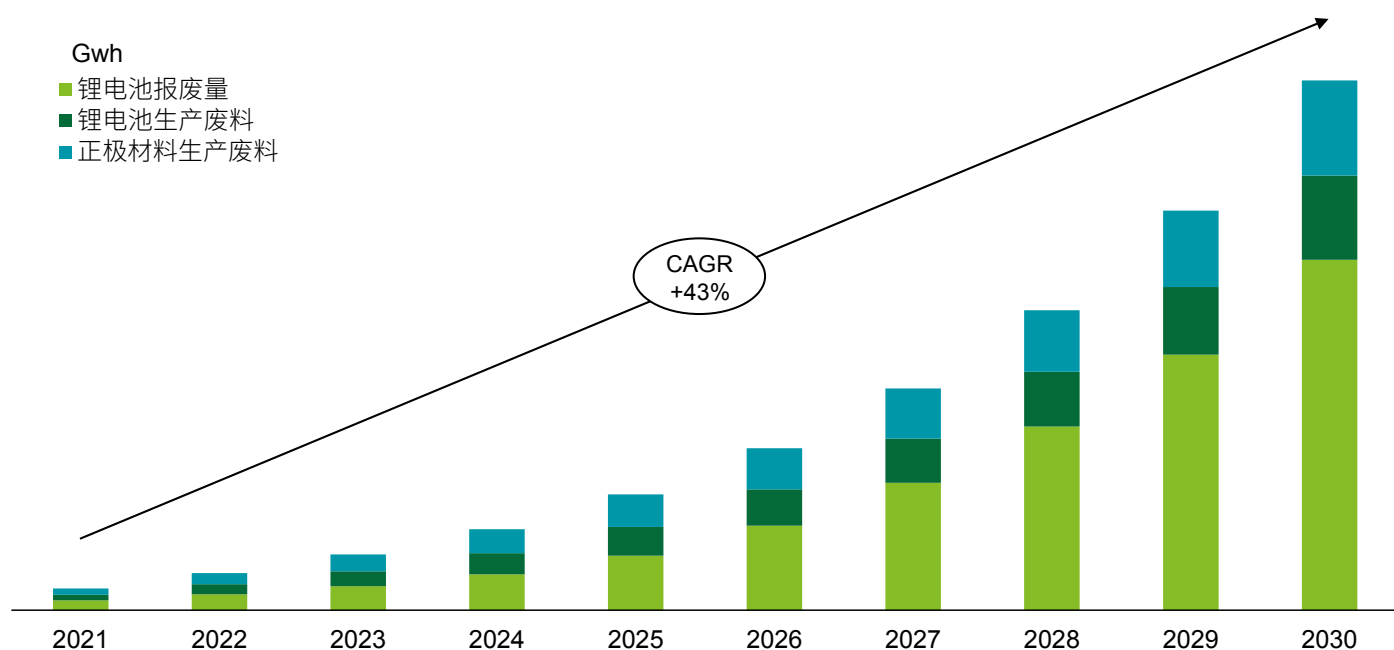
图3: 不同锂电池回收工艺的全生命周期环境影响

### 3. 电池退役潮将至

随着全球新能源汽车市场的崛起，动力电池装机量迅速攀升。由于锂电池的性能会随使用时间的增加而逐渐衰减，动力电池的平均使用年限通常在5到8年之间。因此，首批投入市场的动力电池即将迎来“退役潮”。根据测算，2021至2030年期间，动力电池报废量将以43%的复合年均增长率快速增长，到2030年将达到1,483GWh/年<sup>20</sup>。作为全球电动汽车市场的引领者，中国同样有望在电池

回收领域拔得头筹，届时中国将占全球电池回收产能的70%左右（图4）。

面对即将到来的电池退役潮，利益相关者正在积极开发和应用新兴电池回收技术，旨在尽量减少对环境的负面影响，同时通过精炼和熔炼报废电池中的高价值组分来实现资源利用最大化。作为锂电池行业的最后一块拼图，电池回收市场蕴藏着巨大的机遇。



资料来源：安信证券、德勤分析

图4: 全球可回收报废锂电池及锂电池生产废料预测

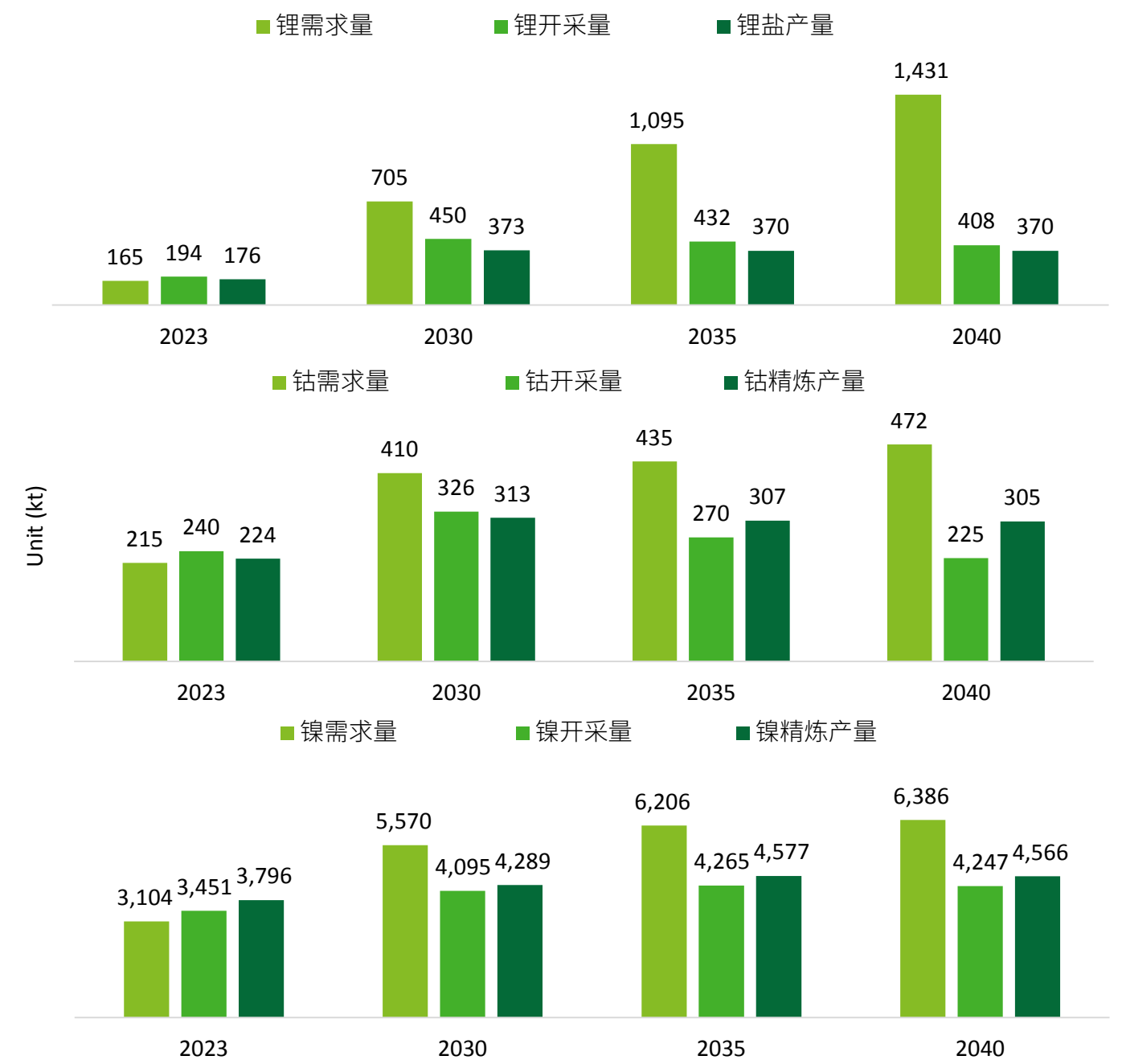


4. 回收利用以弥补关键原材料的潜在供应缺口

锂电池行业的发展仍然受限于上游关键矿物的供应。根据国际能源署的预测，在2050年实现净零排放的情景下，到2040年全球锂需求量将达到143.1万吨，相比当前水平高出七倍。此外，预计到2040年镍和钴的需求量将翻一番，分别达到638.6万吨和47.2万吨。尽管对关键矿物的需求激增，但扩大采矿和精炼产能需要投入大量资金并经历长达数年的开发周期。因此，预计关键矿物资源的

供需缺口将在2035年后逐渐显现并不断扩大（图5）。

近年来，电池关键原材料的价格波动剧烈，影响波及整个行业价值链中的利益相关者。虽然电池材料价格在2024年大幅下降，但受地缘政治紧张局势、贸易政策不确定性以及其他全球危机影响，供应链依然动荡不止。电池回收为锂电池行业开辟了一条新路径来减少对传统原材料开采的依赖并降低未来供应中断的风险。



资料来源：国际能源署《2024年全球关键矿物展望》，德勤分析

图5: 关键矿物供需缺口

# 市场格局

## 1. 回收市场预测

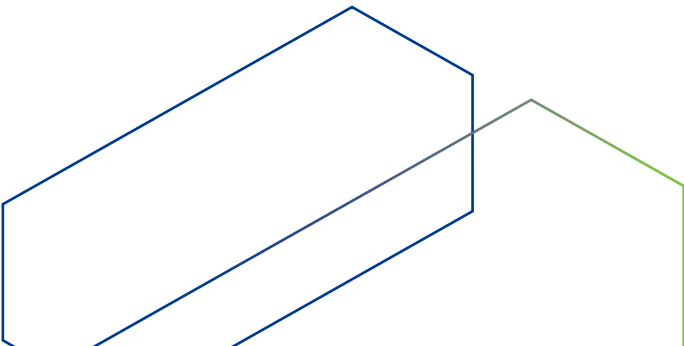
随着政府和企业采取行动应对持续攀升的电池回收需求，全球锂电池回收行业蓬勃发展。目前，现有设施的回收产能约为160万吨/年。待规划设施建成后，预计回收产能将超过300万吨/年。在政府计划和资金的大力支持下，各地区都在积极提高回收产能，以满足不断增长的需求。

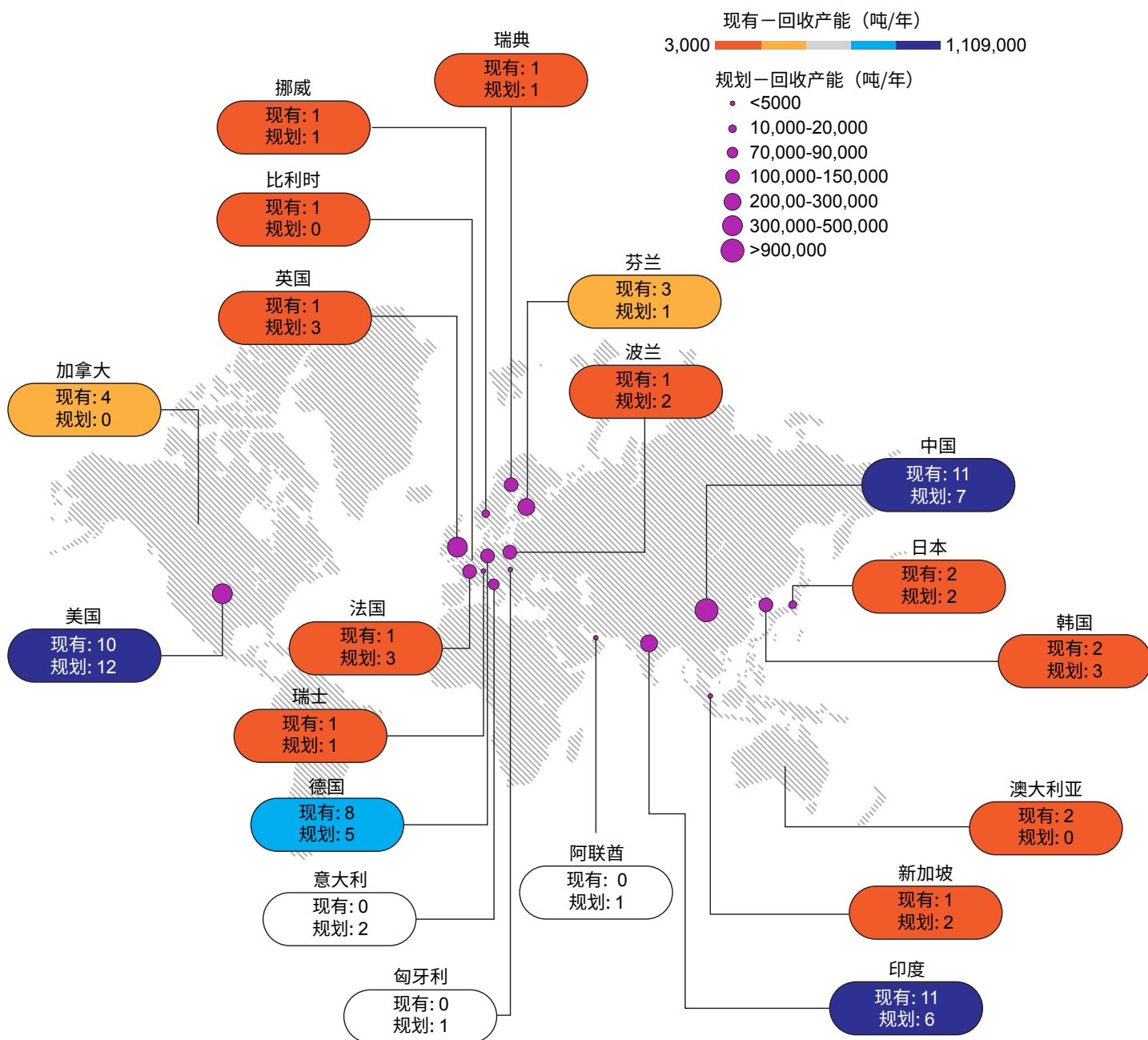
就现有设施而言，亚洲占据主导地位，总回收产能超过121万吨/年（图6）。其中，中国遥遥领先，回收产能超过110万吨/年，其次是印度，拥有产能为89,900吨/年。另一方面，日本和韩国的回收产能相对较低，分别为6,000吨/年和28,000吨/年。不过，中国计划将其回收产能增加122万吨/年，印度计划增加26万吨/年。随着韩国政府大力推动锂电池回收，韩国计划将其回收产能提高13.4万吨/年，日本计划提高2万吨/年。此外，亚洲其他区域也在建设新设施。

美国在内的北美地区总回收产能为14.4万吨/年。相较于

于锂电池生产和应用的增长预期，这一数字仍显不足。因此，美国政府正在通过提供必要的资金来支持回收设施的建设，例如美国能源部贷款项目办公室已宣布向Li-Cycle US Holdings, Inc.提供3.75亿美元的有条件贷款，用于在北美建设锂电池回收设施<sup>21</sup>。能源部的资金支持推动了建设锂电池回收设施的浪潮。目前，美国在积极推进相关计划，包括改进现有设施和建设新设施，力求将现有回收产能提高超过30万吨/年。

欧洲拥有超过20万吨/年的回收产能，分布在英国、法国、德国、芬兰、挪威、波兰、瑞典、比利时和瑞士。然而，2023年《新电池法》的实施推动电池回收行业迎来显著扩张，许多企业纷纷扩大业务规模或建设新设施。此次扩张或将促使欧洲的回收产能提升至超过112万吨/年，其中苏格兰、匈牙利和意大利的发展较快，仅苏格兰的回收产能就将达到35万吨/年。此外，优美科宣布将建设欧洲最大的电池回收工厂，预计回收产能为15万吨/年<sup>22</sup>。





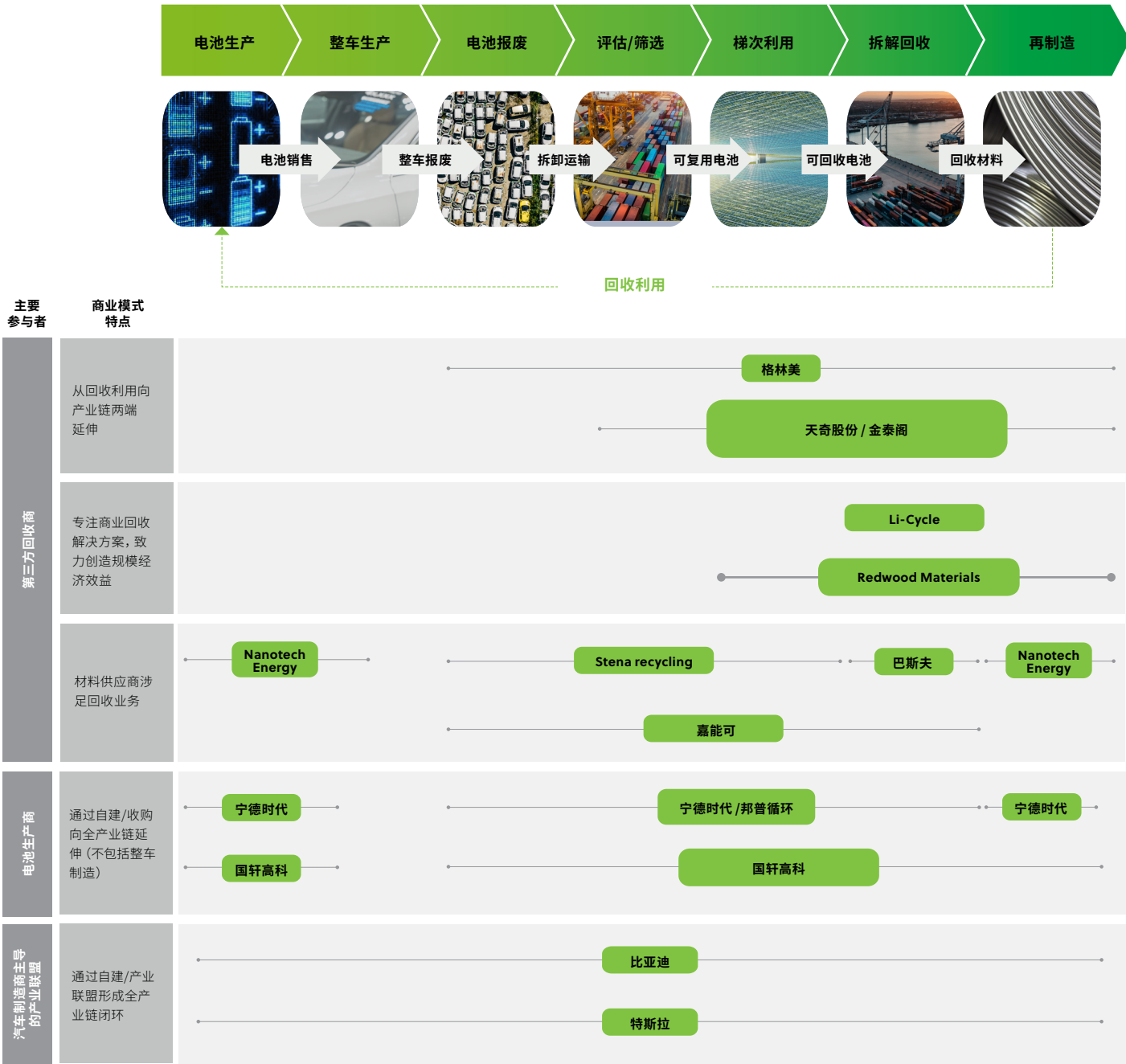
资料来源：CAS根据公开信息整理

图6：现有和规划锂电池回收设施的地域分布情况

2. 产业链

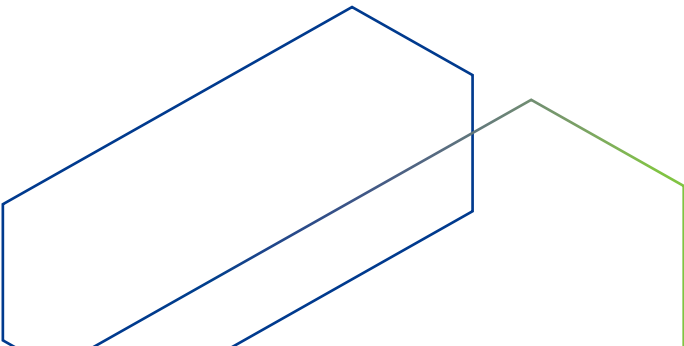
锂电池回收行业发展势头强劲，将为构建可持续电动汽车供应链提供有力支持。汽车制造商、电池生产商和第

三方回收商等各类参与者都采取了独特的战略参与这一领域。这些战略或全面覆盖整个价值链，或专门针对特定环节，但目标均在于优化资源回收，建立闭环产业链（图7）。



资料来源：公司网站、公开信息、德勤分析

图7：电池回收产业链及回收商采用的商业模式



电池回收产业链中的各类参与者在原材料获取、技术能力、回收渠道、监管影响力和可持续发展等方面拥有不同优势。

- **第三方回收商**

拥有回收技术和流程方面的专业知识，能够高效进行材料回收。然而，他们对原材料获取和回收渠道的依赖较大，需要通过合作关系加以解决。

- **电池生产商**

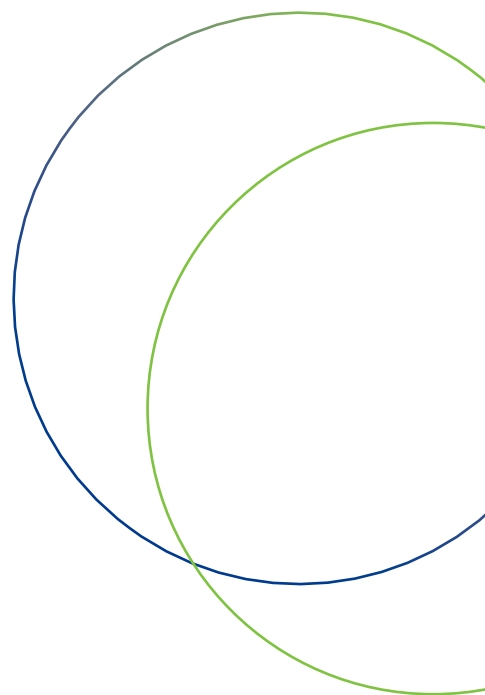
占据产业链中的重要地位，拥有稳定的原材料获取渠道、先进的回收技术和强大的监管影响力。通过对生产环节的控制，他们能够确保稳定的原材料供应。

- **汽车制造商**

正在迅速提升自身在回收领域的地位，尤其是在回收渠道方面。他们通过报废汽车计划和客户网络掌握了较大的话语权。此外，汽车制造商将可持续发展列为优先事项，积极遵守监管要求，致力逐步成为具有影响力的参与者。

目前，各类参与者正在合力构建闭环电池回收产业链，但真正实现无缝衔接的关键或许在于数字产品护照（DPP）的广泛应用。DPP是嵌入在每个电池中的数字记录，其中包含电池从原材料采购、制造、使用、维修到回收的全生命周期数据。作为一种数字身份，DPP可为电池回收产业链中的所有利益相关者提供有关电池状况和材料成分的实时、准确信息。

在这个众多利益相关者都依赖准确信息来做出决策的行业中，DPP充当了沟通和协作的桥梁。此外，随着该行业在回收可追溯性方面面临的监管压力不断增加，DPP通过建立贯穿生产到处置全流程的可认证监管链来保障合规性。如今，DPP的实际应用在欧洲受到广泛关注，宝马<sup>23</sup>和大众等公司正在尝试利用DPP满足监管标准并提高运营效率。

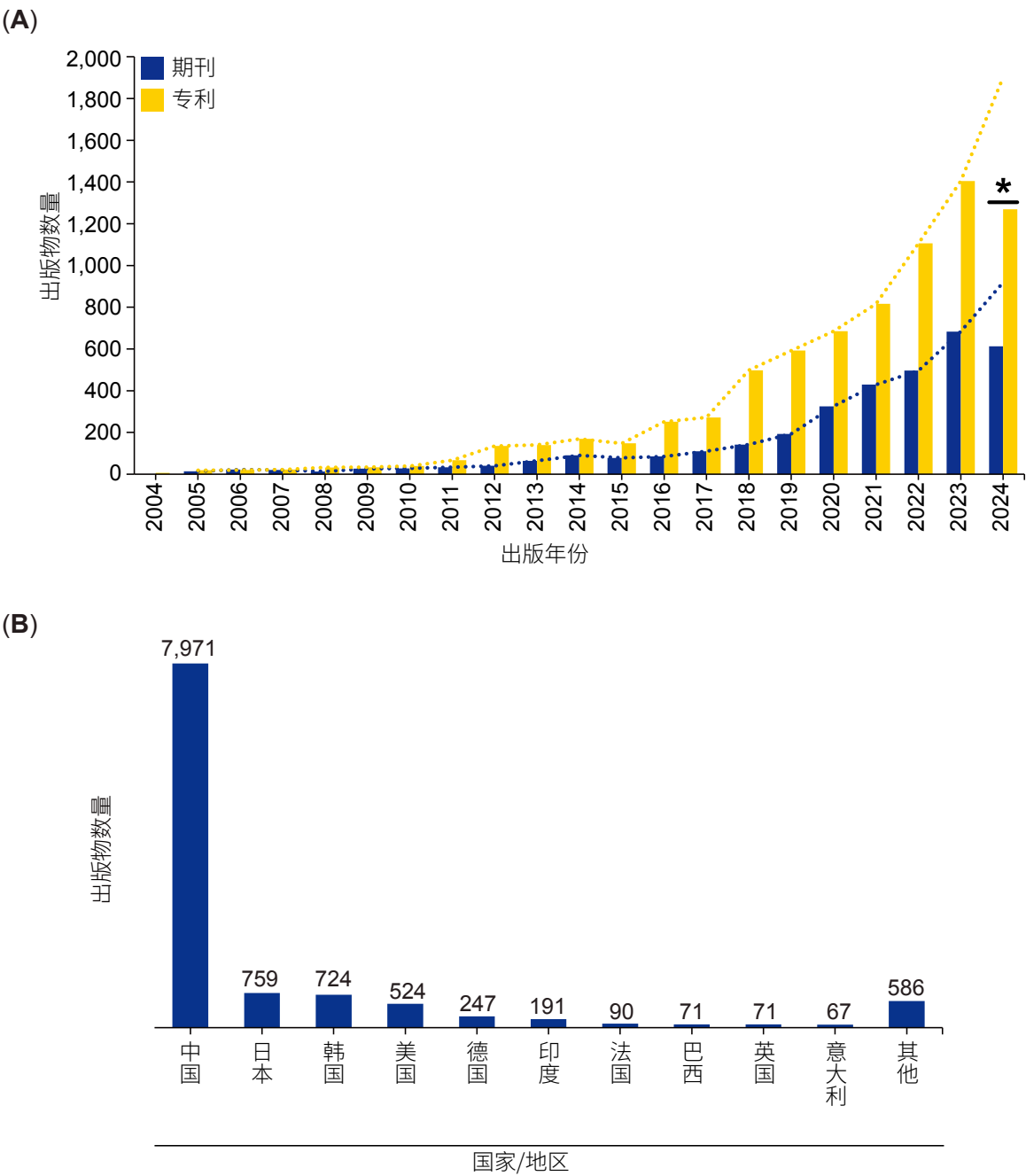


# 技术创新

为编制本报告，我们依托CAS内容合集™（全球最大的人工编辑科学信息存储库之一）对技术创新趋势进行了全面分析。我们的行业专家进行了精确的搜索查询，检索了2004至2024年期间的11,000多份文献（期刊和专利出版物），旨在确保信息覆盖范围的最大化，同时将无关信息的干扰降至最低。除了提取和分析这些文献的书目数据，我们还基于CAS的概念和化学物质索引对相关技术发展进行了深入研究。

## 1. 了解全球领导者和技术创新趋势

锂电池回收领域的专利与期刊出版物比例高达2:1，远超常规比例（1:5），表明该领域具有较高的商业价值（图8A）。此外，如图8B所示，我们针对出版物地域分布情况的分析显示，亚洲国家在该领域处于主导地位。中国已经成为领头羊，日本和韩国紧随其后，美国和德国也占有重要位置。



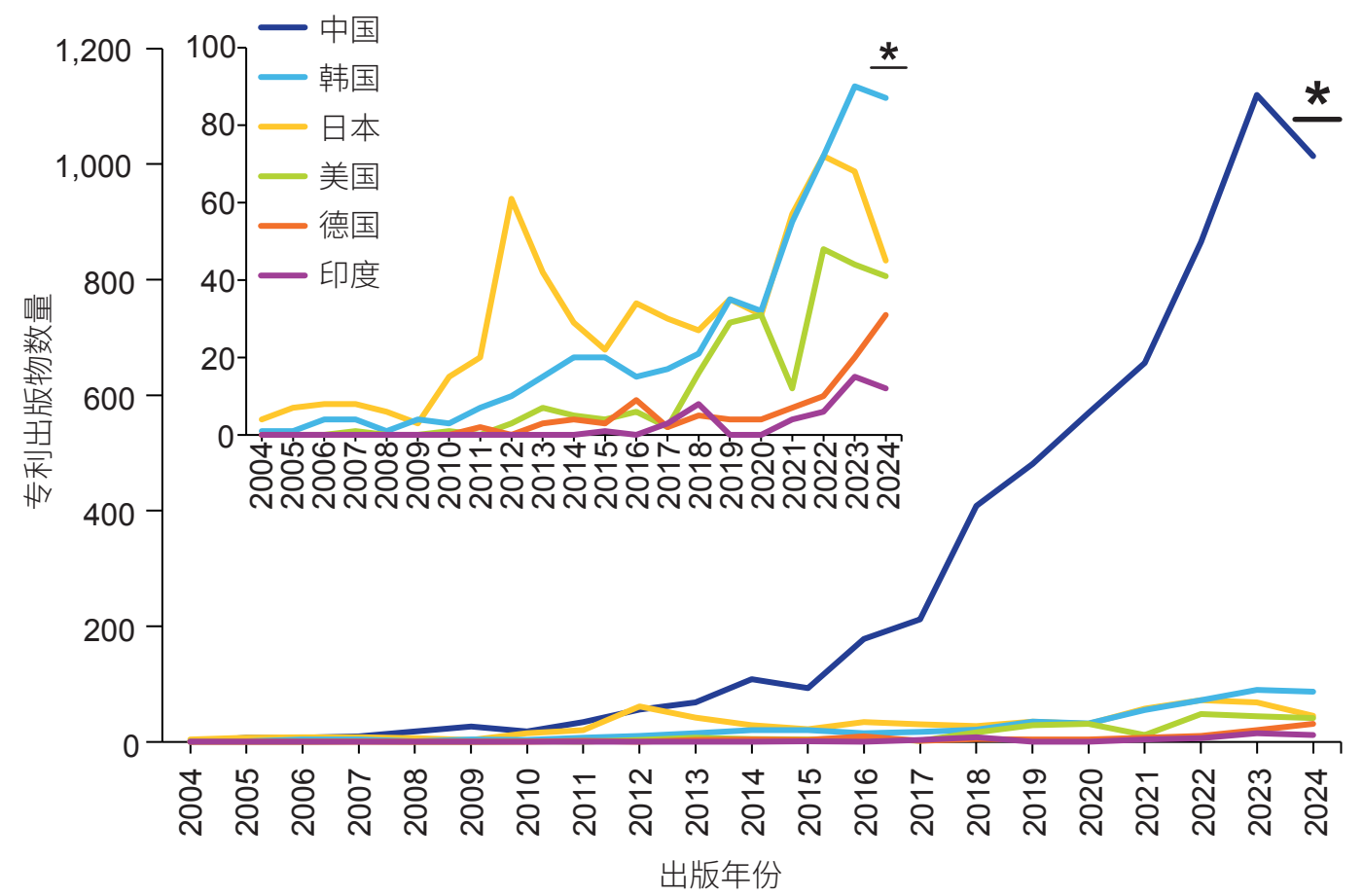
资料来源：CAS内容合集

图8：锂电池回收领域的 (A) 出版物数量变化趋势和 (B) 出版物地域分布情况。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集集中的期刊和专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据



为评估锂电池回收的商业化进程，我们分析了领先国家的专利出版物数量变化趋势（图9）。中国仍占主导地位，但日本和韩国在商业化方面也取得了长足进展，这一

点从它们近年来不断增加的专利数量中可见一斑。美国紧随其后。值得注意的是，韩国专利数量的指数式增长表明其在技术创新方面的投资急剧增加。

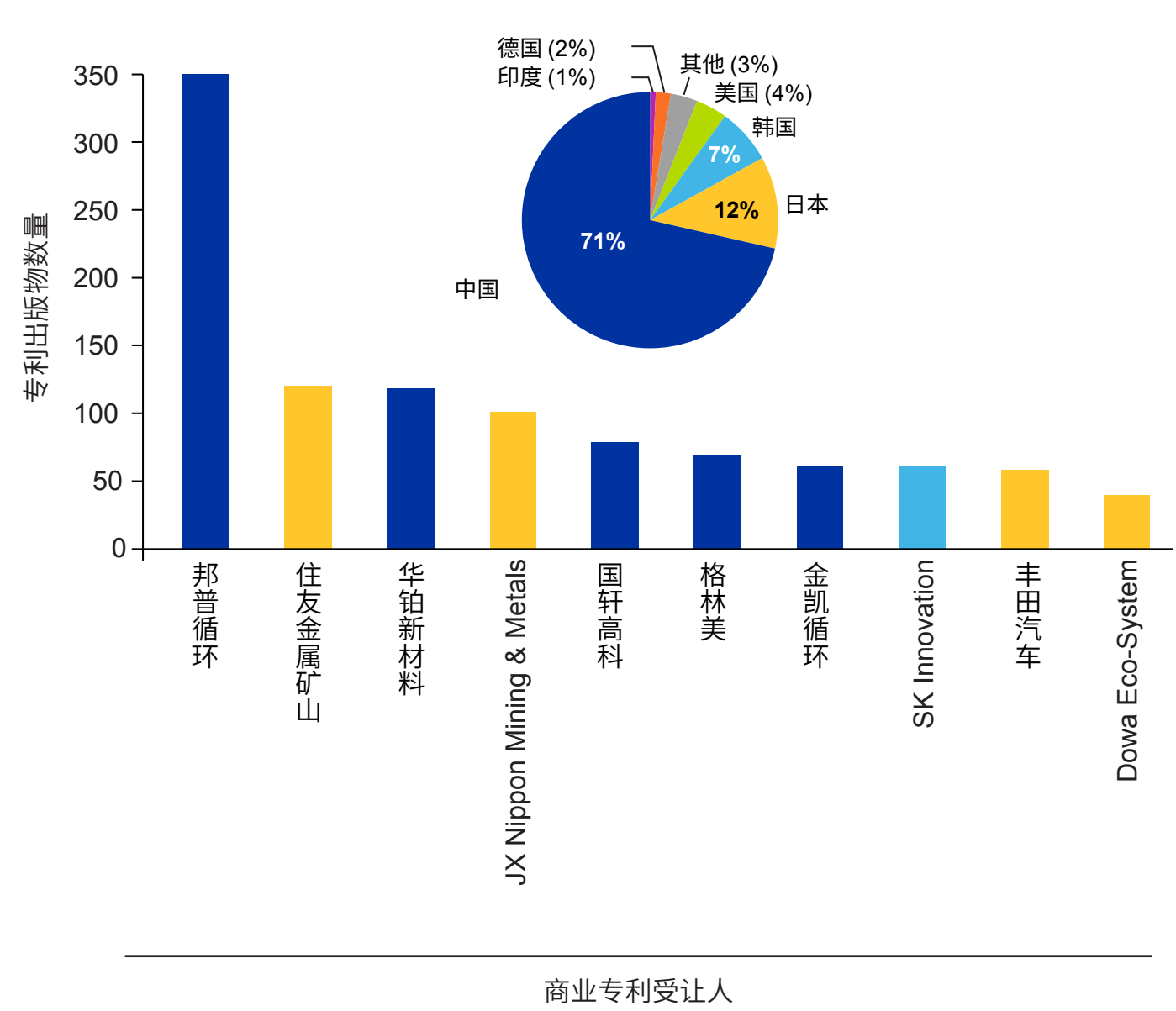


资料来源：CAS内容合集

图9：领先国家/地区的专利出版物数量变化趋势。数据代表2004年2024年期间收录在CAS内容合集中的锂电池回收相关专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据

随后，我们根据专利出版物数量确定了锂电池回收技术创新领域的领先公司（图10）。宁德时代旗下中国子公司邦普循环（代表性专利：CN113957255A<sup>24</sup>）在该领域脱

颖而出，日本公司住友金属矿山（JP2021031760A<sup>25</sup>）紧随其后。韩国公司SKInnovation（WO2022139310A1<sup>26</sup>）也在前十之列。



资料来源：CAS内容合集

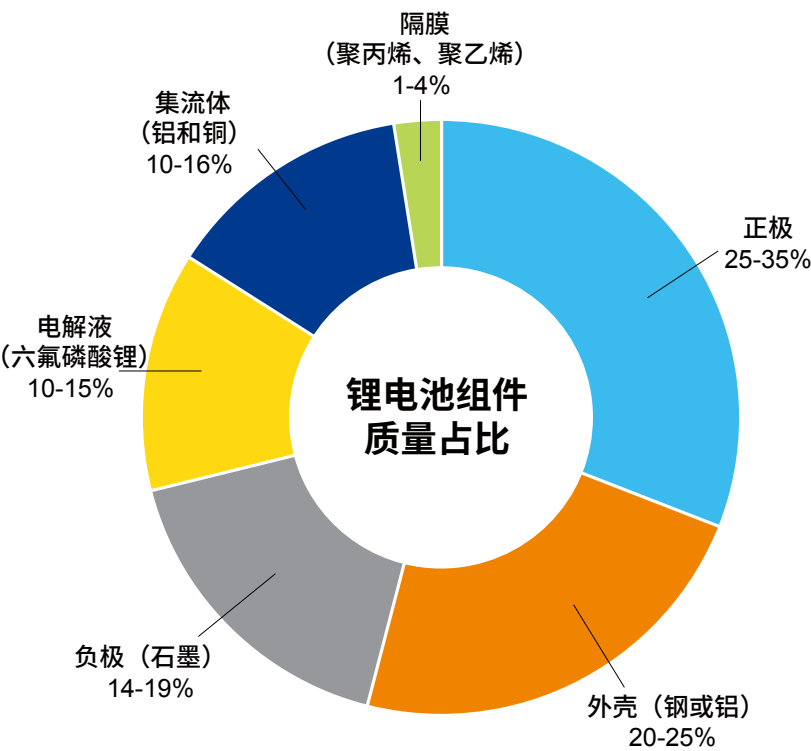
图10：锂电池回收领域的成熟/领先商业实体（按专利出版物数量排名）。柱状图按国家/地区着色。饼状图展示了该领域商业专利受让人的地域分布情况。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集集中的专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据

除这些领先公司外，我们还根据过去五年的专利申请增加量筛选出了一些新星公司，包括德国公司巴斯夫（WO2024094725A1<sup>27</sup>）、韩国公司LG新能源（WO2024010260A1<sup>28</sup>）、美国公司Ascend Elements（US20240304883A1<sup>29</sup>）以及中国公司武汉蔚能（CN116387667A<sup>30</sup>）和天能新材料（CN118256726A<sup>31</sup>）。巴斯夫、LG新能源和天能新材料正在开发从废弃锂电池中回收高价值金属的方法，而Ascend Elements则专注于锂电池回收。此外，武汉蔚能正在研发高效回收和拆解锂电池的技术。这些公司都展现出了巨大的增长潜力

和创新能力，因此在未来一段时间内需要密切关注其对锂电池回收行业的潜在影响。

2. 在选择回收工艺时，价值比质量更重要

从更高层面来看，企业需要做出的一项关键决策是选择回收工艺。锂电池中大多数组件在电池总质量中的占比都大约在10%-35%之间（图11），但常见回收工艺大多针对回收价值最高的正极材料而开发。这是因为正极材料通常是由钴和镍等紧缺金属组成。

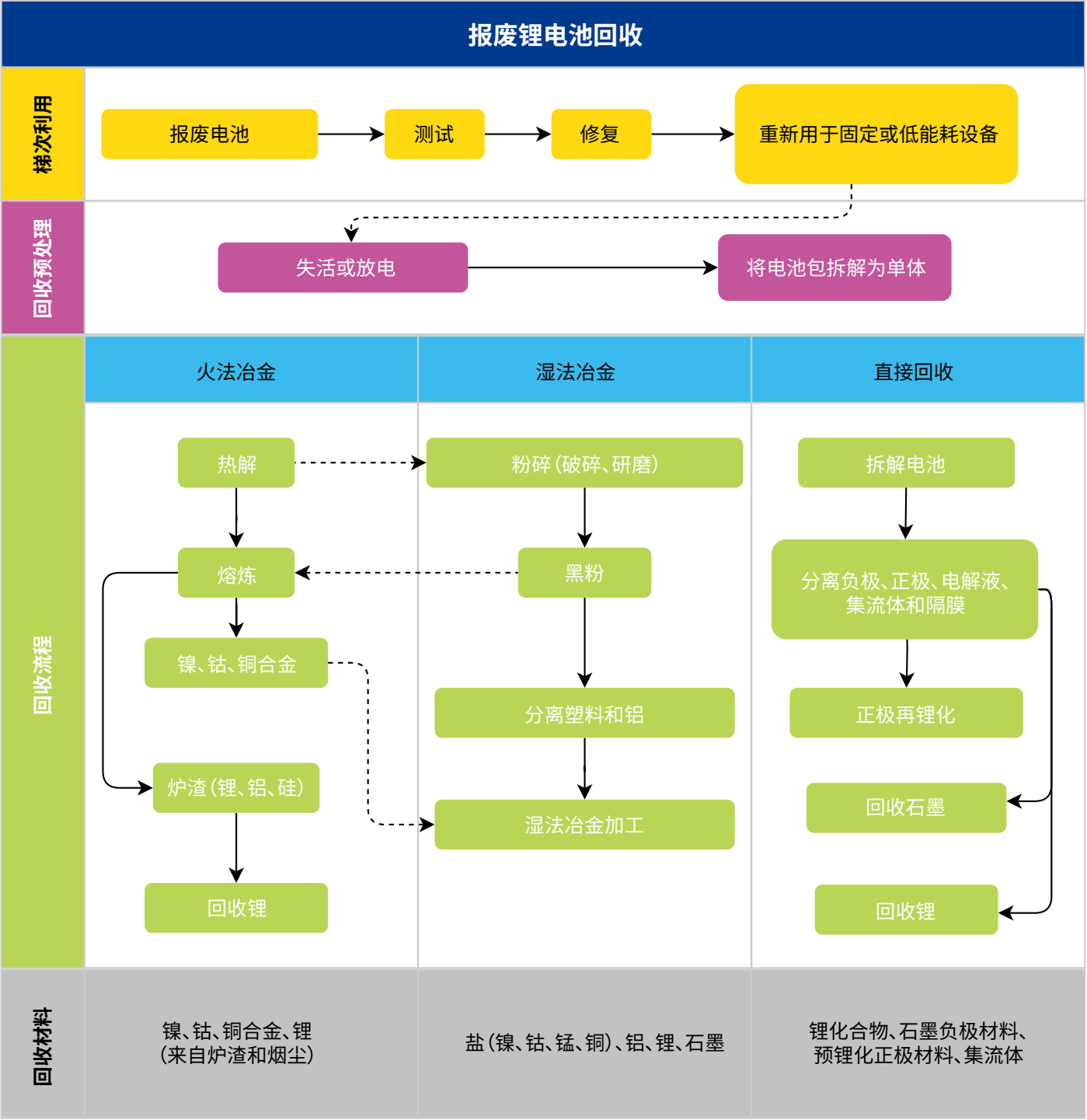


资料来源：CAS

图11：锂电池组件质量占比。改编自Georgi-Maschler等人的文章<sup>32</sup>

废弃锂电池的回收流程如图12所示。除直接进行回收外，还有一小部分废弃锂电池会被重新用于高尔夫球车或光伏储能等低能耗设备，这一过程称为梯次利用<sup>33,34</sup>。回收流程的第一步是对电池进行失活处理。废弃锂电池中的残余电荷可能会在回收过程中引发热失控并释放有毒气体，因此必须进行失活处理。常见失活处理方法包括外部短路和使用导电液体<sup>35</sup>。

锂电池的主要回收工艺包括火法冶金、湿法冶金和直接回收<sup>36</sup>，每种方法将使用不同的技术手段回收有价值的材料。火法冶金依靠高温处理，湿法冶金使用化学溶剂，直接回收旨在保留电极的化学结构。采用这些方法回收的金属具有不同的化学成分。通过火法冶金回收的金属多为合金形态，通常需要进一步的化学加工，这就催生了湿法冶金与火法冶金相结合的混合工艺（如虚线箭头所示）。



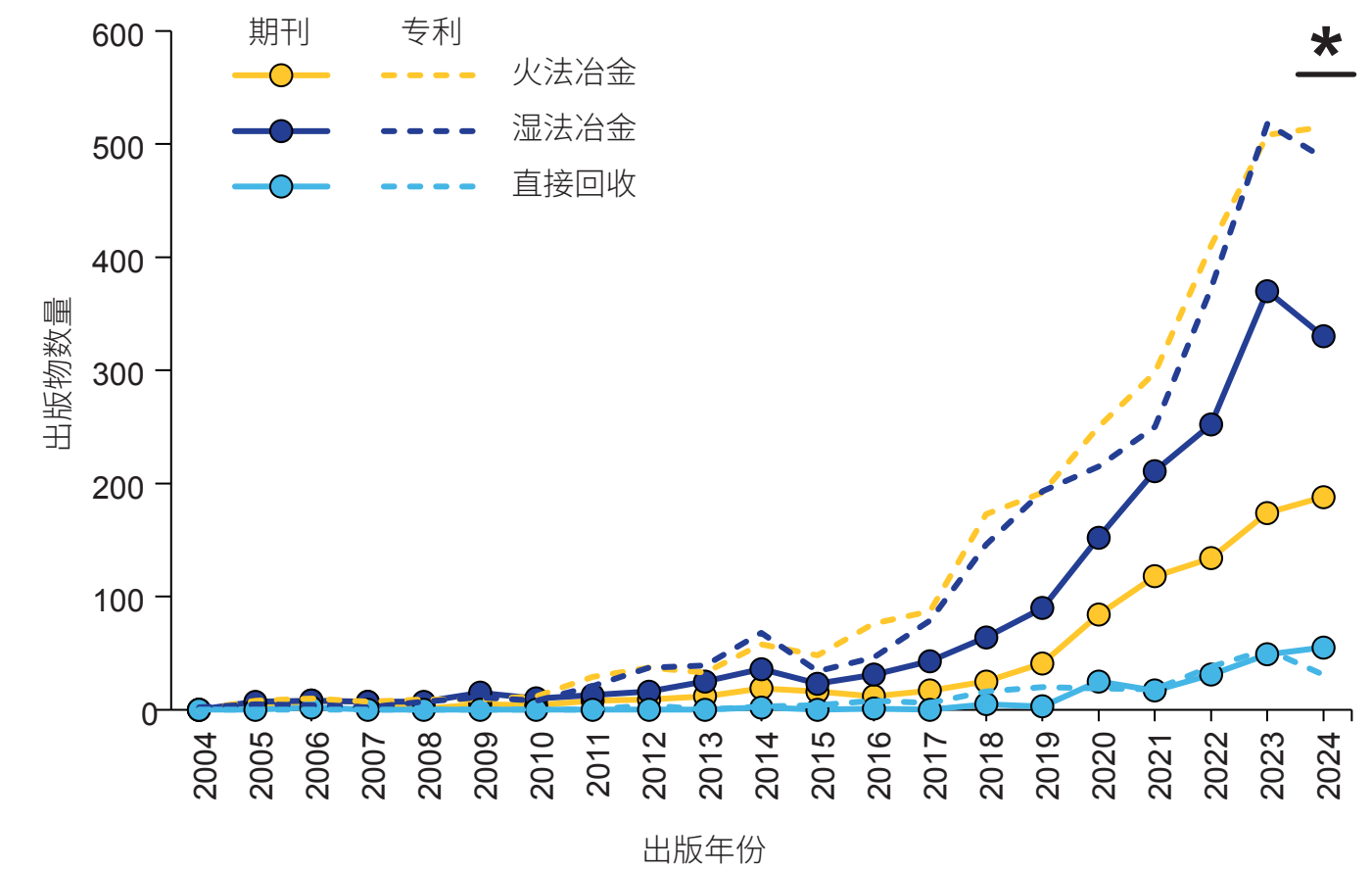
资料来源：CAS

图12：采用三种主要回收工艺回收工艺（湿法冶金、火法冶金和直接回收）回收锂电池的主要流程和步骤

3. 锂电池回收仍以火法冶金和湿法冶金为主导

图13基于CAS内容合集™中的数据，展示了火法冶金、湿法冶金和直接回收领域出版文献数量的变化趋势。从数据来看，出版物以专利为主，这反映了该领域具有较高的商业化价值。整体出版物数量的整体增长，凸显了锂电

池回收在全球范围内的重要性不断上升。具体而言，湿法冶金方面的出版物数量略微领先于火法冶金，而直接回收领域的出版物则明显滞后。此外，湿法冶金在期刊出版物中占比较高，表明业界在该领域进行了大量的基础研究，重点探索创新、高效、环保且具有成本效益的化学工艺。



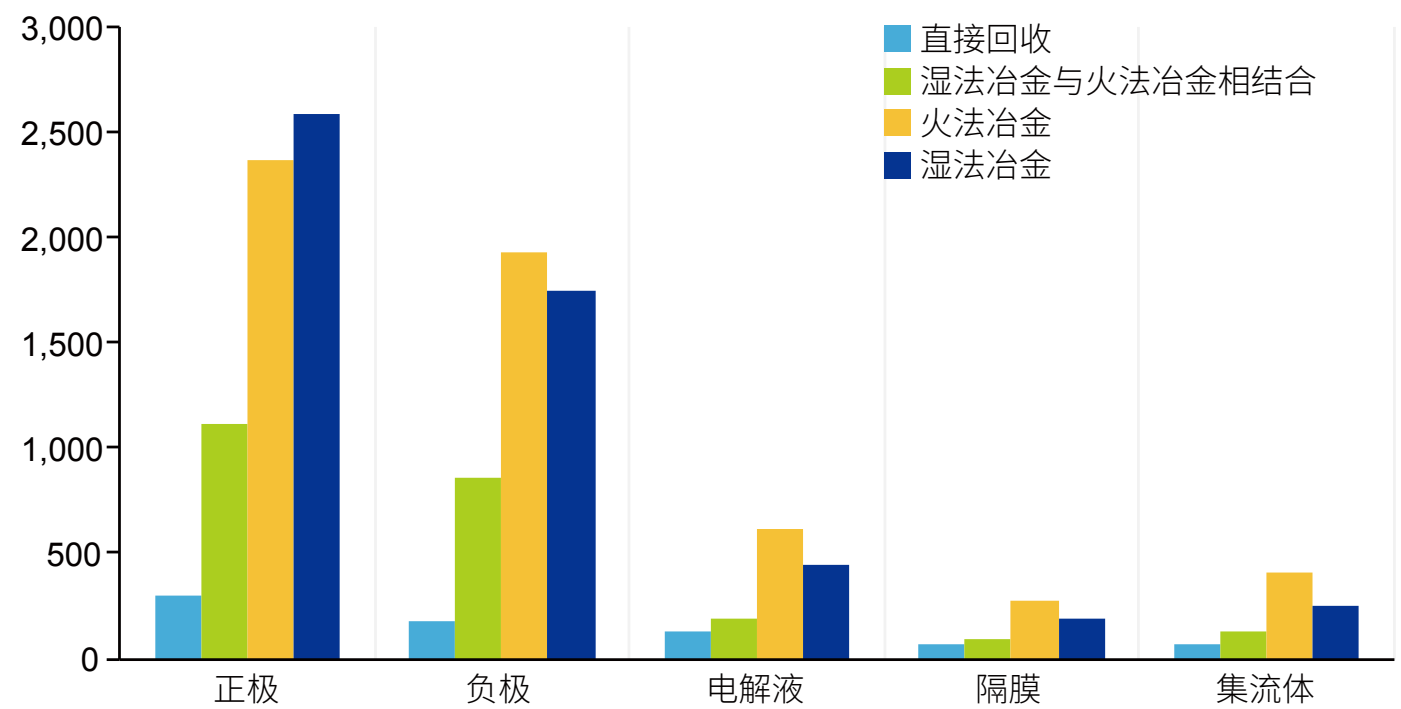
资料来源：CAS内容合集

图13：三种主要回收工艺（湿法冶金、火法冶金和直接回收）方面的出版物数量变化趋势。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集里的专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据

4. 锂电池正极材料回收的重要价值

回收工艺的选择通常与电池组件类型和回收材料有关。图14展示了针对不同电池组件的主流回收工艺。钴、镍和锂等高价金属使得正极材料回收成为重中之重<sup>37</sup>。可

回收的石墨和锂激起了业界对负极材料回收的关注<sup>38</sup>，而由锂盐和有机碳酸盐溶剂组成的电解液亦可用于进行锂提取<sup>38</sup>。此外，作为负极集流体制备材料的铜提高了该组件的回收价值<sup>39</sup>。

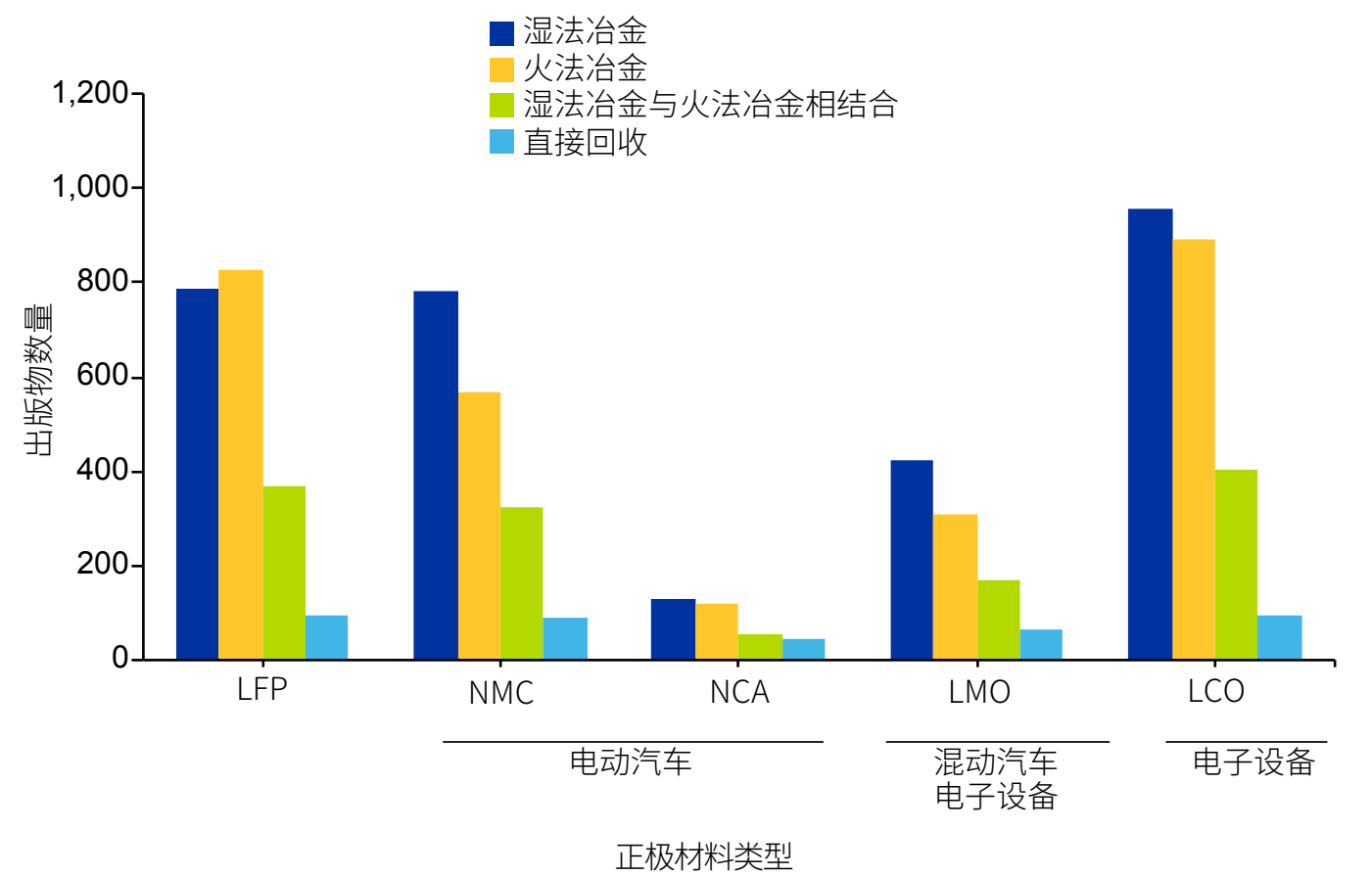


资料来源: CAS内容合集

图14: 与采用三种主要回收工艺（湿法冶金、火法冶金和直接回收）回收不同锂电池组件（正极、负极、电解液、隔膜和集流体）相关的出版物数量。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集集中的专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据

锂电池回收主要集中于正机组件，因为其含有价值最高的材料，但其组成成分可能存在些微差异。图15展示了常见锂电池正极材料类型及其对应回收工艺。磷酸铁锂（LFP）电池、镍钴锰酸锂（NMC）电池和镍钴铝酸锂（NCA）电池常用于电动汽车。其中，LFP电池和NMC电池已实现广泛应用，相关文献对其回收工艺也有大量讨论，这些方法按应用广泛度排序依次为湿法冶金、火法冶金、混合方法和直接回收。LFP电池更适合采用火法冶金方法，这可能是由于其所含金属价值较低，导致通过湿法冶金方法对其进行化学处理的成本效益较低<sup>40</sup>。NCA电池的使用相对较少，因此相关文献对其回收利用的研究也较少。锰酸锂（LMO）电池通常用于混合动力汽车或电子设备，而钴酸锂（LCO）电池则主要用于电子设备。这些正极材料回收工艺的应用程度也遵循上述趋势。

湿法冶金、火法冶金和直接回收。LFP电池更适合采用火法冶金方法，这可能是由于其所含金属价值较低，导致通过湿法冶金方法对其进行化学处理的成本效益较低<sup>40</sup>。NCA电池的使用相对较少，因此相关文献对其回收利用的研究也较少。锰酸锂（LMO）电池通常用于混合动力汽车或电子设备，而钴酸锂（LCO）电池则主要用于电子设备。这些正极材料回收工艺的应用程度也遵循上述趋势。

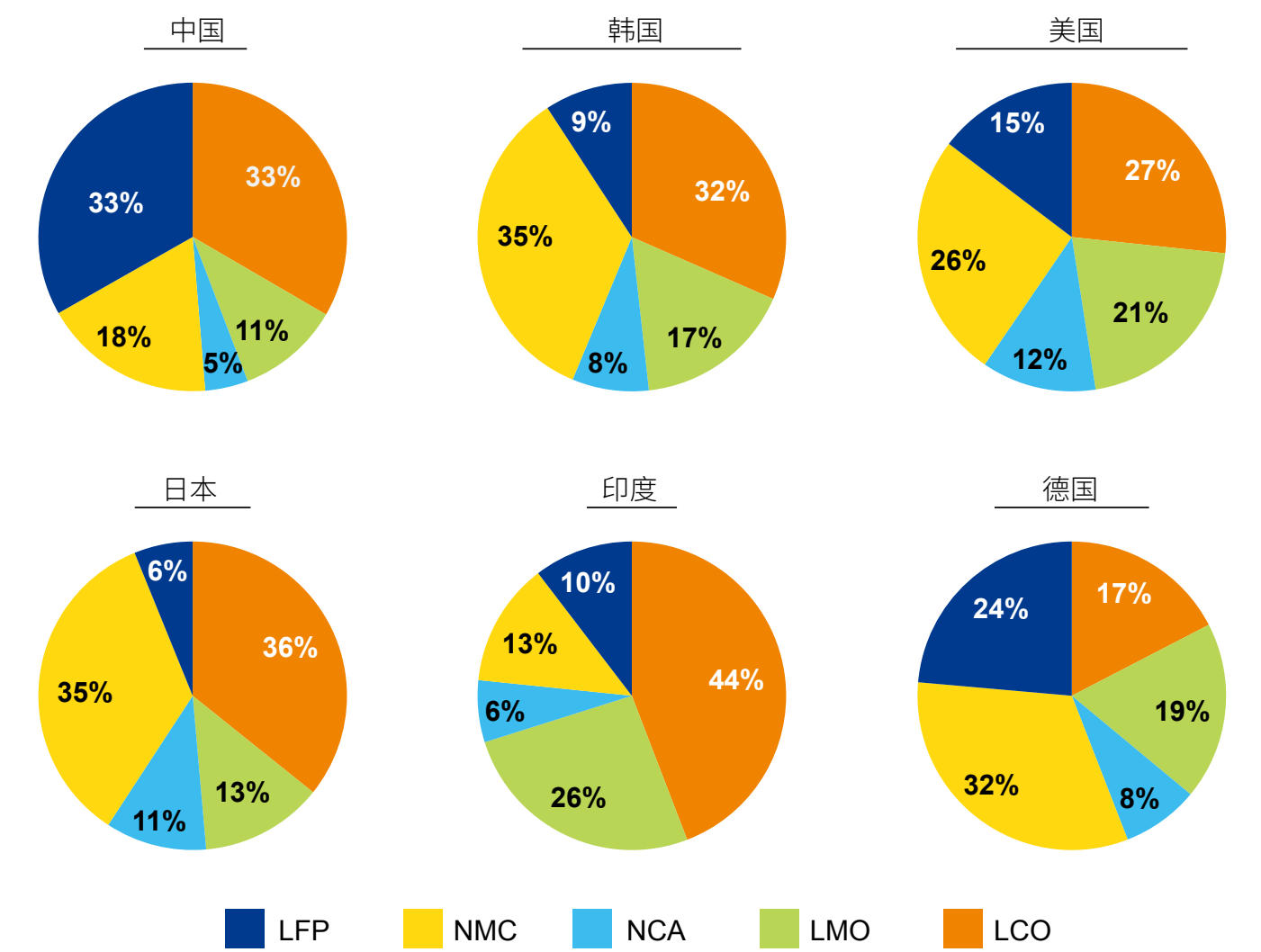


资料来源：CAS内容合集

图15：与采用三种主要回收工艺（湿法冶金、火法冶金和直接回收）回收不同锂电池（LFP、NMC、NCA、LMO和LCO电池）相关的出版物数量。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集的期刊和专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据



图16展示了不同国家在各类正极材料方面的出版物占比。中国对LFP电池的重视表明其在中国得到了广泛应用，而在韩国、美国、日本和德国等其他国家，NMC电池因在电动汽车领域较为普及而占据主导地位。此外，从电子设备中获取报废LCO电池也推动了LCO电池回收研究，这一点在印度和日本尤为明显。

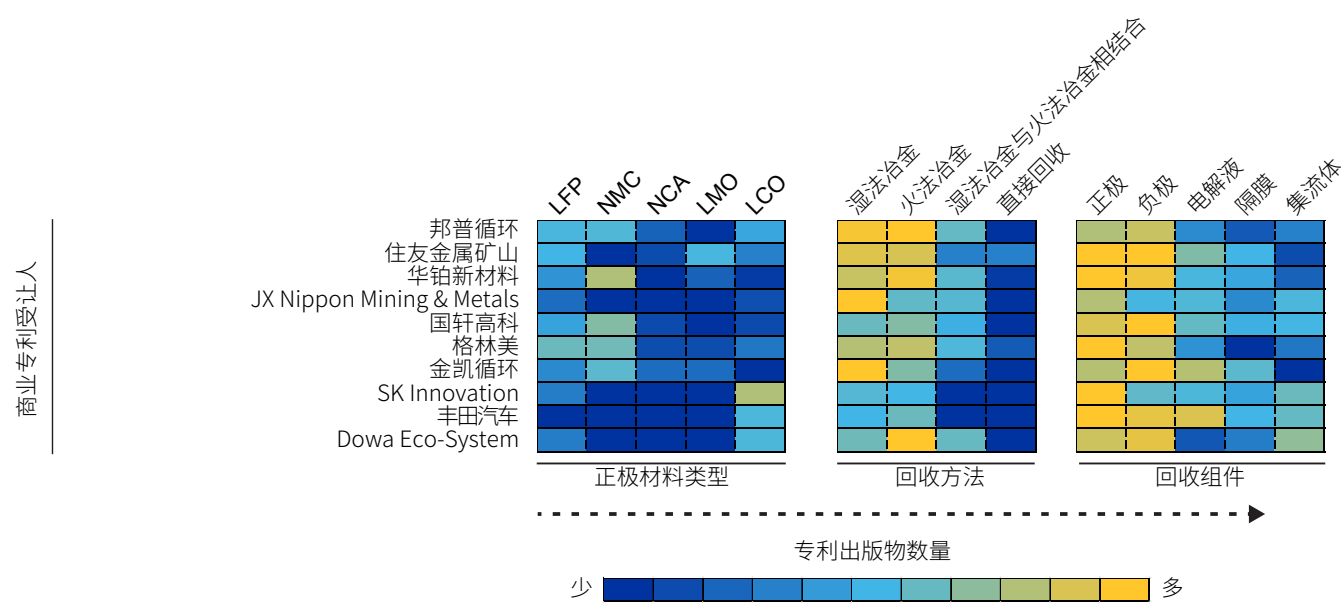


资料来源：CAS内容合集

图16: 主要国家或地区在不同锂电池（LFP、NMC、NCA、LMO和LCO电池）方面的出版物分布情况。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集的期刊和专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据

主要锂电池回收商对正极材料回收工艺的偏好因地区而异(图17)。中国回收商重点关注LFP电池,这与国内生产趋势相符,而其他地区的回收商则根据本地锂电池生产情况,在NMC电池和NCA电池之间进行均衡考量<sup>41</sup>。

火法冶金和湿法冶金方法均得到广泛应用,回收商对此并无明显偏好,一些回收商甚至综合运用这两种方法来提高回收效率<sup>42, 43</sup>。



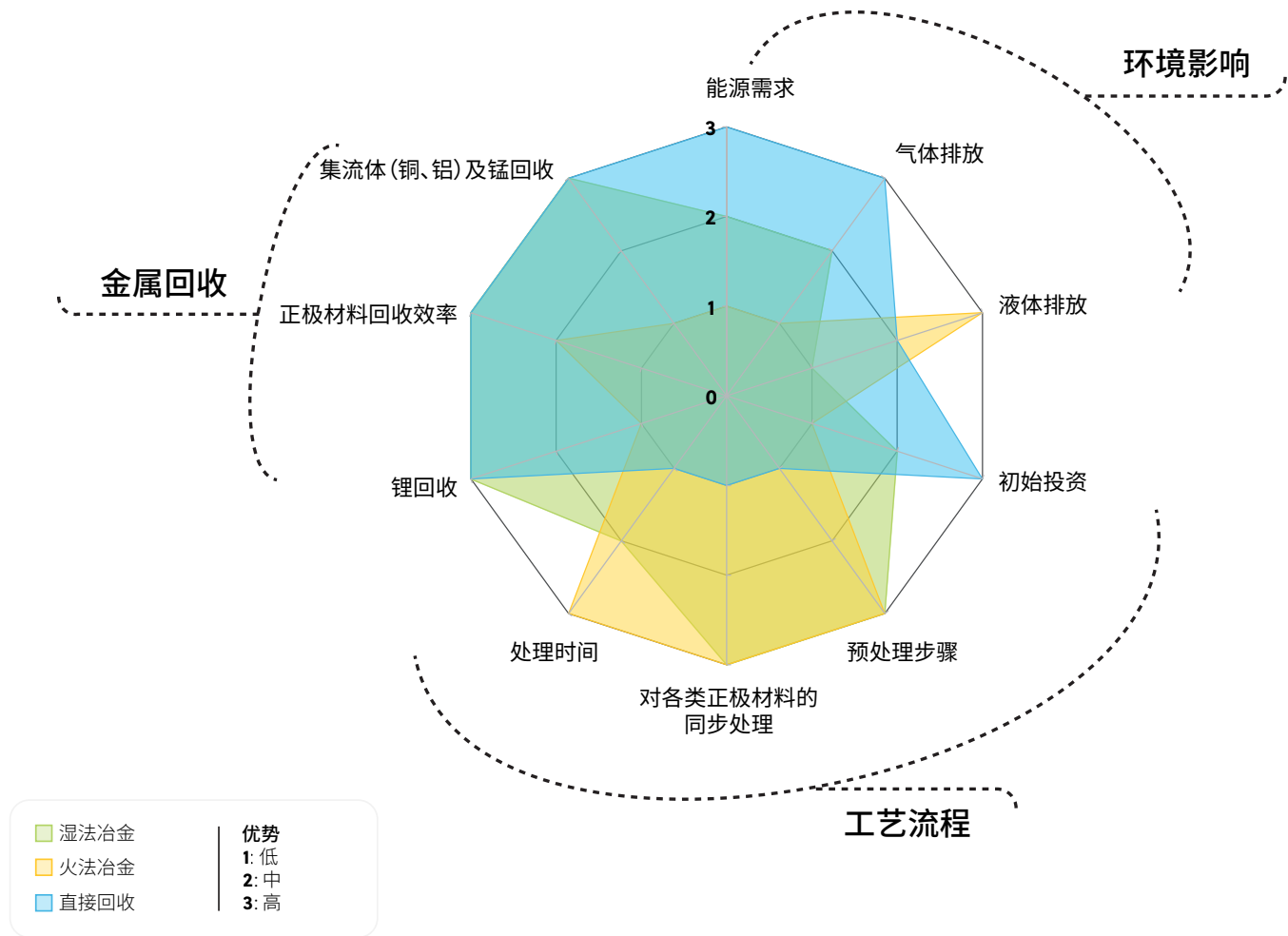
资料来源：CAS内容合集

图17： 以上热图展示了主要商业专利受让人在不同锂电池（LFP、NMC、NCA、LMO和LCO电池）、回收工艺（湿法冶金、火法冶金和直接回收）以及回收组件（正极、负极、电解液、隔膜和集流体）方面的专利分布情况。数据代表2004至2024年期间收录在CAS内容合集中的专利出版物数量。2024年仅包含1月至9月的数据

5. 锂电池回收工艺综合对比

在对火法冶金、湿法冶金和直接回收进行对比后可以发现，每种方法都有明显的优缺点（图18）。火法冶金能耗较高，需要大量电力或燃料才能达到所需温度，并且废气排放量较大<sup>44</sup>。湿法冶金虽然能耗较低，但会产生大

量需要进一步处理的废液。通过火法冶金难以回收锂、铝和锰，这些物质通常会形成需要进一步加工的炉渣<sup>45</sup>。直接回收和湿法冶金的工艺流程可能根据正极材料类型进行调整，但火法冶金的高温处理方式可以有效处理各类电池。



资料来源：CAS

图18：以上雷达图展示了三种主要回收工艺（湿法冶金、火法冶金和直接回收）在关键参数（环境影响、工艺流程和金属回收）方面的对比情况

# 前景展望

尽管电池回收行业目前面临诸多挑战，包括回收成本居高不下、回收过程错综复杂、收集和物流体系较为分散，但其发展前景依然广阔。技术的进步、数字化技术的应用以及行业合作的加强将会提高电池回收的效率和经济可行性，从而彻底改变行业格局。随着利益相关者纷纷投资于智能解决方案，我们或将进入可持续电池管理新时代，不仅能够满足日益增长的电动汽车装机需求，也将为迈向绿色循环经济铺平道路。

## 1. 借助回收技术创新解决成本和安全问题

电池回收面临着一系列复杂挑战，涉及作业效率、安全风险、监管合规和环境影响等多个方面。其中一项主要挑战在于电池的形态、设计、组成和化学成分多种多样且不断变化，导致回收过程错综复杂，需要使用特定技术。此外，由于存在有毒和易燃物质，回收过程往往能耗较高，且需采取成本高昂的安全措施。

为了应对上述挑战，政府已开始为电池回收提供资金。2022年，美国颁布了《两党基础设施法案》（Bipartisan Infrastructure Law），拨款2亿美元支持动力电池回收和二次利用的研究、开发和示范工作。2021年，欧盟委员会批准了一项29亿欧元（35亿美元）的资助计划，旨在推进泛欧电池产业链研究和创新项目。电池回收领域的创业投资也在不断增加，2023年电池回收初创企业所获投资达到45亿美元，是上年的两倍。投资者包括电池生产商、精炼商、矿业巨头及汽车制造商。

回收技术创新和新兴技术发展的重点在于提高金属回收

率，并使回收过程更具经济可行性和可持续性。国际能源署的数据显示，各类回收技术的成熟度并不相同（图19）<sup>46</sup>。例如，直接回收旨在保留材料的功能结构和化学成分，以降低能源和环境成本。Ascend Elements首创了一种新型电池回收工艺，该工艺摒弃了传统的粉碎和熔炼技术，转而采用酸性物质溶解电池中的矿物，从而对镍、钴和锂等高价值金属进行回收利用。Ascend Elements在佐治亚州和马萨诸塞州设有工厂，并计划在肯塔基州投资十亿美元建立新厂。

深共晶溶剂（DES）和生物浸出等具有广阔应用潜力的新方法处于早期开发阶段。尽管湿法冶金的能耗低于火法冶金，但其使用的酸性浸出剂通常具有毒性和腐蚀性。相比之下，DES则以无毒无害、成分可调、具备氧化还原能力和可复用性等特点，逐渐成为湿法冶金中酸性物质的绿色替代品<sup>47</sup>。相关研究表明，添加少量试剂即可从浸出液中沉淀金属，并在多个浸出周期中重复使用DES，从而大幅减少溶剂浪费。然而，尽管DES展现了良好的发展前景，但由于成本较高、成分复杂以及可复用性尚存疑问，使其在实际应用中受到一定限制<sup>48</sup>。生物浸出（或生物湿法冶金）也是一种新兴替代方法。尽管目前该方法在出版的研究数量方面落后于火法冶金或湿法冶金，但其利用微生物提取高价值金属的能力展现出了巨大的应用潜力和环保优势<sup>49</sup>。该方法可以减少对火法冶金和湿法冶金等高能耗方法的依赖。然而，生物浸出方法的金属回收率较低、对有毒电池化合物较为敏感且难以实现规模化部署，这些都对其工业应用造成了阻碍。因此，仍需围绕提高该方法的效率、可扩展性和成本效益开展进一步研究。

| 技术     | 说明                                      | 成熟度2020        | 成熟度2024        | 补充信息                                                             |
|--------|-----------------------------------------|----------------|----------------|------------------------------------------------------------------|
| 火法冶金   | 使用超过1,000摄氏度的高温熔炉熔化和分离电池组件              | 成熟 (TRL = 11)  | 成熟 (TRL = 11)  |                                                                  |
| 湿法冶金   | 使用水溶液溶解电池组件，包括酸浸、萃取和沉淀                  | 成熟 (TRL = 11)  | 成熟 (TRL = 11)  | 自2010年以来，专注于湿法冶金的回收商已获得12亿美元的风险投资，这些资金主要用于商业化目的，包括建造新设施          |
| 直接回收   | 不使用酸性物质或熔炼方式回收正极材料                      | 小型原型 (TRL = 4) | 大型原型 (TRL = 5) | Princeton NuEnergy获得超过5,500万美元融资，Li Industries获得由博世领投的3,600万美元融资 |
| 电力回收   | 利用电流和电压分离金属                             | 概念 (TRL = 2)   | 概念 (TRL = 2-3) |                                                                  |
| 电池回收设计 | 在设计电池时考虑回收问题，使得电池拆解、回收甚至再生变得更容易、更安全、更高效 | 大型原型 (TRL = 5) | 大型原型 (TRL = 5) |                                                                  |

TRL指技术成熟度

资料来源：TRL数据来自国际能源署ETP Clean Energy Technology Guide数据库及德勤绿色空间研究分析；公开信息；德勤分析。

图19：电池回收技术不断迭代

随着上述技术的发展，行业参与者纷纷重新对自身进行战略定位。巴斯夫和庄信万丰等化工巨头正进军湿法冶金领域，以满足日益增长的电池级化学品需求。OnTo Technologies拥有一项直接回收技术专利，其正与庄信

万丰合作进一步开发该技术。同时，Cleantech Group的分析表明，由于生产者责任延伸制度和LFP电池回收经济性的提升可能为电池回收项目带来更高回报，欧洲和中国汽车制造商或将转向直接回收工艺。

2. 利用数字工具提高可追溯性和回收效率

传统人工流程往往意味着较低的回收率、较高的成本以及潜在的安全隐患。此外，迫于监管压力，企业必须遵循材料回收率和环境影响方面的严格标准。缺乏可追溯性会使这一目标难以实现，使企业面临声誉和法律风险。就此而言，数字工具如何提供帮助？数字工具可以用于材料全生命周期追踪、自动分拣和拆解，以及回收流程

优化（图20）。例如，企业可以利用云平台和区块链技术对电池材料进行全生命周期追踪，从收集到回收再到重新融入供应链的每一步都清晰可见。这不仅确保企业符合环保法规，并帮助利益相关者监控材料回收率和碳排放量等关键指标。例如，沃尔沃与英国初创公司Circular合作开发了电池护照解决方案，可以为消费者提供汽车电池的详细信息，包括电池成分、材料来源、回收材料含量以及碳足迹等<sup>50</sup>。

| 类别                                                                                          | 数字工具          | 主要应用                                                                                                     | 影响                                                                                           | 用例                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|  数据管理和追踪   | 数字孪生、区块链、云平台  | <ul style="list-style-type: none"> <li>模拟并优化回收流程</li> <li>进行材料全生命周期追踪</li> <li>实现集中式数据存储和实时追踪</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>提升流程效率</li> <li>提高可追溯性和透明度</li> <li>优化决策过程</li> </ul> | 优美科与微软合作，利用云平台和人工智能提升电池回收效率；宁德时代借助区块链进行材料追溯 |
|  自动化和机器人技术 | 自动分拣、拆解机器人    | <ul style="list-style-type: none"> <li>识别并分离电池材料</li> <li>拆解电池组件</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>减少劳动力成本和人工干预</li> <li>提高安全性</li> </ul>                | Li-Cycle使用机械臂进行拆解作业，最大限度降低安全风险              |
|  高级分析和人工智能 | 预测分析、机器学习     | <ul style="list-style-type: none"> <li>优化回收计划</li> <li>改进材料回收流程</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>最大限度减少废物</li> <li>最大限度提取资源</li> </ul>                 | Redwood Materials、比亚迪、丰田利用人工智能预测最佳回收时间      |
|  循环经济平台    | 数字市场、生命周期管理软件 | <ul style="list-style-type: none"> <li>交易回收电池材料</li> <li>管理电池库存并确保合规性</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>扩大回收部件的市场准入范围</li> <li>改进生命周期管理，提高可持续性</li> </ul>     | RecycliCo开发了一个数字平台来支持回收电池材料交易               |

资料来源：公司新闻、德勤分析

图20：利用数字工具提高电池回收效率

### 3. 通过跨产业链合作扩大业务规模

分散的电池回收链一直是电池回收产业扩大规模的主要障碍之一。在中国，目前只有25%的退役动力电池通过正规渠道被回收，导致回收公司对原材料数量和质量的控制较为有限，进而阻碍了其有效扩大业务规模。

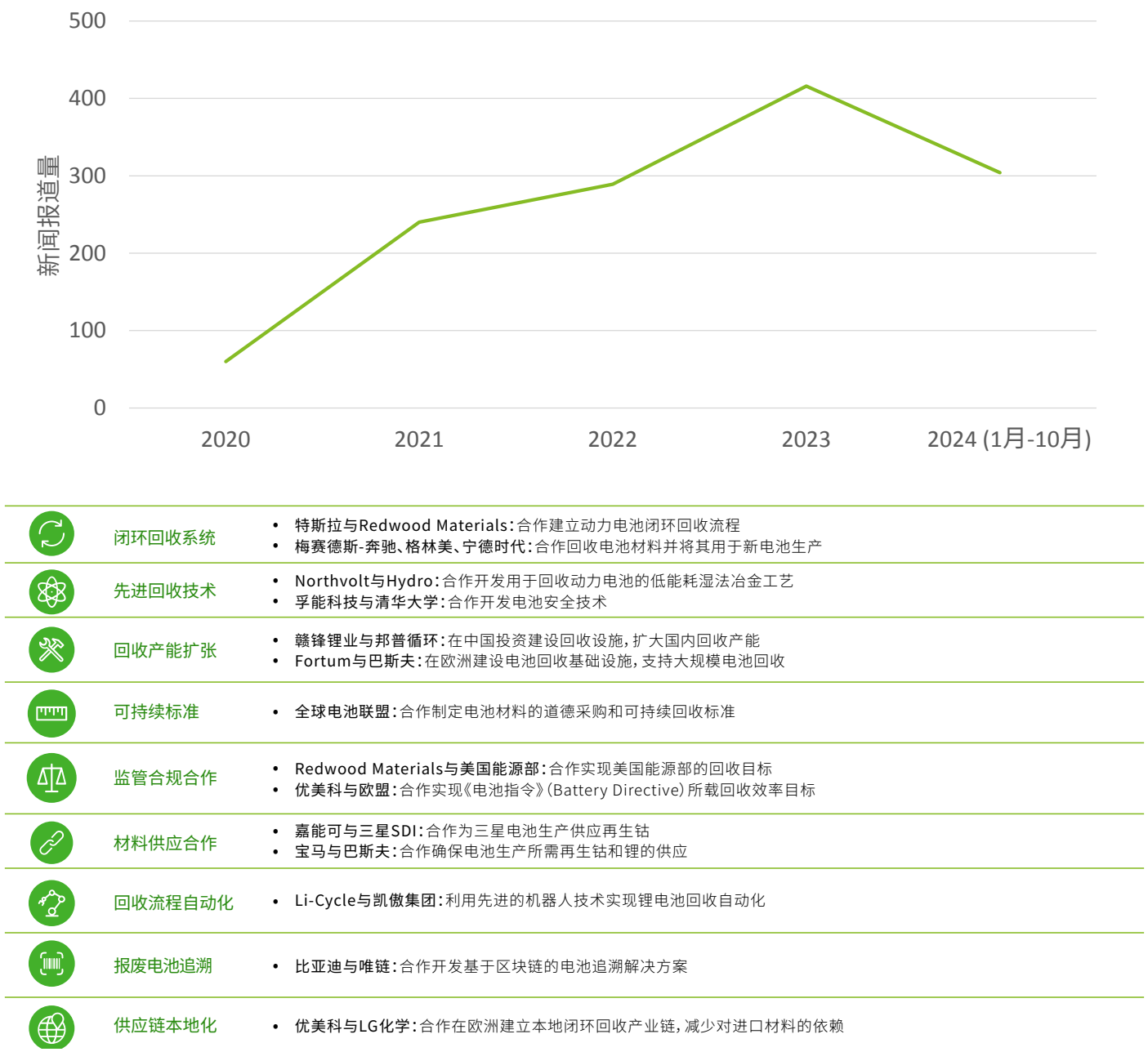
不过，循环经济的推行促进了电池循环设计的发展。鉴于80%的环境影响取决于产品设计阶段，设计易于回收的电池将有助于提高拆解过程的效率和可持续性。

因此，材料供应商、电动汽车制造商、汽车品牌和回收公司之间的合作日益紧密。通过汇集专业力量，这些利益相关者能够迅速应对挑战并适应行业变化。

电池回收产业链中涌现了几个重点合作领域（图21）。例如，许多企业正在合作建立闭环系统，以有效回收废弃电池并将其再造为新电池。为了推动这一进程，汽车制造商、电池生产商和回收商必须积极开展合作。

这些合作有助于打造一个兼具协同性、创新性及合规性的电池回收行业，从而为高成长和可持续的增长奠定基础。

电池回收合作趋势不断增强



资料来源: 公司新闻、德勤分析

图21: 电池回收合作趋势不断增强

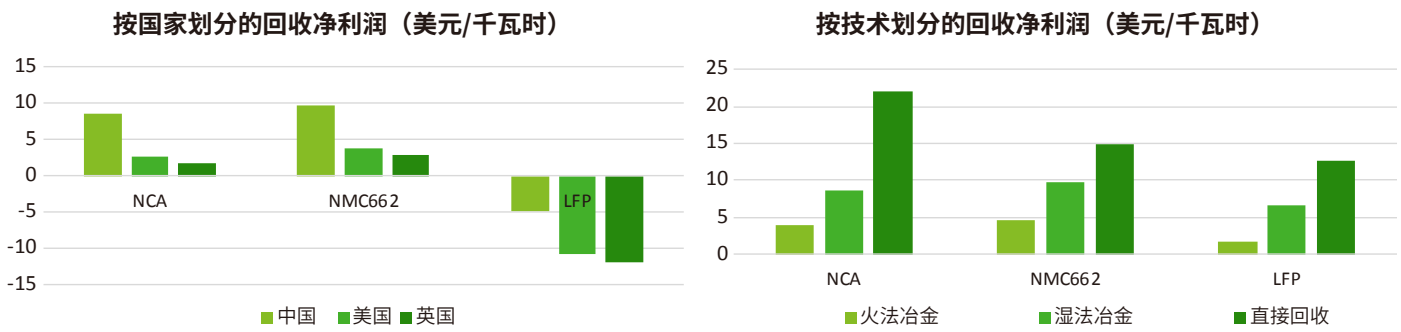
4. 电池回收行业实现盈利的战略路径

电池回收业务的盈利能力取决于三个关键因素：回收成本、回收材料的价值和环境效益。影响回收成本的变量包括运输距离、劳动力成本、电池包设计、电池化学成分和回收工艺选择等。为确保经济可行性，回收商可以寻求利用自动化技术降低成本，同时尽量缩减运输费用，并根据回收材料的价值选择最有效的回收工艺。含有高价值金属的电池（如NMC电池和NCA电池）能够快速实现盈利，尤其是在采用湿法冶金方法回收钴和铜的情况下。但就LFP电池而言，在回收前对其进行梯次利用可以带来显著的长期经济和环境效益。回收工艺的选择——无论是火法冶金、湿法冶金还是直接回收——必须与材料的价值和规模经济目标相匹配，才能提高盈利能力（图22）。除经济收益外，德勤也对电池回收的环境效益进行了推算。根据电池类型、碳定价和市场行情的不同，具体环境效益在每千瓦时3美元至11美元之间，这印证了电池回收兼具经济和生态价值。<sup>51-53</sup>

随着时间推移，电池回收行业通常经历三个发展阶段：净

成本期、盈亏平衡期和高盈利期（图23）。在净成本期，行业面临高昂的初始建设成本和监管调整压力。此阶段，回收企业的战略重点应放在完善基础设施、引进核心技术并确保法规合规。进入盈亏平衡期后，技术进步与运营效率的提升逐渐降低成本，再生材料的市场需求也趋于稳定。此时，回收企业应着重优化工艺流程，并通过建立战略合作伙伴关系，确保材料供应的稳定性。在高盈利期，回收企业需深度融入循环经济，利用先进技术提升回收率，同时应对日益严格的全球可持续发展法规。此阶段的战略重心将转向创新驱动、扩大生产规模，并与ESG目标相结合。

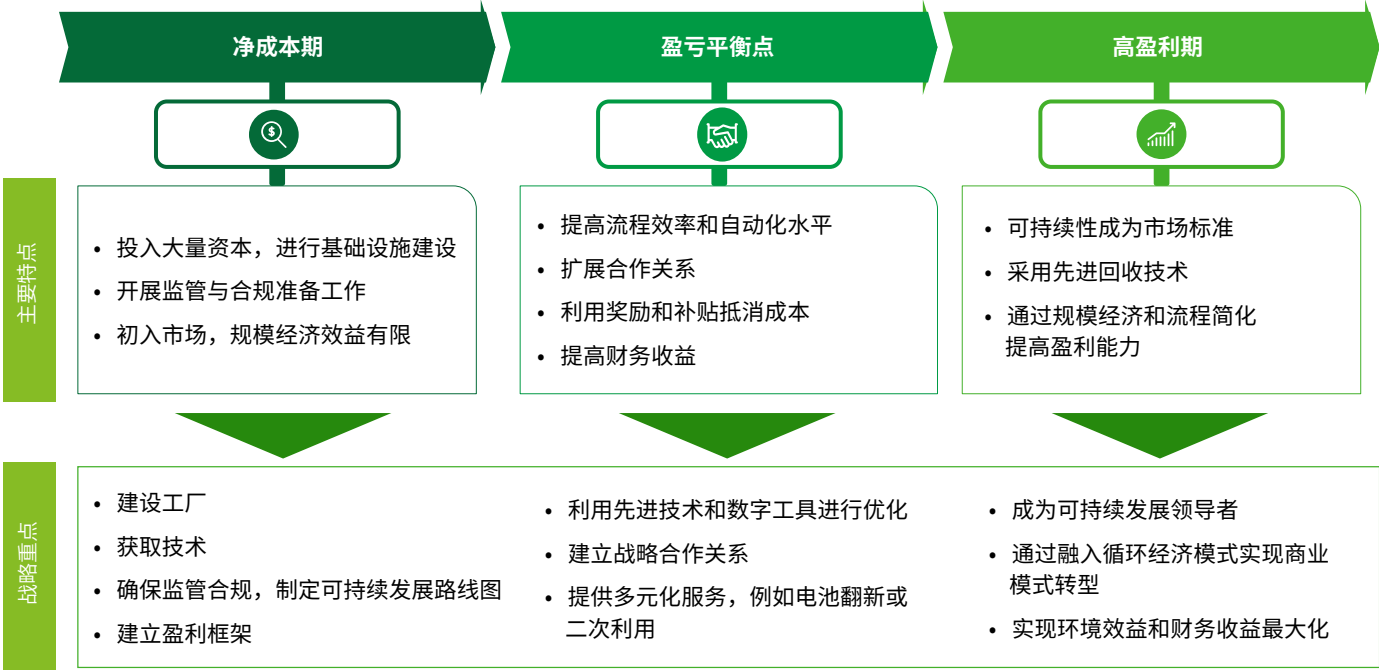
在这一发展过程中，实现规模经济至关重要，而盈亏平衡点则因电池化学成分和回收工艺不同而有所差异。例如，某英国工厂通过火法冶金、湿法冶金和直接回收工艺回收NCA电池的产能分别需要达到每年17,000吨、7,000吨和3,000吨才能实现盈亏平衡<sup>54</sup>。因此，企业应采取前瞻性方案，优先考虑利用高价值材料快速获取回报，同时投资于可持续发展实践和梯次利用战略，从而在不断变化的市场中保持长期盈利能力与抗风险能力。



资料来源：Laura Lander, 2021

图22：回收净利润对比





资料来源：德勤分析

图23：回收业务经济可行性预测和战略重点

回收技术创新和数字解决方案正引领电池回收行业的变革，不断提升回收率、运营效率和环境效益。通过湿法冶金和直接回收等先进工艺，可以以更低能耗提取高纯度材料。这些技术与数字化工具相辅相成，后者通过生命周期追踪、资源管理和电池健康状态的实时数据收集，进一步优化回收生态系统。二者的综合运用不仅改进电池的收集、分拣和处理环节，还能确保回收流程的可持续性。这些创新成果共同打造了一个更加智能、高效的回收产业链，为电池和电动汽车行业迈向可持续循环经济奠定了坚实基础。

# 案例研究：广东邦普循环科技有限公司

邦普循环是全球领先电池生产商宁德时代的控股子公司，专注于电池回收及材料回收业务，并构建了上下游优势互补的电池全产业链循环体系。自2005年成立以来，

邦普循环已在中国和印尼建立了7个生产基地，现有报废电池回收产能达到12万吨，在建回收产能超过30万吨。通过以下几项战略举措，公司实现了盈利：

- **技术创新**

邦普循环开发了针对电动车电池的全自动回收技术与设备，率先应用独有的逆向产品定位设计（RPPD）和定向循环技术（DRT）。DRT系统的出发点是从可复用性和可拆解性角度对新电池产品进行绿色设计，从而提高电池回收率。这些技术突破有效提高了运营效率与材料回收率，同时显著降低成本，为公司盈利提供了强有力的支持。

- **标准化溯源管理**

邦普循环还开发了再生材料追溯体系和标准，创新性地将追溯码、时间段和产品端相结合。通过标准化追溯管理可解决一些业内常见问题，例如回收材料比例核算数据无法有效追溯、企业间流程存在差异、产品信息披露缺乏连续性等。通过标准化的溯源管理，邦普循环不仅提高了透明度和运营效率，还为电池回收行业树立了标杆。

- **全价值链协作**

作为宁德时代的子公司，邦普循环从稳定的退役电池和生产废料供应中获益匪浅。为了构建循环经济生态，邦普循环与产业链上下游合作，包括电动车制造商、电池生产商以及电动车销售商，共同构建电池回收网络。值得一提的是，邦普循环与梅赛德斯-奔驰等领先品牌在华开展了电动车电池回收合作，同时与其他汽车制造商建立了广泛联系。基于RPPD技术，邦普推出了全产业链一体化（IEIC）的工程技术模式，推动电池回收行业高质量发展。作为这一模式的典范，邦普在2021年和2022年分别于宜昌和佛山建设了两个IEIC产业园，进一步巩固其在可持续电池回收领域的领先地位。

邦普循环实现了退役电池中镍、钴、锰的综合回收率超过99.6%，锂回收率超过91%。通过优化电池回收流程并减少能源消耗，邦普循环成功打造了一种可持续且高效的

一站式闭环解决方案，有力推动了电池全生命周期管理的绿色创新，为行业树立了新标杆。

信息来源：公司官网

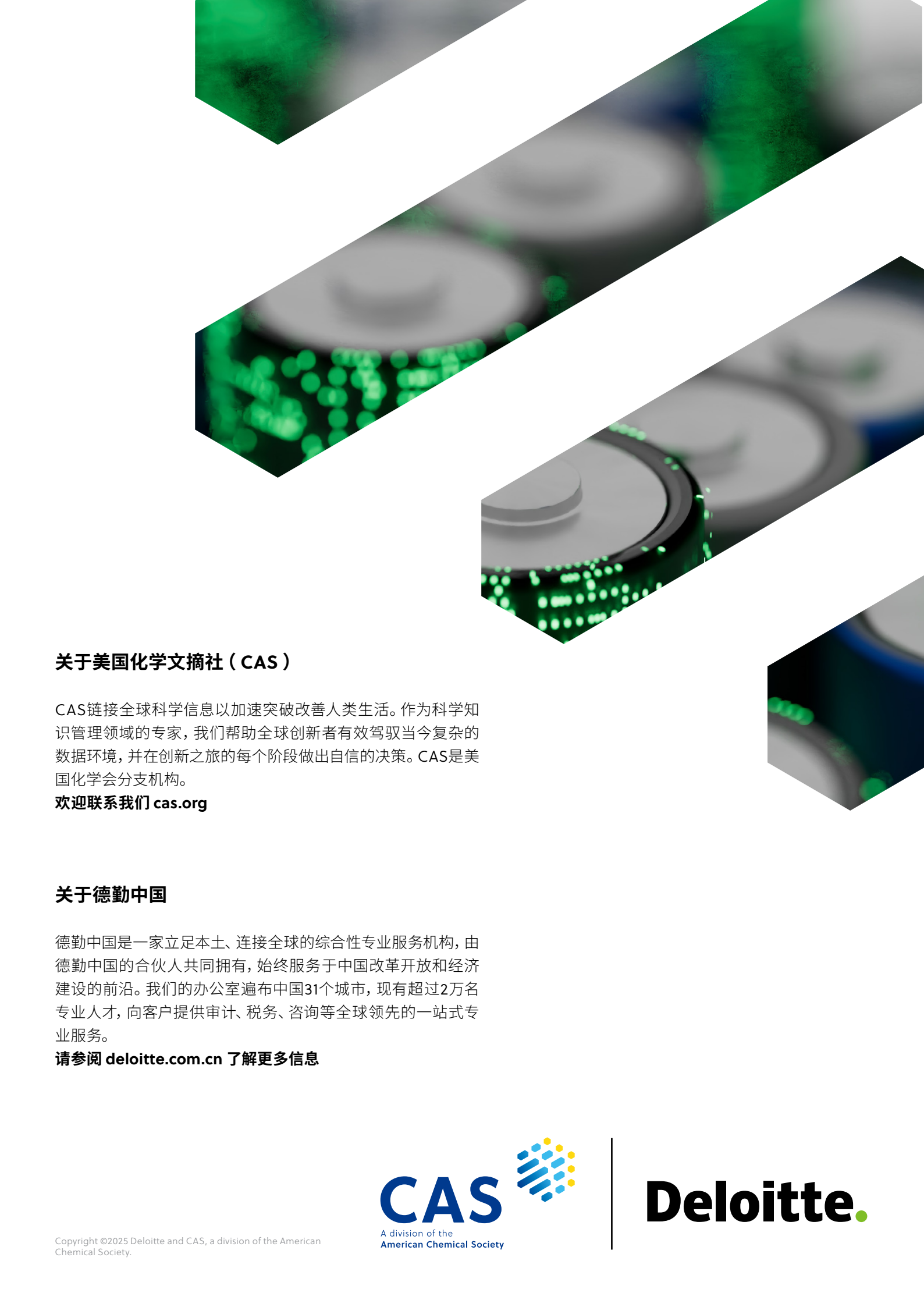
## 参考资料

1. Qu, T. Assessing and Comparing Different Policies Regarding Recycling Lithium-ion Batteries. Highlights in Science, Engineering and Technology **2022**, 26, 1-5. DOI: 10.54097/hset.v26i.3632 (accessed 2024/11/27).
2. European commission, E. ANNEX to the COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. 2018. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_3&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF) (accessed 2024 27th November).
3. European Battery Alliance. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-battery-alliance\\_en#:~:text=In%202018%2C%20the%20Commission%20adopted,the%206%20priority%20areas%20below](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-battery-alliance_en#:~:text=In%202018%2C%20the%20Commission%20adopted,the%206%20priority%20areas%20below). (accessed 2024 27th November).
4. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance). 2024. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj> (accessed 2024 3rd December).
5. Agency, U. S. E. P. An Analysis of Lithium-ion Battery Fires in Waste Management and Recycling. 2021. [https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-08/lithium-ion-battery-report-update-7.01\\_508.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-08/lithium-ion-battery-report-update-7.01_508.pdf) (accessed 2024 27th November).
6. Agency, U. S. E. P. Lithium Battery Recycling Regulatory Status and Frequently Asked Questions 2023. <https://rcrapublic.epa.gov/files/14957.pdf> (accessed 2024 27th November).
7. Battery recycling regulation in 2024 and beyond. 2024. <https://www.innovationnewsnetwork.com/battery-recycling-regulation-in-2024-and-beyond/43997/#:~:text=One%20additional%20area%20that%20the,be%20tailored%20to%20lithium%20batteries>. (accessed 2024 27th November).
8. Bird, R.; Baum, Z. J.; Yu, X.; Ma, J. The Regulatory Environment for Lithium-Ion Battery Recycling. ACS Energy Letters **2022**, 7 (2), 736-740. DOI: 10.1021/acsenenergylett.1c02724.
9. Karlson, P. Executive Summary of Study of Large Format EV Lithium-ion Battery Recycling in China. <https://naatbatt.org/wp-content/uploads/2019/03/Executive-Summary-of-China-Recycling-Study-v2-1.pdf> (accessed 2024 27th November).
10. Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Environment Pollution Caused by Solid Wastes (2020). 2020. <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC154880/#:~:text=China-,Law%20of%20the%20People's%20Republic%20of%20China%20on%20the%20Prevention,the%20sustainable%20development%20of%20economy>. (accessed 2024 27th November).
11. Aaron H. Goldberg, W. L. China promulgates amendment to its Solid Waste Law. 2020. [https://www.letsrecycle.com/news/china-promulgates-amendment-solid-waste-law/#:~:text=%E2%80%93Extended%20Producer%20Responsibility%20\(EPR\),recycling%20system%20\(Article%2066\)](https://www.letsrecycle.com/news/china-promulgates-amendment-solid-waste-law/#:~:text=%E2%80%93Extended%20Producer%20Responsibility%20(EPR),recycling%20system%20(Article%2066)). (accessed 2024 27th November).
12. New development plan for NEVs unveiled. 2020. [https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202011/02/content\\_WS5f9ff225c6d0f7257693ece2.html](https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202011/02/content_WS5f9ff225c6d0f7257693ece2.html) (accessed 2024 27th November).
13. Circular economy gets 5-year regulator boost. 2021. [https://en.ndrc.gov.cn/news/mediarousources/202107/t20210728\\_1292039.html](https://en.ndrc.gov.cn/news/mediarousources/202107/t20210728_1292039.html) (accessed 2024 27th November).
14. China releases proposed standards for battery recycling. 2024. <https://rhomotion.com/news/china-releases-proposed-standards-for-battery-recycling-industry-update/#:~:text=The%20Ministry%20of%20Industry%20and,Batteries%20of%20New%20Energy%20Vehicles%20> (accessed 2024 27th November).

15. Battery Waste Management Rules 2022. 2022. <https://cpcb.nic.in/uploads/hwmd/Battery-WasteManagementRules-2022.pdf> (accessed 2024 27th November).
16. Battery Waste Management Rules, 2022. 2022. <https://www.nextias.com/ca/current-affairs/27-08-2022/battery-waste-management-rules-2022-2> (accessed 2024 27th November).
17. ACT ON RESOURCE CIRCULATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT AND VEHICLES. 2023. [https://elaw.klri.re.kr/eng\\_mobile/viewer.do?hseq=63675&type=part&key=39](https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=63675&type=part&key=39) (accessed 2024 27th November).
18. Sung, S.-H. Korea to keep track of EV battery life cycles for recycling. 2024. <https://www.kedglobal.com/batteries/newsView/ked202407100017#:~:text=The%20South%20Korean%20government%20will,in%20the%20next%20few%20years> (accessed 2024 27th November).
19. Wagner-Wenz, R.; van Zuilichem, A.-J.; Göllner-Völker, L.; Berberich, K.; Weidenkaff, A.; Schebek, L. Recycling routes of lithium-ion batteries: A critical review of the development status, the process performance, and life-cycle environmental impacts. *MRS Energy & Sustainability* **2023**, 10 (1), 1-34. DOI: 10.1557/s43581-022-00053-9.
20. Deloitte Lithium Battery White Paper Series 3: Lithium Battery Recycling, a Promising Future. 2022. <https://www2.deloitte.com/cn/zh/pages/strategy/articles/high-growth-opportunities-in-the-lithium-battery-industry-2022-3.html> (accessed 2024 2nd December).
21. LPO Announces a Conditional Commitment for Loan to Li-Cycle's U.S. Battery Resource Recovery Facility to Recover Critical Electric Vehicle Battery Materials. 2023. <https://www.energy.gov/lpo/articles/lpo-announces-conditional-commitment-loan-li-cycles-us-battery-resource-recovery#:~:text=The%20U.S.%20Department%20of%20Energy's,recovery%20facility%20in%20North%20America>. (accessed 2024 27th November).
22. Umicore Battery Recycling: Capturing profitable growth and enabling a circular and low-carbon battery value chain. 2023. <https://www.umicore.com/en/newsroom/umicore-battery-recycling/#:~:text=In%202022%2C%20Umicore%20launched%20a,to%20be%20ready%20by%202026>. (accessed 2024 27th November).
23. How BMW Uses Digital Product Passport for Sustainable Innovation ? 2024. <https://authentifyit.com/digital-product-passport/case-studies/bmw#:~:text=The%20DPP%20system%20of%20BMW,ownership%20claims%20of%20the%20vehicles>. (accessed 2024 2nd December).
24. CHANGDONG, X. Y. Y. H. L. A. Z. X. L. Method for separating and recycling valuable metal in waste ternary lithium batteries. CN113957255A, 2022.
25. AKIRA, Y. T. T. PROCESS FOR RECOVERING VALUABLE METAL. JP2021031760A, 2021.
26. HA, H. B. K., Hyeon Jung; KIM, Sang Ki; KIM, Wan Gi. METHOD FOR RECOVERING ACTIVE METAL OF LITHIUM SECONDARY BATTERY. WO2022139310A1, 2022.
27. RANG, M. W., Wolfram; DUCHARDT, Marc; ZIESCHANG, Anne-Marie Caroline; SEELER, Fabian; ROHDE, Wolfgang; SCHIERLE-ARNDT, Kerstin. LFP BATTERY RECYCLING PLANT AND PROCESS. WO2024094725A1, 2024.
28. SEO, Y. Y., Doo Kyung; KIM, Min Seo; CHOI, Jeong Mi; PARK, Se Ho; LEE, Jeongbae; SEONG, Eunkyuu; KIM, Yeon Jun; YU, Hyemin. RECYCLED CATHODE ACTIVE MATERIAL, METHOD FOR RECYCLING CATHODE ACTIVE MATERIAL, AND SECONDARY BATTERY COMPRISING SAME. WO2024010260A1, 2024.
29. Kim, K.-C. G., Eric; Tranape, Benoit. LITHIUM RECYCLING. US2024304883A1, 2024.
30. ZHIXIANG, X. Lithium battery recovery device. CN116387667A, 2023.
31. HAO; SHI LIYONG; ZHU MEILING; WANG YADONG; WANG KE; MA JIA, Z. A. L. Y. P. Y. Z. M. L. Q. L. G. Z. L. H. J. Q. W. P. C. D. H. W. J. Z. Valuable metal recovery method. CN118256726A, 2024.
32. Georgi-Maschler, T.; Friedrich, B.; Weyhe, R.; Heegn, H.; Rutz, M. Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* **2012**, 207, 173-182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.152>.

33. Wang, Y.; Hu, F.; Wang, Y.; Guo, J.; Yang, Z.; Jiang, F. Revolutionizing the Afterlife of EV Batteries: A Comprehensive Guide to Echelon Utilization Technologies. *ChemElectroChem* **2024**, 11 (4), e202300666. DOI: <https://doi.org/10.1002/celec.202300666>.
34. Lai, X.; Huang, Y.; Deng, C.; Gu, H.; Han, X.; Zheng, Y.; Ouyang, M. Sorting, regrouping, and echelon utilization of the large-scale retired lithium batteries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2021**, 146, 111162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111162>.
35. Mikita, R.; Suzumura, A.; Kondo, H. Battery deactivation with redox shuttles for safe and efficient recycling. *Scientific Reports* **2024**, 14 (1), 3448. DOI: 10.1038/s41598-024-53895-3.
36. Wang, J.; Ma, J.; Zhuang, Z.; Liang, Z.; Jia, K.; Ji, G.; Zhou, G.; Cheng, H.-M. Toward Direct Regeneration of Spent Lithium-Ion Batteries: A Next-Generation Recycling Method. *Chemical Reviews* **2024**, 124 (5), 2839-2887. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00884.
37. Muralidharan, N.; Self, E. C.; Dixit, M.; Du, Z.; Essehli, R.; Amin, R.; Nanda, J.; Belharouak, I. Next-Generation Cobalt-Free Cathodes – A Prospective Solution to the Battery Industry's Cobalt Problem. *Advanced Energy Materials* **2022**, 12 (9), 2103050. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202103050>.
38. Arshad, F.; Li, L.; Amin, K.; Fan, E.; Manurkar, N.; Ahmad, A.; Yang, J.; Wu, F.; Chen, R. A Comprehensive Review of the Advancement in Recycling the Anode and Electrolyte from Spent Lithium Ion Batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2020**, 8 (36), 13527-13554. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c04940.
39. Murdock, B. E.; Toghill, K. E.; Tapia-Ruiz, N. A Perspective on the Sustainability of Cathode Materials used in Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials* **2021**, 11 (39), 2102028. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202102028>.
40. Fan, E.; Li, L.; Wang, Z.; Lin, J.; Huang, Y.; Yao, Y.; Chen, R.; Wu, F. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. *Chemical Reviews* **2020**, 120 (14), 7020-7063. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00535.
41. Inclán, I. R. Analysis of global battery production: production locations and quantities of cells with LFP and NMC/NCA cathode material. 2023. <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/globale-batterieproduktion-analyse-standorte-mengen-zellen-lfp-nmc-nca-kathoden.html> (accessed 2024 27th November).
42. Recycling of lithium-ion secondary batteries. 2024. [https://www.smm.co.jp/en/sustainability/activity\\_highlights/article\\_15/](https://www.smm.co.jp/en/sustainability/activity_highlights/article_15/) (accessed 2024 27th November).
43. Billmann, R. S. Q. P. L. Comparative study of Li-ion battery recycling processes. 2020. <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf> (accessed 2024 27th November).
44. Liu, S.; Li, Q.; Lu, C.; Tan, L.; Xia, D.; Dong, L.; Zhou, C. Separation and Recovery of Cathode Materials from Spent Lithium Iron Phosphate Batteries for Sustainability: A Comprehensive Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2024**, 63 (32), 13945-13965. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c01742.
45. Li, H.; Qiu, H.; Ranneberg, M.; Lucas, H.; Graupner, T.; Friedrich, B.; Yagmurlu, B.; Goldmann, D.; Bremer, J.; Fischlschweiger, M. Enhancing Lithium Recycling Efficiency in Pyrometallurgical Processing through Thermodynamic-Based Optimization and Design of Spent Lithium-Ion Battery Slag Compositions. *ACS Sustainable Resource Management* **2024**, 1 (6), 1170-1184. DOI: 10.1021/acssusresmg.4c00064.
46. ETP Clean Energy Technology Guide. 2024. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?layout=list&selectedTechID=9e425da2> (accessed 2024 4th December).
47. Tran, M. K.; Rodrigues, M.-T. F.; Kato, K.; Babu, G.; Ajayan, P. M. Deep eutectic solvents for cathode recycling of Li-ion batteries. *Nature Energy* **2019**, 4 (4), 339-345. DOI: 10.1038/s41560-019-0368-4.
48. Meles Neguse, S.; Yoon, S.; Lim, H.; Jang, J.; Baek, S.; Jöckel, D. M.; Widenmeyer, M.; Balke-Grünwald, B.; Weidenkaff, A. The Pitfalls of Deep Eutectic Solvents in the Recycling of Lithium-Ion Batteries. *Energy Technology* **2024**, 12 (4), 2301213. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.202301213>.

49. Moazzam, P.; Boroumand, Y.; Rabiei, P.; Baghbaderani, S. S.; Mokarian, P.; Mohagheghian, F.; Mohammed, L. J.; Razmjou, A. Lithium bioleaching: An emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries. *Chemosphere* **2021**, 277, 130196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130196>.
50. Carey, N. Volvo to issue world's first EV battery passport ahead of EU rules. 2024. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/volvo-issue-worlds-first-ev-battery-passport-ahead-eu-rules-2024-06-04/> (accessed 2024 2nd December).
51. Gaines, L. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies* **2014**, 1-2, 2-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001>.
52. Dunn, J. B.; Gaines, L.; Sullivan, J.; Wang, M. Q. Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries. *Environmental Science & Technology* **2012**, 46 (22), 12704-12710. DOI: 10.1021/es302420z.
53. Swain, B. Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology* **2017**, 172, 388-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.031>.
54. Lander, L.; Cleaver, T.; Rajaeifar, M. A.; Nguyen-Tien, V.; Elliott, R. J. R.; Heidrich, O.; Kendrick, E.; Edge, J. S.; Offer, G. Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *iScience* **2021**, 24 (7), 102787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102787>.



## 关于美国化学文摘社 (CAS)

CAS链接全球科学信息以加速突破改善人类生活。作为科学知识管理领域的专家，我们帮助全球创新者有效驾驭当今复杂的数据环境，并在创新之旅的每个阶段做出自信的决策。CAS是美国化学会分支机构。

欢迎联系我们 [cas.org](https://cas.org)

## 关于德勤中国

德勤中国是一家立足本土、连接全球的综合性专业服务机构，由德勤中国的合伙人共同拥有，始终服务于中国改革开放和经济建设的前沿。我们的办公室遍布中国31个城市，现有超过2万名专业人才，向客户提供审计、税务、咨询等全球领先的一站式专业服务。

请参阅 [deloitte.com.cn](https://deloitte.com.cn) 了解更多信息



**Deloitte.**