



退役锂电池回收知识图谱分析

黄海港, 何利华

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘 要: 基于“Web of Science 核心合集”和引文分析软件 Citespace, 对退役锂电池回收领域的研究概况、热点及演进趋势进行分析。结果表明: 该领域正处于快速发展阶段, 中国已出现数家强势研究机构, 形成了优秀的科研团队, 成果产出和影响力均处于世界领先地位, 但跨地区、跨机构的科研合作还需继续加强。目前退役锂电池回收的研究热点集中在金属湿法富集/提取工艺研究、电极材料解离分析研究、资源循环可持续研究三大方向。经过 10 年不断发展, 该领域逐渐实现前期预处理、有价资源综合回收、回收产品资源化利用的闭环工艺体系。该领域将朝着资源综合利用、经济效益与生态环境保护协同推进的方向继续发展。

关键词: 锂离子电池; 回收; Citespace; 知识图谱; 趋势

文章编号: 1004-0609(2021)-07-1965-14

中图分类号: X705

文献标志码: A

引文格式: 黄海港, 何利华. 退役锂电池回收知识图谱分析[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1965–1978.

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40001

HUANG Hai-gang, HE Li-hua. Knowledge map analysis of recycling of waste lithium ion batteries[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1965–1978. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40001

近年来, 我国新能源汽车产业发展迅速, 动力电池研究领域也随之获得快速发展, 特别是锂电池^[1]。退役锂电池中含有的 Li、Ni、Co、Mn 等金属具有较高的回收价值, 通过回收利用有利于缓解能源金属短缺的现状; 另一方面, 退役锂电池中含有重金属、有机物等, 如随意弃置, 将对生态环境产生极大危害。因而, 退役锂电池的绿色回收与资源化利用既可以产生相当的经济效益, 也可以同时实现能源金属资源短缺的缓解和生态环境的保护。基于以上原因, 越来越多的科研机构和相关企业涉足退役锂电池回收领域。当前退役锂电池的回收方法主要为火法熔炼-湿法冶金和机械分解-分选-湿法冶金两种, 生物冶金回收方法也有一定的应用^[2-5]。

Citespace 是一款主要用于数据分析的引文可视化软件^[6], 其分析结果的呈现为可视化图形, 即“科学知识图谱”。“科学知识图谱”在图书情报领

域也被称为知识域可视化, 即以科学知识域为基础, 展现科学知识的发展路径和内部结构关系的图形。Citespace 可对文献数据进行分析处理, 探究复杂科学文献内部隐藏的重要信息, 至今其已在档案管理^[7]、医学^[8]、经济学^[9]等领域大量应用。

基于此, 本文拟利用 Citespace 软件, 通过大数据分析退役锂离子电池回收的研发现状, 并重点探究退役锂电回收领域中的科研热点、前沿与发展趋势, 对相关学科和行业创新发展具有重要借鉴和参考意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

为保证软件运行的稳定性与数据的准确性, 本文采集的数据检索自“Web of Science 核心合集”(简

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51934010); 中南大学“创新驱动”人才计划资助项目(2020CX026); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40377)

收稿日期: 2020-08-07; **修订日期:** 2020-10-25

通信作者: 何利华, 副教授, 博士; 电话: 13467718264; E-mail: helihua@csu.edu.cn

称 WOS), 检索主题词 “spent lithium* batter*”、“waste lithium* batter*”、“recover*”、“recycle*”, 文献类型 “Article or Review”, 时间跨度 2010—2019 年。最终检索时间为 2020 年 5 月 15 日, 检索共获得文献 781 篇。

1.2 研究方法

Citespace 软件是陈超美教授基于科学计量学和信息可视化等相关领域科学原理, 通过 Java 语言平台开发的知识图谱及信息可视化分析软件。本文将从 WOS 中获得的原始数据导入 Citespace 软件, 进行除重处理, 对处理后数据进行作者、机构和国家的合作网络分析, 关键词共现、聚类分析以及文献的共被引分析等模块, 完成对退役锂电池回收领域的研究概况、热点及研究趋势的分析。软件使用过程中参数设置如下。

1) Time Slicing: 起止年份 2010—2019 年, Years per slice(年份切片)1 年。

2) Node Types: 根据分析类型选择勾选相应选项(Author、Institution、Country、Keyword、Reference、Cited Author、Cite Journal)。

3) Selection Criteria: Top $N=50$ 。

注: Pruning 和 visualization 模块, 根据不同数据分析及可视化需要勾选相应选项, 其余模块使用软件默认参数。

2 研究概况

通过对 WOS 检索数据进行合作网络分析, 实现对退役锂电池回收研究领域年发文量、期刊发文量、作者、机构、国家的合作网络分析进一步了解该领域的研究概况。

2.1 年发文量分析

文章发表数量是衡量一个研究领域发展情况的重要指标。从图 1 可以看出, 2010—2011 年发文数仅为个位数, 数量较少, 可见该领域相关研究较少, 仅为该领域发展的起步阶段; 2012—2016 年, 发文数量逐年增加, 但增加速度相对较慢, 基本可视为研究领域的基本发展阶段; 2017—2019 年, 领域发文数量急剧增加; 2019 年, 研究领域总发文量已达到 225 篇, 可见此阶段为退役锂电池回收研究

领域飞速发展阶段。

结合相关文献和数据显示^[10-11], 2014 年中国新能源汽车产业开始迅速发展, 2015 年产量高达 34.05 万辆, 2017 年产量 79.4 万辆, 已占汽车市场约 2.7%。2014—2017 年, 新能源汽车飞速发展, 相应的动力锂电池报废数量也随之快速增加, 退役锂电池的绿色回收与资源化处理也越来越受到关注, 即与 2017—2019 年其退役锂电池回收研究领域发文数迅速增加的现象相印证。基于国家 “十三五” 计划和《中国制造 2025》对新能源汽车产业的规划和重视, 可以大胆推测, 动力锂电池领域将进一步发展, 退役锂电池回收研究领域将更受重视, 该领域发文量将进一步增加。

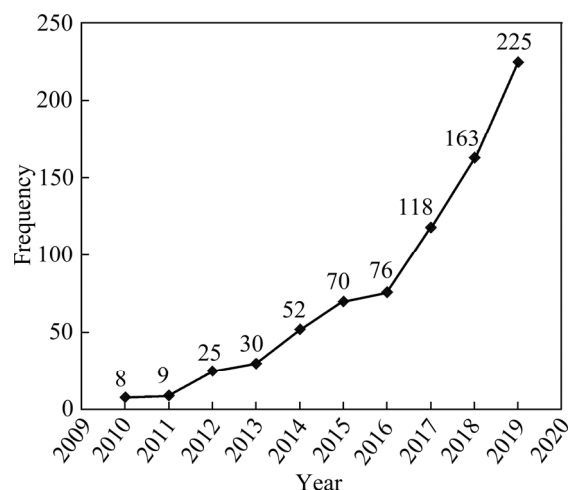


图 1 2010—2019 年退役锂电池回收研究文献时间分布图

Fig. 1 Time distribution of waste lithium-ion batteries recovery literature (2010—2019)

2.2 期刊发文量分析

发期刊是衡量一篇文章质量的重要因素, 表 1 列出了该领域发文量前十的学术期刊。从表中可以明显看到各期刊影响因子均较高, 7 种期刊的影响因子超过了 5, 排名前四的期刊发文数量均超过了 40 篇, 可见国际上对该领域的研究给予了较高的关注和重视。该领域在 ACS Sustainable Chemistry & Engineering、Journal of Cleaner Production 和 Journal of Environmental Chemical Engineering 等期刊上都有一定的发文量, 也可见该领域的研究方向扩展至资源绿色循环利用、可持续发展和生态环境保护等领域。

表 1 前十位文献来源期刊统计表

Table 1 Top-10 published literature sources journals statistics

No.	Journal title	Frequency	Proportion/%	IF
1	Waste Management	64	8.19	5.997
2	ACS Sustainable Chemistry & Engineering	55	7.04	7.741
3	Journal of Power Sources	43	5.51	7.250
4	Journal of Cleaner Production	40	5.12	7.491
5	Hydrometallurgy	31	3.97	3.890
6	Separation and Purification Technology	27	3.46	5.257
7	RSC Advances	25	3.20	3.098
8	Journal of Hazardous Materials	22	2.82	8.512
9	Resources, Conservation and Recycling	16	2.05	7.589
10	Journal of Environmental Chemical Engineering	15	1.92	—

Note: IF data from 5-Year Impact Factor of JCR, 2019 edition

2.3 合作网络分析

科学合作即科研工作者为实现创造新的科研成果的目标而一起工作。Citespace 主要通过共同发表论文的数据实现合作网络分析。2007 年, 美国研究人员数据分析结果显示^[12], 自然科学领域中, 团队合作的产出成果比例逐年增加, 团队规模也呈现愈加庞大的趋势。合作网络的分析结果对于高校创新人才引进、国家智库分析和领域专家选择等方面具有重要参考意义。本文对该研究领域合作网络的分析主要包括作者(微观)、机构(中观)和国家(宏观)三个层面。

2.3.1 作者合作分析

作者合作情况是该研究领域发展情况的重要表征, 作者合作网络的分析有助于对该领域的进一步了解。表 2 列出了在锂电回收领域发文数量最多的 10 位科研人员。从表 2 可以看到发文前十的作者发文量均超过了 10 篇, 整个领域科研力量较为雄厚; 发文最多的 WU 和 LI 均自 2010 年已开始发文, 是该领域的开拓者和领头人; CAO、SUN 等 2017 年开始发文, 进入该领域, 短短 3 年时间已发文近二十篇, 产出大量成果, 是该领域的重要新兴科研力量。经验丰富的领头人和新兴科研力量, 既可以看出该领域研究人员的科研实力, 又凸显该领域的发展活力, 具有广大发展前景。

图 2 中, 每个节点代表一位发文作者, 节点之间的连线代表作者之间的合作关系。图 2 所示的研究人员合作关系图谱中, Nodes(节点)=396, Links(连

表 2 前十位高发文作者统计表

Table 2 Top-10 high frequency authors statistics

No.	Author	Frequency	Year of first paper published
1	WU F	22	2010
2	LI L	20	2010
3	CAO H B	19	2017
4	SUN Z	18	2017
5	CHEN R J	16	2010
6	LI J H	16	2014
7	HE Y Q	15	2014
8	ZHANG Y	14	2017
9	ZHOU T	14	2014
10	YI H	11	2017

线)=600, Density(密度)=0.0115, 可以看出退役锂电回收的研究人员分布较为零散, 虽有以 WU、LI、CAO 等为首的优秀科研团队, 但该领域科研团队方面处于发展期, 尚未形成一批优秀、完备的科研团队, 有待进一步发展。

2.3.2 机构、国家合作网络分析

机构、国家的合作网络分析有助于分析、判断各个国家对该研究领域的重视程度和科研实力, 也有利于找到该领域的强势研究机构。

表 3 和 4 分别列举了近十年不同研究机构和国家在退役锂电回收领域的研究文章发文量的统计。综合表 3 和 4 数据进行分析, 可以发现, 宏观国家层面, 我国在该领域的研究中处于绝对中心位置, 发文量超过了整个领域的一半, 达到了 51.91%, 凸

显了我国对该领域发展的重视和强大的科研实力。这也与我国近年来大力发展新能源汽车产业，动力电池领域不断取得新成果的现实相对应。而高发文机构中，我国高等院校和科研院所也占据了绝大多数，其中中南大学(Central South University)、清华大学(Tsinghua University)和中国科学院(Chinese Academy of Sciences)位居前三位，发文量都超过 30 篇。中南大学为冶金领域强势院校，多年位居全国

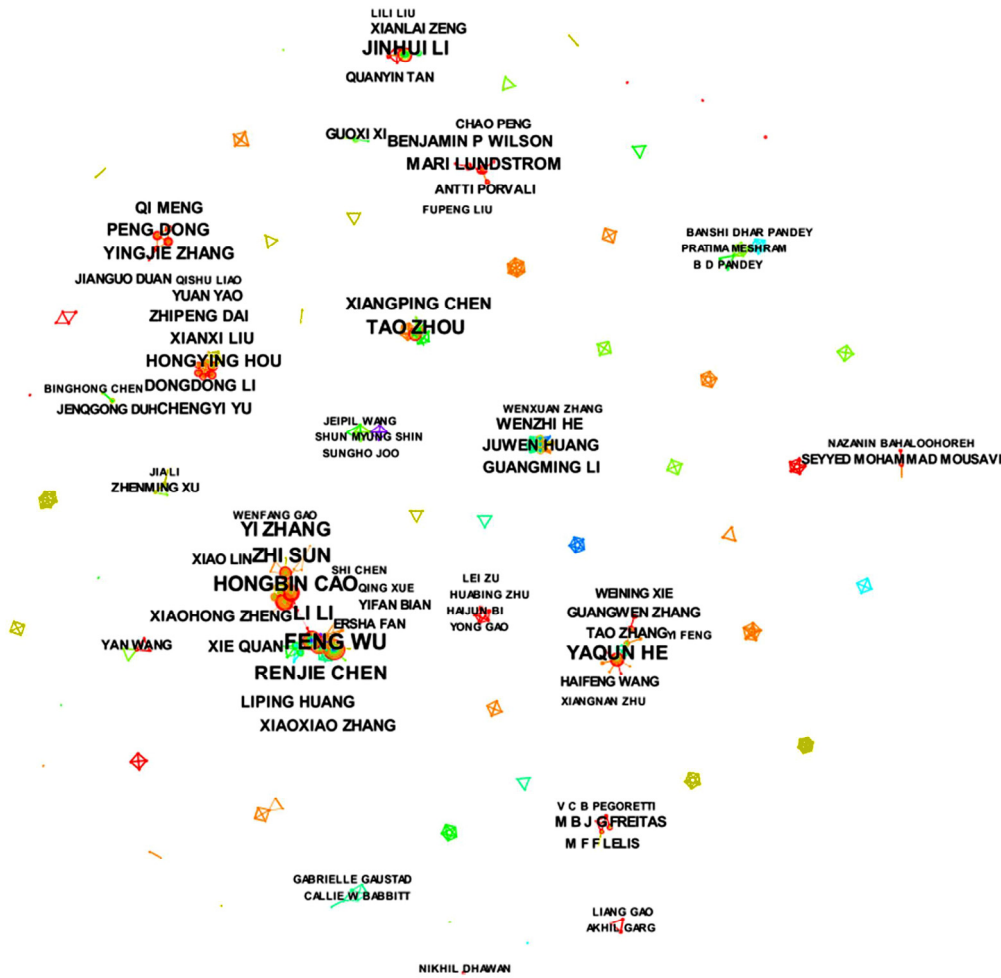


图 2 退役锂电池回收研究作者合作网络图谱

Fig. 2 Author cooperation map of waste lithium-ion batteries recovery research

表 3 前十位退役锂电池回收研究高发文机构数据表

Table 3 Top-10 institution of waste lithium-ion batteries recovery research			
No.	Institution	Frequency	Proportion/%
1	Central South University	44	5.63
2	Tsinghua University	34	4.35
3	Chinese Academy of Sciences	33	4.23
4	Beijing Institute of Technology	27	3.46
5	Kunming University of Science and Technology	24	3.07
6	China University of Mining and Technology	17	2.18
7	Shanghai Jiao Tong University	14	1.79
8	Aalto University	14	1.79
9	University of Science & Technology Beijing	11	1.41
10	Korea Institute of Geosci & Mineral Resources	10	1.28

表 4 前十位退役锂电池回收研究国家发文数据表

Table 4 Top-10 productive country of waste lithium-ion batteries recovery research

No.	Country	Frequency	Proportion/%
1	China	408	51.91
2	United States	82	10.43
3	Korea	60	7.63
4	India	49	6.23
5	Brazil	30	3.82
6	Australia	29	3.69
7	Germany	25	3.18
8	Iran	19	2.42
9	Finland	17	2.16
10	England	15	1.91

冶金专业榜首,在冶金领域具有深厚积淀和底蕴;清华大学为全国顶尖高校,科研实力毋庸置疑;中国科学院为国内最高学术机构之一,拥有众多国家重点实验室和以诸院士为首的行业专家。这些机构依靠其深厚的学术积累与强大的科研能力大大推动了整个研究领域的发展。

此外,图 3 所示的退役锂电回收研究机构的合作关系图谱可以发现,该领域已经出现以 Central South University、Tsinghua University 和 Chinese

Academy of Sciences 等机构为核心的机构合作网络,跨机构的科研合作已经出现。但整体而言合作还较少,尚未大规模开展,未来有待多机构广泛深入合作、强强联合,实现技术的持续创新,以促进学科和产业的进一步完善和发展。

3 研究基础、热点与趋势分析

3.1 研究基础

高被引文献是一个研究领域文章中最重要的一部分,在领域中具有极大创新性和重要性,对于领域的发展起到了较高影响。通过阅读、分析研究领域的高被引文献,有助于快速了解该领域知识结构和研究基础。

表 5 所示为近十年来在退役锂电回收领域的高被引文献的数据列表。通过分析表 5 中十篇高被引文献可发现,该领域研究方向主要集中在通过湿法冶金从退役锂电池的正极材料中回收 Li、Co、Ni、Mn 等有价金属,基础方法为使用草酸、柠檬酸等浸出剂浸出,萃取剂、沉淀剂富集、沉淀目标金属,以实现有价金属的浸出、分离、富集、纯化和资源化的目的。

共被引分析的定义为若文献 A、B 均被文献 C

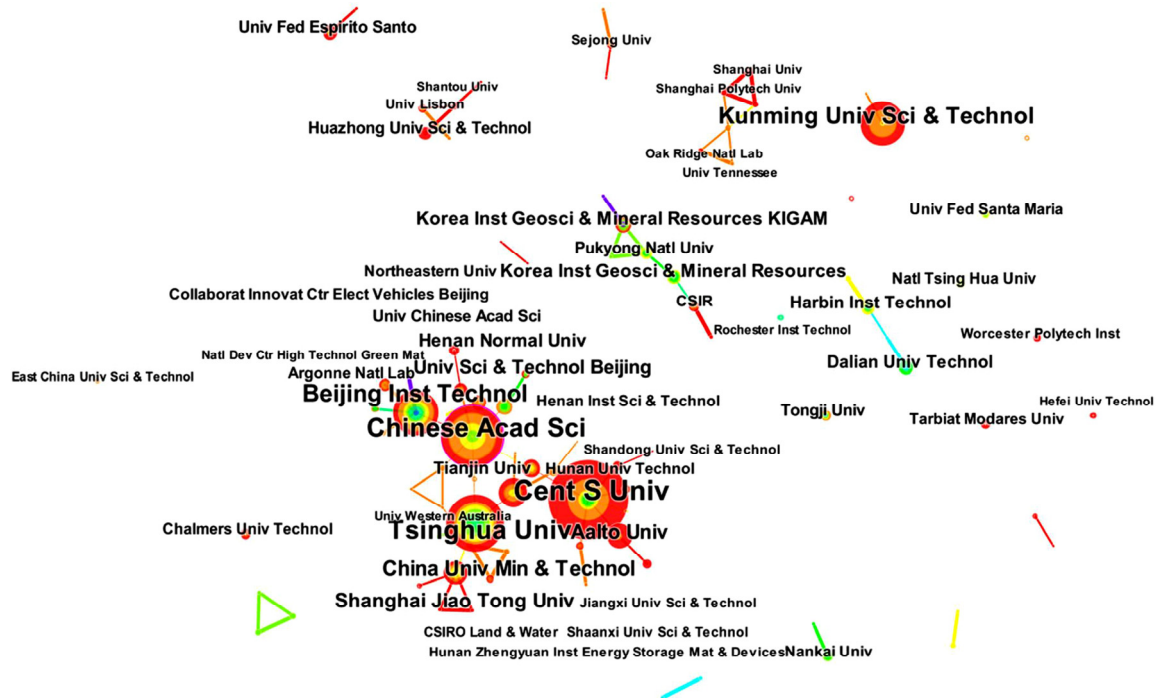


图 3 退役锂电池回收研究机构合作网络图谱

Fig. 3 Institution cooperation map of waste lithium-ion batteries recovery research

引用，文献 A、B 互为共被引文献^[13]。文献的研究领域影响力和重要性与共被引频次成正比。图谱中，每个节点代表一篇文献，节点越大则共被引次数越多，节点之间的连线代表文献之间构成共被引关系。图 4 中，Nodes(节点)=202，Links(连线)=666，Density(密度)=0.0209，从该文献共被引图谱中可以

表 5 退役锂电池回收研究高被引文献数据表

Table 5 High cited literature of waste lithium-ion batteries recovery research

No.	Title	Frequency	Author
1	Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review	247	ZENG X L
2	Recovery and recycling of lithium: A review	240	SWAIN B
3	A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries	222	LISBONA D
4	Recovery of cobalt and lithium from spent lithium ion batteries using organic citric acid as leachant	217	LI L
5	Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review	204	MESHGRAM P
6	Development of a recycling process for Li-ion batteries	193	GEORGIM T
7	Environmental friendly leaching reagent for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries	187	LI L
8	Process for the recovery of cobalt oxalate from spent lithium-ion batteries	166	CHEN L
9	Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries	157	ORDONEZ J
10	Organic oxalate as leachant and precipitant for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries	150	SUN L

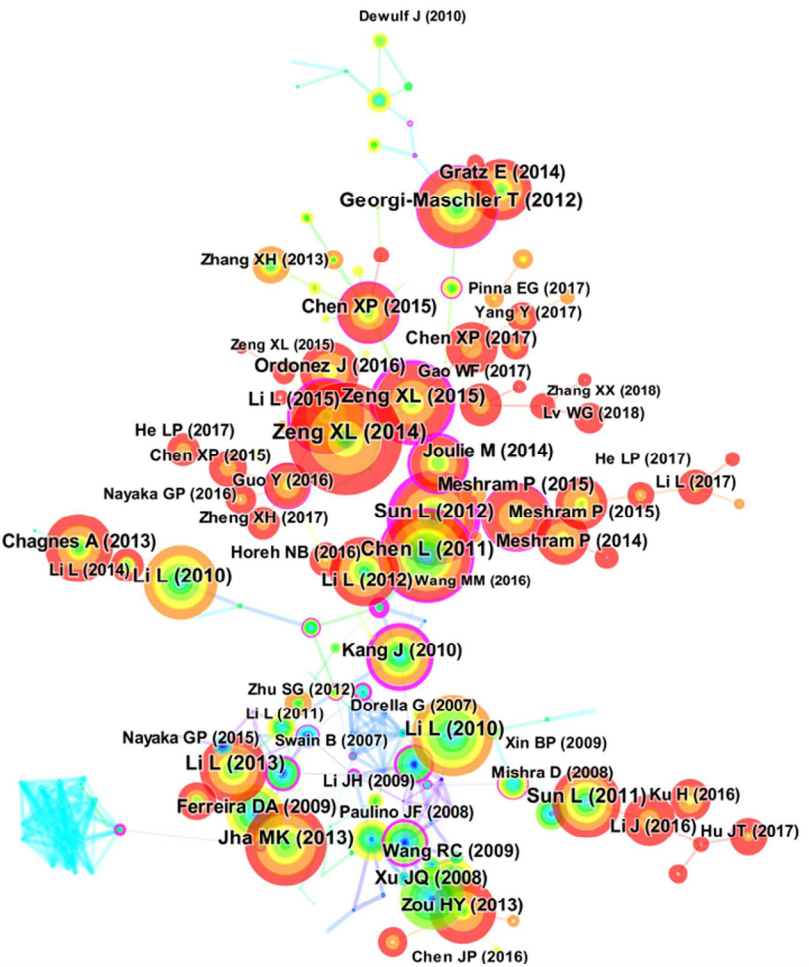


图 4 退役锂电池回收研究文献共被引图谱
Fig. 4 Co-cited literature map of waste lithium-ion batteries recovery research

表 6 退役锂电池回收研究共被引文献数据表

Table 6 Co-cited literature table of waste lithium-ion batteries recovery research

No.	Title	Frequency	Author
1	Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review	142	ZENG X L
2	Process for the recovery of cobalt oxalate from spent lithium-ion batteries	117	CHEN L
3	Organic oxalate as leachant and precipitant for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries	108	SUN L
4	Recovery of cobalt and lithium from spent lithium ion batteries using organic citric acid as leachant	107	LI L
5	Development of a recycling process for Li-ion batteries	105	GEORGIM T
6	Recovery of lithium and cobalt from waste lithium ion batteries of mobile phone	105	JHA M K
7	Environmental friendly leaching reagent for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries	99	LI L
8	Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid	98	ZENG X L
9	Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment	91	LI L
10	Vacuum pyrolysis and hydrometallurgical process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries	91	SUN L

明显看出, ZENG X L 于 2014 年发表的综述“Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review”是最高共被引文献, 共被引 142 次。同时, 此篇综述也是该领域的最高被引文献, 被引 247 次, 可见该文献对整个研究发展的突出贡献。

有意思的是, 通过将表 6 所列的退役锂电池回收领域共被引文献与表 5 中的高被引文献进行对比, 可以发现表 6 中文献 1、2、3、4、5、6、7 同时也在表 5 中, 既是高共被引文献也是高被引文献。进一步佐证了上文对该领域研究基础的分析, 即利用特定浸出剂通过湿法浸出、分离、沉淀从退役锂电池中选择性富集提取目标金属。

3.2 研究热点

研究热点是一个领域最值得关注、最前沿的研究方向。研究热点的分析有助于进一步、深层次的了解该领域。本文主要通过关键词的共现和聚类分析, 对退役锂电池回收研究的热点进一步探究和挖掘。

3.2.1 关键词共现分析

关键词是一篇文献主要研究内容和方向的浓缩总结, 通过对关键词的共现分析, 可以进一步了解该领域。本文基于 Citespace 中 Keyword 模块进行分析, 并对相似关键词节点进行合并和无关节点

的排除, 最终获得 Node(节点)173 个。Line(连线)546 条。

图 5 所示为退役锂电池回收研究关键词共现图谱, 图中圆形节点大小代表该关键词出现的频次; 节点间的连线粗细代表关键词共现强度, 颜色代表发文时间, 越偏向暖色调, 发文时间越晚。中介中心性(Centrality)是衡量节点在网络中重要性的指标, 本处用于衡量关键词的重要程度。相关数据导出汇总得到表 7, 结合图 5 和表 7 可见, Recovery、Cobalt、Lithium ion battery 等词具有超高的共现频次, Acid、Separation、Valuable metal 等词不仅具有较高的共现频次, 还具有较高的中介中心性。结合前文中对研究概况和基础的分析, 可初步分析该领域的研究热点在于利用特定酸等浸出剂结合萃取剂从退役锂离子电池选择性富集提取有价金属。

3.2.2 关键词聚类分析

关键词共现分析, 主要获得频次、中介中心性(Centrality)等微观局部信息, 无法从宏观上分析关键词整体情况。为了对关键词内部潜在信息进一步挖掘, 本节对关键词进行聚类分析, 结果如图 6 所示。此外, 通过对各聚类群信息整理汇总, 得到如表 8 所示的退役锂电池回收领域关键词聚类数据表。图 6 中, 不同颜色的多边形代表各个聚类块, 黄色矩形为该聚类名, 从图中可以清晰看到各聚类

表 8 退役锂电池回收研究关键词聚类数据表

Table 8 Key word cluster table of waste lithium-ion batteries recovery research

Cluster ID	Top term	Size	Silhouette	Mean year
0	Cobalt leaching	21	0.86	2014
1	Energy storage	18	0.908	2015
2	Cathode material	16	0.865	2013
3	Electrochemical performance	16	0.872	2015
4	Sustainability	14	0.911	2013
5	Spent lithium-ion batteries	14	0.987	2013
6	Chemistry	14	0.824	2013
7	Circular economy	14	0.955	2014
8	Bioleaching	13	0.926	2013
9	Dissolution	9	0.98	2016

名及其包含的重要关键词。从表 8 中 Silhouette(轮廓值)可见, 各聚类群轮廓值 S 值均显著 >0.8 , 非常接近 1, 可见聚类效果较好, 各聚类群内部关键词联系紧密; Mean year(平均年份)数据可见, 各聚类群内关键词平均年份集中在 2013—2016 年, 与前文分析 2012—2016 年为该领域的基础发展阶段相印证。

为了更好地通过聚类数据分析该领域研究热点, 本节对图 6 中相似聚类进行了合并分析, 组成新的三大聚类研究群。

1) 金属湿法富集、提取研究

主要包括表 8 中 #0 Cobalt leaching, #6 Chemistry, #8 Bioleaching, #9 Dissolution 四个聚类群;

2) 电极材料解离分析研究

主要包括表 8 中 #1 Energy storage, #2 Cathode material, #3 Electrochemical performance 三个聚类群;

3) 资源循环可持续研究

主要包括表 8 中 #4 Sustainability, #5 Spent lithium-ion batteries, #7 Circular economy 三个聚类群。

对三大聚类研究群内重要高频关键词汇总整理, 具体信息见下表 9。

从表 9 中统计信息可见, 对于金属湿法富集、提取工艺研究群而言, 本研究群的高频关键词主要包括 Cobalt(钴)、Li(锂)、Acid(酸)、Extraction(萃取)、Precipitation(沉淀)等。退役锂电池经预处理过程获得电极材料, 电极材料的湿法处理过程是整个回收

流程的关键, 湿法处理工艺中主要将电极材料通过 HNO_3 、 HCl 、 H_2SO_4 或生物浸出法^[14-18]使金属以离子状态进入溶液, 然后通过选择性沉淀法^[19]、萃取法^[20]、电化学法^[21]等完成金属的分离、富集、提取过程。这种湿法处理工艺是当前最主流的研究方向, 如何选用浸出剂、萃取剂、沉淀剂等从而实现 Li、Co、Ni 等金属简单、高效、经济、环保的富集、提取也是该领域的重要研究方向和研究热点。

对于电极材料解离分析研究群而言, 本研究群的高频关键词主要包括 Separation(分离)、Cat-hode Material(阴极材料)、Nickel(镍)、Electrochemical performance(电化学性能)、Graphite(石墨)等。锂离子电池主要包括电极材料、有机隔膜、铝、铜箔、电解液、活性物质等^[22]。电极材料从锂电池主体中的分离属于整个回收体系的预处理过程, 处理过程主要方法为物理方法: 机械分离^[23]、机械化学^[24]、热处理^[25]等。整个预处理过程即可以实现电极材料良好解离分出, 有利于电极主体进入金属富集、提取工序, 也有利于电池中其它材料的分类回收及资源化处理。

对于资源循环可持续研究群而言, 本研究群的高频关键词主要包括 Recovery(回收)、Metal(金属)、Technology(技术)、Regeneration(再生)、Future(未来)、Circular economy(循环经济)等。退役锂电池具有极高的潜在经济价值和资源价值, 其中含有大量的 Co、Cu、Al、Li 等金属, 远高于天然矿石的品位; 同时其内部的电极材料、电解质、隔膜等又可能造成重金属污染、有机物污染、氟污染等生态环境破坏的可能性, 退役锂电池的绿色回收与资源化

利用的重要性与必要性不言而喻。本研究群的焦点在于如何最大程度的实现资源绿色回收，最大限度的实现退役锂电池内部各材料的回收资源化利用，既避免对生态环境的破坏，也能产生相当的经济效益，同时也可以有效缓解我国相应 Li、Co、Ni 等关键资源短缺的问题。

3.3 研究演进趋势分析

关键词的时区图将关键词按首次出现年份呈现时间维度分布，通过关键词的时间趋势变化可以进一步分析该领域的演进趋势。该研究关键词时区图如图 7 所示，参数设定为 Threshold(阈值)=12，Font Size(字体大小)=5，Node Size(节点大小)=10。为了更加直观分析，本文将图 7 中各节点按频次进

行排列，并将 2010—2019 各年份重点关键词和新增关键词数目汇总数据于表 10。

突现性检测是对文档流中某主题的特征出现频率急剧增加进行分析检测，Citespace 也是基于 Kleinberg, J.于 2002 年提出的算法进行节点的突发性检测^[26]，而一个聚类中出现的突现关键词越多，则说明该聚类越活跃，其对应研究方向也可能是新的研究趋势。

图 8 所示为该领域的关键词突现信息，图中 Keywords 对应关键词，Year 为首次出现年份，Strength 为突现强度，Begin、End 分别表示突现起止年份。从图 8 可见，Metal value、Solvent extraction、Battery recycling、Separation、Waste 在 2010 年已开始突现，突现词更多属于湿法富集、提取工艺研究

表 9 退役锂电池回收研究聚类群信息表

Table 9 Cluster group of waste lithium-ion batteries recovery research

Cluster group ID	High-frequency keywords
Metal wet concentration and extraction process research	Valuable metal, Li, Waste, Acid, Extraction, Kinetics, Co, Adsorption, Citric acid, Reduction, Precipitation
Dissociation analysis of electrode material research	Cobalt, Separation, Cathode material, Nickel, Cathode, Electrochemical performance, Graphite, Anode material, Energy storage
Resource recycling and sustainable research	Recovery, Lithium ion battery, Recycling, Metal, Technology, Spent lithium ion battery, Regeneration, Electrode, Future, Circular economy, Metal value

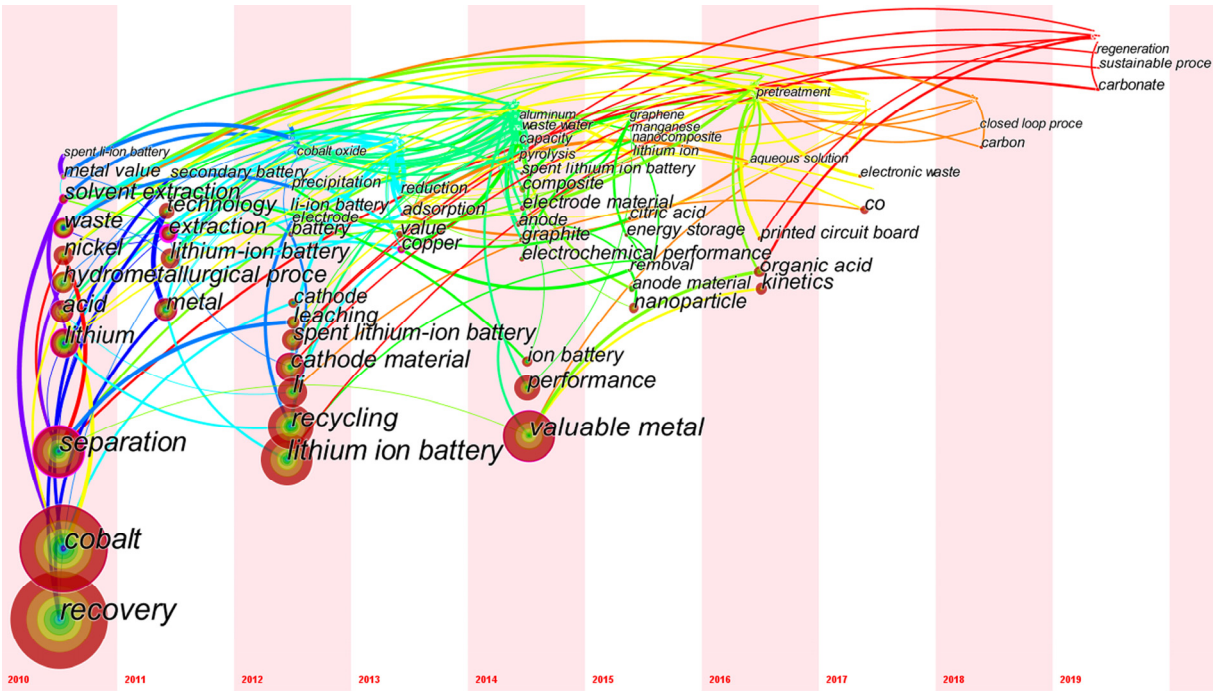


图 7 退役锂电池回收研究关键词时区图

Fig. 7 Keyword time zone map of waste lithium-ion batteries recovery research

表 10 退役锂电池回收研究年度新增关键词信息表

Table 10 Annual added keyword of waste lithium-ion batteries recovery research

Year	High-frequency keyword	Frequency
2010	Recovery, Cobalt, Separation, Lithium, Acid, Hydrometallurgical process	11
2011	Metal, Lithium-ion battery, Extraction, Technology, Secondary battery	5
2012	Lithium ion battery, Recycling, Li, Cathode material, Spent Lithium-ion battery	21
2013	Copper, Value, Adsorption, Reduction, Bioleaching, Microbial fuel cell	18
2014	Valuable metal, Performance, Ion battery, Electrochemical performance, Graphite	33
2015	Nanoparticle, Anode material, Energy storage, Citric acid, Removal, Lithium ion	14
2016	Kinetics, Organic acid, Printed circuit board, Aqueous solution, Pretreatment, Dissolution	17
2017	Co, Electronic waste, China, Mobile phone, Li ion battery	14
2018	Carbon, Closed loop process, Active material, Temperature, Cathodic active material	6
2019	Carbonate, Sustainable process, Regeneration, Process optimization, Circular economy	10



图 8 退役锂电池回收研究关键词突现图

Fig. 8 Burst keywords of waste lithium-ion batteries recovery research

群,可见该领域早期更多关注与电极材料中金属的浸出、分离、提取研究;同时 Metal value 也是该领域突现强度最高(6.0365),突现时间最长(2010—2017年)的关键词,可见该领域对该研究的关注与重视;而2017年以来,没有新增关键词突现,且表10中显示新增关键词数也较2013—2016年有所下降,可以推测该领域的主要研究方向经前期发展已基本确定,近几年的研究重点在于对现有方向的进一步深入研究,这也与2017—2019年该领域发文量激增相印证。

综合以上数据分析,可以将该研究领域2010—2019十年的发展分为三个阶段:2010—2012年,该领域研究尚处于初始阶段,研究的方向和焦点主要集中在废旧锂离子电池的电极材料湿法处理工艺上,电极材料经浸出、萃取、选择性沉淀等工艺流程实现金属的分离、富集、提取;2013—2016年,研究领域向外扩展,湿法处理过程也向生物浸出等新型绿色处理工艺,回收体系的预处理过程:电极材料与其它电池组分的分离,其他有价金属、石墨等材料的分类回收也开始受到关注;2017—2019年,该领域的研究格局进一步扩大,在前面研究方向的基础上,出现了对于闭环回收工艺、循环经济、资源化回收再生等方向的研究和关注。未来,该领域在聚焦各个细分研究方向的同时,也将推动整个研究领域回收处理体系的闭环,推动退役锂电池材料的绿色高效资源化利用体系继续发展。

4 结论

1) 根据年发文量数据分析,该研究领域经过起始、基础发展阶段,正处于飞速发展阶段,且根据我国相关计划和文件战略意图,该领域将在未来一段时间获得进一步发展;

2) 根据期刊发文量数据分析,该领域已出现诸多优秀成果,国内外对该领域的研究给予了充分关注和重视;

3) 根据合作网络分析,国家/地区层面,中国在该研究领域处于绝对领先地位;机构层面,已出现以中南大学、清华大学和中国科学院为首的头部科研机构,拥有优秀的科研人员与顶尖的科研实力,但跨机构合作较少,有待进一步发展;作者层

面,已有优秀科研带头人出现,“科研新星”不断出现,已形成数只优秀的科研合作团队,但数量太少,且多为团队内合作,未出现大量跨团队、跨学科合作。

4) 根据文献共被引分析,该领域的研究基础主要在于从电极材料中分离、富集、回收有价金属;结合关键词共现及聚类分析,该领域的主要研究方向及热点为金属湿法富集、提取研究、电极材料解离分析研究、资源循环可持续研究。

5) 综合时区图和关键词突现等数据分析,将该领域的演进趋势分为三个阶段:2010—2012年,研究初始阶段,研究焦点集中于在电极材料中有价金属的回收;2013—2016年,基础发展阶段,研究领域向外扩展,开始涉足回收预处理过程,探究退役锂电池内部其它材料的回收资源化处理;2017—2019年,快速发展阶段,开始探索整个回收处理工艺的循环及资源化再生。未来,该领域将聚焦于整个回收处理体系的闭环,实现退役锂电池材料绿色综合回收与资源化利用。

REFERENCES

- [1] 唐葆君,王翔宇,王彬,等.中国新能源汽车行业发展水平分析及展望[J].北京理工大学学报(社会科学版),2019,21(2): 6–11.
TANG Bao-jun, WANG Xiang-yu, WANG Bin, et al. Analysis and prospect of china's new energy automobile industry development level[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2019, 21(2): 6–11.
- [2] LÜ Wei-guang, WANG Zhong-hang, CAO Hong-bin, et al. A critical review and analysis on the recycling of spent lithium-ion batteries[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(2): 1504–1521.
- [3] ZHENG Xiao-hong, ZHU Ze-wen, LIN Xiao, et al. A mini-review on metal recycling from spent lithium ion batteries[J]. Engineering, 2018, 4(3): 361–370.
- [4] 黄红军,黄秋森.采用球磨-低温热处理-浮选法回收废旧锂电池中电极材料的机理[J].中国有色金属学报,2019,29(4): 878–886.
HUANG Hong-jun, HUANG Qiu-sen. Mechanism of recycling electrode materials spent lithium batteries by ball milling-low temperature heat treatment-flotation[J]. The

- Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 878–886.
- [5] 王 轩, 王先友, 张 蕊, 等. 从废旧 LiFePO_4 电池极片中原子经济回收 Li、Fe 和集流体 Al 箔[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1824–1831.
- WANG Xuan, WANG Xian-you, ZHANG Rui, et al. Atomic-economic recovery of aluminum, iron and lithium from spent LiFePO_4 battery[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1824–1831.
- [6] 李 杰, 陈超美. Citespace:科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016.
- LI Jie, CHEN Chao-mei. Citespace: text mining and visualization in Scientific literature[M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016.
- [7] 刘梦丹. 我国档案学研究现状的可视化分析[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
- LIU Meng-dan. Visual analysis of the research status of archives science in China[D]. Hefei: Anhui University, 2016.
- [8] LIAO Hu-chang, TANG Ming, LUO Li, et al. A bibliometric analysis and visualization of medical big data research[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 166.
- [9] SONG Jin-bo, ZHANG Hong-lian, DONG Wan-li. A review of emerging trends in global PPP research: Analysis and visualization[J]. Scientometrics, 2016, 107(3): 1111–1147.
- [10] 邓国开. 我国新能源汽车产业发展现状、挑战与展望分析[J]. 汽车实用技术, 2017(7): 1–2, 12.
- DENG Guo-kai. Analysis of the current situation, challenges and prospects of the development of Chinese new energy automobile industry[J]. Practical Automobile Technology, 2017(7): 1–2, 12.
- [11] 马 建, 刘晓东, 陈铁嵩, 等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 1–19.
- MA Jian, LIU Xiao-dong, CHEN Yi-song, et al. Development status and countermeasures of Chinese new energy automobile industry and technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 1–19.
- [12] WUCHTY S, JONES B F, UZZI B. The increasing dominance of teams in production of knowledge[J]. Science, 2007, 316: 1036–1039.
- [13] HENRY S. Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents[J]. Journal of the American Society for Information Science, 1973, 24(4): 265–269.
- [14] HE Li-po, SUN Shu-ying, SONG Xing-fu, et al. Leaching process for recovering valuable metals from the $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathode of lithium-ion batteries[J]. Waste Management, 2017, 64: 171–181.
- [15] 赖延清, 杨 健, 张 刚, 等. 废旧三元锂离子电池正极材料的淀粉还原浸出工艺及其动力学[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(1): 153–160.
- LAI Yan-qing, YANG Jian, ZHANG Gang, et al. Optimization and kinetics of leaching valuable metals from cathode materials of spent ternary lithium ion batteries with starch as reducing agent[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(1): 153–160.
- [16] YANG Yue, HUANG Guo-yong, XU Sheng-ming, et al. Thermal treatment process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries[J]. Hydrometallurgy, 2016, 165: 390–396.
- [17] 郭苗苗, 席晓丽, 张云河, 等. 报废动力电池镍钴锰酸锂三元正极材料高温氢还原-湿法冶金联用回收有价金属[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1415–1426.
- GUO Miao-miao, XI Xiao-li, ZHANG Yun-he, et al. Recovering valuable metals from waste ternary cathode materials of power battery by combined high temperature hydrogen reduction and hydrometallurgy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1415–1426.
- [18] YANG Jian, JIANG Liang-xing, LIU Fang-yang, et al. Reductive acid leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries using hydrazine sulfate as reductant[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2256–2264.
- [19] LI Jiang-gang, ZHAO Ru-song, HE Xiang-ming, et al. Preparation of LiCoO_2 cathode materials from spent lithium-ion batteries[J]. Ionics, 2009, 15(1): 111–113.
- [20] ZHAO JM, SHEN X Y, DENG F L, et al. Synergistic extraction and separation of valuable metals from waste cathodic material of lithium ion batteries using Cyanex272 and PC88A[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 78(3): 345–351.
- [21] GARCIA E M, SANTOS J S, PEREIRA E C, et al. Electrodeposition of cobalt from spent Li-ion battery cathodes by the electrochemistry quartz crystal microbalance technique[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(1): 549–553.
- [22] 王光旭, 李 佳, 许振明. 废旧锂离子电池中有价金属回

- 收工艺的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 113–123.
- WANG Guang-xu, LI Jia, XU Zhen-ming. Research progress of valuable metal recovery technology from waste lithium ion batteries[J]. Materials Guide, 2015, 29(7): 113–123.
- [23] LI Jin-hui, SHI Pi-xing, WANG Ze-feng, et al. A combined recovery process of metals in spent lithium-ion batteries[J]. Chemosphere, 2009, 77(8): 1132–1136.
- [24] SAEKI S, LEE J, ZHANG Qi-wu, et al. Co-grinding LiCoO_2 with PVC and water leaching of metal chlorides formed in ground product[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74: S373–S378.
- [25] SUN Liang, QIU Ke-qiang. Vacuum pyrolysis and hydrometallurgical process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 194: 378–384.
- [26] KLEINBERG J. Bursty and hierarchical structure in streams[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2003, 7(4): 373–397.

Knowledge map analysis of recycling of waste lithium ion batteries

HUANG Hai-gang, HE Li-hua

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A detailed knowledge map analysis of documents related to the recycling of waste lithium-ion batteries situation, focus and trend was carried out based on the ‘Web of Science Core Collection’ database and software Citespace. The results show that this field is in a stage of rapid development. China has many powerful research institutions and excellent teams. Their research achievements and influence are both in the leading position, but the cross-regional and cross-institutional cooperation still needs to strengthen. The research focus is concentrated in three directions: hydrometallurgical concentration and extraction process, electrode material dissociation analysis and resources recycling and sustainable research. For ten years of continuous development, this field gradually realizes the closed-loop system of pre-treatment, valuable resources comprehensive recovery, and recycled product resource utilization. The field will develop in the direction of comprehensive utilization of resources, economic benefits and ecological environmental protection.

Key words: lithium-ion battery; recovery; Citespace; knowledge map; tendency

Foundation item: Project(51934101) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2020CX026) supported by the ‘Innovation Driven’ Scholar Project of Central South University, China; Project(2019JJ40377) supported by the General Project of Natural Science Foundation of Hunan Province, China

Received date: 2020-08-07; **Accepted date:** 2020-10-25

Corresponding author: HE Li-hua; Tel: +86-13467718264; E-mail: helihua@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)