



电力碳减排与碳核算技术转移转化能力提升高级研修班

典型电工装备全生命周期碳足迹 评价方法与案例分析

高文芳

副教授/博导

河北工业大学 双碳研究院 碳排放监控与管理研究所所长

河北工业大学 能源与环境工程学院 环保设备工程系副主任

1
2025年5月28日

研究背景

- 电工装备是实现能源安全稳定供给和国民经济持续健康发展的基础
- 我国电力系统规模的显著增长，大量设备面临退役报废和升级改造问题



- 加快电工装备绿色低碳创新发展
- 工业化过程：资源-产品；退役产品-材料再生

产品



电工装备低碳创新发展



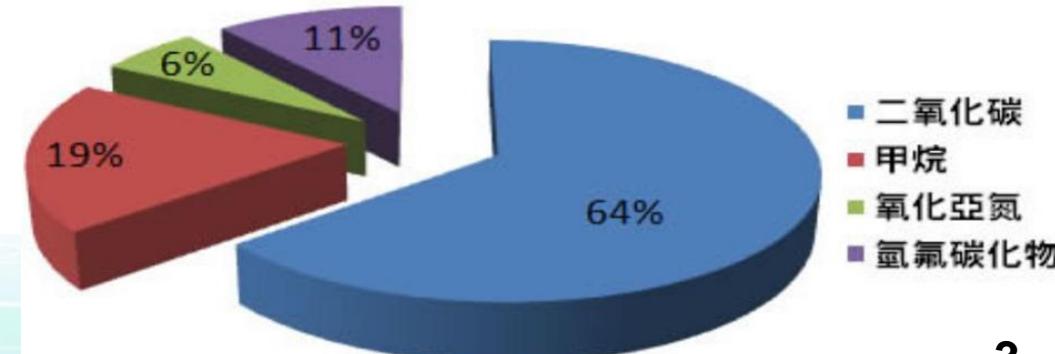
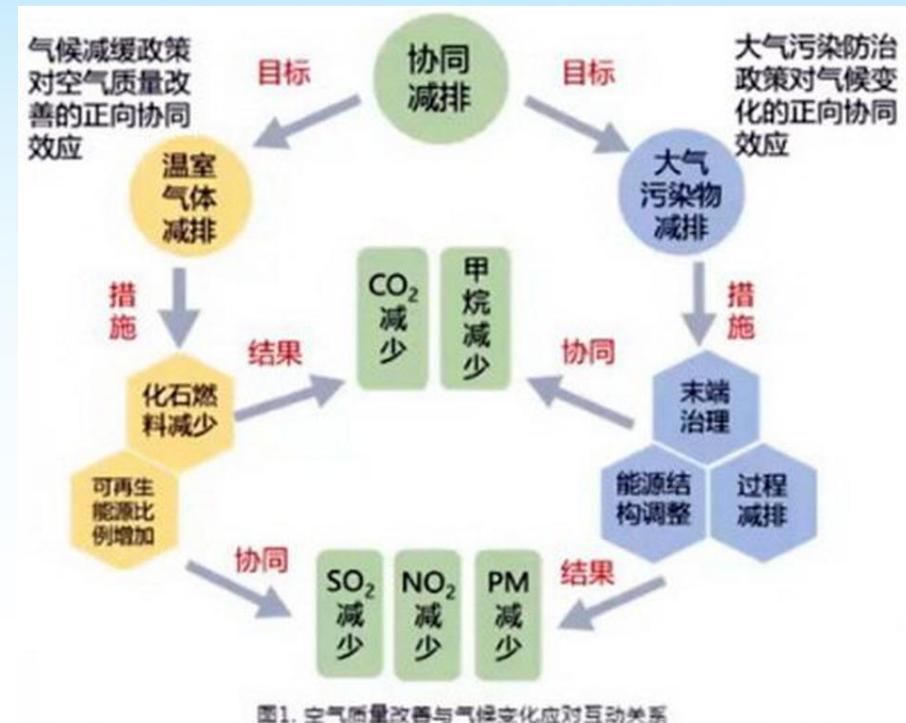
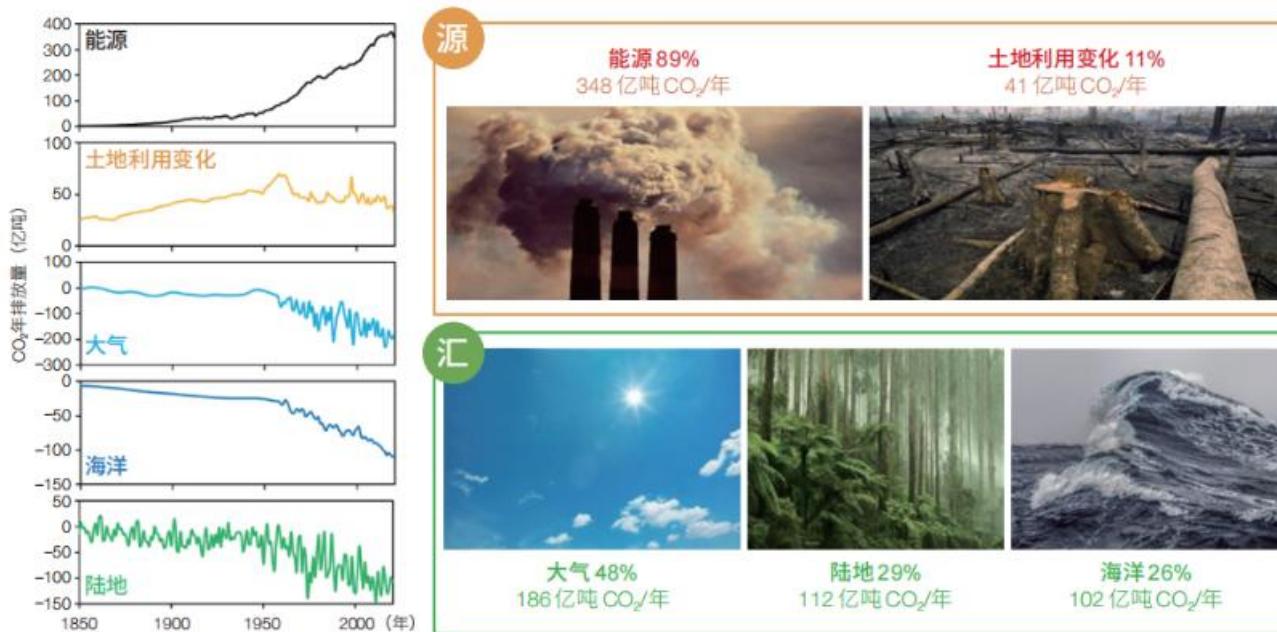
资源

退役产品

全球气候变化与低碳转型迫切性

- 2011-2020年全球的年均人为 CO₂排放量约为**389亿吨**
- 能源消费和土地利用的碳排放分别占全球碳排放总量的**89%**和**11%**
- **48%**滞留在大气中, **29%**和**26%**被陆地和海洋生态系统吸收固定

- ◆ 减少污染物的排放, 实现能源转型, 工业减排
- ◆ 减少温室气体的排放

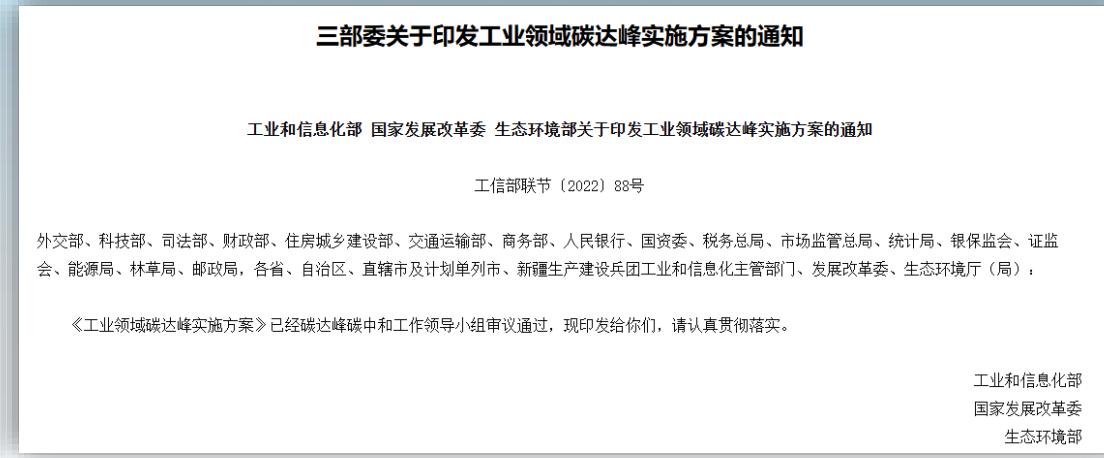


研究背景

国家环保标准要求



绿色供应链管理



双碳政策



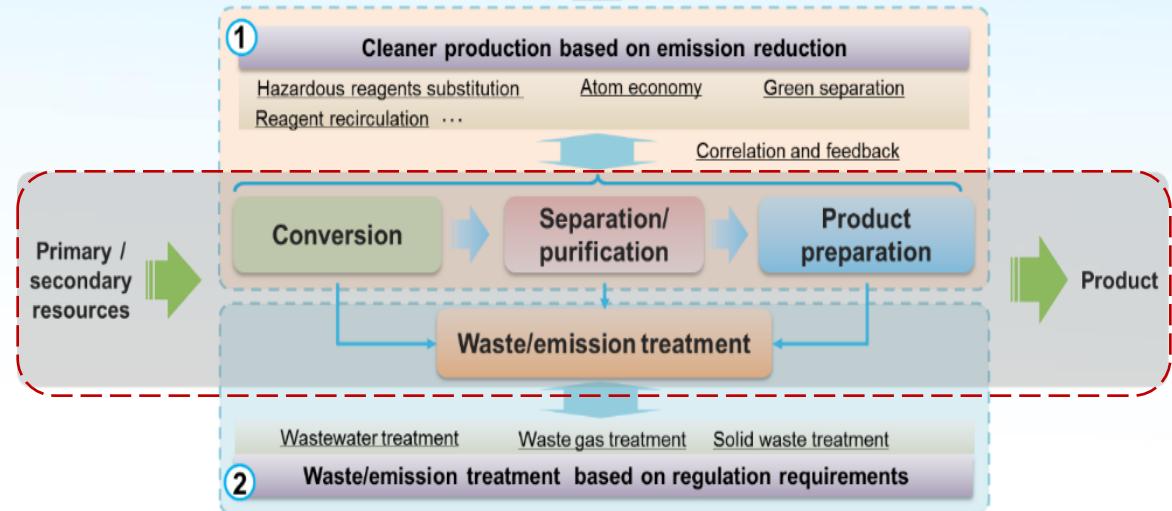
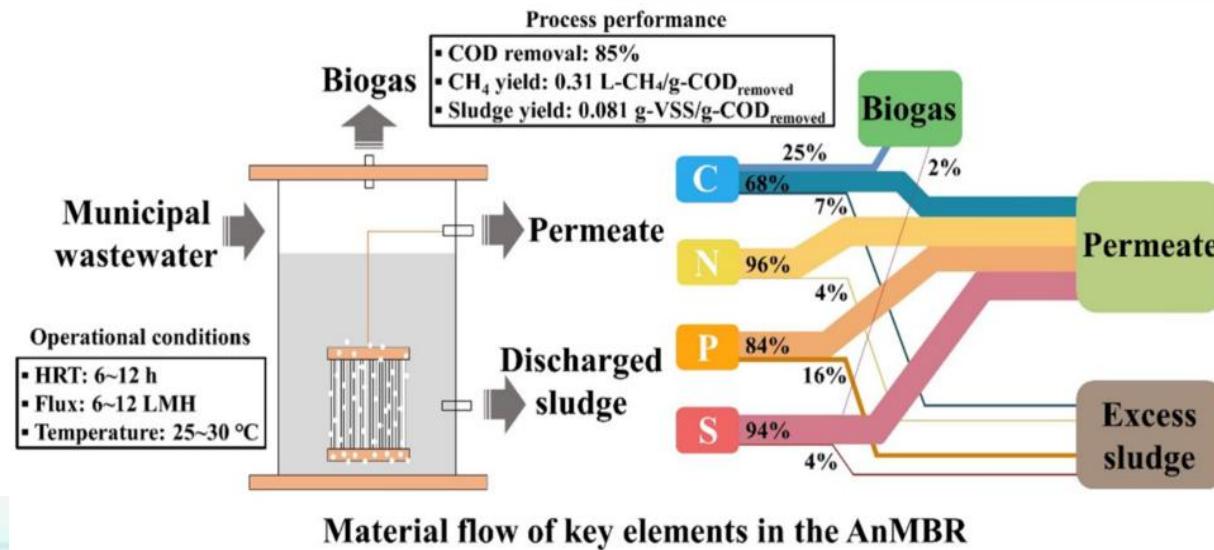
国家政策与行业标准的推动

- 国家大力提倡“双碳”的背景下，碳足迹评价核算与方法研究非常必要
- 常规的评价方法主要以**LCA为主**；
- 高效处理工艺往往流程长，可能伴随有高碳排问题，同时产品质量高与**经济**等方面相结合**综合评价也很重要**

存在问题

电工装备资源利用过程碳足迹评价面临问题：

- ✓ 多角度综合碳足迹评价
- ✓ 科学评价回收/处理工艺
- ✓ 建立低碳、环境友好的工艺流程



适用范围

清洁生产
全过程
物质流
生命周期

生产过程 废物处理
工业生产过程
工业生产过程
工业生产过程

全球/全国范围
运输 使用 回收

典型电工装备全生命周期碳足迹评价体系：



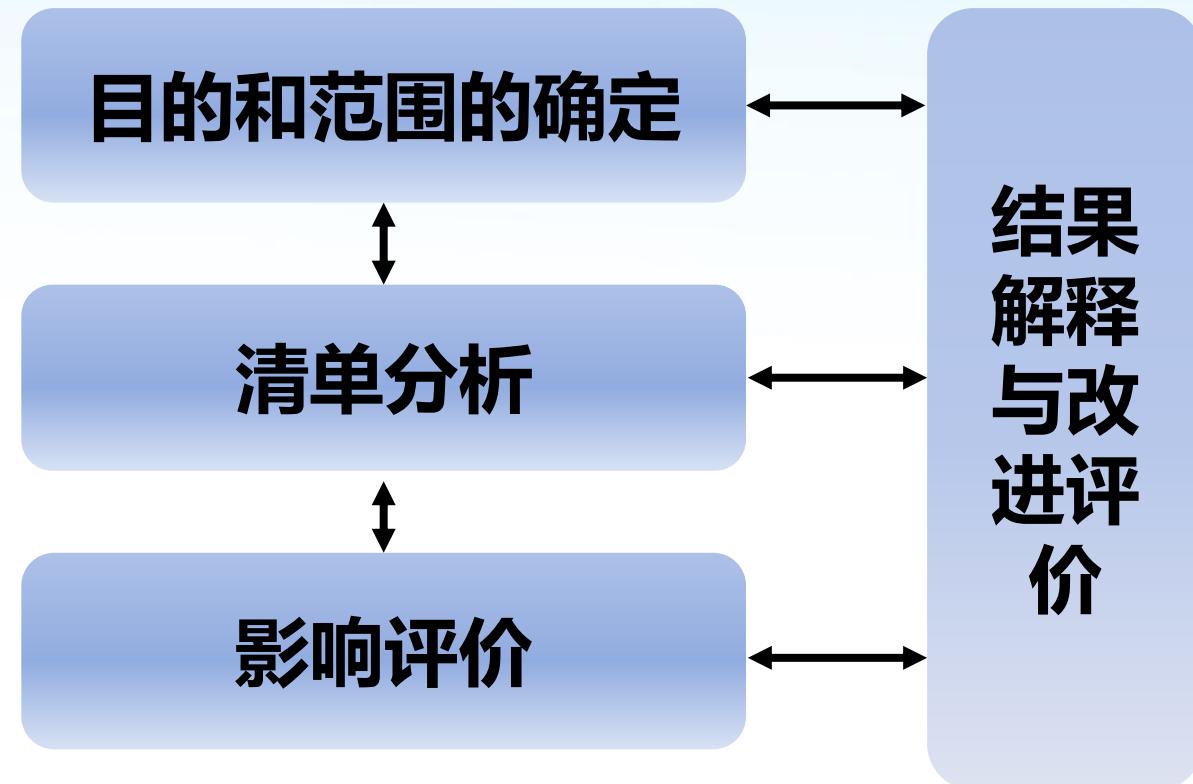
通过分析典型案例，为构建电工装备全生命周期碳足迹评价模型提供参考，助力政府完善行业标准，企业明确减排路径

1. 评价模型简介

1.1 生命周期评价 (LCA) 分析模型

定义：

LCA是指对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价(ISO 14040)，具体包括互相联系、不断重复进行的四个步骤：



功能单位：
一定数量的产品或某种服务

1.目标定义和范围界定

目标：

- 对特定产品或过程的环境因素进行评价，以获得如何改进其环境表现的信息。
- 如果在设计阶段，目的可能是比较不同方案；
- 如果已经投产，可能是评价产品或者流程的系统，以确定最低干扰和最低成本。

生命周期范围

细节标准范围



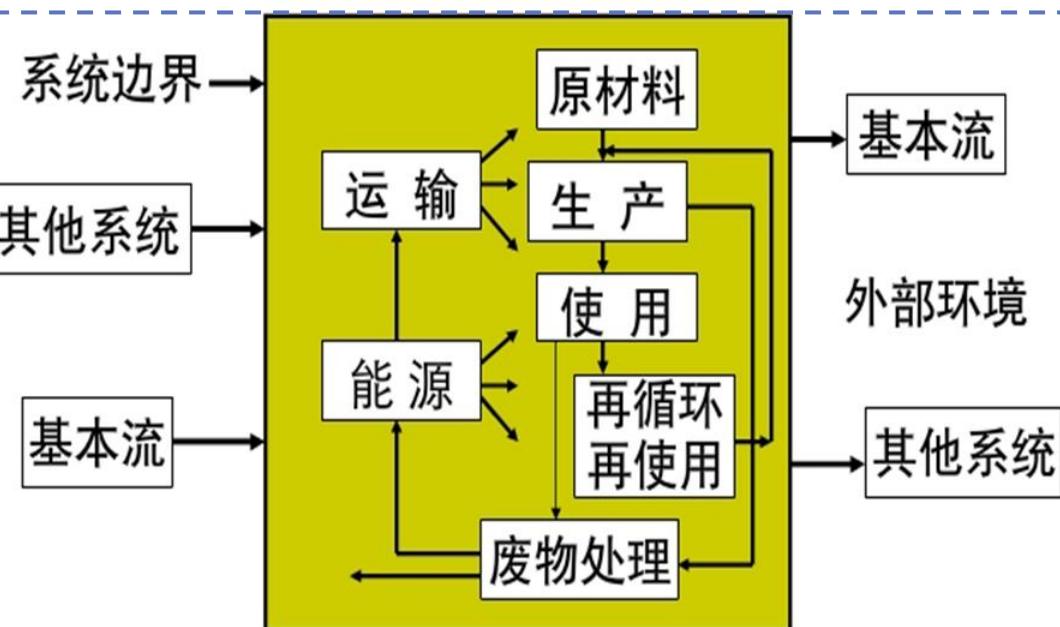
环境影响范围：
资源、生态、
健康

时空边界：地域范围和时间跨度

1.目标定义和范围界定

系统边界

用来区分**系统内部**(包括单元过程、内部产品流)与**外部环境**(包括输入输出基本流和其他系统产品流)的界限



- 单元过程: 研究对象的生命周期可以明确划分的各阶段。 决定研究中对哪些单元过程建立模型及研究程度
- 内部产品流:各单元过程之间的基本材料、装配组件等 (待处理的可用废弃物可以在单元过程中流动)
- 基本流:系统由外向内提供的资源能源和由内向外 (向空气水体及土壤排放的三废)
- 其他系统产品流:研究对象的生命周期从外界获取或向外界提供的产品 (半成品或者成品)

1.1 LCA分析模型

1.目标定义和范围界定

功能单位：

产品系统	功能	功能单位	LCI结果举例
发电厂	产电	每生产一千瓦时的电	每生产一千瓦时的电排放的千克二氧化碳量
圣诞树	提供节日欢乐	基于一段假期的一棵未被装饰的树	每一段假期中每棵未被装饰的树的能量值
干手机	干手	一双被烘干的手	每一双被烘干的手的能量值
灯泡	照明	提供一个小时100流明的光 (亦称100流明·小时)	每提供一个小时100流明的光消耗的水银量

1.1 LCA分析模型

2. 清单分析

对产品、工艺或活动在整个生命周期各阶段的资源、能源消耗和向环境的排放(三废)所进行的数据量化分析。

系统建立

绘流程图

量化分析

系统建立

LCI过程

单元划分原则

- 生命周期中资源、能源使用、废弃物排放定量技术；
 - 数据包括环境影响的数据-能源、资源、排放；
 - 对系统过程进行单元划分
 - 以功能单位为数据基础
 - 过程包括数据收集、计算
-
- 各单元过程之间有产品或废弃物流相联系；
 - 单元过程与环境通过基本流相联系；
 - 单元过程明确输入输出遵守物质/能量守恒；
 - 物质量守恒来验证单元表述的有效性。

2. 清单分析

数据收集

- 制定收集计划：目标、来源、可信度；
绘制清单流程图：包括输入输出；
- 确定数据来源与种类：原始数据、间接数据；测算/模拟；
- 收集方法：自行收集、数据库、文献
- 数据、报告性数据

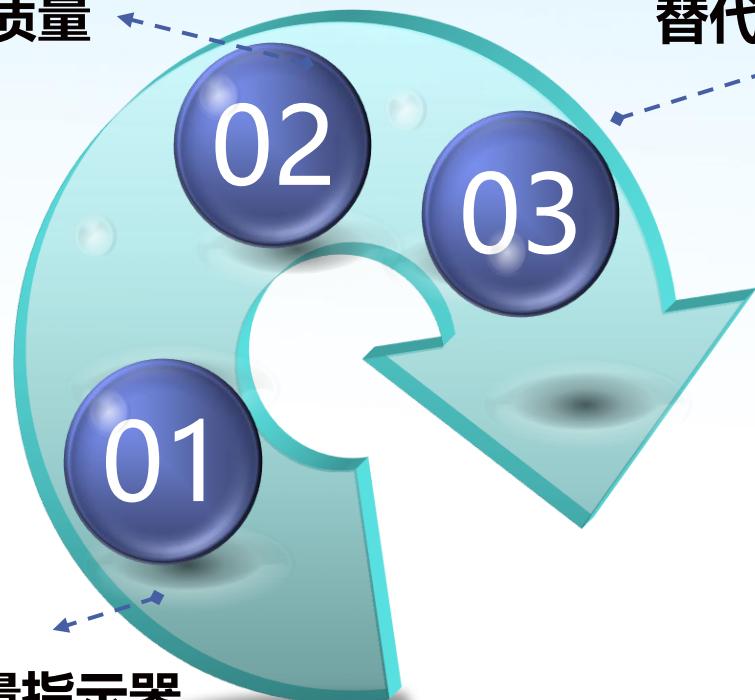
数据确认

评价数据质量

数据质量指示器

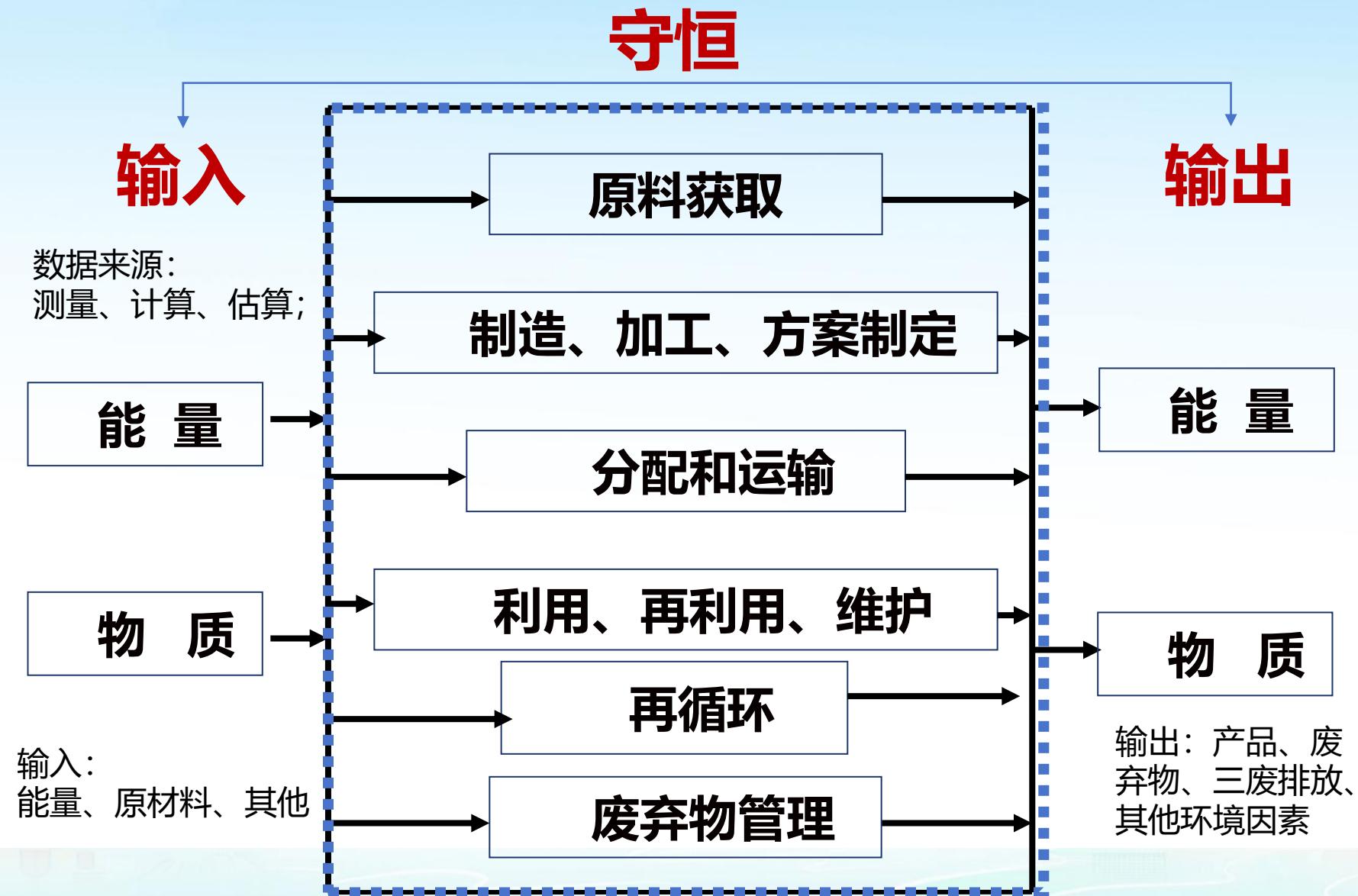
数据缺失时的处理、调整和替代。确定

- 1) 可接受度；2) 偏差；
- 3) 比较性；4) 完备性；
- 5) 精确度；6) 参考性；
- 7) 收集方法及局限性



1.1 LCA分析模型

2. 清单分析



3. 生命周期影响评价

对环境影响结果的合理预期。



- 量化：依据特征化对各类环境影响类型的潜值总和，对各类环境影响进行**赋权**，进行总环境影响潜力的量化计算。

- 分类：将**清单分析结果划分到各个环境影响类型**的过程。



- 特征化：计算各类影响类型的环境影响潜值总和。把所有环境影响因子归一为单一的环境当量基准因子的过程。
- 赋权-权重：社会总则及专家评判
- 总影响潜值计算： $EIL = \sum WF(j) \times EP(j)$

4.改善评价

根据一定的评价标准，对影响评价结果做出分析解释，识别出产品的薄弱环节和潜在改善机会，为达到产品的生态最优化目的提出改进建议。

总结：生命周期评价的过程

- 首先辨识和量化整个生命周期阶段中能量和物质的消耗以及环境释放；
- 然后评价这些消耗和释放对环境的影响；
- 最后辨识和评价减少这些影响的机会。
- 生命周期评价注重研究系统在生态健康、人类健康和资源消耗领域内的环境影响。

LCA工具简介

类别

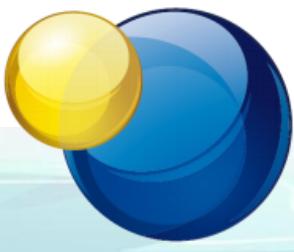
- 01 GaBi (德国)
- 02 LCAiT (瑞典)
- 03 PEMS (英国)
- 04 Simapro (荷兰)
- 05 TEAM (美国)

LCA工具简介

1

GaBi

GaBi是德国Institut fur Kunststoffprufung und Kunststoffkunde所开发出的环境影响评价软件，目前版本为GaBi4，其数据库包括800种不同的能源与材料流程。每一种流程又可以让使用者自行发展出一套子系统。数据库中也提供400种的工业流程，归纳在十种基本流程中如工业制造、物流、采矿、动力设备、服务维修等。多功能的会话环境让使用者可自行输入或编辑资料。输出时提供能量、质量等多种对照表，也可以输出至微软Excel软件，适合有经验的LCA软件使用者，但是由于其内部采用图形界面设计，因此初学者也可轻易上手。



GaBi
Product Sustainability
Performance

LCA工具简介

2

LCAiT(LCA Inventory Tool)

LCAiT(LCA Inventory Tool)乃是瑞典Chalmers Industrieknik所开发出的件，它仅提供有限的数据库，包括能源、生产燃料及物流、化学物质、塑料纸浆及纸制品等内容，其优点是可外接其他数据库，适合具有物质能量流动概念的非专业技术的初学者使用。

2

PEMS(Pira Environmental Management System)

PEMS(Pira Environmental Management System)系由英国Pira International公司所研发出来，可以选择109种材料、49种能源、37种废弃物管理及16种物流等来计算影响评估程度，参数主要采用欧洲的资料，且不可自行修改或编辑输出资料可选择采用文字或图表。初学者及专业人士皆可适用。

LCA工具简介

4

TEAM

TEAM是由美国Ecobalance公司所开发的软件，其数据库分为10大类及216个小类个别资料文档。10大类分别为：纸浆造纸、石化塑料、无机化学、铜、铝、其他金属、玻璃、能量转换、物流、废弃物管理等。使用者可自行定义及编辑资料或单位。因为其输出介面并未使用图形介面，使用者操作起来较不方便，此软件较适合生命周期评估之专家使用。

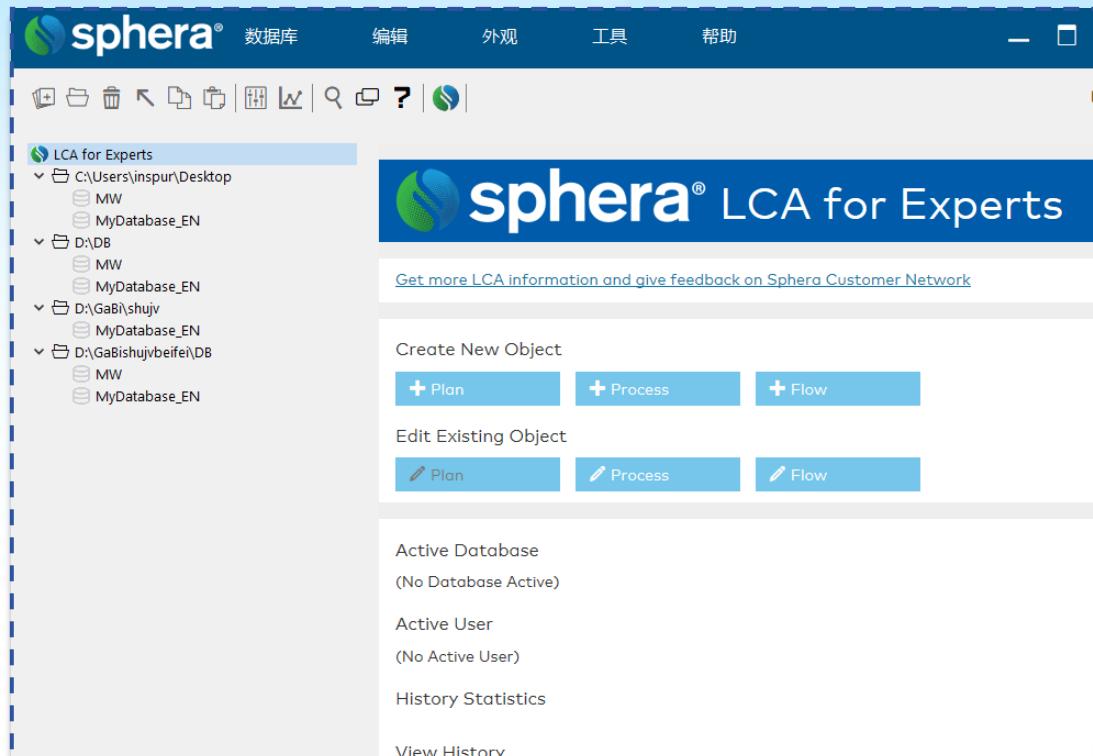
5

SimaPro

SimaPro是由荷兰PRe Consultant公司所开发出的影响评估软件，是数据库最丰富的LCA软件之一。其特色为制造阶段的数据库最为详尽。且其可以选择图文输出方式，使用者操作更为简便。

SimaPro

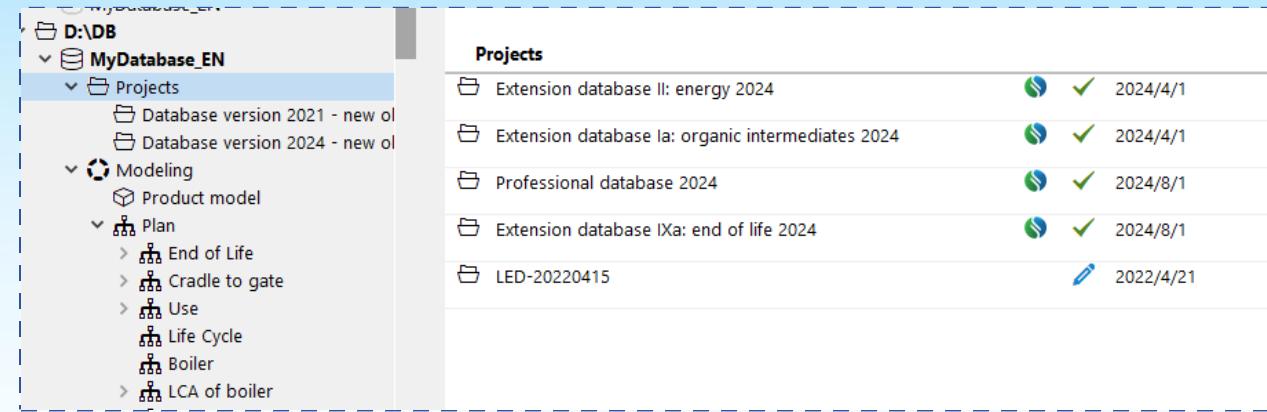
1.1 LCA分析模型



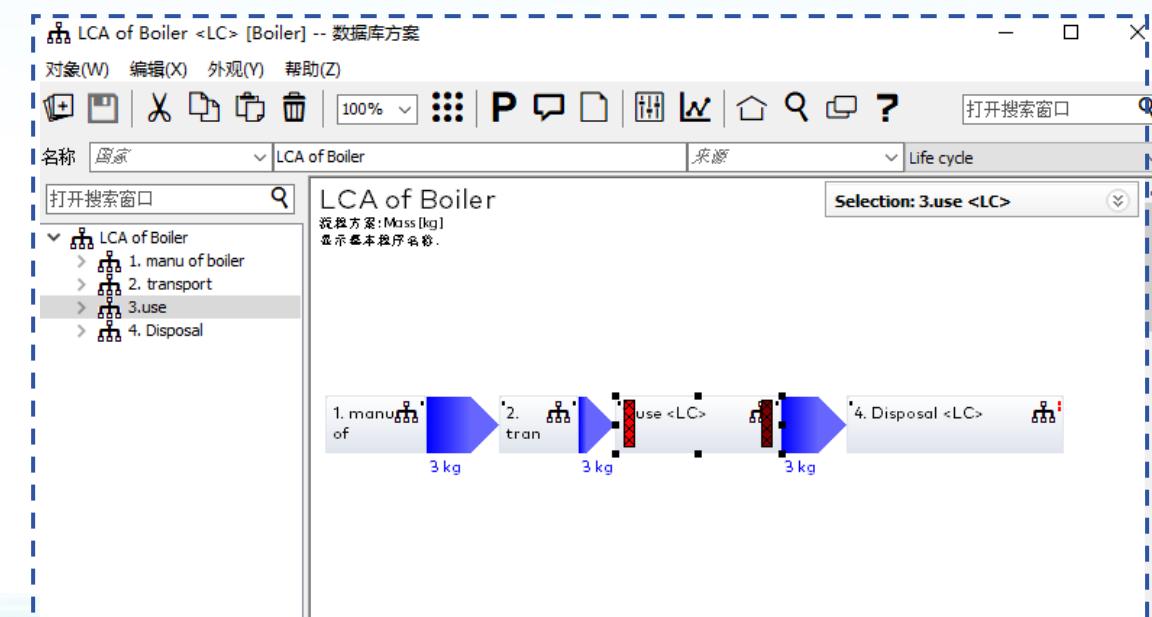
Gabi 服务器界面

Boiler				
	LCA of Boiler	LC		2022/4/11
	1. manu of boiler	LC		2022/4/11
	2. transport	LC		2022/4/11
	3.use	LC		2022/4/11
	4. Disposal	LC		2022/4/11

Gabi 过程界面

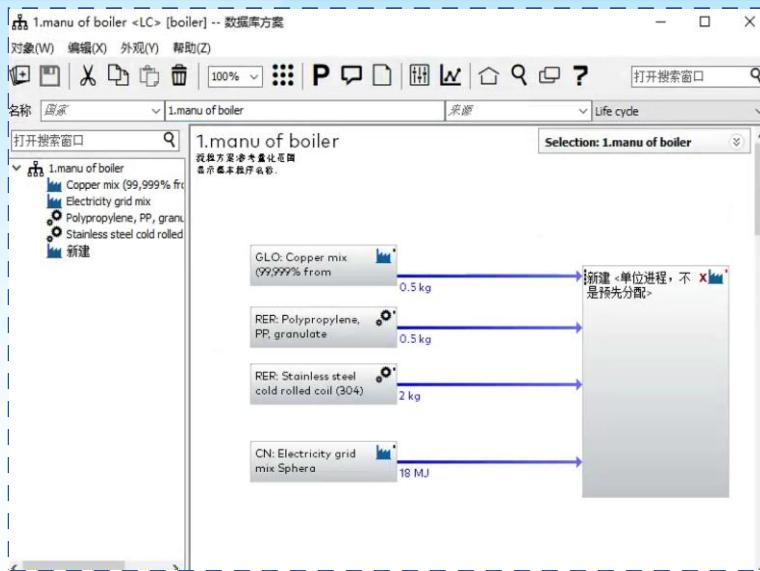


Gabi 数据库展开图

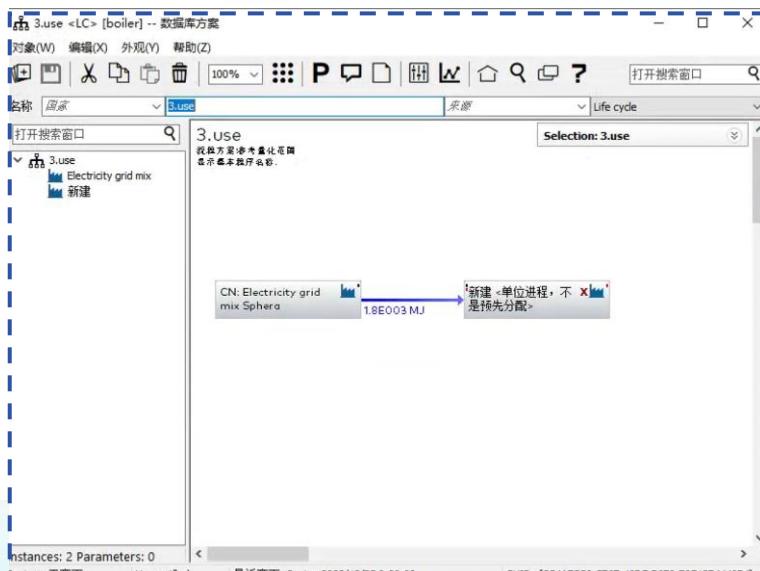


Gabi 模型示意图

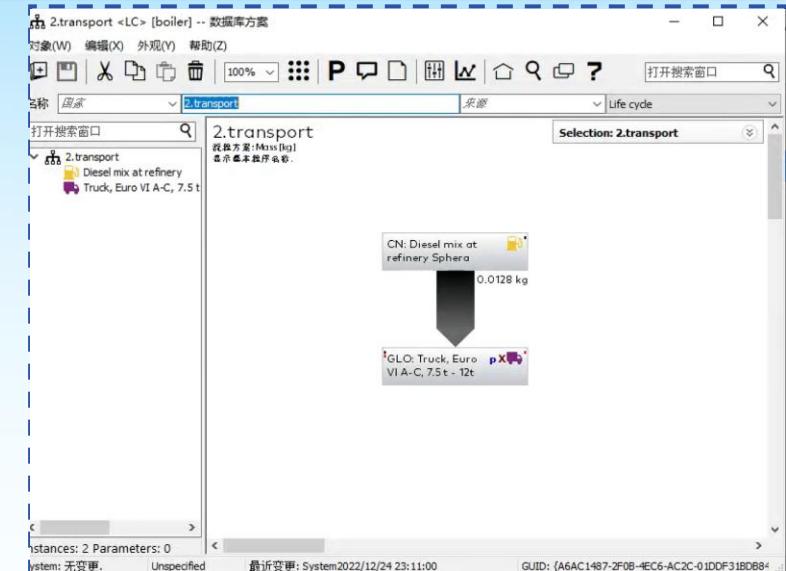
1.1 LCA分析模型



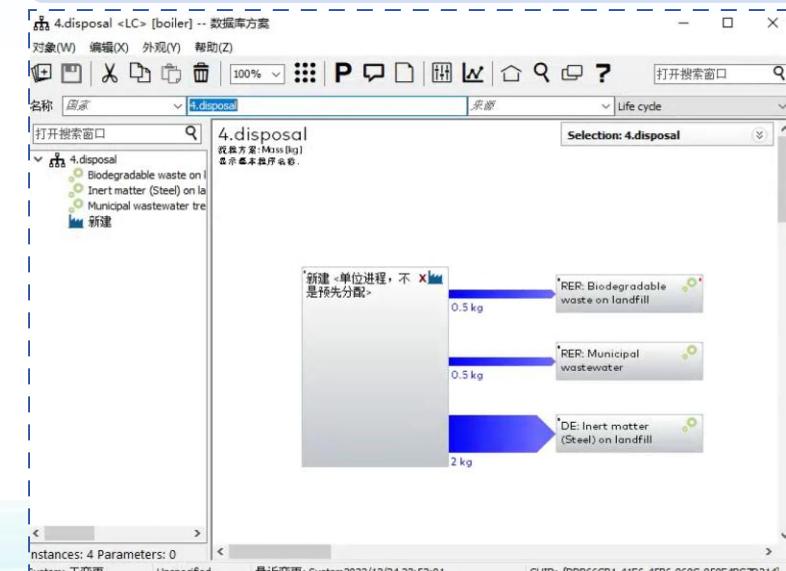
制造过程建模



使用过程建模

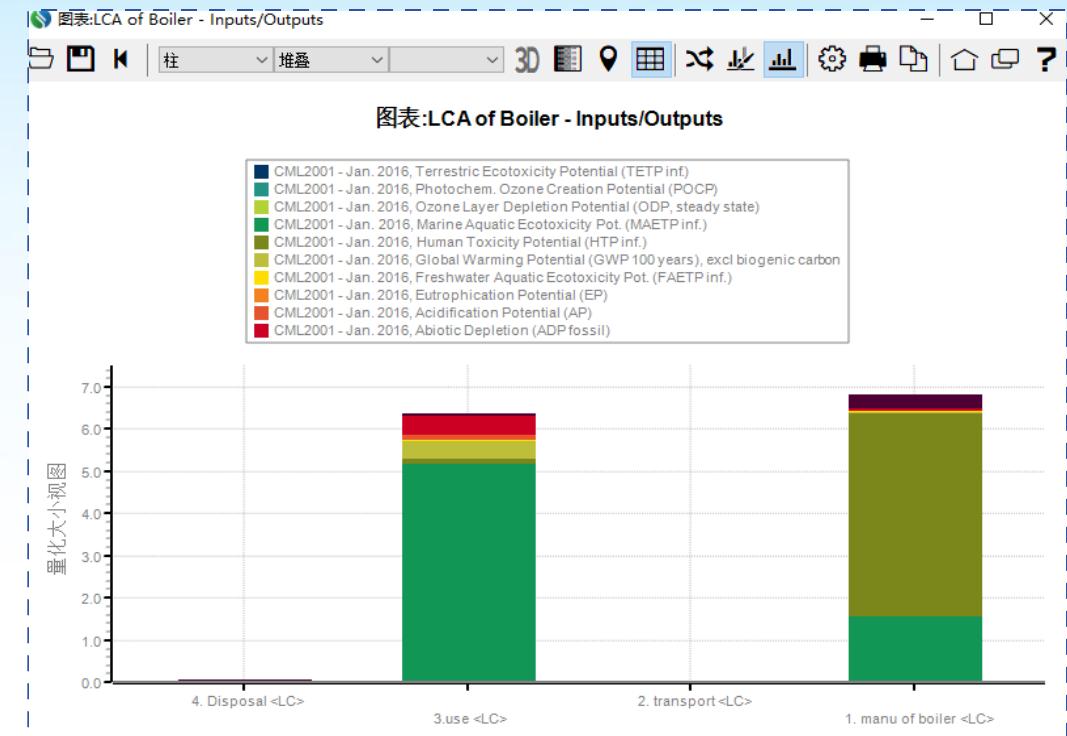
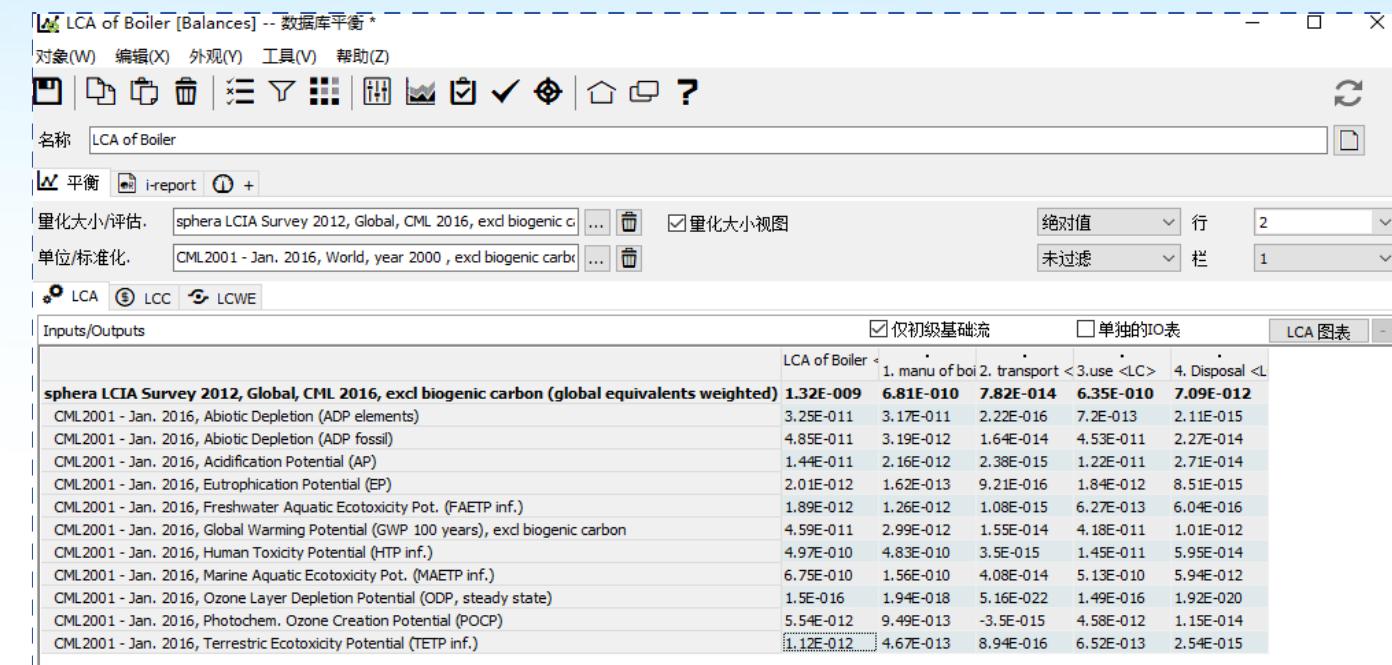


运输过程建模



处置过程建模

1.1 LCA分析模型



Gabi 建模结果

Gabi 结果图

非生物耗竭(Abiotic Depletion elements, ADP)、酸化潜能(Acidification Potential, AP)、富营养化潜能(Eutrophication Potential, EP)、淡水水生生态毒性潜能(Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, FAETP)、全球变暖潜能值(Global Warming Potential 100 years, GWP)和人类毒性潜能值(Human Toxicity Potential, HTP)、臭氧层消耗潜能(Ozone Layer Depletion Potential, ODP)、海洋水生生态毒性潜力(Marine Aquatic Ecotoxicity Potential, MAETP)、光化学生态毒性(Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)和陆地生态毒性(Terrestrial Ecotoxicity Potential, TETP)

1.1 LCA分析模型

The screenshot shows the eFootprint platform's model management interface. At the top, there is a search bar labeled "输入产品名称" and a green button labeled "+ 新建模型". Below the search bar is a table with columns: 产品名称 (Product Name), 规格型号 (Specification Model), 数量 (单位) (Quantity (Unit)), 目标应用与目标代表性类型 (Target Application and Target Representativeness Type), 创建时间 (Creation Time), and 操作 (Operations). The table contains several entries, including "燃料" (Fuel), "feishui", and various electrical components like "TPF-BYQ-非晶立体卷400kVA-变压..." and "TPF-BYQ-10kV 硅钢立体卷200kVA...". At the bottom of the table, there is a page navigation bar with numbers 1 through 7 and a total count of "总共 68 条信息".

eBalance 界面

This screenshot shows the "目标与范围定义" (Objectives and Scope Definition) section of the eBalance NCM direct recycling process. It includes fields for Product Name (NCM直接处理), Specification Model (补充说明), Target Application and Target Representativeness Type (行业LCA-代表特定技术/全行业/市场平均水平 (用于流程行业数据库...)), and other parameters like Product Category, Shape and Form, Functional Unit, System Boundary, and Reference Year. A note at the bottom explains exclusion rules for common materials, low-value materials, and most cases.

eBalance NCM直接回收过程-目标与范围定义

1.1 LCA分析模型

The screenshot shows the eFootprint software interface for creating an LCA model. The main tabs at the top are '目标与范围定义' (Scope and Objectives), '生命周期模型' (LCA Model), 'LCA结果' (LCA Results), and '模型文档与评审' (Model Documentation and Review). The current tab is '生命周期模型'. On the left, there's a sidebar with icons for users, groups, and notifications (0). The main content area is titled 'NCM直接处理' (NCM Direct Treatment) under '生产' (Production). It includes sections for '过程描述' (Process Description), '产品信息(1)' (Product Information), '输入表(2)' (Input Table), and '输出表(0)' (Output Table). A note says '主要数据来源: 代表行业平均数据' (Main data source: Representative industry average data). The '产品信息(1)' table shows one item: 'NCM直接处理 [主产品]' with '1kWh' quantity and '单件/台/套' unit. The '输入表(2)' table shows two inputs: '电' (Electricity) at 0.53kWh and '活性炭' (Activated Carbon) at 6.30E-04kg. The '输出表(0)' table is empty.

eBalance NCM直接回收过程-生命周期模型

The screenshot shows the eFootprint software interface displaying LCA results for the NCM direct recycling process. The top navigation bar has tabs for '目标与范围定义' (Scope and Objectives), '生命周期模型' (LCA Model), 'LCA结果' (LCA Results), and '模型文档与评审' (Model Documentation and Review). The current tab is 'LCA结果'. The main content area is titled 'NCM直接处理' (NCM Direct Treatment) under '生产' (Production). It shows a table of results:

基准流	计算方案名称	所选指标	计算时间	操作
NCM直接处理【生产】-NCM...	NCM直接处理【生产】-NCM直 接处理 (1 kWh)	单项指标(15项): GWP、PED、ADP、WU、AP 、EP、RI、ODP、POP、CO2、SO2、NOx、 NH3-N、COD、IWU	2024-11-01 11:35	

Below the results table is a detailed table of environmental impact indicators:

中文名称	英文名称	缩写(单位)	LCA指标结果
气候变化	Climate Change	GWP(kg CO ₂ eq)	0.5
初级能源消耗	Primary energy demand	PED(MJ)	6.61
非生物资源消耗潜值	abiotic depletion potential	ADP(kg Sb eq)	2.92E-07
水资源消耗	Resource Depletion - water	WU(kg)	1.66
酸化	Acidification	AP(kg SO ₂ eq)	2.63E-03
富营养化潜值	eutrophication	EP(kg PO43-eq)	1.72E-04
可吸入无机物	Particulate matter	RI(kg PM2.5 eq)	7.66E-04
臭氧层消耗	Ozone depletion	ODP(kg CFC-11 eq)	9.85E-10
光化学臭氧合成	Photochemical ozone formation	POPF(kg NMVOC eq)	1.89E-04
二氧化碳	carbon dioxide	CO ₂ (kg)	0.46

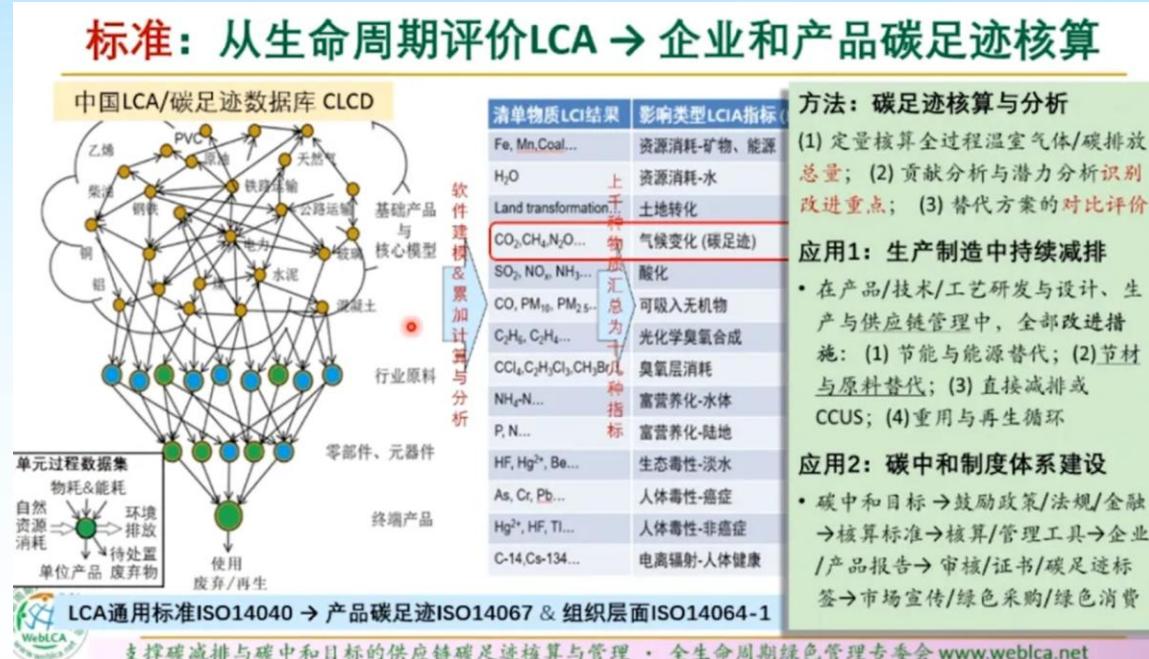
eBalance NCM直接回收过程-LCA结果

1.2 碳足迹分析模型

碳足迹计算

碳足迹的计算有两种方法：

- 利用生命周期评估法，这种方法较准确也更具体；
- 通过所使用的能源矿物燃料排放量计算；



相关标准

PAS 2050

- 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范
- 英国标准协会（BSI）
- 建立在现有生命周期评价方法之上，而这些方法则是根据ISO 14040: 2006和ISO 14044: 2006标准并通过明确规定各种商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价要求而制定。

GHG Protocol

- 温室气体议定书：产品核算与报告标准
- 世界资源研究所（WRI）和世界可持续发展工商理事会（WBCSD）
- 基于ISO 14044的生命周期评估部分参考ISO 14040/44生命周期评价系列标准，标识部分参考ISO 14020环境标志系列标准，温室气体盘查部分参考ISO 14064温室气体系列标准。

ISO 14067

- 产品碳足迹量化和报告要求及指南
- 国际标准化组织（ISO）
- 生命周期评估部分参考ISO 14040/44生命周期评价系列标准，标识部分参考ISO 14020环境标志系列标准，温室气体盘查部分参考ISO 14064温室气体系列标准。



减少碳足迹的途径：

- 节能减排
- 使用低碳
- 无碳能源
- 碳转换
- 碳补偿

产品碳足迹评价过程术语和定义

- 温室气体：大气层中自然存在的和由于人类活动产生的能够吸收和散发由地球表面、大气层和云层所产生的、波长在红外光谱内的辐射的气态成分（二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟碳化（PFCs）、六氟化硫（SF₆）与三氟化氮（NF₃））；
- 二氧化碳当量：气体的质量乘以其全球增温潜势（GWP）；
- 全球增温潜势值（GWP）：通常基于100年的时间跨度计算GWP，记作GWP100；
- 功能单位：基于产品系统性能用来量化的基准单位。功能单位可以是质量、数量单位，如1吨钢材，1吨水泥等；
- 输入（输出）：进入（离开）一个单元过程的产品、物质、能量流；
- 生命周期评价：对一个产品生产系统在其生命周期内的投入、产出和潜在环境影响的评价；
- 不确定性分析：指对可能发生偏差的数据进行精准度估计，及对可能引起偏差的原因进行定性描述；
- 生物碳：源自生物质的碳；
- 化石碳：化石材料中的碳；
- 从摇篮到大门：指产品从原材料获取到产品生产完成的过程；
- 从摇篮到坟墓：指产品从原料开采、加工、制造、使用、维护等直到最终处理或再生利用的过程；
- 废物：处置的或打算予以处置的物质或物品；

1.2 碳足迹分析模型

避免重复计算

- 避免在产品系统内重复计算温室气体的排放量和清除量

透明性

- 以开放的、易懂的方式记录所有相关问题

- 确保产品碳足迹评价过程是准确的、可核证的、相关的、无误导的，并尽可能减少偏差和不确定性

生命周期视角

- 考虑产品生命周期的所有阶段或某些主要阶段

完整性

- 包括对产品碳足迹有实质性贡献的所有温室气体的排放与清除

一致性

- 在产品碳足迹评价的整个过程中应采用相同的假设、方法和数据，以得到与评价目标和内容相一致的结论

原

则

准确性

05

04

06

01

02

03

排放与清除

温室气体排放与清除的范围

- 进行碳足迹评价时，应记录排放到大气中和从大气中清除的温室气体量。产品生命周期过程中温室气体排放和清除的评价来自各种过程，这些过程可包括但不限于：
 - 1) 能源利用；
 - 2) 化学反应；
 - 3) 废弃物处置；

单元划分原则

- 化石碳等非生物碳所引起的二氧化碳排放应包含到产品的生命周期碳足迹评价中；
- 生物碳所引起的二氧化碳排放应排除在产品生命周期二氧化碳排放的计算之外；

1.2 碳足迹分析模型

评价目标与内容

- 产品碳足迹评价的目标是通过量化产品生命周期内所有显著的排放与清除，来计算该产品对全球暖化的潜在贡献（以二氧化碳排放当量表示）；
- 确定产品碳足迹评价的具体目标时，应明确陈述评价用途及开展评价原因；

产品碳足迹评价内容应与评价目标相一致。在确定评价内容时，应考虑并清晰描述以下项目：

- 1) 产品系统及其功能；
- 2) 功能单位；
- 3) 系统边界；
- 4) 数据与数据质量要求；
- 5) 数据的时间边界；
- 6) 分配原则；
- 7) 计算；



1.2 碳足迹分析模型

系统边界

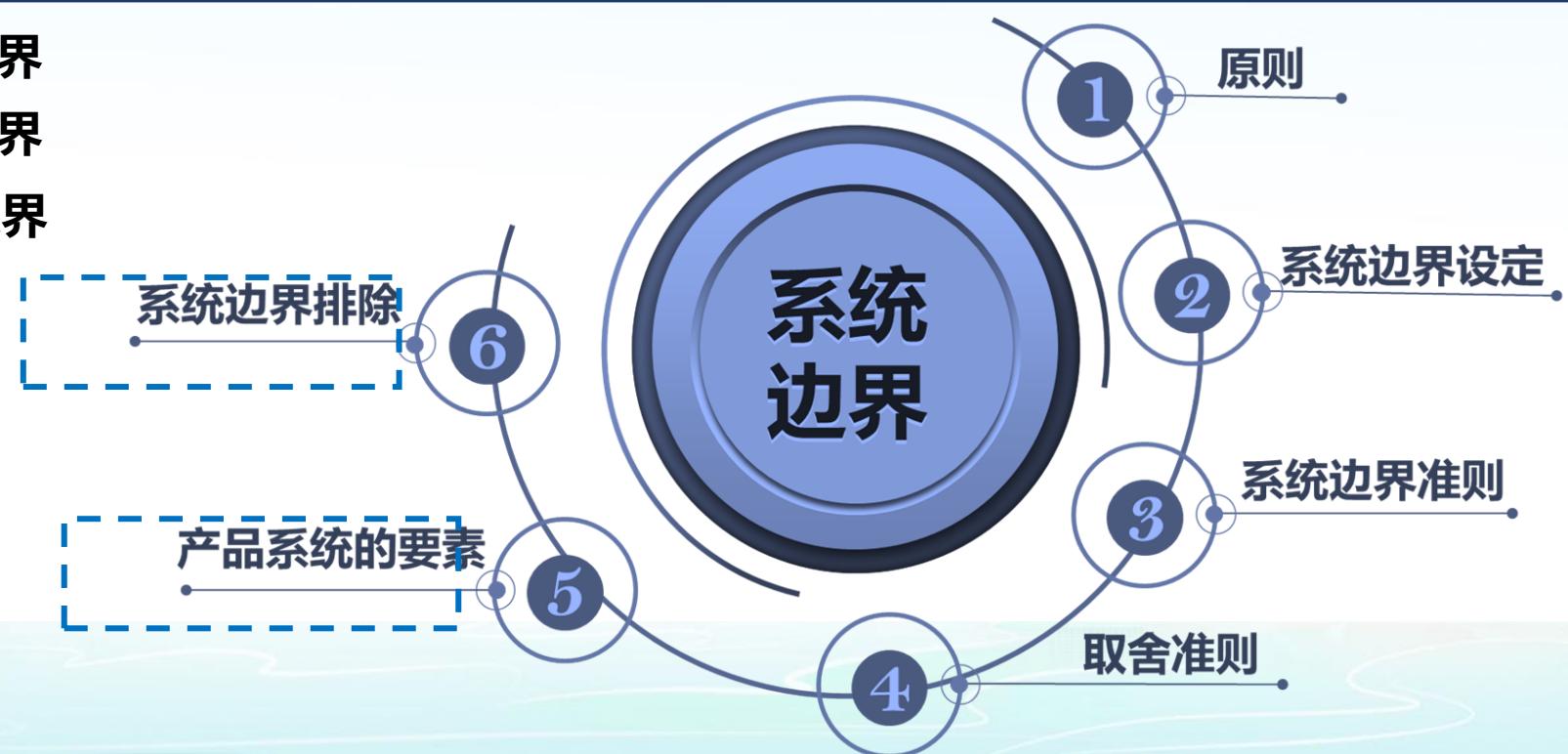


“大门到大门” 边界

“摇篮到大门” 边界

“摇篮到坟墓” 边界

- ◆ 系统边界决定产品碳足迹评价所涵盖的单元过程。系统边界应与产品碳足迹评价目标和范围相一致



1.2 碳足迹分析模型

产品系统的要素



1.2 碳足迹分析模型

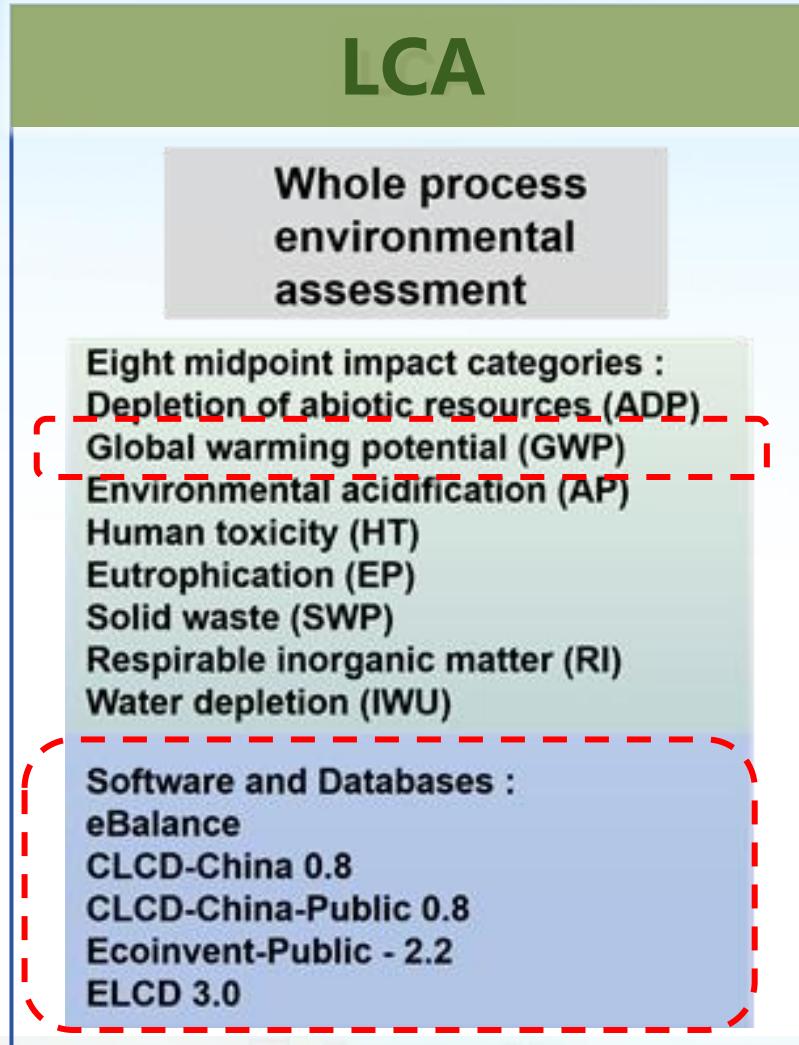
系统边界排除

与以下方面有关的温室气体排放不应纳入系统边界：

- ◆ 消费者往返零售点的交通
 - ◆ 各个过程和 / 或预处理过程中的人力输入
 - ◆ 员工通勤
 - ◆ 人、畜力提供的运输
-
- The diagram features a central diamond shape containing the text '系统边界排除' (System Boundary Exclusion). Surrounding this central diamond are four smaller, semi-transparent diamonds arranged in a cross pattern. The top diamond contains the number '02', the bottom-left diamond contains '01', the bottom-right diamond contains '03', and the rightmost diamond contains '04'. All diamonds are light blue with dark blue outlines.

1.2 碳足迹分析模型

基于LCA-GWP碳足迹分析模型建立：



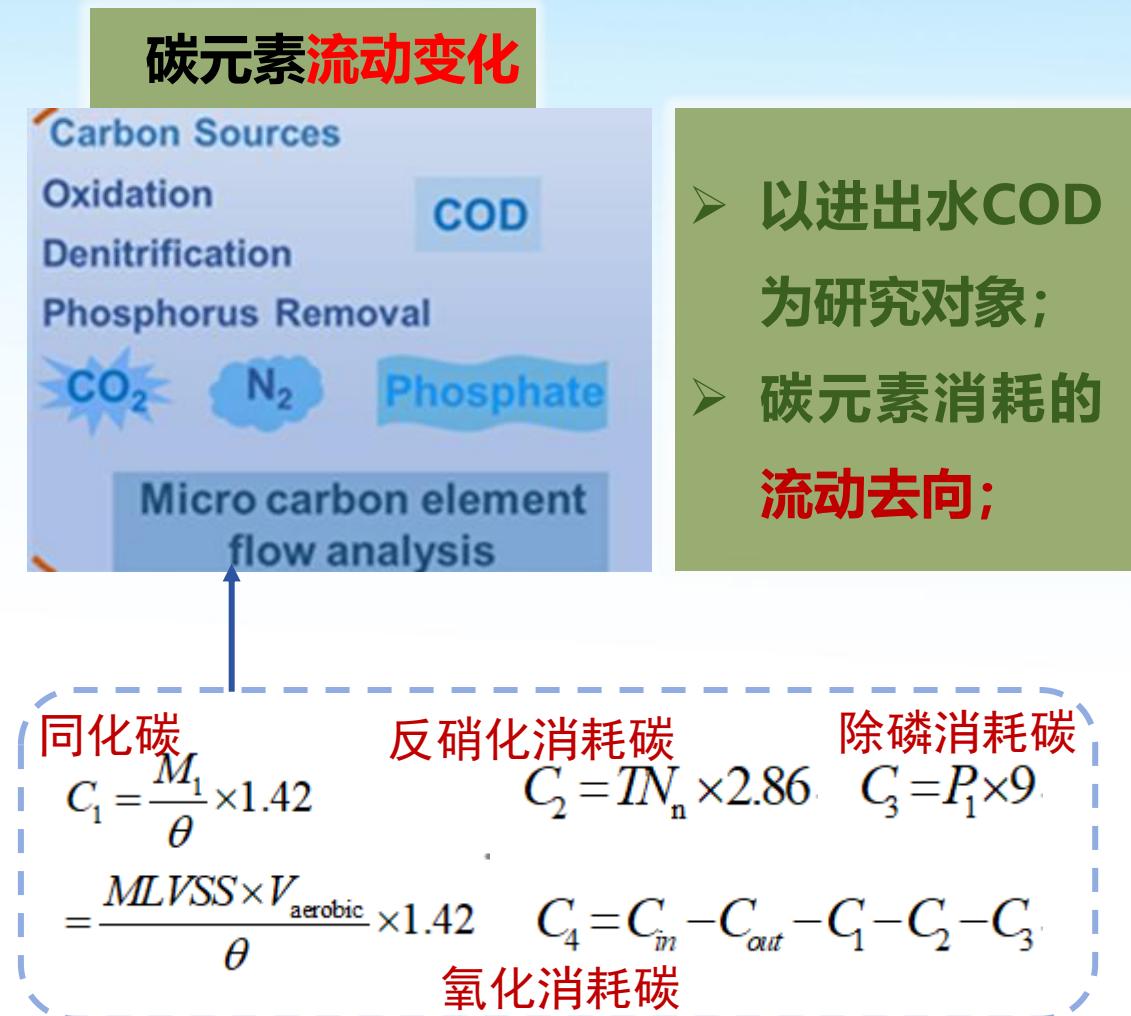
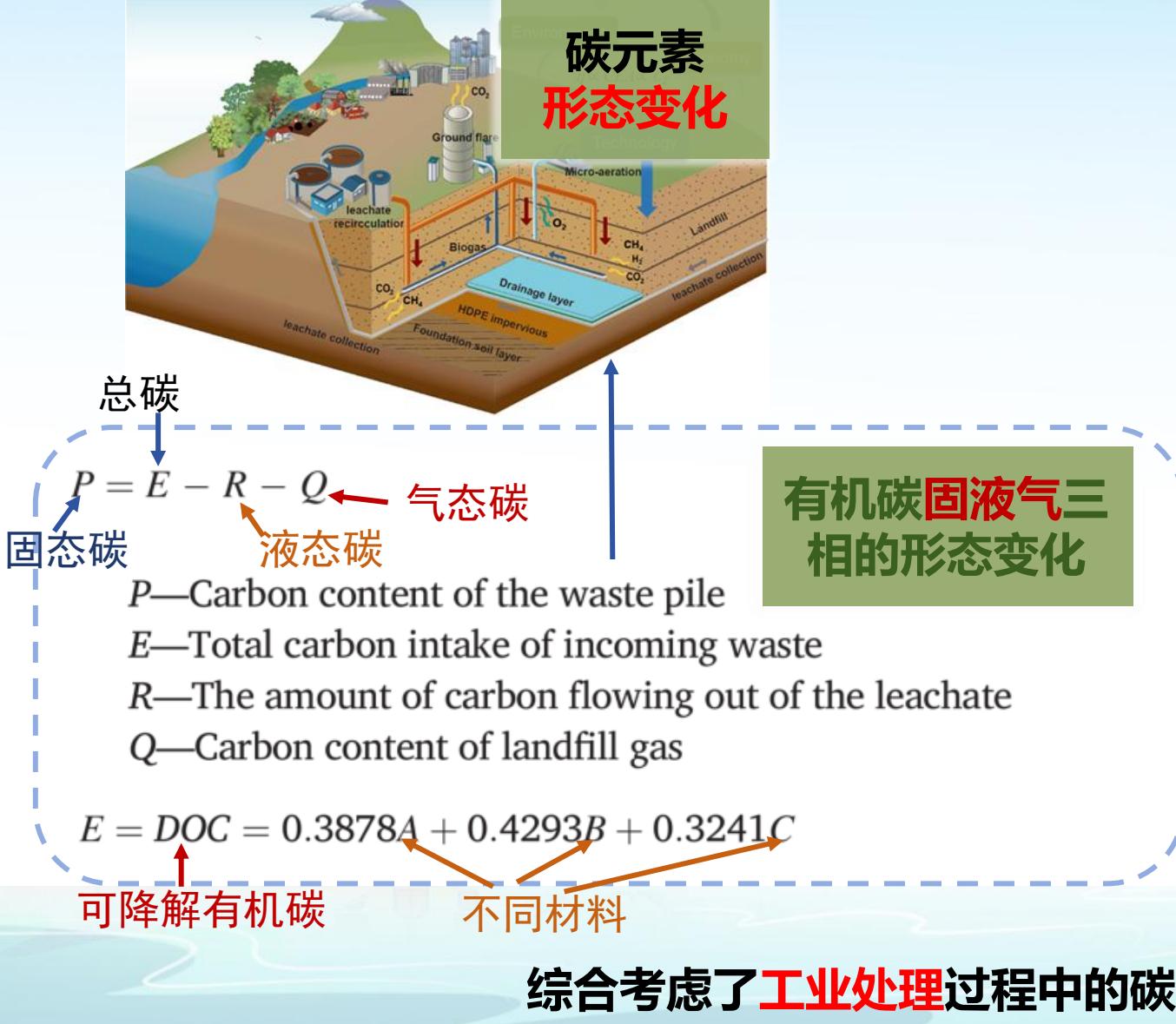
模型思路

- ◆ 利用 **Gabi** 或 **e-Balance** 软件，选择 **CLCD-China 0.8, Ecoinvent-Public -2.2, CML 2001-Aug. 2016** 等数据
- 库及方法：
- ◆ 充分考虑**物料、能耗、水耗和环境**等因素；
- ◆ 计算基于**LCA**的全过程的**全球变暖潜值 (GWP)**；
- ◆ 利用**特征化和归一化**结果分析工业过程中的**碳排放能力**；
- ◆ 建立全流程工业处理碳足迹评价体系；

➤ 基于LCA方法从宏观GWP碳足迹分析的角度考虑了工业处理全流程的碳排放对环境的影响

1.3 综合碳足迹分析模型

典型工业过程碳转化形态与足迹分析：



1.3 综合碳足迹分析模型

综合碳足迹分析模型建立：

微观

Micro key element flow analysis

Key Elemental Analysis:

Phosphorus Sources

Nitrogen Sources

TN

TP

Carbon Sources

Oxidation

Denitrification

Phosphorus Removal

CO₂ N₂ Phosphate

Micro carbon element flow analysis

宏观

Life cycle assessment

Impact Categories

Abiotic Depletion (ADP)
Acidification Potential (AP)
Eutrophication Potential (EP)
Human Toxicity Potential (HTP)
Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)
Ozone Layer Depletion Potential (ODP)
Photochemical Ecotoxicity Potential (POCP)
Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)

Method & Software
CML 2001-Aug. 2016
Gabi

Global Warming Potential (GWP)

Direct emissions CO₂ equivalent
Indirect emissions



Carbon footprint analysis

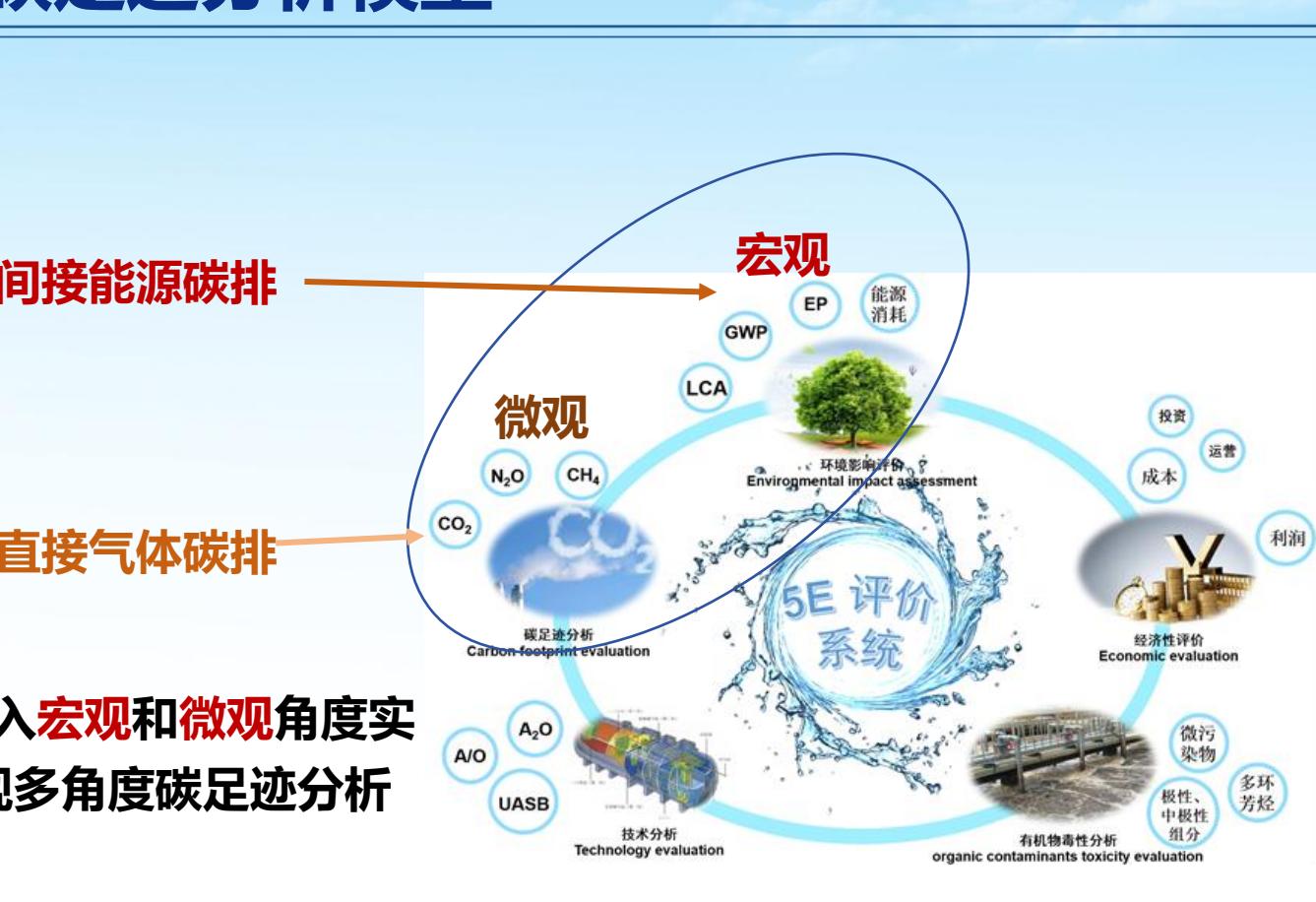
间接能源碳排

宏观

微观

直接气体碳排

引入宏观和微观角度实现多角度碳足迹分析

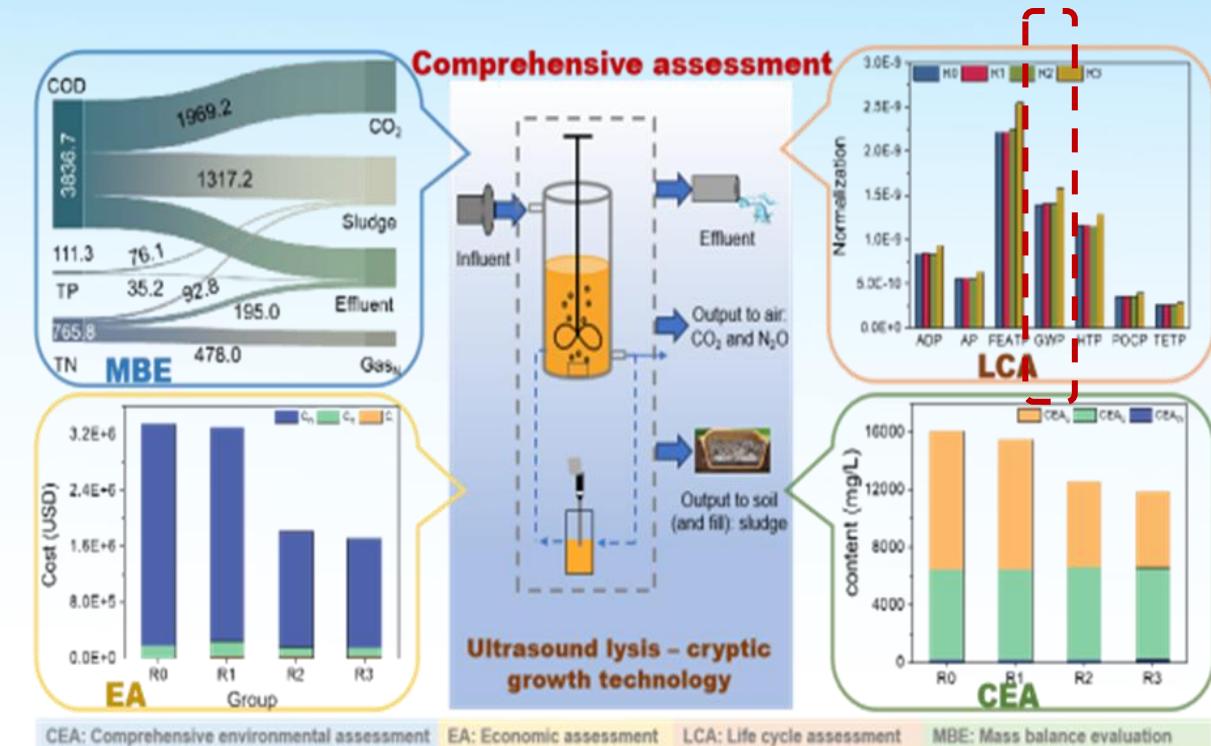
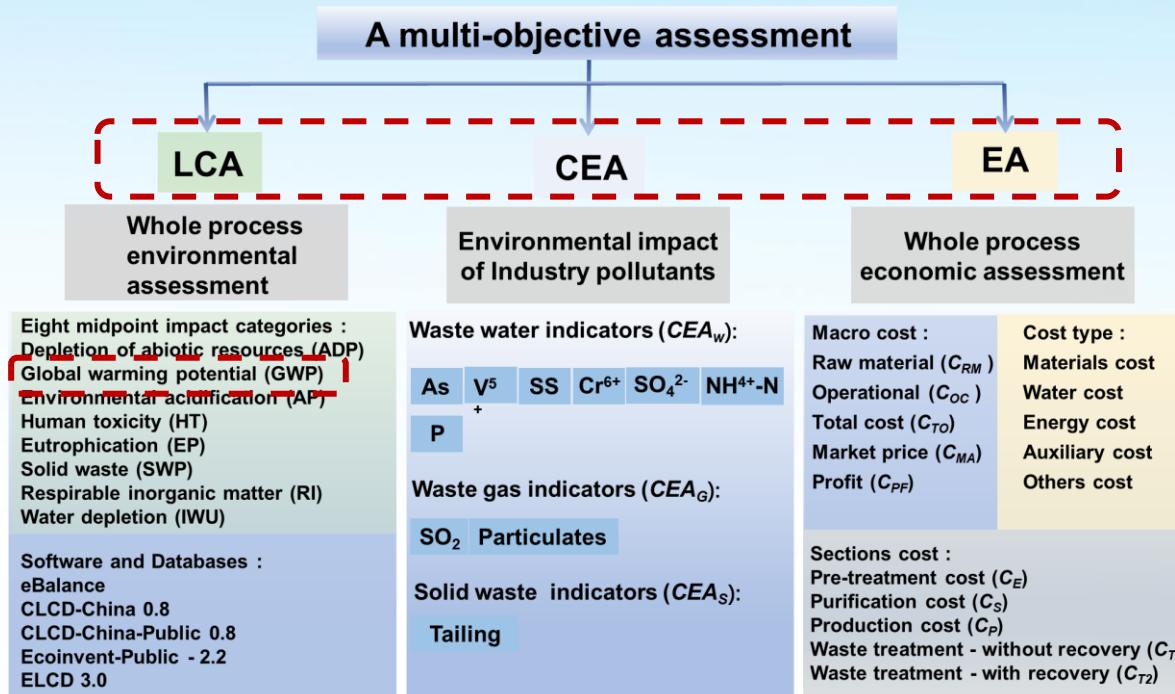


- ◆ 基于LCA方法，引入能源和材料的背景数据，综合考虑GWP的潜能值，实现全流程间接碳足迹影响评价；
- ◆ 结合微观碳元素流动和碳元素形态变化，参考质量守恒方法；
- ◆ 研究处理过程中的固态、液态、气态及不同的流动变化，评估直接碳排放影响；

实现微观和宏观的综合评价，分析工业处理过程中的碳足迹

1.4 多角度碳足迹分析模型

多角度分析模型建立：

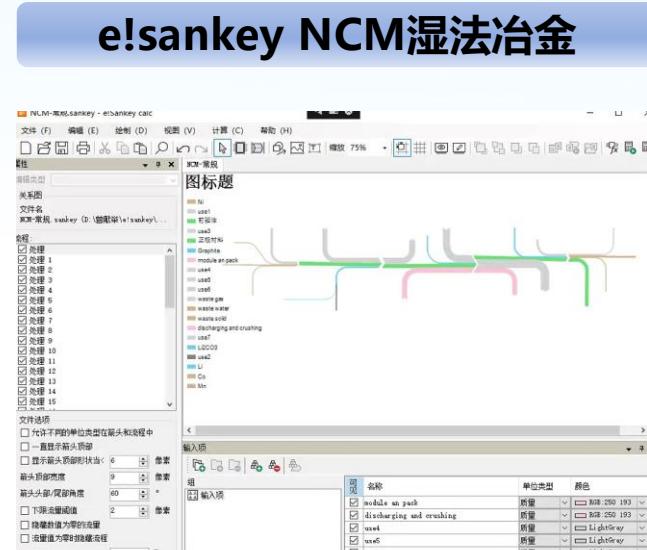
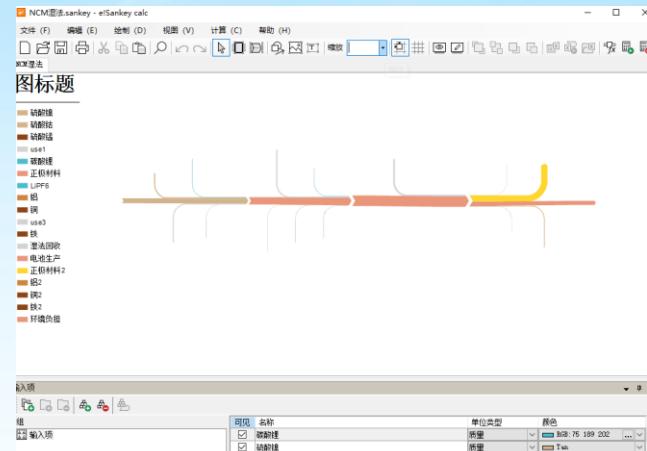
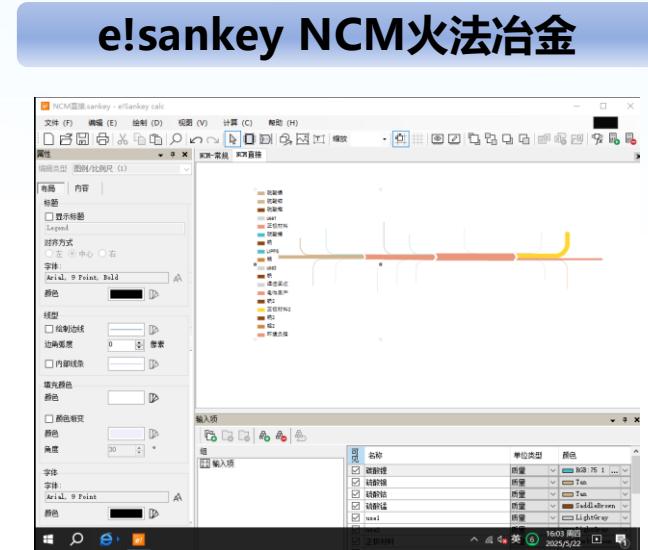
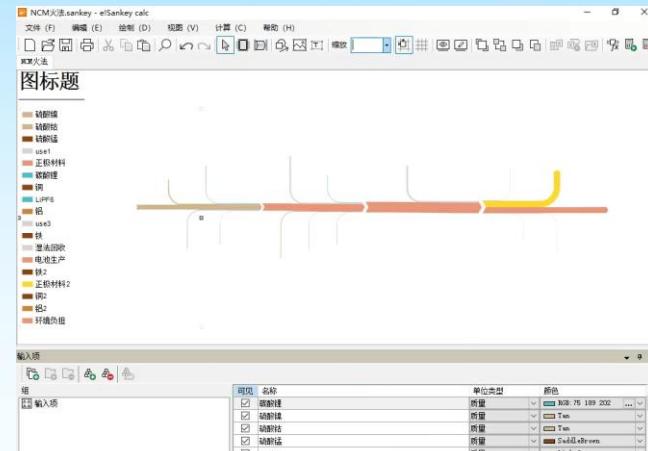


碳足迹、环境、经济角度

- ◆ 引入权重指数及质量和浓度指标研究处理过程中的固态、液态、气态及不同的流动变化，评估直接碳排放影响；
- ◆ 基于**LCA**方法，引入能源和材料的背景数据，综合考虑**GWP**的潜能值，实现全流程**间接碳足迹**影响评价；
- ◆ 结合质量守恒方法，进行微观碳元素流动和碳元素形态变化；
- ◆ 引入利润和不同类型，不同阶段阶段，宏观成本等指标，建立经济评价方法；
- ◆ 基于宏观和微观碳足迹分析方法，结合**LCA**和综合环境影响评价及经济评价方法，从环境，经济和碳排放等多角度综合评价了工业处理过程的综合影响；

微观碳流动，宏观碳足迹、环境、经济角度

1.4 多角度碳足迹分析模型



2. 电工装备碳足迹评价案例

- 锂离子电池全产业链碳足迹评价模型
- 钒生产过程的生命周期评估
- 锂离子电池回收过程多角度评估

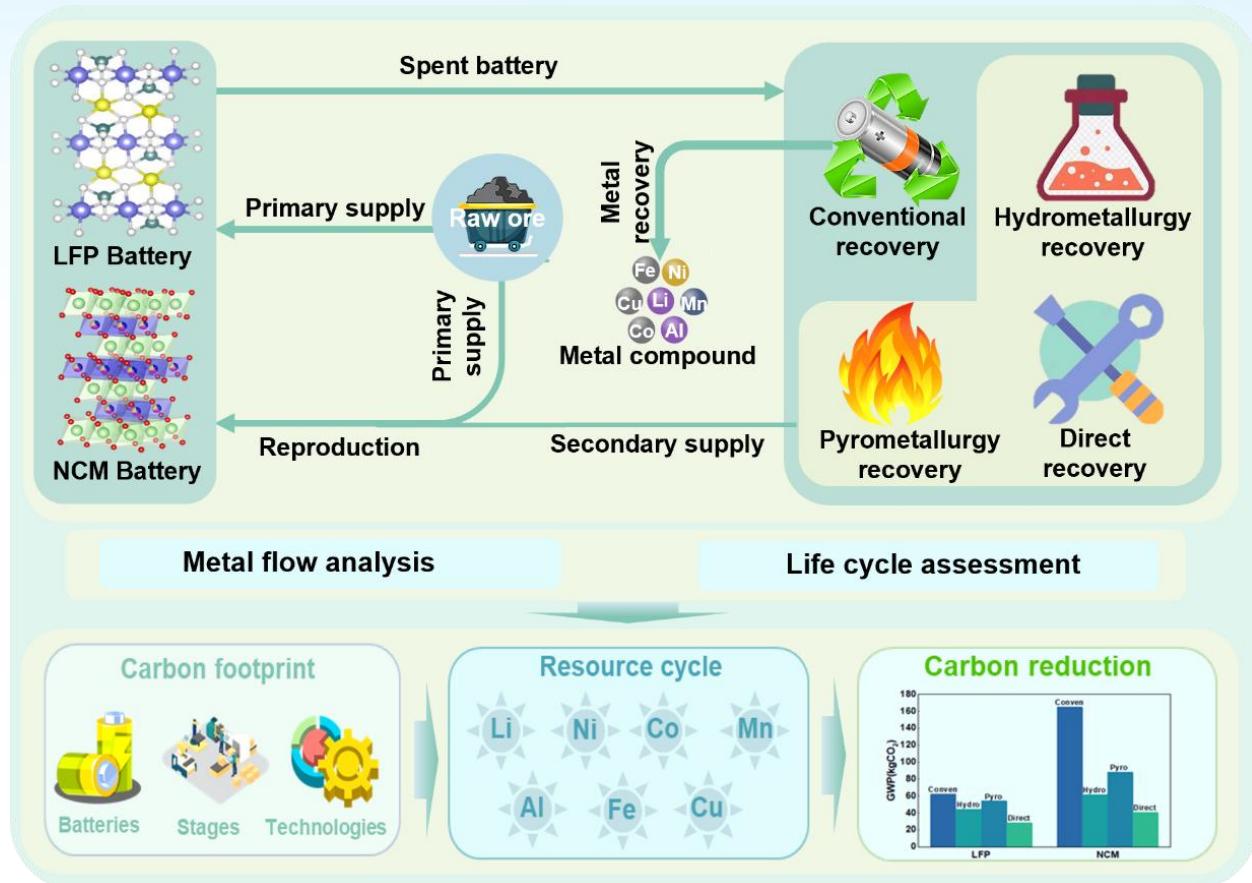
2.1 全产业链体系 - 典型锂离子电池全产业链碳足迹评价

□ 基于常规回收、湿法冶金、火法冶金和直接回收构建四种资源循环模式

□ 以金属流动和生命周期评价为基础进行碳足迹分析

□ 基于LCA计算了13种环境影响指标

- (1) LIBs的金属化合物生产
- (2) LIBs生产
- (3) LIBs回收，基于湿法冶金、火法冶金和直接回收工艺
- (4) LIBs再生产，将原矿生产的金属与回收的金属结合。

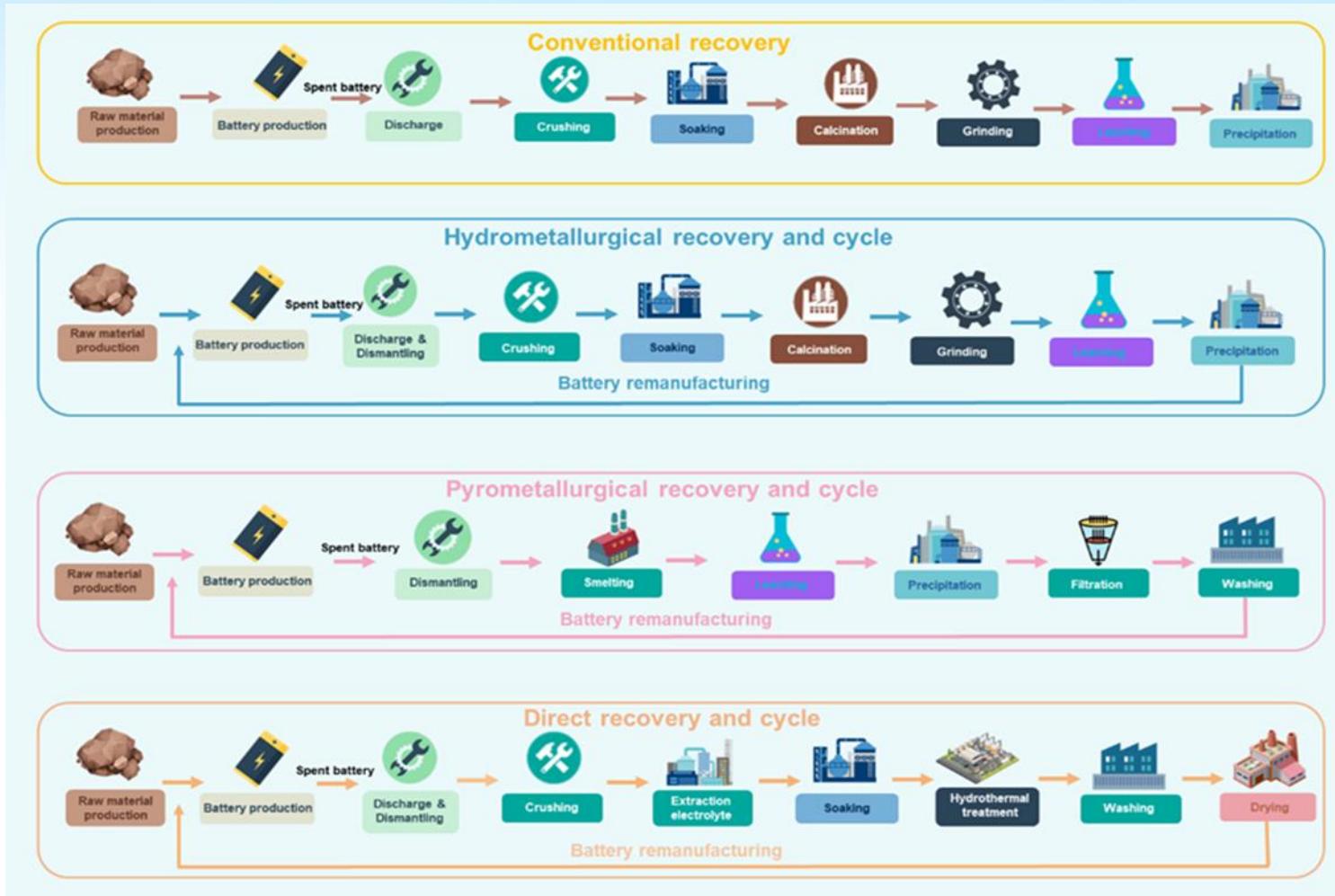


□ 根据目前锂电池市场份额，选取**镍钴锰酸锂(Lithium nickel cobalt manganese oxide, NCM)**电池和**磷酸铁锂(Lithium iron phosphate, LFP)**电池作为研究对象

□ 功能单位： **1 kWh的LIBs系统**

2.1 全产业链体系 - 典型锂离子电池全产业链碳足迹评价

系统边界



常规模式主要包括金属原矿开采和生产、LIBs生产、LIBs回收（常规模式基于湿法冶金回收工艺，金属产品直接进入市场，不需要再生产LIBs）。

湿法模式、火法模式和直接回收模式是基于湿法冶金回收、火法冶金回收和直接回收过程。将回收的金属用于再生，实现了LIBs的闭环回收。

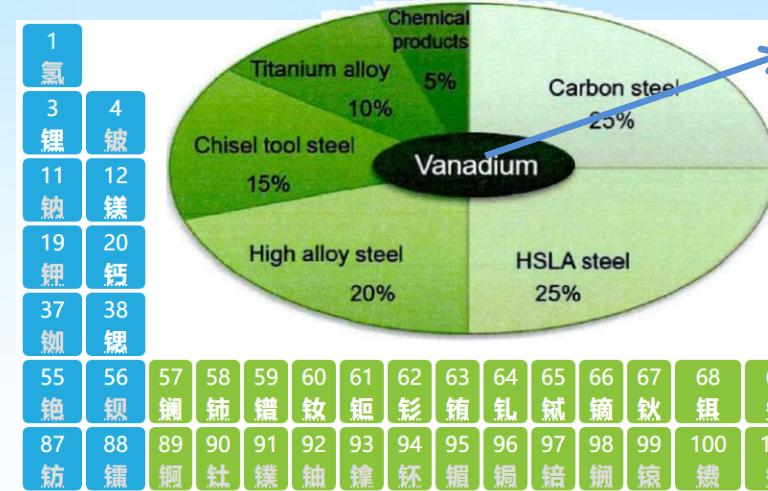
2.1 全产业链体系 - 典型锂离子电池全产业链碳足迹评价

结论

- 基于四种资源回收模型（即传统模型、湿法冶金模型、火法冶金模型和直接模型）分析了LIBs的物质流、环境影响和碳足迹。
- 物质流分析结果：从金属流动角度分析了LIBs的再生产过程，锂的回收率影响LIBs再生产过程的环境影响
- 环境影响分析结果：GWP, PED, WU, IWU是环境影响最突出的四个指标，制造，回收，再制造过程总体环境影响趋势为直接回收模式<湿法冶金模式<火法冶金模式
- 碳足迹评价分析结果：回收过程碳足迹直接回收模式<湿法冶金模式<火法冶金模式<常规模式
- LFP全产业链碳排放量为：常规模式 $62.17 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, 火法模式 $54.05 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, 湿法模式 $44.6 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, 直接模式 $28.29 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。
- NCM111全产业链碳排放量为：常规模式 $164.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, 火法模式 $87.86 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, 湿法模式 $61.76 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, 直接模式 $40.37 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

研究背景



公司名称	五氧化二钒计产能 (t/a)
攀钢集团	20,000
承德钢铁集团	15,000
沈阳华瑞钒业有限公司	5,000
中信锦州铁合金股份有限公司	5,000
云南华云钒业有限公司	4,000
内江市川威特殊钢有限公司	4,000
四川卓越钒钛有限公司	4,000
陕西五洲矿业有限公司	4,000
辽宁晨光铁合金集团有限公司	3,000
敦煌市鄂鑫钒业有限责任公司	2,000
南京福星钒合金	2,000
湖南、陕西、河南、河北、甘肃、广西小厂	>15,000
合计	>83,000

重要的金属元素



高炉氧化

原料

钒渣 (40%)

转炉吹炼

传统工艺

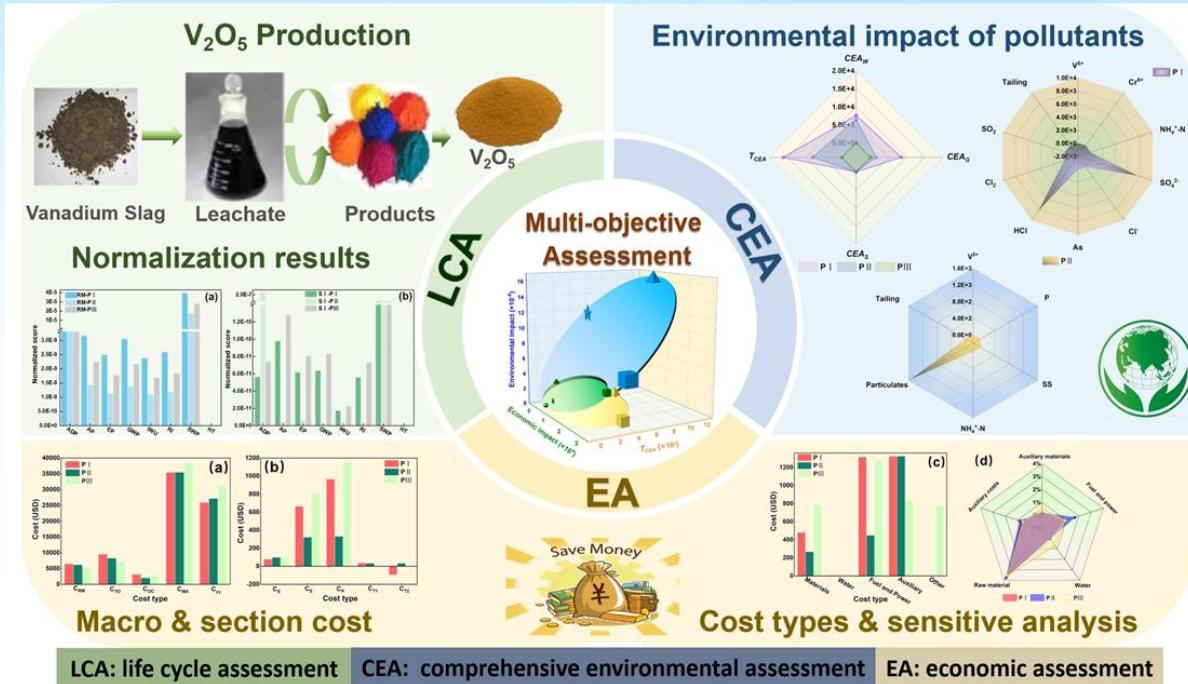
清洁工艺

钠化焙烧、钙化焙烧 亚熔盐法

主要为技术探索，
缺乏环境和经济角度分析

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

评价方法



◆ 综合环境影响评价
工业综合环境评估，考虑了废水、废气和固废，是整个生产过程的一个重要评估指标。

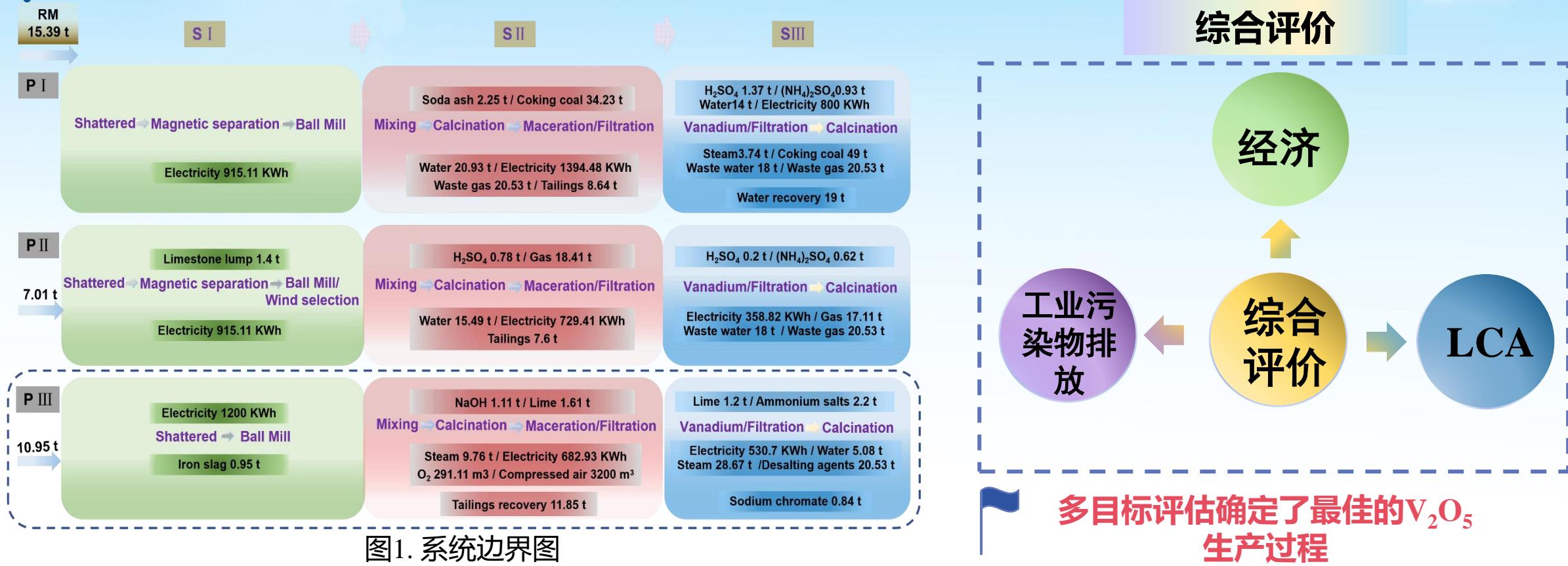
◆ 经济影响评价

- 宏观成本: C_{RM} : 原材料成本, C_{OC} : 运营成本, C_{TO} : 总成本, C_{MA} : 市场价格, C_{PF} : 利润
- 各阶段成本: C_E : 预处理, C_S : 提纯, C_P : 生产, C_{T1} : 废物处理-无回收, C_{T2} : 废物处理-有回收
- 不同类型成本: 材料、水、能源、辅助和其他成本

LCA

- 8个中点影响类别: ADP、GWP、AP、HTP、EP、SWP、RI、IWU
- eBalance软件、数据库 (CLCD-China 0.8, CLCD-China-Public 0.8, Ecoinvent-Public - 2.2, ELCD 3.0)

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价



系统边界：从钒渣到产品的三个生产过程，包含原材料投入、资源消耗和废物排放

功能单元：生产1 t V₂O₅

数据来源：中国四川和河北某代表性企业的V₂O₅生产厂

材料/能源/水/产品的单价为2016-2021年中国四川省攀枝花市的平均市场价格

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

环境影响

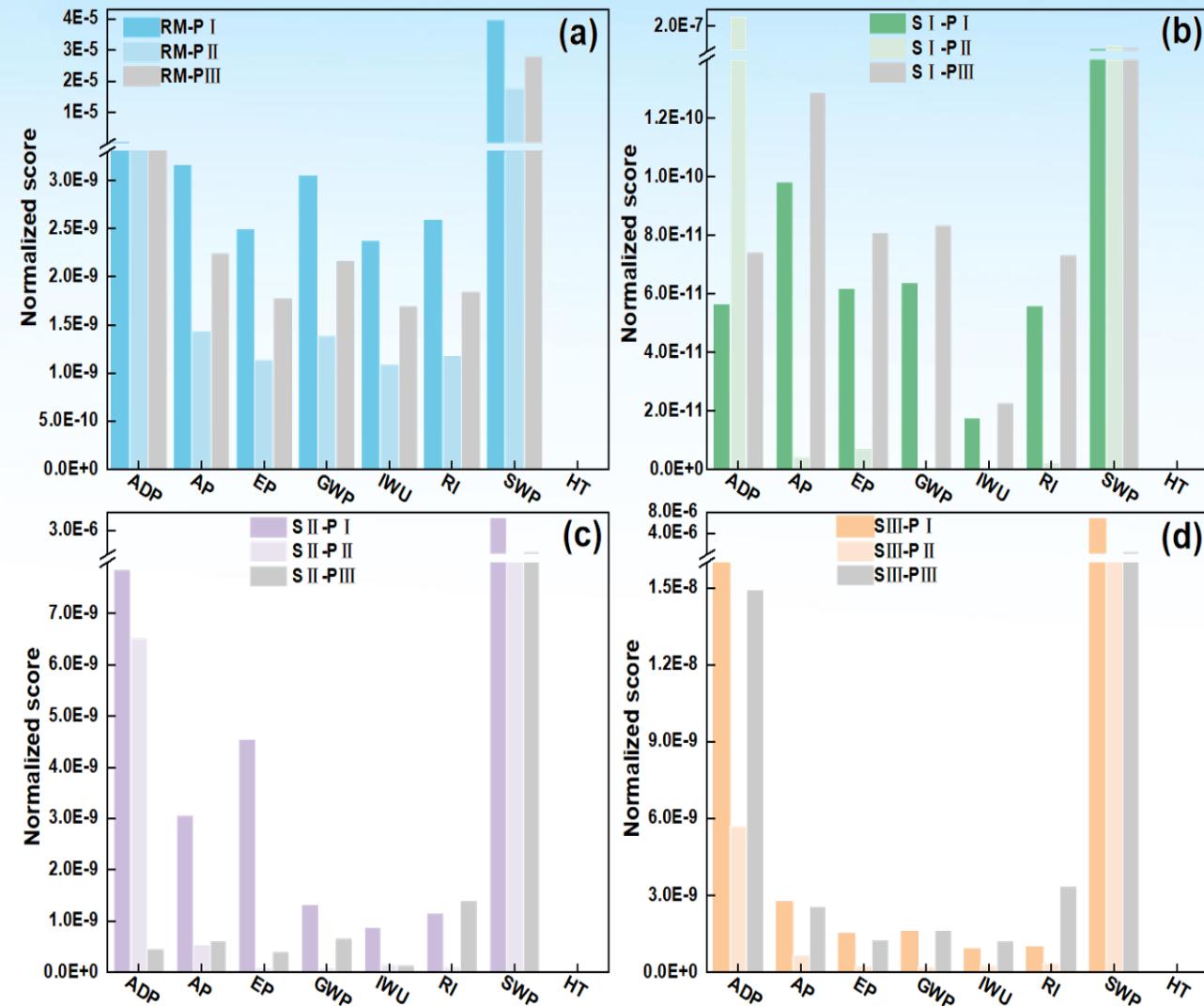


图2. 归一化结果图

➤ 钠焙烧工艺>亚熔盐工艺>钙化焙烧工艺

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

关键过程分析

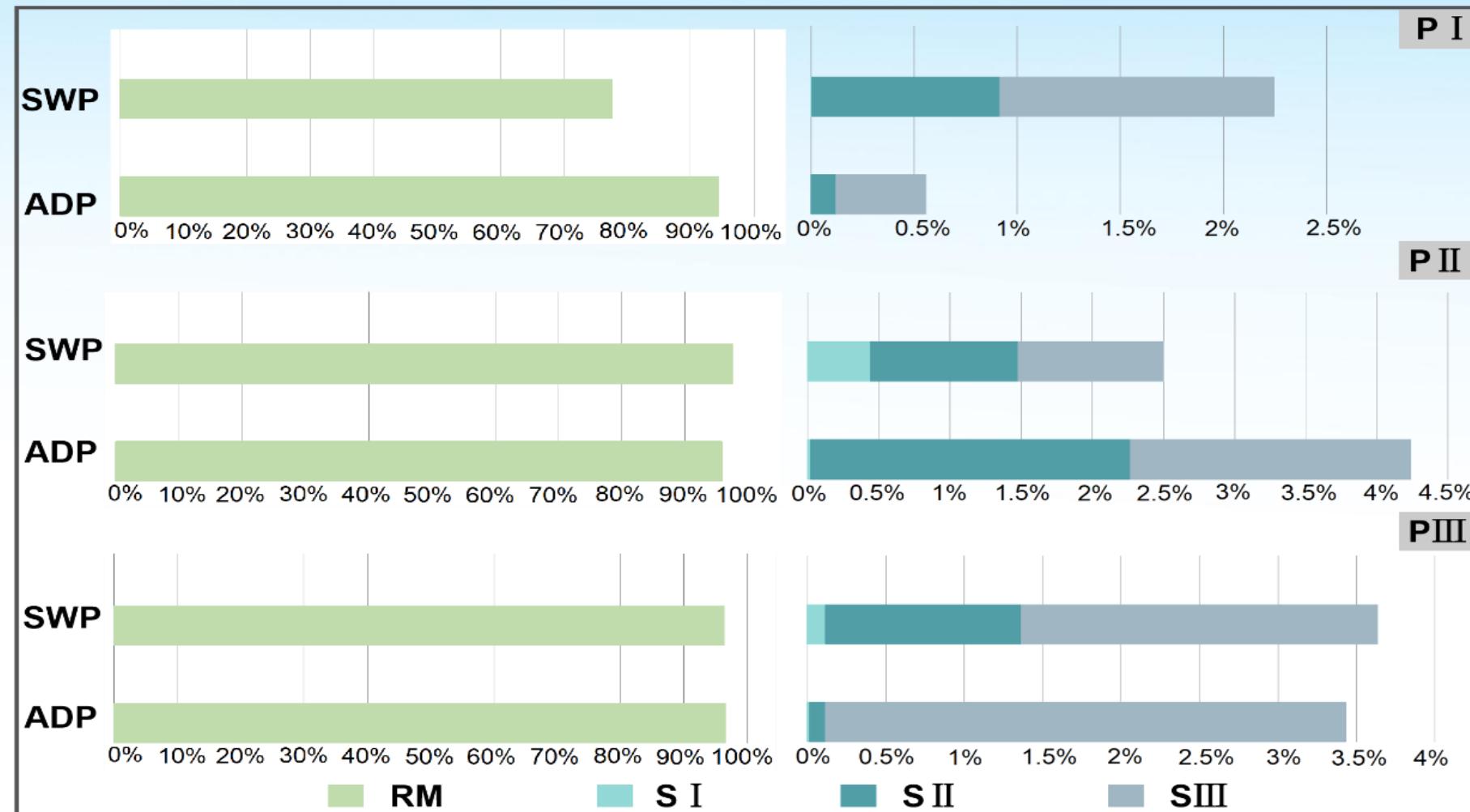


图3. 关键过程的环境影响图

➤ RM的环境影响最大，为关键过程

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

关键物质分析

表1. 不同材料造成的环境影响比例

Category	PI	PII	PIII
ADP	Coking coal 37.85%(SIII)	(NH ₄) ₂ SO ₄ 69.66%(SIII)	
			(NH ₄) ₂ SO ₄ 94.64%(SIII)
SWP	Coking coal 94.64%(SII)	H ₂ SO ₄ 99.25%(SII)	
	Coking coal 92.35%(SIII)	(NH ₄) ₂ SO ₄ 66.04%(SIII)	(NH ₄) ₂ SO ₄ 66.42%(SIII)
	Coking coal 93.86%(SII)	H ₂ SO ₄ 87.92%(SII)	

- 钒渣作为三个钒生产过程的关键原料，是关键物质；
- 主要原因是生产V₂O₅所消耗的主要原料是钒渣，其工业生产主要消耗的是钒钛磁铁矿/原煤/原油/天然气等初始不可再生资源；

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

敏感性分析

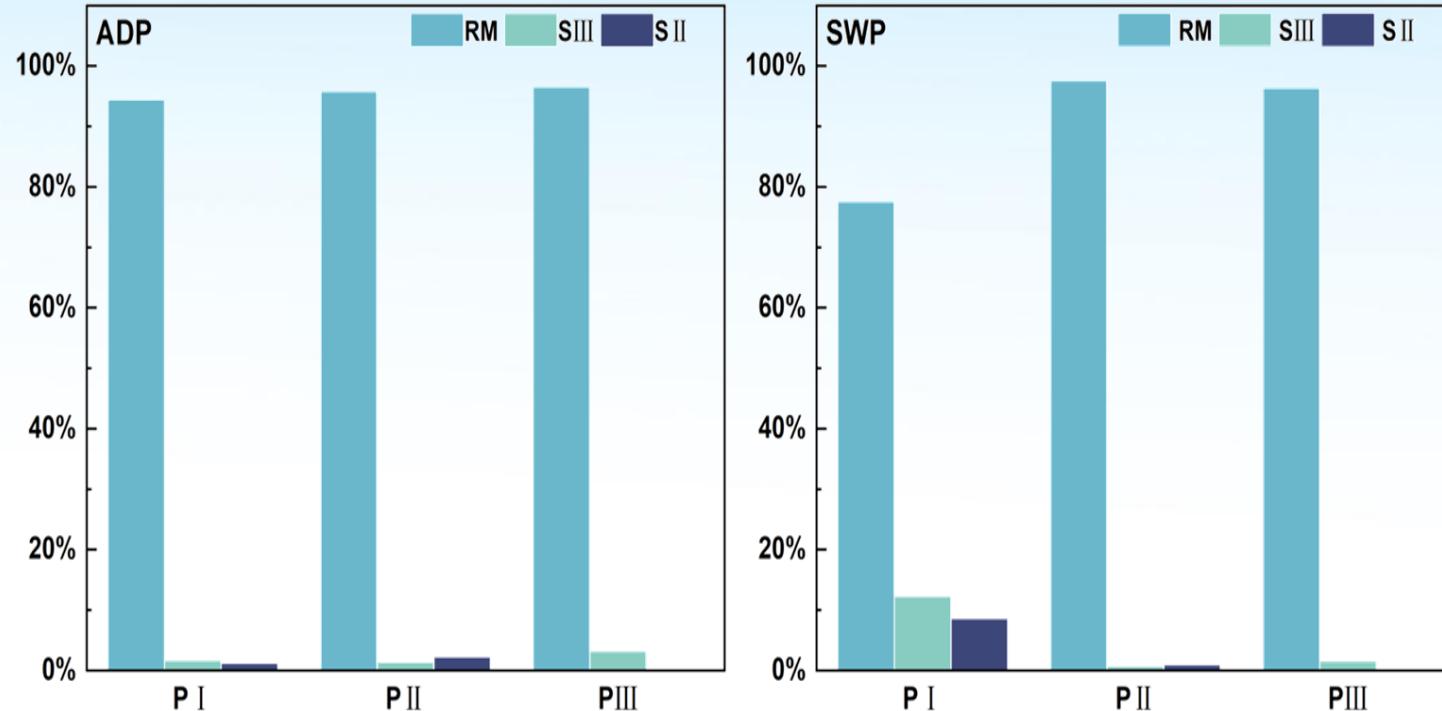


图4. 主要材料的敏感性结果

- 变量为5%。RM (钒渣) 对三个钒生产过程的两个影响类别产生了最大的环境影响;
- 表明控制钒渣消耗量可以减少对ADP和SWP类别的影响;

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

综合环境影响评价

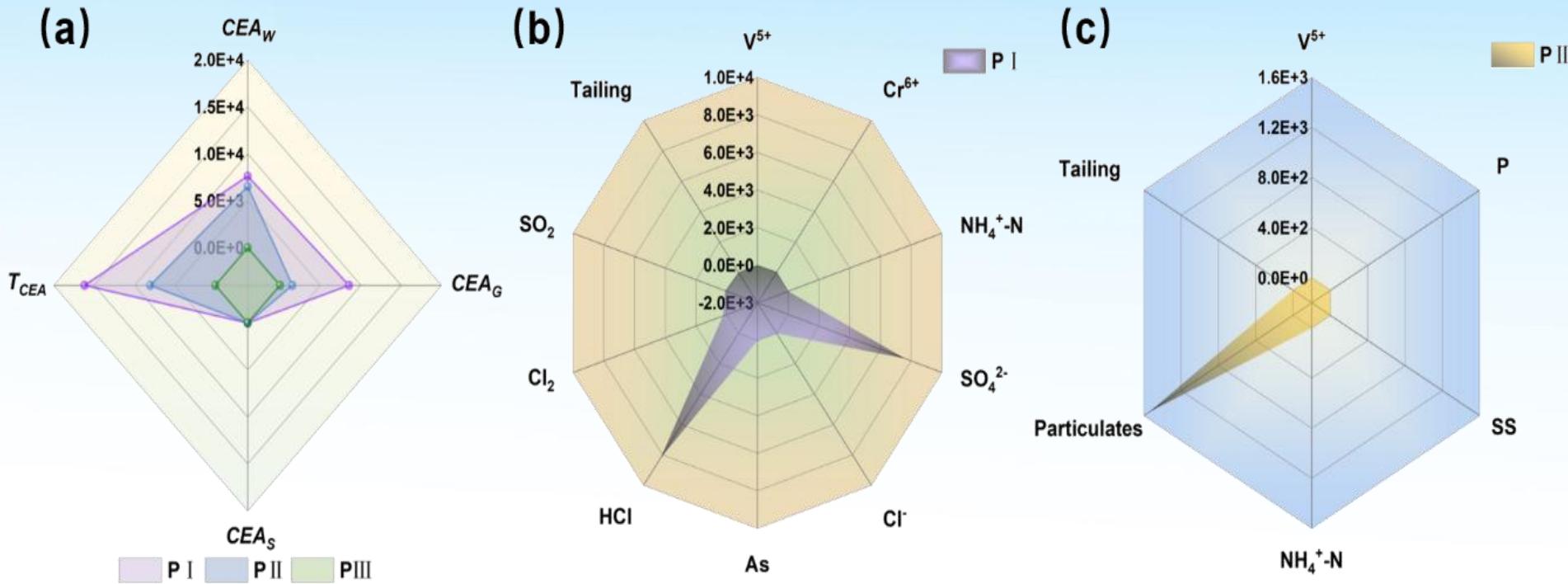


图5. 环境影响: (a) 三种工艺的比较; (b) PI的污染物; (c) PII的污染物

- 研究表明PIII从源头上避免了有害气体、氨氮废水等产生。尾矿可以完全被利用，导致污染物零排放，环境影响最小；
- PI：氯化氢和硫酸根离子作为添加剂对环境有严重影响；
- PII：颗粒物是最普遍的污染物，因为钒渣和石灰或石灰石作为煅烧原料；

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

经济评价

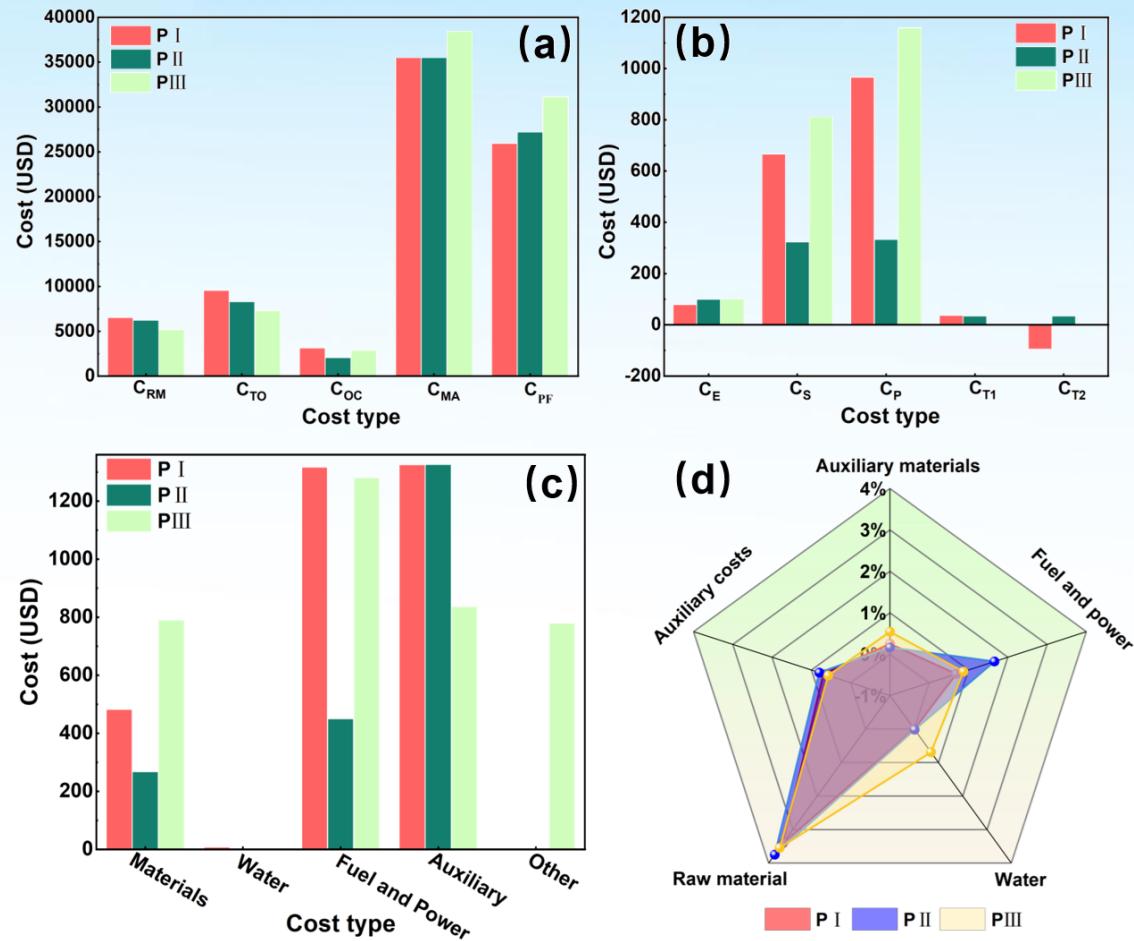


图6 (a) 宏观成本比较 (b) 各部分的成本比较 (c) 不同成本类型比较 (d) 总成本的敏感分析

- P III 具有较低的 C_{RM} 和 C_{TO} , 较高的 C_{PF}
- 提纯与生产工段 P III > P I > P II, P III 在废物处理阶段 没有三废产生, 不产生任何成本

- P III 有副产品的产生, 总成本最低
- 原材料、燃料和电力变量最大, 生产中应减少其消耗

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

综合评价

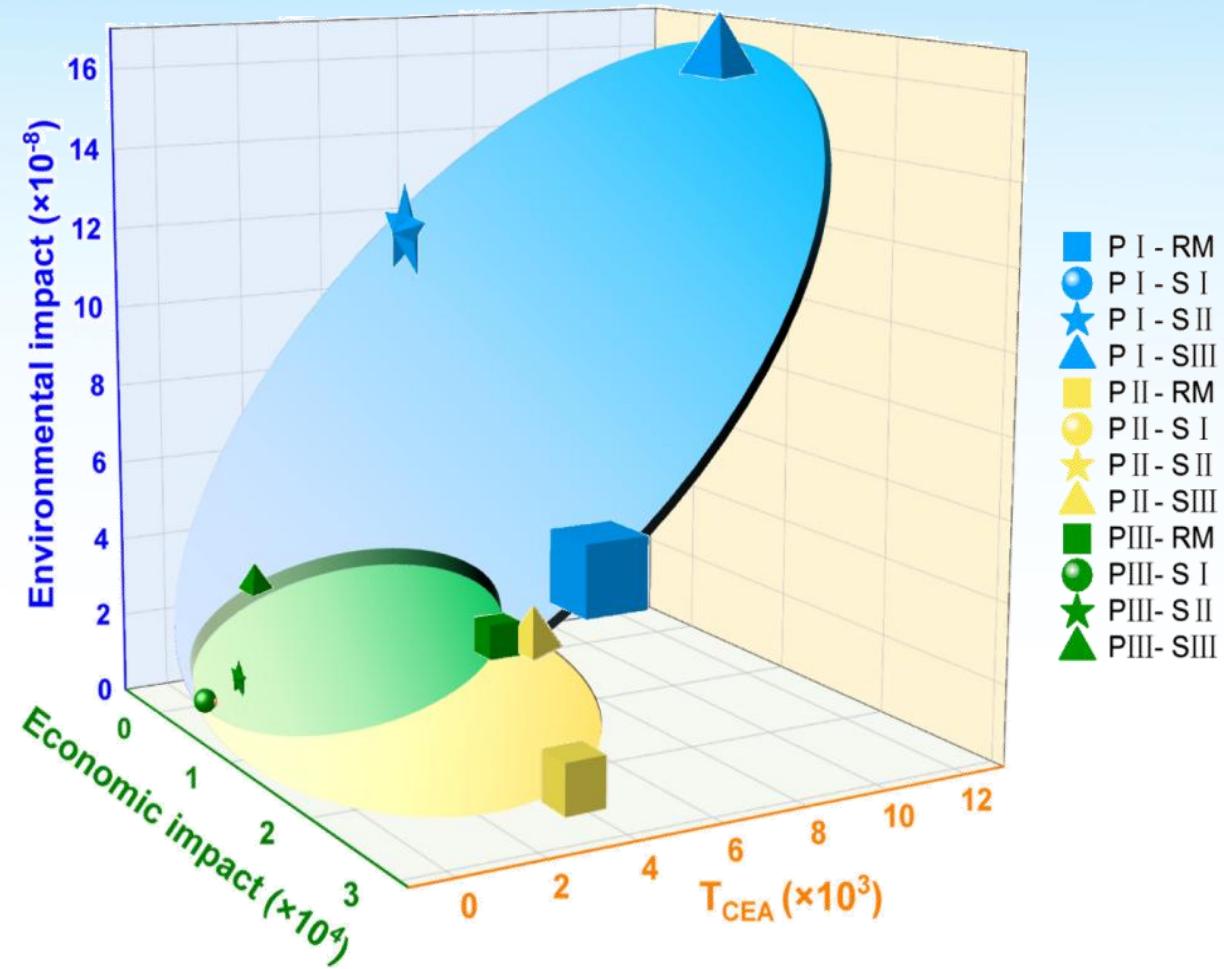


图7 综合评价结果

- P I 的综合评价结果最差；
- 其次为 P II， P III 是最佳的V₂O₅生产工艺， 利润较高， LCIA和 T_{CEA} 较低；

2.2 金属生产体系 - V-LCA评价

结论

总成本: $P_I > P_{II} > P_{III}$, 利润反之。各部分的成本: $S_{III} > S_{II} > S_I$, P_{III} 将清洁生产和生产线末端处理结合起来, 零废物, 副产品降低了成本, 低成本和高利润

LCA: 原料部分是三个钒生产过程中
的关键工艺和关键材料, 控制钒渣消
耗对减少环境影响至关重要

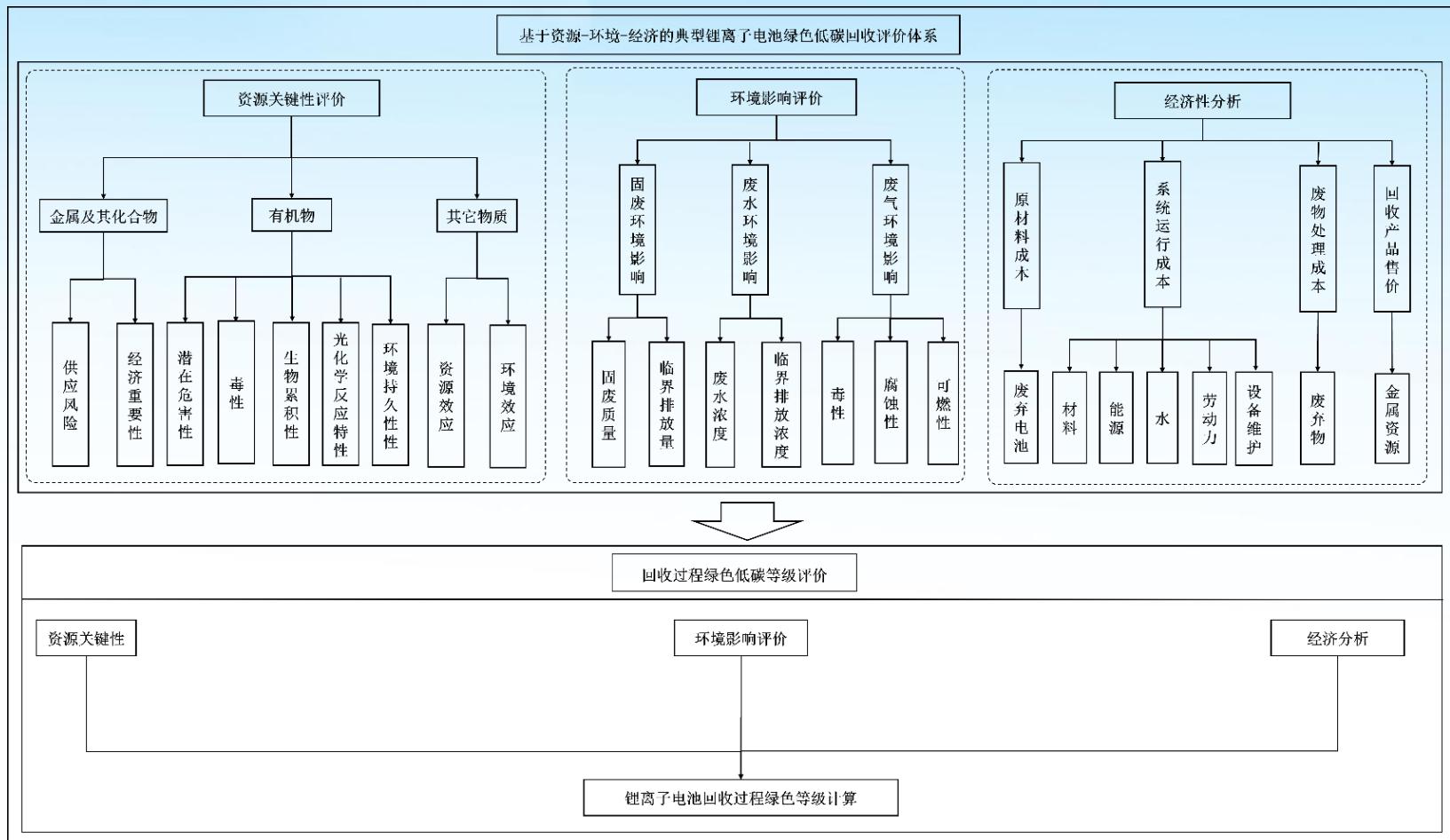


T_{CEA} : $P_I > P_{II} > P_{III}$, 其中 P_I 比 P_{II} 大
2倍。亚熔盐工艺造成的工业污染最小

综合评估: 亚熔盐工艺的环境影响
和经济成本最低, 经济效益最高

有效地解决了钒生产评估的单一性, 并
可在实际生产过程中使用。研究成果对
 V_2O_5 生产工艺的选择和优化很有价值

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估



绿色回收综合评价方法

资源关键性

分为金属、有机物和气体等。

综合环境影响评价

根据污染物的系统边界，进行绿色制造等级的评价。

经济分析模型

建立综合运行、动态和宏观成本的动态经济模型。

绿色回收综合评价

计算不同工段的水资源消耗。

- 针对废旧 LIBs 的资源属性，引入供应风险和经济重要性等参数，基于对典型成分（金属、有机物等）进行资源关键性分析，进而对材料进行资源关键性评价。
- 针对回收工艺评价不全面的问题，综合资源关键性、系统操作元素、综合环境影响评价和经济分析，建立绿色回收综合评价模型。

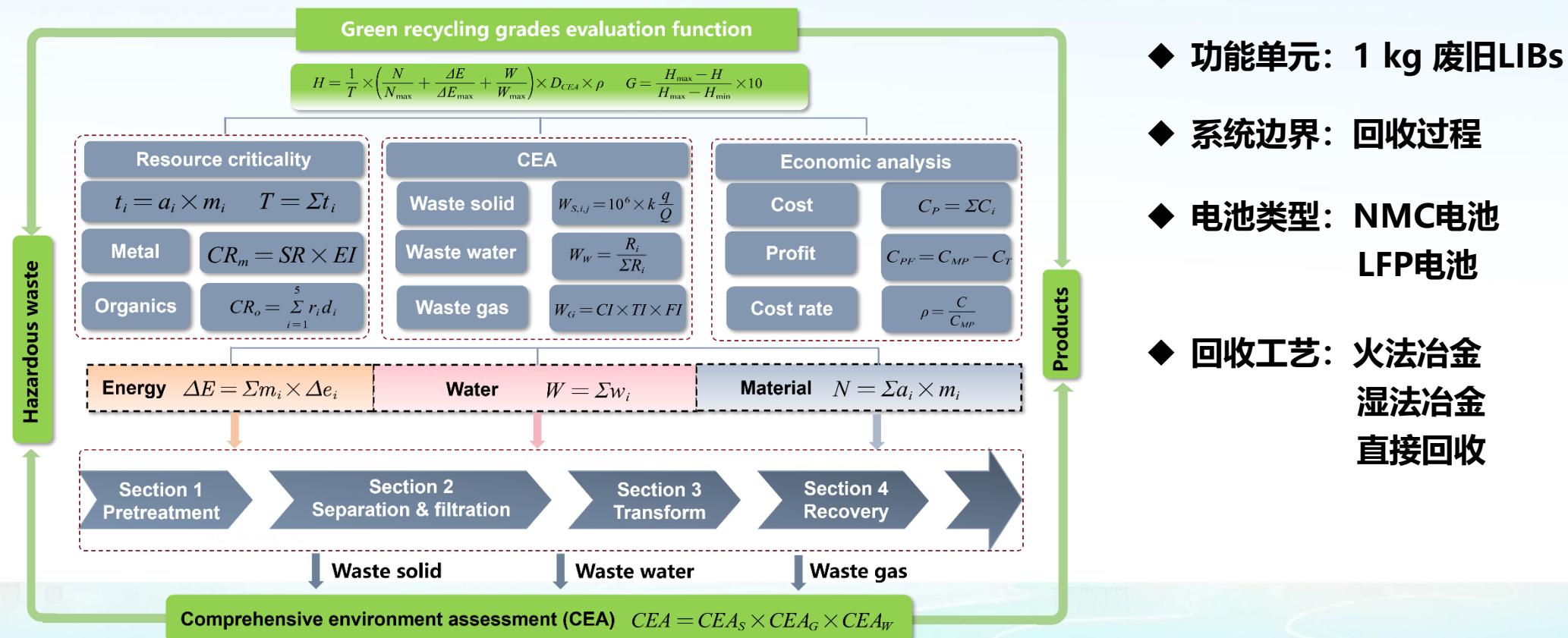
2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

评价原则

充分考虑物料、能耗、水耗和环境等因素，建立全流程绿色回收评价体系

模型思路

- ◆ 全流程分为四个回收工段
- ◆ 对资源、系统操作元素、环境和经济的分析
- ◆ 计算出绿色低碳回收评价指标
- ◆ 指导废物类型和回收等级



2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

1. 资源关键性评价

资源关键性评价主要包括金属、有机物和其它物质

原材料关键性

$$T = \sum a_i \times m_i$$

原材料总关键性

材料的质量

材料的关键性，其中取决于材料种类
(如金属和金属盐、有机物、无机物
和气体)

有机物关键性

$$CR = \sum_{i=1}^5 r_i d_i$$

有机物关键性

环境影响指数

- d_1 : 分别为潜在危害性;
 d_2 : 毒性等级;
 d_3 : 生物累积性;
 d_4 : 光化学反应性;
 d_5 : 环境持久性。

其它物质关键性

由于无机材料没有明显的资源效应和污染效应，故设 a_i 为1。
空气、合成或加工气体和特种气体的 a_i 分别为0.33、0.67和1。

金属材料关键性

$$a_i = \sum C_i \times CR_i$$

材料中的金
属成分

金属关键性

供应风险

赫希曼世界、中国管理指数

进口依赖度

电池回收率

$$SR = \left((HHI_{WGI})_{GS} \times \frac{IR}{2} + (HHI_{WGI})_{CN} \times \left(1 - \frac{IR}{2}\right) \right) \times (1 - EOL_{RIR}) \times SI_{SR}$$

× 材料的权重行业价值、最大行业价值

$$EI = (\sum S \times GVA) / GVA_{est} \times SI_{EI} \times 10$$

经济重要性

市场份额

经济重要性可持续性指数

供应风险可
持续性指数

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

2. 环境影响评价

采用综合环境影响评价方法，从固废、废水和废气的角度进行评价

综合环境影响

$$CEA = CEA_S \times CEA_G \times CEA_W$$

$$CEA_{S/W/G} = \sum W_i m_i$$

↑
综合环境影响值 ↑
废弃物权重系数 废弃物质量

固废权重系数

$$W_{S,i} = 10^6 k \frac{q}{Q}$$

↑
固废质量
固废临界排放量
危害系数

废水权重系数

$$R_i = \frac{S_i}{S_i^*} \rightarrow \begin{array}{l} \text{废水排放浓度} \\ \text{国家标准排放浓度} \end{array} \quad W_W = \frac{R_i}{\sum R_i} \rightarrow \text{废水污染比率}$$

废气权重系数

$$W_G = TI \times CI \times FI$$

↑
毒性指数 可燃性指数
腐蚀性指数

$$TI = \frac{5000 \times 10^{-6} - LC_{50}}{LC_{50}} \rightarrow \begin{array}{l} \text{半致死浓度} \\ \text{强腐蚀性气体、腐蚀性气体和弱腐蚀性气体的体积分数。} \end{array}$$

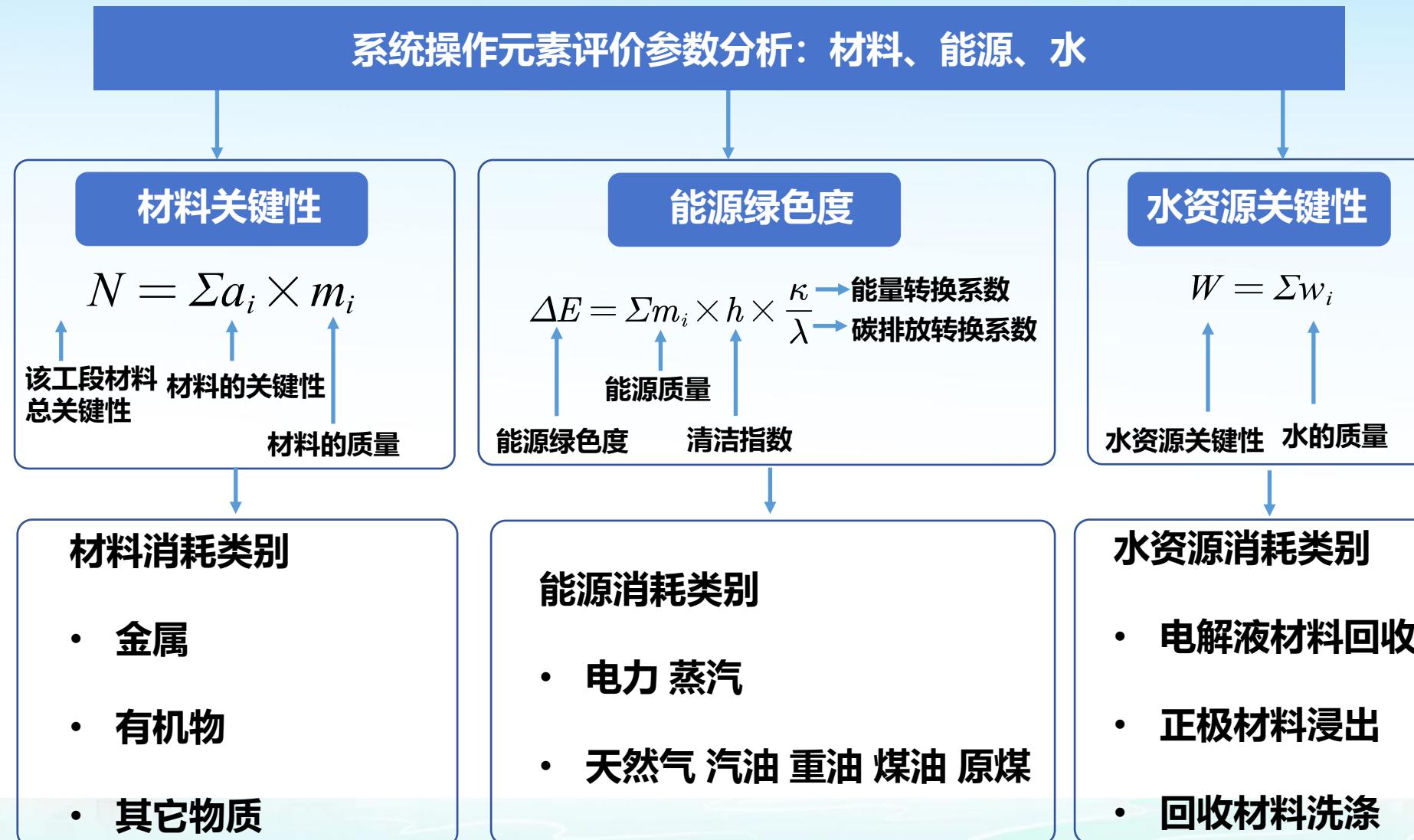
$$CI = \sum \left(\frac{C_{c^+}}{L_{c^+}} + \frac{C_c}{L_c} + \frac{C_i}{L_i} \right)$$

强腐蚀性气体、腐蚀性气体和弱腐蚀性气体体积分数下限。

$$FI = \sum \frac{A_i'}{T_{ci}} \rightarrow \begin{array}{l} \text{可燃性废气组分含量} \\ \text{可燃性废气不可燃的最高含量} \end{array}$$

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

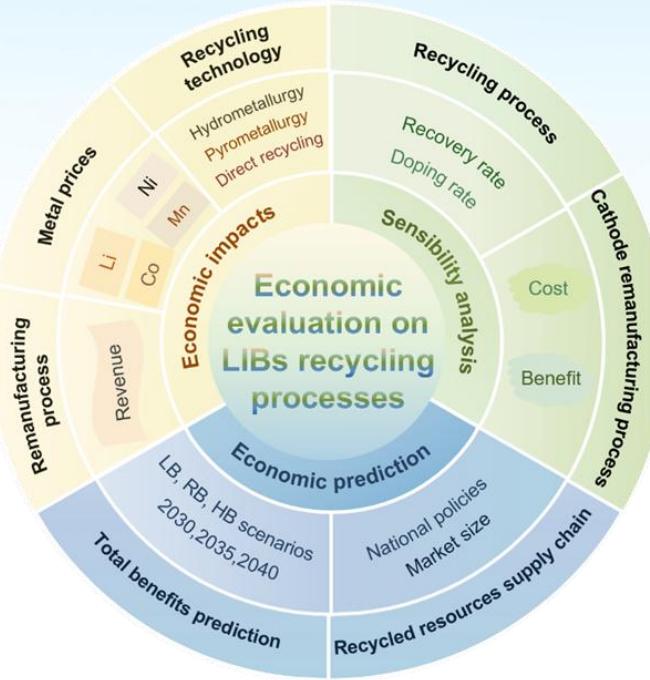
3. 系统操作元素评价



2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

4. 经济分析

采用经济评价模型，从材料成本、系统运行成本、废物处理成本和产品收益的角度进行评价



经济分析角度

回收成本

原材料成本 废物处理成本

回收成本 系统运行成本

$$C_T = C_{RM} + C_{SO} + C_W$$

系统运行成本

材料成本 水成本 设备维护成本成本

系统运行成本 能源成本 劳动力成本

利润

$$C_{PF} = C_{MP} - C_T$$

利润 收益 总成本

再制造利润

$$C_{RP} = C_{sell} - (C_T + C_{remanu.})$$

再制造利润 售价 回收成本 再制造成本

成本率

$$\text{成本率 } \rho = \frac{C_T}{C_{MP}}$$

回收成本 回收收益

废物处理成本

固废

$$C_W = C_{ws} + C_{ww} + C_{wg}$$

废物处理成本 废水 废气

回收收益

$$C_{MP} = C_M \times P_M$$

收益 产品价格 产品质量

某工艺处理质量 $M_i = \frac{V_p}{V_T} \times 100\%$ 某工艺回收收益 $P_a = \sum_i M_i \times p_{i,a}$

总回收收益

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

绿色低碳等级评价

绿色回收等级

在特定范围内评价回收工艺的绿色低碳指数的大小。

$$G = \frac{H_{\max} - H}{H_{\max} - H_{\min}} \times 10$$

绿色低碳指数最大值、最小值

绿色回收指数

用于表征回收电池原材料在材料、能源、水和环境方面的影
响程度。

$$H = \frac{1}{T} \left(\frac{N}{N_{\max}} + \frac{\Delta E}{\Delta E_{\max}} + \frac{W}{W_{\max}} \right) \times D_{CEA} \times \rho$$

原材料关键性

系统操作元素分析

综合环境影响等级

成本率

原材料关键性

- 金属材料：采用欧盟2020金属关键性计算方法和关于中国的金属材料数据评价金属的关键性。
- 有机物：根据材料中有机物的成分、毒性及链长评价其关键性。
- 其它物质：根据物质类型及性质分别确定其关键性。

系统操作元素分析

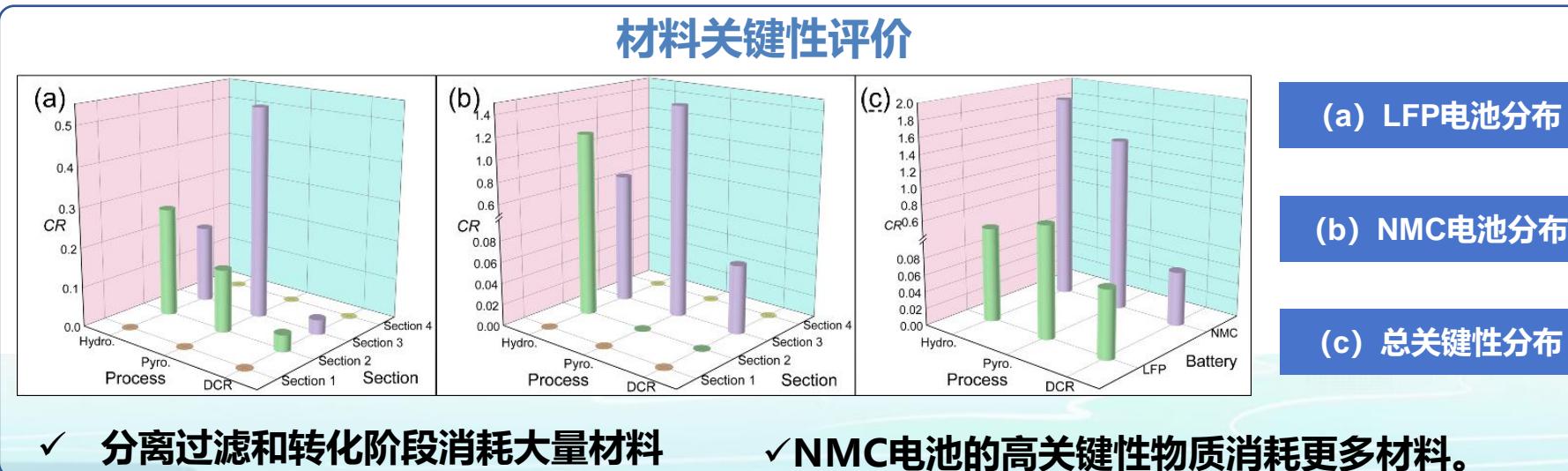
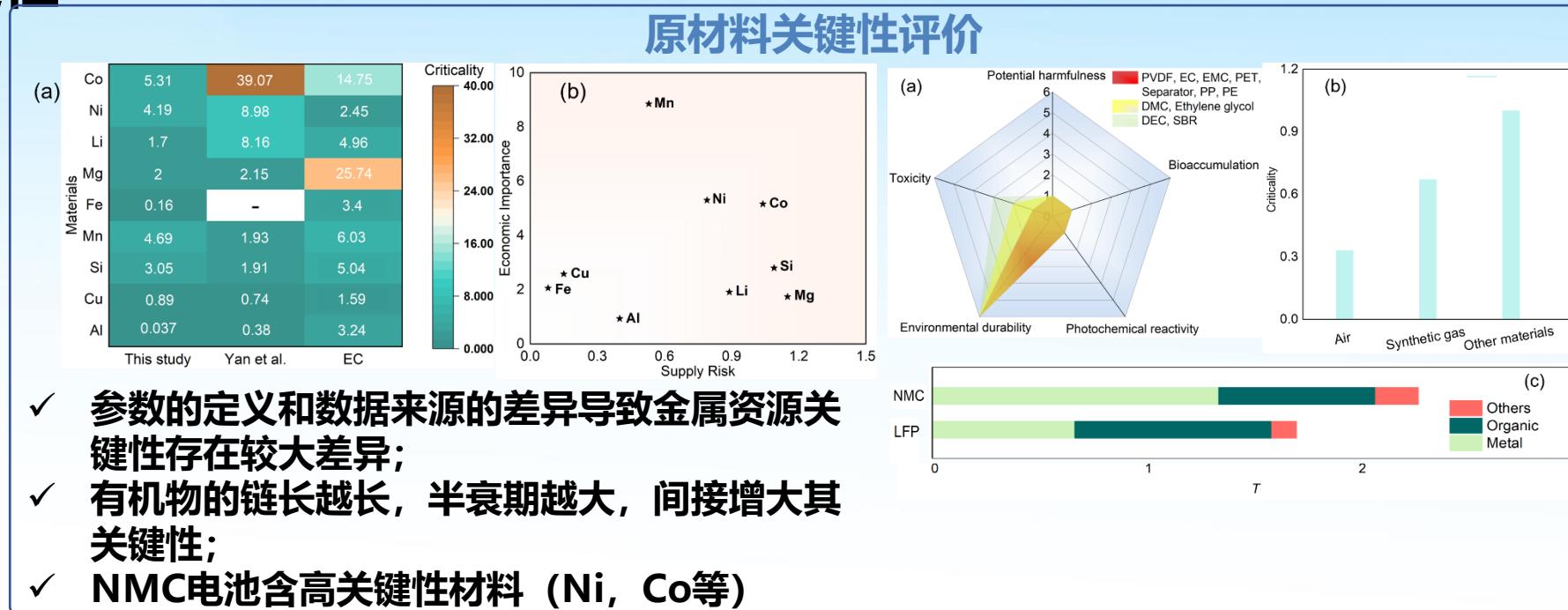
- 材料关键性：类同于原材料关键性，计算不同工段关键性。
- 能源绿色度：基于能量消耗计算回收过程的碳排放强度。
- 水资源关键性：以水的质量为基础计算不同工段的水资源关键性。

综合环境影响等级

- 综合环境影响：考虑固废、废水和废气的环境影响。
- 综合环境影响等级：根据综合环境影响值和等级范围确定综合环境影响等级。

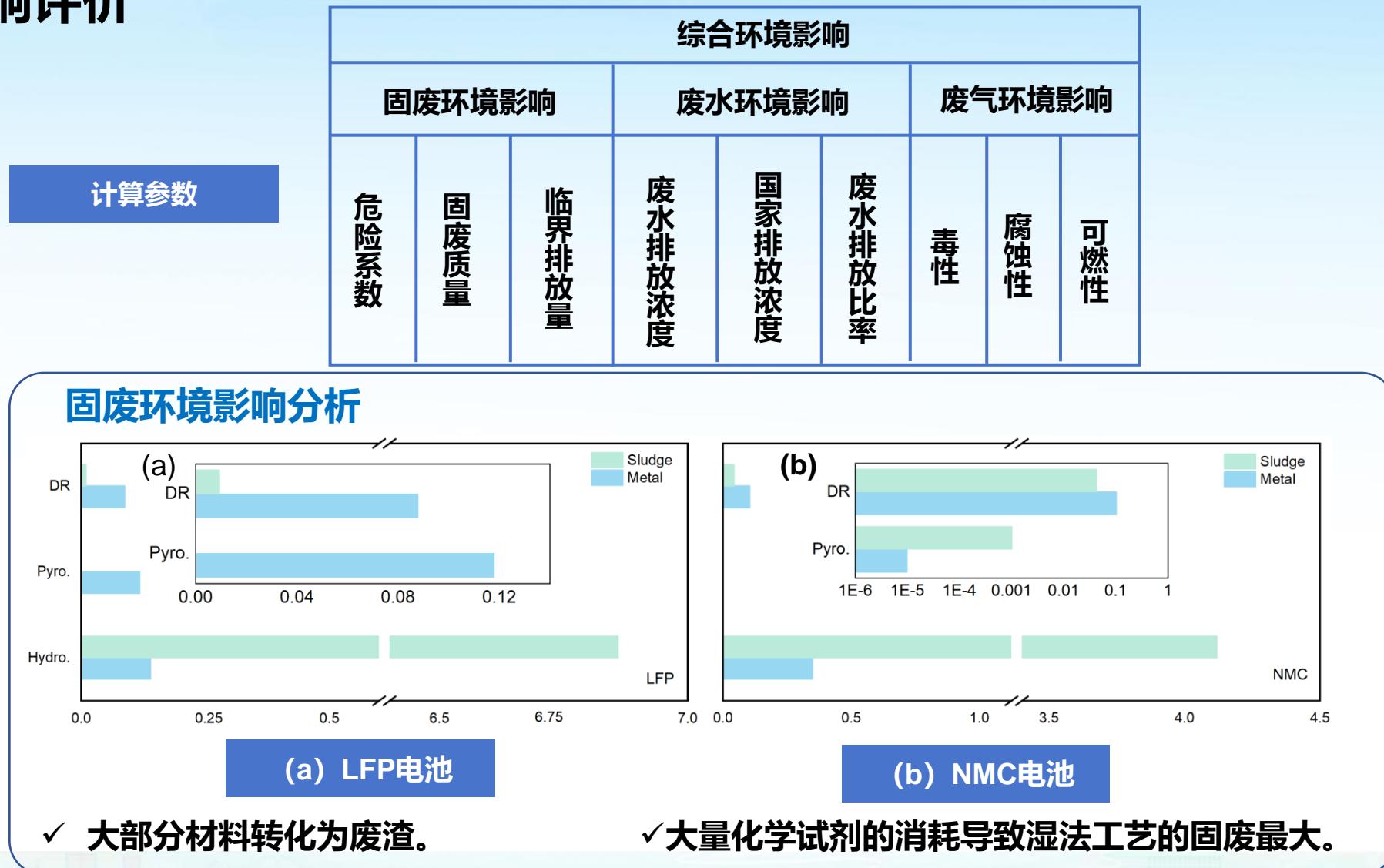
2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

1. 资源关键性



2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

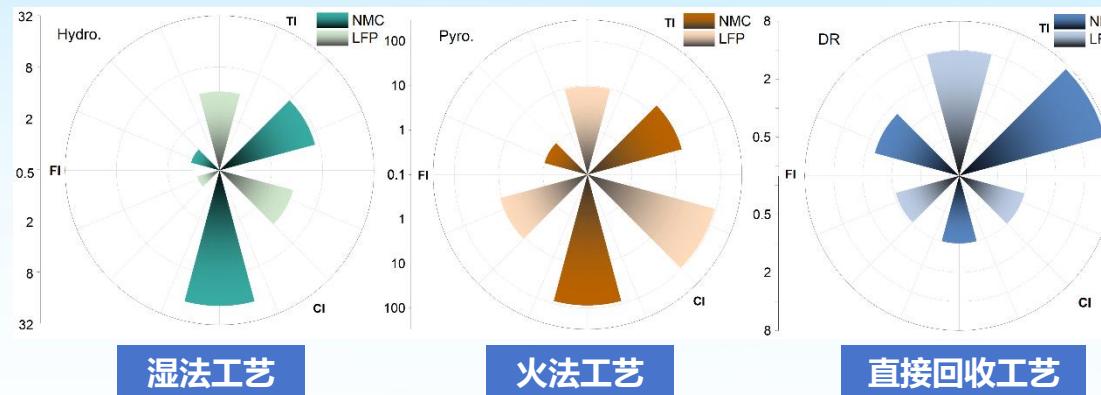
2. 环境影响评价



2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

2. 环境影响评价

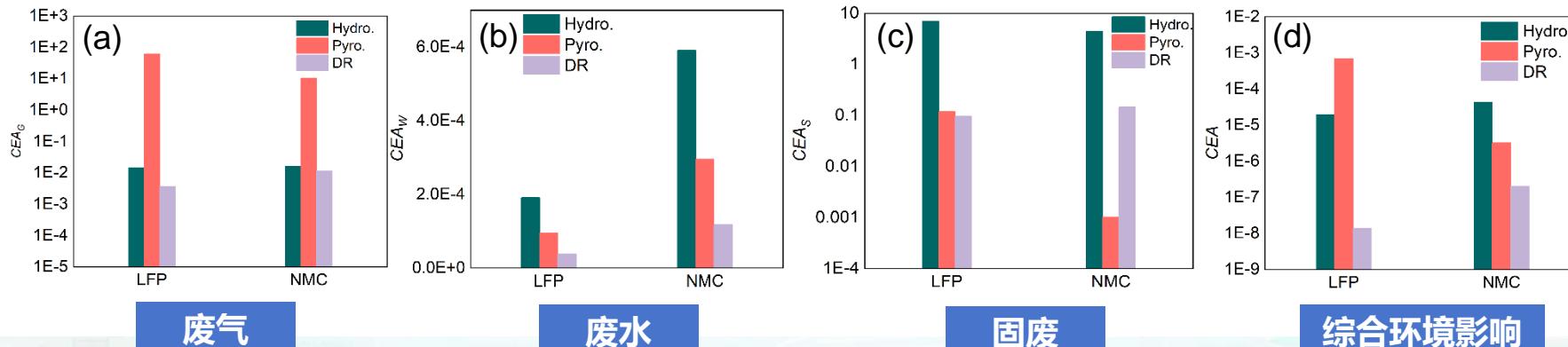
废气环境影响系数分析



*废气成分复杂，影响因素较多，不便于展开分析。废气的权重系数是造成废气的环境影响关键因素，主要由毒性(TI)、腐蚀性(CI)和可燃性(FI)组成。

✓ 因能源有机物的燃烧释放大量废气，**火法工艺**的毒性、腐蚀性和可燃性均高于其他工艺。

综合环境影响

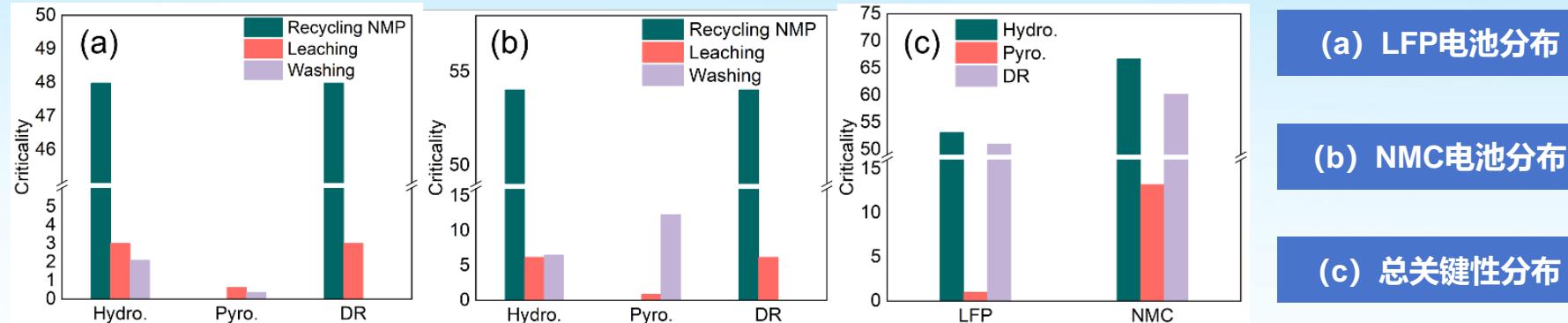


✓ 湿法、火法工艺的环境影响分别集中在**固废**、**废气**方面；✓**直接回收**的综合环境影响**最低**。

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

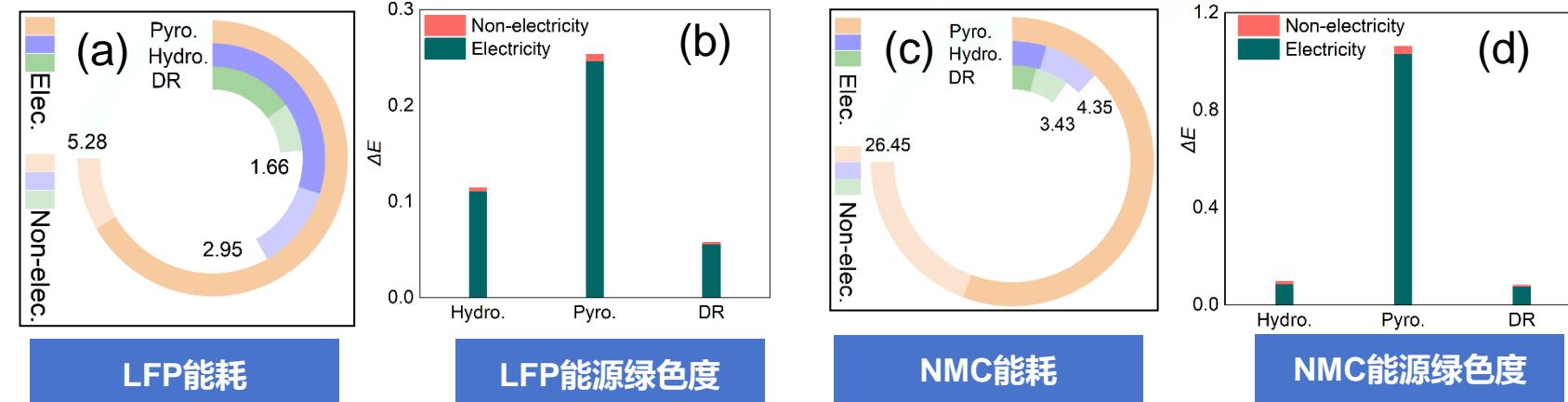
3. 系统操作元素评价

水资源关键性评价



✓ NMP材料复杂的回收流程消耗大量的水资源。 ✓ 因其工艺特性，**湿法工艺的水资源消耗最大。**

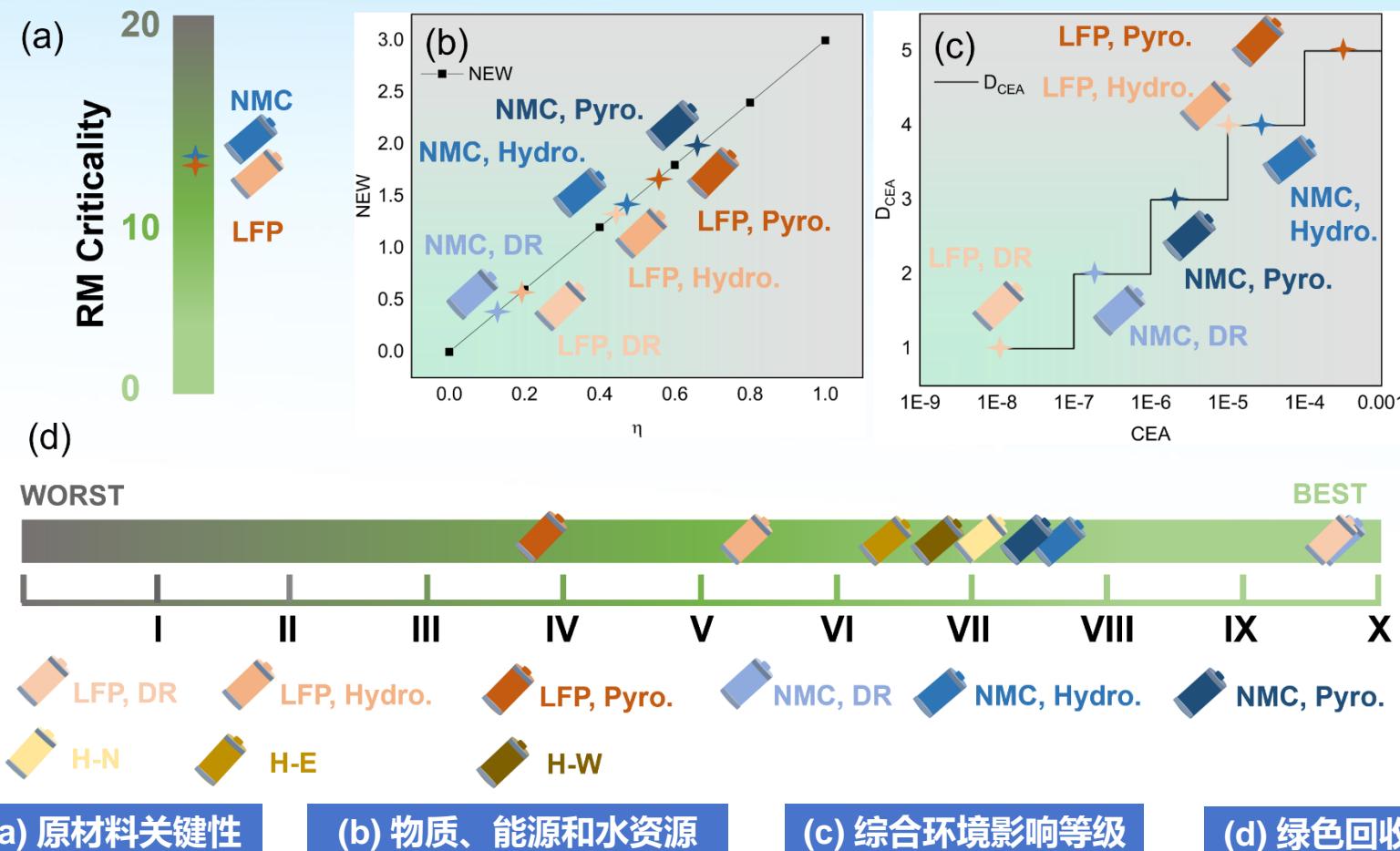
能源绿色度评价



✓ 能源绿色度与能源类型密切相关； ✓ **电力扩大能源碳排放影响程度。**

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

绿色回收等级评价

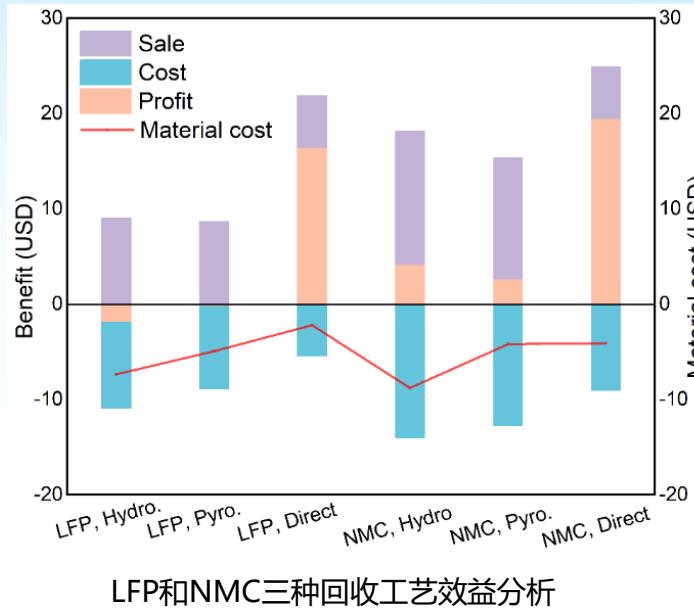


- ✓ 直接回收工艺绿色回收等级最高； ✓ 火法回收最低；
- ✓ 物质、能源和水资源的极端情景均会降低绿色回收等级，尤其是水资源。

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

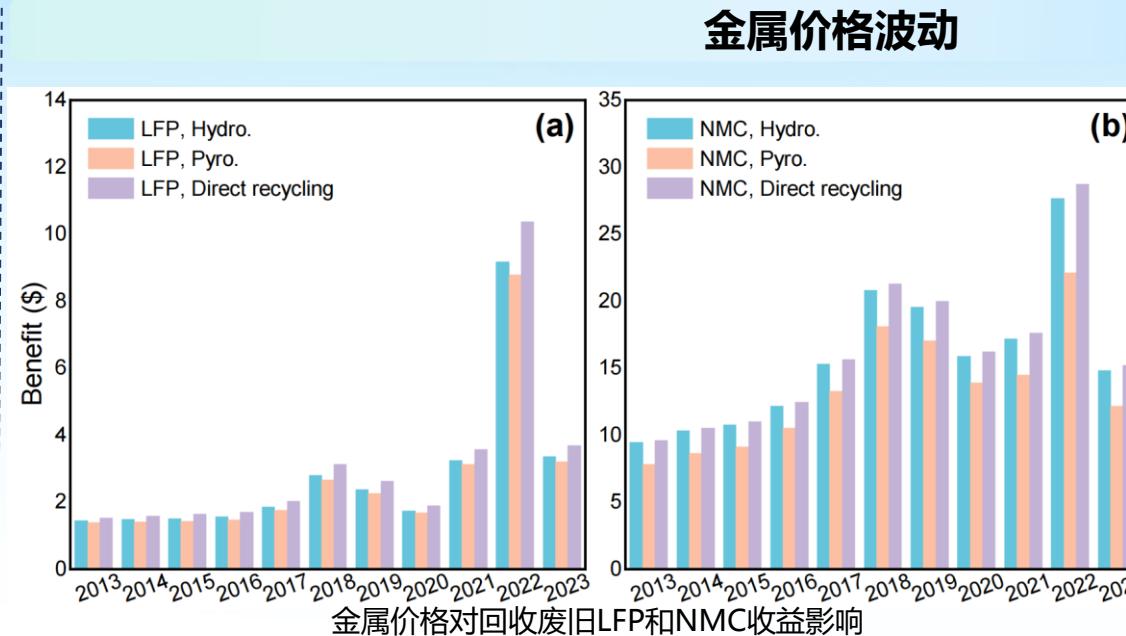
经济分析

不同回收技术经济分析



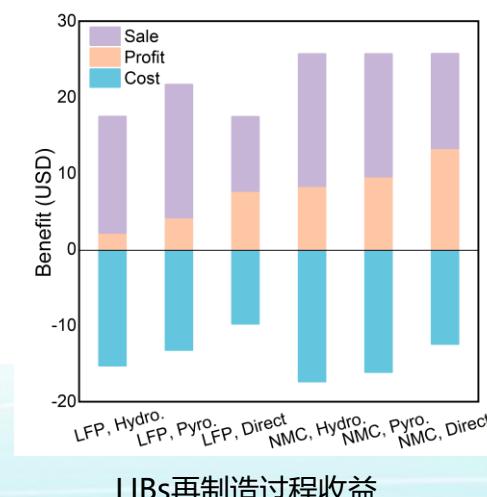
LFP和NMC三种回收工艺效益分析

- 亏损主要原因：材料成本和回收价格
- 采用湿法冶金回收LFP的成本率最高(1.21)，采用直接回收工艺回收NMC的成本率最低(0.45)
- 收益角度：LFP适用于火法冶金，NMC适用于湿法冶金



金属价格波动

- NMC包含Ni,Co,Mn,回收收益(10-28 \$/kg)高于LFP(1.4-10.4 \$/kg)
- LFP含有金属量少而回收收益波动小
- 金属价格呈现上升趋势，未来回收收益随之增长



再制造过程

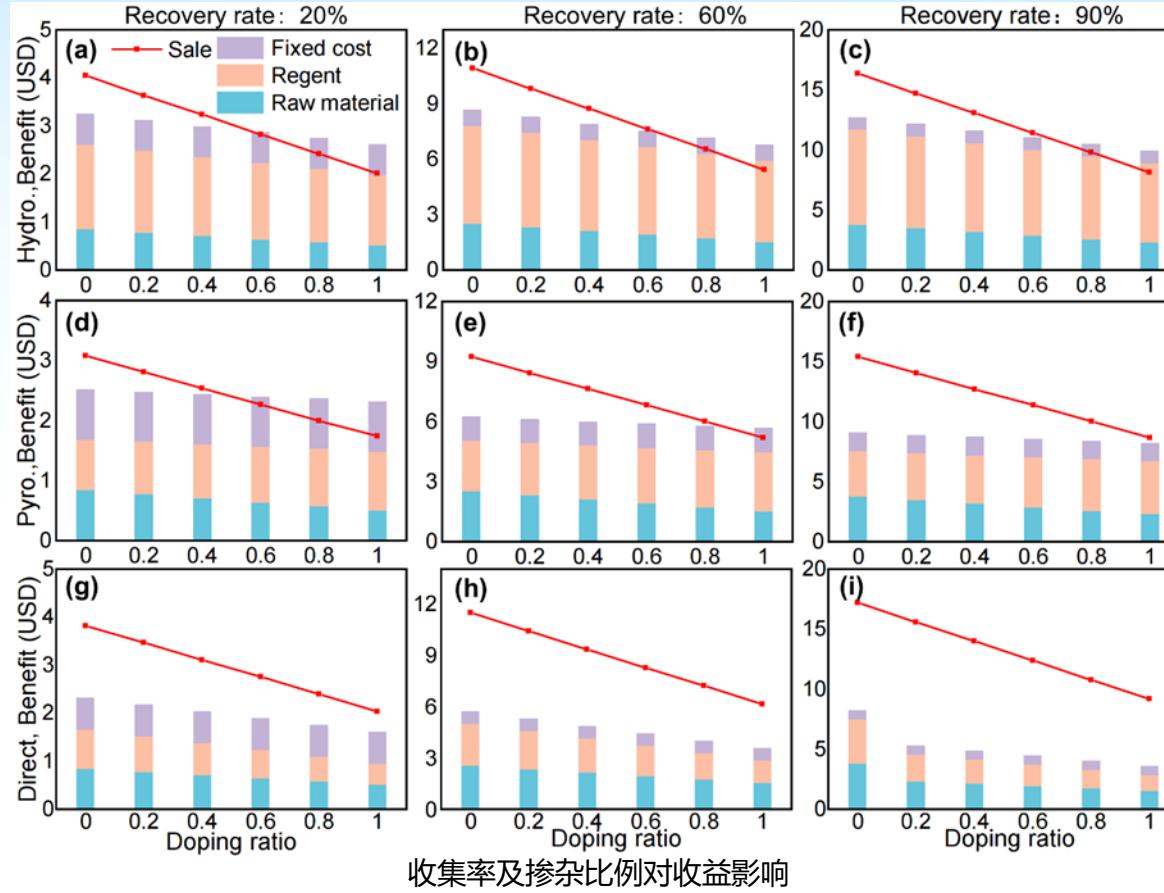
- 再制造产品按照原材料生成的LIBs价格进行出售
- 再制造过程有助于提高收益，NMC>LFP，直接回收 > 湿法冶金 > 火法冶金
- 主要影响因素：试剂成本、金属含量、电池售价

LIBs再制造过程收益

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

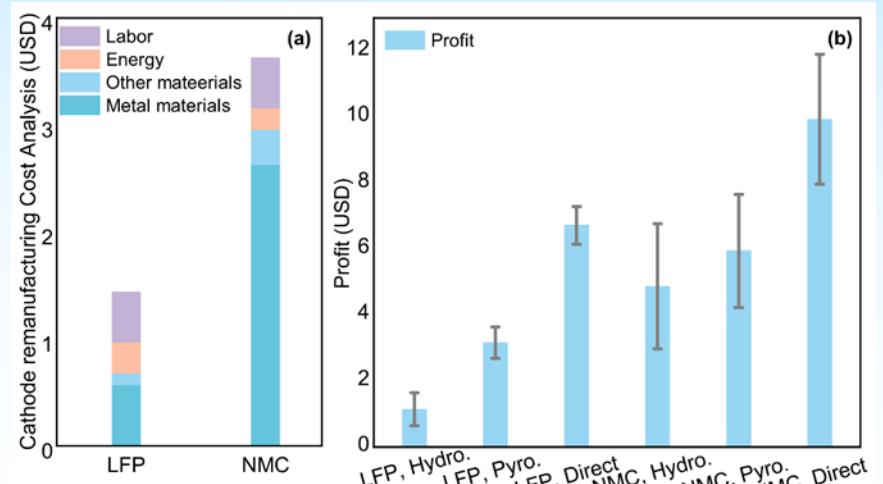
经济分析

敏感性分析



收集率及掺杂比例对收益影响

- 在NMC混杂LFP的比例和废旧LIBs收集率(20%,60%,90%)对回收收益的影响
- LFP混杂比例过高会显著降低回收收益，在湿法冶金工艺中，亏损节点出现在60%-80%



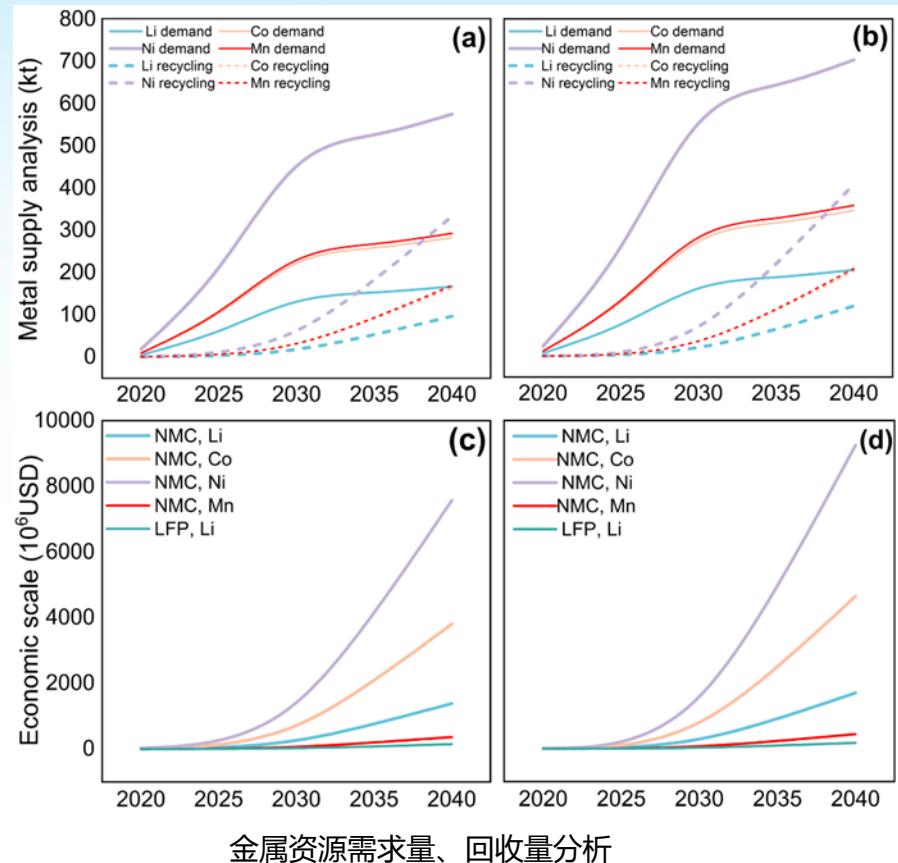
正极再制造收益分析 (a) 正极再制造成本; (b) 再制造过程收益分析

- LFP再生的金属数量较低，正极再制造成本对正极再制造利润所造成的影响相对较低
- 湿法冶金试剂成本高导致其利润低于火法冶金
- 收益仍要高于仅进行回收工艺

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

经济分析

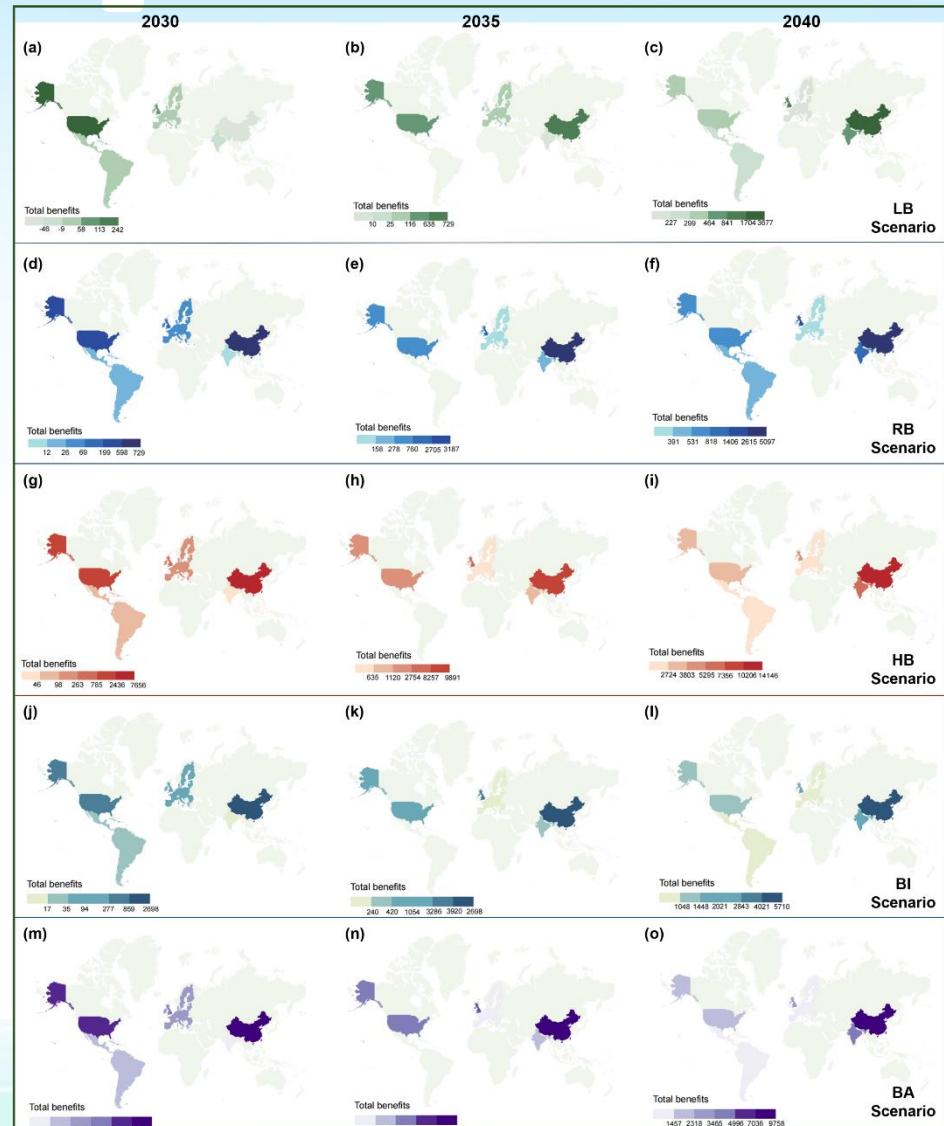
回收资源对未来供应链的贡献



金属资源需求量、回收量分析

- 由于钴的关键性较高，未来将可能沿着“高镍低钴”的趋势发展
- 市场的规模预测稍高于基于国家政策预测
- 镍、锰的回收几乎完全来源于NMC
- 回收两种锂离子电池对钴、镍资源2040年的市场规模达到38-80亿美元、75-95亿美元

典型国家回收LIBs经济预测



五种情景下废旧锂离子电池的总回收效益预测

2.3 材料回收体系 - 锂离子电池回收过程多角度评估

总结

资源关键性

- LFP 和 NMC 的关键性分别为 1.69 和 2.26；材料关键性主要与工艺的操作方法有关。

环境影响

- 环境影响与**电池类型、回收工艺种类、投入材料及产生的废弃物的数量、性质均有直接关系。**

经济分析

- NMC 具有较高的回收效益，成本率均低于 1，LFP 除直接回收工艺外均高于 1，其中采用湿法工艺回收 LFP 的成本率最高，达到 1.21。

绿色回收等级评价

- LFP适合火法冶金工艺回收，NMC适合湿法冶金工艺回收。

前期研究成果



国家电网天津市电力公司双碳运营管理分公司

- ◆ 报告：国网天津双碳运营公司产品碳足迹现状分析报告
- ◆ 专利：干式变压器绿色制造评价方法
- ◆ 汇总：电力碳排放因子全平台汇总
- ◆ 标准：T/ATCRR 69—2024 《动力锂离子电池回收企业碳排放强度等级及评定方法》
- ◆ 核算：典型电工装备碳足迹核算



中国电力科学研究院

- ◆ 致力于解决光伏产业废旧光伏板的资源化过程的碳足迹核算
- ◆ 构建基于资源循环的降碳潜力量化评价系统

相关成果

◆ 所获奖项

2023年度天津市科技进步二等奖，砷化镓LED外延、芯片绿色制造技术研究
蔡坤煌、**高文芳**、陈芳芳、康飞、陶天一、陶莉、张东炎、熊伟平

◆ 发布标准

- ◆ T/ATCRR 69—2024《动力锂离子电池回收企业碳排放强度等级及评定方法》，主要起草人：张宇平、阎文艺、**高文芳**、别传玉、吉娜、阮丁山、**闵春华**等12人。2024-12-20。
- ◆ T/ATCRR 68—2024《动力锂离子电池回收过程绿色低碳评价方法》，主要起草人：张宇平、孙峙、**高文芳**、别传玉、辛锐、阎文艺、阮丁山、任芝军、**辛振**等15人。2024-12-20。
- ◆ T/ATCRR 47—2024《废铅蓄电池专用车辆技术规范》，主要起草人：俞卿、何艺、魏兴虎、矫坤远、卢晓阳、邹亚美、**高文芳**、魏耀东、华楠、张海东等25人。2024-12-20。
- ◆ T/ATCRR 48—2024《废铅蓄电池塑料清洗技术规范》，主要起草人：王武钧、何艺、殷天强、矫坤远、魏兴虎、汪彬、孙权、陈浩、魏耀东、王秀生、曹国庆、**高文芳**、孙晓晨、张光明等25人。2024-12-20。
- ◆ T/ATCRR 52—2024《废铅蓄电池回收脱硫盐》，主要起草人：汪彬、何艺、殷天强、魏兴虎、王武钧、**高文芳**、徐标、矫坤远等24人。2024-12-20。





感谢聆听！

高文芳

副教授/博导/环保系副主任

河北工业大学 双碳研究院/能源与环境工程学院

Email: wfgao@hebut.edu.cn

Mobile: 158 2266 4891 (同微信)

2025年5月28日