

重庆剑涛铝业有限公司

铝锭

产品 LCA 研究报告

产品名称	铝锭
功能（声明）单位	1 千克铝锭
报告依据	ISO 14040:2006、ISO 14044:2006 和 ISO 14025
发行单位	重庆剑涛铝业有限公司
报告日期	2025 年 10 月 10 日
报告编号	CKG333051-铝锭 LCA

摘要

研究采用 Simapro 软件实现了产品的生命周期建模、计算和结果分析，以保证数据和计算结果的可溯性和可再现性。研究过程中，为了保证数据质量，实景数据来源于重庆剑涛铝业有限公司的现场收集，背景数据来源于 Ecoinvent 3.11，数据库是国际上公认和广泛采用的生命周期数据库。

基本资料：

产品名称	铝锭
功能(声明)单位	1 千克铝锭
产品照片	
制造/服务厂商名称	重庆剑涛铝业有限公司
制造/服务厂商地址	中国重庆市涪陵区李渡新区盘龙路 13 号
数据收集时间	2024 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日
影响类别	详见表 3
评估方法	EN 15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3.1 normalization and weighting set
系统边界	“摇篮”到“大门” 生命周期包括原材料获取阶段、生产阶段。详细的系统边界图，请参阅本报告第 2.2 节
评估结果	详见表 7

目 录

摘要	2
1. 企业及产品介绍	6
1.1 企业介绍	6
1.2 产品介绍	7
2. 目标与范围的定义	8
2.1 研究目的	8
2.2 研究范围	8
2.2.1 功能单位	9
2.2.2 系统边界	9
2.2.3 分配原则	10
2.2.4 取舍原则	10
2.2.5 相关假设	11
2.2.6 影响类型和评价方法	11
2.2.7 软件和数据库	12
2.2.8 数据质量要求	13
3. 生命周期清单分析	16
3.1 前景数据	16
3.2 背景数据和数据质量	18
4. 生命周期影响评价	20
4.1 评价结果	20
4.2 对环境造成影响的主要阶段	21
4.3 对环境造成影响的主要单元过程	22
4.3.1 原材料获取阶段	22
4.3.2 生产阶段	22
5. LCA 结果解释	22
5.1 完整性	23
5.2 敏感性以及不确定性分析	23

5.3 一致性	27
6. 结论、限制和建议	28
6.1 结论	28
6.2 限制	28
6.3 建议	28
附录： 引用	29
附录：	30
表 S1 原材料获取阶段的环境影响（所有数据均基于声明单位）	30
表 S2 生产阶段的环境影响（所有数据均基于声明单位）	32

简称	全称
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (联合国政府间气候变化专门委员会)
CFP	Product carbon footprint (产品碳足迹)
HFC	Hydrofluoro Carbon (氢氟碳化物)
PFC	Perfluoro Carbon (全氟碳化物)
CO ₂ eq.	Carbon Dioxide Equivalent (二氧化碳当量)
LCA	Life cycle assessment(生命周期评价)
BSI	British Standards Institution(英国标准协会)
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development(世界企业可持续发展理事会)
ISO	International Organization for Standardization(国际标准组织)
PEF	Product Environment Footprint(产品环境足迹)
GWP	Global Warming Potential(全球暖化潜值)
ELCD	European Life Cycle Database(欧洲生命周期参考数据库)
USLCI	United States Life Cycle Inventory(美国生命周期清单数据库)

1. 企业及产品介绍

1.1 企业介绍

重庆剑涛铝业有限公司是一家集再生铝合金生产、研发、零部件铸造为一体的循环经济型企业。

公司于 2007 年 8 月 9 日在涪陵李渡工业园区投资建设“30 万吨再生铝及铸件”的现代化生产、科研基地。工厂占地 300 亩，建筑面积约 4.8 万平方米。主要利用国内外丰富的铝废料资源，为汽车、摩托车、通用机械、家用电器等行业提供铝合金材料及铝铸件，同时，为各行业提供再生铝合金技术及科研项目服务。

一期工程投资 1.8 亿元，已于 2010 年 6 月正式投产；二期工程投资 0.6 亿元，项目已于 2020 年 12 月 30 日建设完成并投入使用。

我公司地理位置优越，水陆交通便利，北接渝涪高速公路，南临长江黄金水道，东有沿江高速及渝怀铁路，可覆盖全国并通达海外。

公司现有员工 700 余人。人员结构及知识结构全面，专业技术力量雄厚，拥有各类专业技术人才和经营管理人才。是中国西部地区再生铝合金行业专业技术力量最具实力的企业之一，可根据不同行业不同产品的需求为客户量身定制，从而满足客户的不同需求。

我司建立了完善的质量保障体系，于 2010 年完成了 ISO9001:2008 和 ISO14001:2004 的初次审核，并每年有通过监督审核；于 2011 年完成对 TS16949 的审核，并每年通过监督审核；于 2018 年完成了对 ISO9001：2015、ISO14001：2015 和 IATF 16949：2016 体系认证并每年有通过监督审核。

公司技术装备先进，节能减排效益突出。原料预处理采用机械及人工的方式，以破碎、磁选、清洗、浮选相结合，辅以人工分捡，有效去除原料中的杂质和有害物质，保证入炉原料的纯净性；熔炼设备采用国际先进的组合式双室反射熔炼炉组，辅以蓄热式弥散燃烧器、电磁搅拌、铝液循环泵、在线除气、底部冷却等先进燃烧、搅拌、铸造技术，烟气余热得到有效回收，能源利用效率高于同行业平均水平；公司自 2018 年 10 月开始至今，积极推进铝液直供技术，已配备铝水保温炉 5 台，铝水运输包 30 余套，以及铝水运输车 7 台。为下游压铸企业大幅节约能源、人工成本、减少金属烧损、减少废气排放工作做出了较大贡献。

1.2 产品介绍

重庆剑涛铝业有限公司，是一家集再生铝合金研发、生产于一体的循环经济高新技术企业，也是中国有色再生金属协会副会长单位，重庆市工业百强、“隐形冠军”企业。

我们深耕再生铝行业三十余载，擅长变废为宝、物尽其用，把生产、生活中的铝废料，去粗取精、回炉消化、重塑再造成为低碳再生铝合金。

自 2007 年落户涪陵高新区以来，我们累计投资 20 亿元，打造 300 亩现代化生产、研发基地，不断更新迭代技术装备，建成 5 条国内领先生产线，现有 30 至 150 吨各型熔炉 15 台、生产辅助设备 300 余台、检测实验设备 28 台、大型环保设备 6 台、烤包器 58 台、铝水包数百个、员工 500 余人，年设计产能 30 万吨。

2. 目标与范围的定义

2.1 研究目的

本研究的目的是根据 ISO 14040:2006, ISO 14044:2006 和 ISO 14025 标准，评估重庆剑涛铝业有限公司生产的铝锭的环境影响。本报告也可以为第三方产品环保声明提供详细的信息和数据支持，为产品设计者和购买者提供可靠的产品环境影响信息。

研究结果将为产品的生产者、设计者、购买者和认证者之间的有效沟通提供适当的参考。本研究结果的潜在交流群体为：重庆剑涛铝业有限公司内部管理人员、第三方认证机构、产品设计人员、绿色产品标准开发商、产品购买者，以及公司外部利益相关者，如原材料供应商、企业、当地政府和环保非政府组织。数据资料也可用于下列用途：

- 三型环境声明（EPD）
- 产品回收应用
- 类似产品对标
- 绿色产品评估
- 绿色采购和供应链决策
- 分析具体指标，如碳足迹或不可再生资源消耗等

2.2 研究范围

本项目生命周期评价核算依据国际标准如下：

- ISO14040:2006 环境管理生命周期评价原则与框架
- ISO14044:2006 环境管理生命周期评价要求与指南

按照 ISO14040:2006、ISO14044:2006 标准的要求，研究范围需要明确评估对象的功能单位、系统边界、分配原则、取舍原则、相关假设、影响评价方法和数据质量要求等。在下列章节中分别予以说明。

2.2.1 功能单位

为方便系统中输入/输出的量化，以及后续企业披露产品的环境信息，或将本研究结果与其他产品的环境影响做对比，本研究声明单位定义为：1千克铝锭。

2.2.2 系统边界

本次研究的系统边界为“摇篮”到“大门”，即原材料获取阶段，生产阶段，不包括分销阶段、使用阶段和生命末期阶段。原材料获取阶段包括废铝、原铝、硅等上游材料的生产和运输。生产阶段的能源消耗为电力、天然气和水。1千克铝锭的系统边界如图1所示。

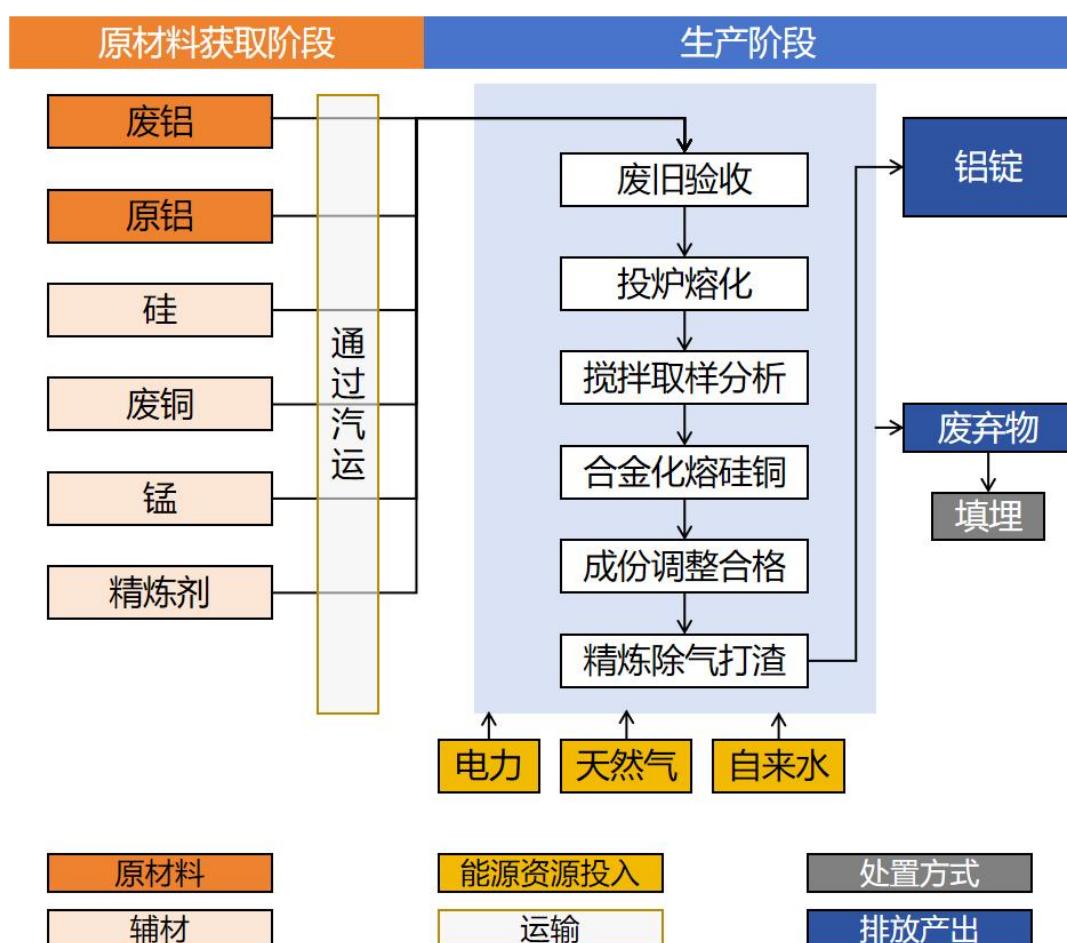


图1 产品系统边界

表 1 生命周期阶段盘查与排除项目

生命周期阶段	纳入项目	排除项目
原材料获取阶段	原材料开采、生产和运输相关之生命周期相关等过程	根据截断原则, 排除了非 PCR 建议的项目, 其中包括: 办公物品的采购
生产阶段	生产过程能源资源投入与废弃物产出	排除了非 PCR 建议项目, 包含但不限于: 1、固定资产相关的 GHG 排放, 如: 用于制造产品的机械、设备、厂房 2、员工通勤、商务旅行/客户和访客等运输排放 此外, 依据截断原则排除与产品生产关联较小的活动, 包含: 汽油(公务车)、厨余垃圾、生活垃圾

2.2.3 分配原则

许多流程通常不只一个功能或输出, 流程的环境负荷需要分配到不同的功能和输出中, 当前有不同的方式来完成分配, 主要有 a.避免分配; b.扩大系统边界; c.以物理因果关系为基准分配环境负荷; d.使用社会经济学分配基准;

产品生产过程的原辅材料消耗, 能源消耗和污染物排放的分摊均采用物理关系, 根据产品产量计算出单位产品的原辅材料消耗, 能源消耗和污染物排放。

2.2.4 取舍原则

根据对国内外各类产品 LCA 研究的调研分析, 并参考欧盟发布的产品环境足迹(Product Environment Footprint, PEF)指南中对取舍准则的要求, 基本的取舍原则有:

1、基于产品投入的比例: 舍去质量或能量投入小于 1% 的产品/能量投入, 但总的舍去产品投入比例不超过 3%。但是, 对于质量虽小, 但生命周期环境影

响大的物质，则不可以舍弃，例如黄金、白银；

2、基于环境影响的比重：以类似投入估算，排除实际影响较小的原料。对于任何类别影响，如果相同影响在一个过程/活动的总和<1%，则此过程可从系统边界中舍去；

3、忽略生产资料与基础设施。

由于铝锭生产过程中产生的二次铝灰由第三方进行回收再利用，且其经济价值较低，其对环境影响较小，本研究舍弃了部分废弃物造成的环境影响。此外，本产品部分包装是循环利用且使用量极少，本研究舍弃了包装造成的环境影响。以上舍弃满足取舍准则的要求。

2.2.5 相关假设

在生命周期评价过程中，会出现数据缺失或情景多样化的情况，生命周期评价执行者需要明确相关假设和限制。

表 2 各个生命周期阶段的假设情况

阶段	假设描述
原材料获取阶段	/
生产阶段	/

2.2.6 影响类型和评价方法

本研究所用的指标/影响类型的 LCIA 方法为 EN 15804 + A2 (adapted) V1.00 / EF 3.1 normalization and weighting set 方法。

表 3 本研究的环境影响类别

影响类别		单位
酸化	Acidification	mol H ⁺ eq
气候变化	Climate change	kg CO ₂ eq
气候变化-生物碳	Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq
气候变化-化石碳	Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq
气候变化-土地利用碳	Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq

影响类别		单位
淡水生态毒性	Ecotoxicity, freshwater	CTUe
淡水生态毒性-无机物	Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe
淡水生态毒性-有机物	Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe
颗粒物	Particulate matter	disease inc.
海洋富营养化	Eutrophication, marine	kg N eq
淡水富营养化	Eutrophication, freshwater	kg P eq
陆地富营养化	Eutrophication, terrestrial	mol N eq
人体健康-致癌物	Human toxicity, cancer	CTUh
人体健康-致癌物(无机)	Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh
人体健康-致癌物(有机)	Human toxicity, cancer - organics	CTUh
人体健康-非致癌物	Human toxicity, non-cancer	CTUh
人体健康-非致癌物(无机)	Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh
人体健康-非致癌物(有机)	Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh
电离辐射	Ionising radiation	kBq U-235 eq
土地利用	Land use	Pt
臭氧层消耗	Ozone depletion	kg CFC11 eq
光化学臭氧生成	Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq
资源消耗-化石燃料	Resource use, fossils	MJ
资源消耗-矿物和金属	Resource use, minerals and metals	kg Sb eq
水资源消耗	Water use	m ³ depriv.

2.2.7 软件和数据库

LCA 研究采用 SimaPro 10.2 软件进行运算。SimaPro 是领先的 LCA 软件解

解决方案，在 80 多个国家的行业和学术界拥有 30 年的声誉。SimaPro 支持集成了不同表征方法和软件的全生命周期评估。EN 15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3.1 normalization and weighting set 是 SimaPro 软件中集成的方法之一。SimaPro 软件还集成了几个数据库，如 Ecoinvent 3.11、Agri-footprint 和 Industry data 2.0 等。本研究以 EN 15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3.1 normalization and weighting set 为主要评价方法，以 Ecoinvent 3.11 为主要数据库进行分析。

Ecoinvent 数据库由瑞士生命周期研究中心开发，包括西欧、瑞士、中国等国家的数据。该数据库涵盖化工、能源、运输、建材、电子、制浆造纸、废弃物、和农业活动等 10000 多个产品和服务数据集。关于该数据库的更多细节可以在 <http://www.Ecoinvent.org> 上找到。

Agri-footprint 包括作物种植、作物加工、动物生产系统和动物产品加工的关联单位过程清单，用于多影响生命周期评估。农业足迹还包含有关运输、化肥生产和辅助材料的库存数据。在 SimaPro 中，基于质量、能量或经济分配，农业足迹可在三个不同的库中使用。信息、常见问题解答、更新日志和报告可通过 www.agri-footprint.com 公开获取。

Industry data 2.0 包含由行业协会收集的数据，如欧洲塑料、世界钢铁、ERASM 和国际钼协会(IMOA)。

2.2.8 数据质量要求

为满足数据质量要求，在本研究中主要考虑了以下几个方面：

- 数据完整性：依据取舍原则
- 数据代表性：生产商、技术、地域以及时间的代表性
- 模型一致性：采用的方法和系统边界一致性的程度

为了准确的评估数据质量，在 SimaPro 中使用所谓的系谱矩阵（最初由 Weidema (1996) 开发）来估计几何标准偏差。每个数据点根据 5 个标准加上基本不确定因素（取决于数据类型）进行评估。使用以下等式计算 95% 置信区间或平方几何标准偏差：

$$U^2 = \sum_{n=1}^5 U_n^2$$

因子 U_1^2 至 U_5^2 是指（1）可靠性、（2）完整性、（3）时间相关性、（4）地理相关性、（5）技术相关性（见表2）。

表4 数据质量（不确定度）得分表

分 数	1	2	3	4	5
U1 可 靠 性	检验数据基于测量	检验数据部分基于假设或者未证实数据基于测量	未证实数据部分基于合格的评估	合格的评估(像工业专家)；数据来源理论信息（化学计量、焓等）	不合格评估
	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
U2 完 整 性	代表性数据来自所考虑市场的所有相关站点，一定时期内平稳波动	代表性数据来自所考虑市场的>50%相关站点，一定时期内平稳波动	代表性数据来自所考虑市场的<<50%相关站点，或者更短时期内>50%站点	代表性数据来自所考虑市场的一个站点或者更短时间内的一些站点	代表性未知，或者数据数据来源于更短时间的少量站点
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
U3 时 间 相 关 性	与参考年份相差少于3年	与参考年份相差少于6年	与参考年份相差少于10年	与参考年份相差少于15年	数据年龄未知，或与参考年份相差大于15年
	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
U4 地 域	数据来源于正在研究的区域	平均数据来源于包括正在研究区域以内的	数据来源比正在研究更小的区域或者相似	数据来源于有相似生产状况的区域	数据来源于未知区域或者明

相关性		更大区域	区域		显不同的区域
U5 技术相关性	1.00	1.01	1.02	1.05	1.10
	数据来源于正在研究的企业，流程和材料(例如相同的技术)	数据来源于相同技术，不同企业的流程和材料	数据来源与同一技术的相关流程或者材料，或者正在研究的流程和材料但是不同技术	数据来源于不同技术的相关流程和材料，或者数据来源于实验室规模的流程和相同技术	数据来源于实验室规模不同的技术的相关流程和材料
U5 技术相关性	1.00	1.05	1.20	1.50	2.00

为了满足上述要求，并确保计算结果的可靠性，在研究过程中实景数据首选来自生产商和供应商直接提供的数据。背景数据大多来自 Ecoinvent 数据库，数据库中的数据是经严格审查，并广泛应用于国际上的 LCA 研究。

3. 生命周期清单分析

本研究的生命周期数据包括前景数据和背景数据。

前景数据:由重庆剑涛铝业有限公司生产部和体系管理部门的工作人员收集提供。

背景数据:来自 Ecoinvent 3.11 数据库。这些数据属于“从摇篮到大门”类别。

3.1 前景数据

前景数据由公司员工收集并提供。前景数据通过现场调查按照“大门到大门”的方法收集，数据收集者通过物料平衡检查对数据进行审核。报告人向数据收集人员证实了这些数据。。

原材料消耗量由收集人员提供，并依据声明单元进行计算。根据公司统计数据收集用电量、用气量等。

表 5 是 1 千克铝锭原材料获取阶段，生产阶段的活动数据。

表 5 1 千克铝锭数据清单

阶段	名称	成分	单耗	单位
原 料 阶 段	废铝	/	0.99589	kg
	原铝	93.64%	0.07639	kg
	硅	/	0.04204	kg
	废铜	/	0.00726	kg
	锰	/	0.00069	kg
	精炼剂	氯化钠 40%， 氯化钾 30%， 冰晶 石 20%， 氟化钙 10%	0.00127	kg
	原物料运输	汽运	0.66623	tkm
生 产 阶 段	市电	/	0.09533	kwh
	光伏电	/	0.00772	kwh
	天然气	/	0.08405	m3

阶段	名称	成分	单耗	单位
	水	/	0.34747	kg
	废弃物填埋	/	0.00124	kg
	废弃物运输	汽运	0.00013	tkm

3.2 背景数据和数据质量

背景数据来自 Ecoinvent 3.11，如果可能的话，使用的是本地数据。数据质量从 5 个方面进行评估，评估准则见 3.2.8。天然气直接燃烧排放的量化，本研究根据《IPCC 2006 国家温室气体清单指南》V2 能源卷提供的排放因子，并结合《综合能耗计算通则》（GB/T 2589-2020）获取天然气平均低位发热量为 35608.5 kJ/m³（取中值）、《企业温室气体排放核算与报告指南 铝冶炼行业》附录 A 附表 A.1 中获取天然气的碳氧化率为 99%，据此计算得到天然直接燃烧过程的排放因子为 1.98 kg CO₂ eq. /m³。

表 6 背景数据

名称	数据集	数据库	数据质量
废铝	Aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting {GLO} market for aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
原铝	Aluminium, primary, ingot {CN} aluminium production, primary, ingot Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
硅	Silicon, metallurgical grade {RoW} silicon production, metallurgical grade Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
废铜	Copper scrap, sorted, pressed {GLO} market for copper scrap, sorted, pressed Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
锰	Manganese {RoW} manganese production Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
精炼剂	Sodium chloride, powder {GLO} market for sodium chloride, powder Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
	Potassium chloride {RoW} market for potassium chloride Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)

	Cryolite {GLO} market for cryolite Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
	Fluorspar, 97% purity {GLO} market for fluorspar, 97% purity Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
市电	Electricity, low voltage {CN} market group for electricity, low voltage Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,1,2)
光伏电	Electricity, low voltage {CN-CQ} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,1,2)
天然气	Natural gas, high pressure {CN} market for natural gas, high pressure Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,1,2)
水	Tap water {RoW} market for tap water Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
废弃物填埋	Inert waste {RoW} treatment of inert waste, sanitary landfill Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)
汽运	Transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 5 {RoW} market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 5 Cut-off, S	Ecoinvent 3.11	(1,1,1,2,2)

注：GLO：全球地区 RER：欧洲地区 CN：中国地区 RoW：世界其他地区

数据质量（X）：X 代表相关不确定度的得分，得分越高，不确定度越大。

4. 生命周期影响评价

4.1 评价结果

采用 EN 15804 + A2 方法，各个影响类别结果如表 7 所示。

表 7 铝锭的生命周期评价结果（所有数据均基于声明单元）

影响类别		单位	数值
酸化	Acidification	mol H ⁺ eq	1.66E-02
气候变化	Climate change	kg CO ₂ eq	2.87E+00
气候变化-生物碳	Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	1.09E-02
气候变化-化石碳	Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	2.86E+00
气候变化-土地利用 碳	Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq	1.27E-03
淡水生态毒性	Ecotoxicity, freshwater	CTUe	7.55E+00
淡水生态毒性-无机 物	Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	7.20E+00
淡水生态毒性-有机 物	Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	3.54E-01
颗粒物	Particulate matter	disease inc.	2.31E-07
海洋富营养化	Eutrophication, marine	kg N eq	3.01E-03
淡水富营养化	Eutrophication, freshwater	kg P eq	6.15E-04
陆地富营养化	Eutrophication, terrestrial	mol N eq	3.19E-02
人体健康-致癌物	Human toxicity, cancer	CTUh	1.06E-09
人体健康-致癌物 (无机)	Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	2.87E-10
人体健康-致癌物	Human toxicity, cancer - organics	CTUh	7.73E-10

影响类别		单位	数值
(有机)			
人体健康-非致癌物	Human toxicity, non-cancer	CTUh	2.08E-08
人体健康-非致癌物 (无机)	Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1.99E-08
人体健康-非致癌物 (有机)	Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	8.30E-10
电离辐射	Ionising radiation	kBq U-235 eq	6.89E-02
土地利用	Land use	Pt	1.11E+01
臭氧层消耗	Ozone depletion	kg CFC11 eq	1.63E-08
光化学臭氧生成	Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	9.87E-03
资源消耗-化石燃料	Resource use, fossils	MJ	2.90E+01
资源消耗-矿物和金属	Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	8.22E-06
水资源消耗	Water use	m ³ depriv.	2.80E-01

4.2 对环境造成影响的主要阶段

不同阶段对环境的影响贡献图 2 所示。由分析结果可知，产品的环境影响主要来自原材料获取阶段的原铝。结果详见附录表 S1 和 S2。

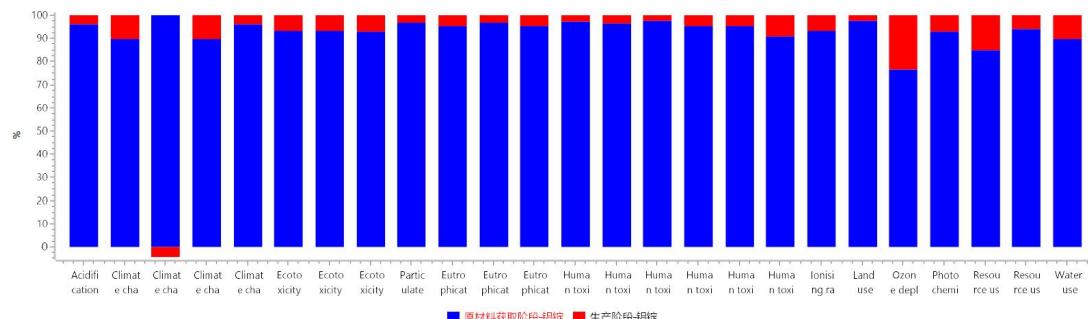


图 2 不同过程对不同类别的环境影响的贡献

4.3 对环境造成影响的主要单元过程

4.3.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段各单元过程的环境负荷贡献见图 3。原材料获取阶段的环境负荷主要来自原铝。

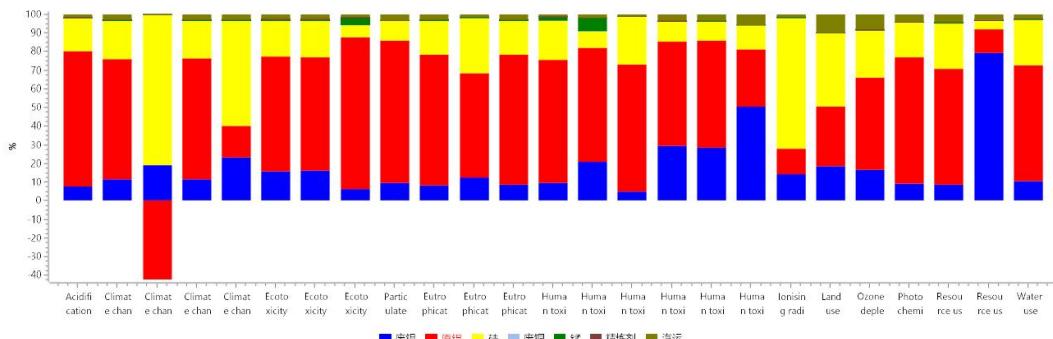


图 3 原材料获取阶段单元过程贡献

4.3.2 生产阶段

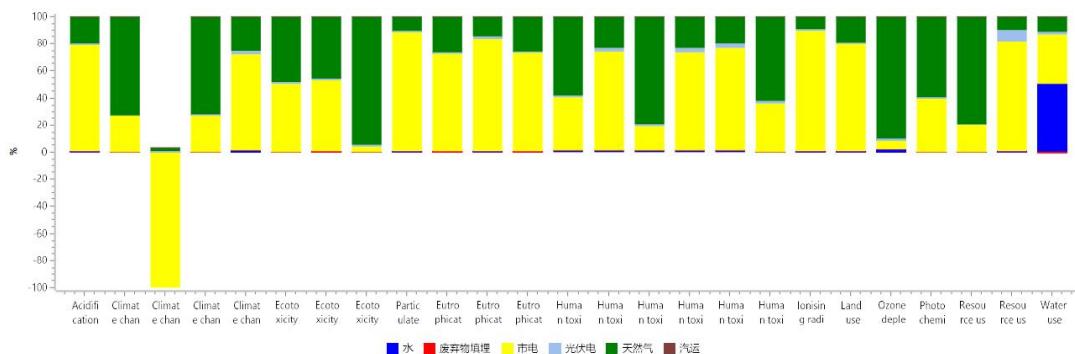


图 4 生产阶段单元过程贡献

生产阶段各单元过程的环境负荷主要来自天然气和电力消耗。

5. LCA 结果解释

根据 ISO 14044: 2006 对生命周期解释的要求，这个阶段主要包括：主要问题的识别、完整性、不确定性分析和一致性检查，最后是结论、局限性和建议。

本研究采用 EN 15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3.1 normalization and weighting set 方法，对重庆剑涛铝业有限公司生产的铝锭的环境影响进行了分析。

由此次研究分析可得，1 千克铝锭环境负荷主要来自原铝，使用可回收料，会显著的减少环境影响。

5.1 完整性

按照 ISO14044:2006 的要求，实施了“从摇篮到大门”的完整性检查，包括：

- 产品生命周期过程的完整性(从摇篮到大门)；
- 本研究界定的系统边界为“从摇篮到大门”。系统边界包括原材料阶段、生产阶段。研究的前景数据包括原辅材料消耗和运输，背景数据被设定为“从摇篮到大门”。生命周期模型和分析方法符合目标和范围定义中的系统边界。
- 是否包括产品的原材料和能量投入；
- 根据表 5，所收集的前景数据包括生产该产品所需的原材料、能源数据、材料的运输数据。原始数据的收集已经完成。
- 获得了重要的输出和固体废物数据。
- 根据表 5，本研究收集了废弃物的数据。

根据完整性检查结果，本研究的生命周期环境影响分析与确定的研究目标一致，原料和辅料数据的收集完整。

5.2 敏感性以及不确定性分析

按照 ISO 14044 的定义，敏感性分析是一个确定变化(例如在数据和方法学的选择上发生的变化)对 LCIA 结果的影响程度的流程。

本次研究中，原材料获取阶段的原铝对 LCIA 结果影响较大。因此选取原铝这个数据选择进行敏感性分析：

表 8 敏感性分析

影响类别		原铝变异幅度	最终结果
酸化	Acidification	10%	6.98%
气候变化	Climate change	10%	5.77%
气候变化-生物碳	Climate change - Biogenic	10%	-7.65%
气候变化-化石碳	Climate change - Fossil	10%	5.82%

影响类别		原铝变异幅度	最终结果
气候变化-土地利用 碳	Climate change - Land use and LU change	10%	1.61%
淡水生态毒性	Ecotoxicity, freshwater	10%	5.77%
淡水生态毒性-无机 物	Ecotoxicity, freshwater - inorganics	10%	5.69%
淡水生态毒性-有机 物	Ecotoxicity, freshwater - organics	10%	7.53%
颗粒物	Particulate matter	10%	7.36%
海洋富营养化	Eutrophication, marine	10%	6.66%
淡水富营养化	Eutrophication, freshwater	10%	5.41%
陆地富营养化	Eutrophication, terrestrial	10%	6.67%
人体健康-致癌物	Human toxicity, cancer	10%	6.45%
人体健康-致癌物 (无机)	Human toxicity, cancer - inorganics	10%	5.87%
人体健康-致癌物 (有机)	Human toxicity, cancer - organics	10%	6.66%
人体健康-非致癌物	Human toxicity, non-cancer	10%	5.36%
人体健康-非致癌物 (无机)	Human toxicity, non-cancer - inorganics	10%	5.47%
人体健康-非致癌物 (有机)	Human toxicity, non-cancer - organics	10%	2.80%
电离辐射	Ionising radiation	10%	1.27%
土地利用	Land use	10%	3.11%
臭氧层消耗	Ozone depletion	10%	3.77%
光化学臭氧生成	Photochemical ozone formation	10%	6.29%

影响类别		原铝变异幅度	最终结果
资源消耗-化石燃料	Resource use, fossils	10%	5.30%
资源消耗-矿物和金属	Resource use, minerals and metals	10%	1.20%
水资源消耗	Water use	10%	5.55%

由此可以看出原铝的数值选择，对最终结果的影响较大，应谨慎考虑。

参数的变化会带来环境影响的不确定性，为了评估参数变化对结果的不确定性，采用蒙特卡罗模拟方法确定了环境影响的范围。结果如表 9 所示，气候变化影响范围为 $2.69E+00$ kg CO₂-eq ~ $3.04E+00$ kg CO₂-eq，平均值为 $2.87E+00$ kg CO₂-eq。其他环境影响类别的不确定性也可以这样推断。

表 9 不确定性分析

影响类别	单位	平均数	2.50%	97.50%
酸化	mol H ⁺ eq	1.66E-02	1.55E-02	1.77E-02
气候变化	kg CO ₂ eq	2.87E+00	2.69E+00	3.04E+00
气候变化-生物碳	kg CO ₂ eq	1.09E-02	9.58E-03	1.23E-02
气候变化-化石碳	kg CO ₂ eq	2.85E+00	2.68E+00	3.03E+00
气候变化-土地利用碳	kg CO ₂ eq	1.26E-03	1.19E-03	1.34E-03
淡水生态毒性	CTUe	7.55E+00	7.08E+00	8.00E+00
淡水生态毒性-无机物	CTUe	7.19E+00	6.75E+00	7.63E+00
淡水生态毒性-有机物	CTUe	3.54E-01	3.31E-01	3.78E-01
颗粒物	disease inc.	2.31E-07	2.15E-07	2.47E-07
海洋富营养化	kg N eq	3.01E-03	2.81E-03	3.20E-03
淡水富营养化	kg P eq	6.14E-04	5.75E-04	6.51E-04
陆地富营养化	mol N eq	3.19E-02	2.98E-02	3.39E-02
人体健康-致癌物	CTUh	1.06E-09	9.89E-10	1.13E-09
人体健康-致癌物（无机）	CTUh	2.87E-10	2.69E-10	3.04E-10
人体健康-致癌物（有机）	CTUh	7.72E-10	7.20E-10	8.22E-10
人体健康-非致癌物	CTUh	2.08E-08	1.94E-08	2.20E-08
人体健康-非致癌物（无机）	CTUh	1.99E-08	1.86E-08	2.11E-08
人体健康-非致癌物（有机）	CTUh	8.30E-10	7.81E-10	8.78E-10
电离辐射	kBq U-235 eq	6.89E-02	6.47E-02	7.33E-02

影响类别	单位	平均数	2.50%	97.50%
土地利用	Pt	1.11E+01	1.04E+01	1.17E+01
臭氧层消耗	kg CFC11 eq	1.63E-08	1.55E-08	1.71E-08
光化学臭氧生成	kg NMVOC eq	9.87E-03	9.23E-03	1.05E-02
资源消耗-化石燃料	MJ	2.90E+01	2.74E+01	3.07E+01
资源消耗-矿物和金属	kg Sb eq	8.22E-06	7.67E-06	8.78E-06
水资源消耗	m ³ depriv.	2.80E-01	2.63E-01	2.96E-01

5.3 一致性

按照 ISO14044:2006 标准的要求，应从以下几个方面进行一致性检查：

a)在产品系统生命周期和不同产品系统之间的数据质量差异是否与研究的目标和范围一致？

参考表 5 和表 6 的前景数据和背景数据。

b)区域和/或时间差异(如果有的话)是否一直适用？

在地理分布上，根据产品原材料来源调查，产品消费的主要原材料集中在在中国，但研究使用的数据集大多来自全球平均水平；在地域代表性和实际代表性上存在着差异。在时间表示上，大部分数据集为 2024 年的平均数据，基本可以代表实际生产水平。

c)分配规则和系统边界一直应用于所有产品系统吗？

背景数据的选取为 Ecoinvent 中 cut-off 的数据集，符合一致性要求。

d)影响评估的要素是否一直被应用？

本研究使用的影响评价模型为 EN 15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3.1 normalization and weighting set。它是一种适用于全球评价的广泛应用的科学模型。

6. 结论、限制和建议

6.1 结论

采用生命周期评价方法，对重庆剑涛铝业有限公司生产的1千克铝锭的生命周期环境影响进行了评价。声明单位为重庆剑涛铝业有限公司生产的1千克铝锭。产品的系统边界设置为“从摇篮到大门”。利用 EN 15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3.1 normalization and weighting set 特征化方法，对生命周期评价进行了评价。

特征化结果表明，原铝的消耗是主要的污染源。文中还提出了输入变化引起的不确定性，以表示结果的范围。

6.2 限制

本研究结果受制于所收集到的数据，亦使用到次级数据和假设来填补计算边界范围内的数据空白。详细的数据记录系统的建立和实施，将有助于提高结果的细节水平，并能够提供一个更有效率的方法进行数据收集。产品特定数据、以及地理相关数据的可得性也将提高研究的代表性。数据差距、数据代表性和时间变数等各个方面都会导致许多不确定的因素。因此，基于通过细致水平的平衡和合理的评价，在本报告中应用的数据是在计算准备时的最佳值，而初级和次级数据的来源会受不确定性影响。

6.3 建议

在本研究中，前景数据由重庆剑涛铝业有限公司的工作人员提供，数据质量可靠。电力的数据来自于国家电网或省级数据，可以保障数据的准确性。为了使研究数据更加准确，为企业、产品设计人员和第三方认证机构提供更加可靠、准确的数据信息，在今后的研究中有必要提高二手数据集的质量。产品的使用和寿命终点不包括在系统边界内，这在未来的研究中需要考虑。

当其他 LCA 研究需要本研究的 LCI 数据或生命周期结果时，研究者应联系重庆剑涛铝业有限公司，以确保数据和结果的正确使用。

附录：引用

- [1] ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva.
- [2] ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.

附录：

表 S1 原材料获取阶段的环境影响（所有数据均基于声明单位）

影响类别	单位	共计	废铝	原铝	硅	废铜	锰	精炼剂	汽运
酸化	mol H ⁺ eq	1.60E-02	1.24E-03	1.16E-02	2.85E-03	1.90E-06	2.75E-05	1.13E-05	2.58E-04
气候变化	kg CO ₂ eq	2.57E+00	2.96E-01	1.65E+00	5.39E-01	2.84E-04	3.82E-03	1.01E-03	7.41E-02
气候变化-生物碳	kg CO ₂ eq	1.14E-02	3.72E-03	-8.33E-03	1.60E-02	4.61E-07	1.32E-05	2.25E-06	2.48E-05
气候变化-化石碳	kg CO ₂ eq	2.56E+00	2.92E-01	1.66E+00	5.22E-01	2.83E-04	3.80E-03	1.00E-03	7.41E-02
气候变化-土地利用碳	kg CO ₂ eq	1.22E-03	2.83E-04	2.04E-04	6.88E-04	7.82E-07	4.51E-06	2.16E-06	3.35E-05
淡水生态毒性	CTUe	7.04E+00	1.10E+00	4.36E+00	1.35E+00	7.31E-04	2.41E-02	3.23E-02	1.73E-01
淡水生态毒性-无机物	CTUe	6.71E+00	1.08E+00	4.09E+00	1.33E+00	6.60E-04	1.10E-02	3.21E-02	1.68E-01
淡水生态毒性-有机物	CTUe	3.29E-01	2.09E-02	2.67E-01	2.19E-02	7.10E-05	1.31E-02	1.82E-04	5.39E-03
颗粒物	disease inc.	2.24E-07	2.16E-08	1.70E-07	2.42E-08	2.75E-11	3.06E-10	1.01E-10	7.24E-09
海洋富营养化	kg N eq	2.87E-03	2.38E-04	2.00E-03	5.37E-04	6.68E-07	6.38E-06	1.38E-06	8.31E-05
淡水富营养化	kg P eq	5.94E-04	7.28E-05	3.33E-04	1.78E-04	3.31E-08	1.70E-06	4.89E-07	8.05E-06

陆地富营养化	mol N eq	3.04E-02	2.60E-03	2.13E-02	5.55E-03	7.24E-06	6.85E-05	1.45E-05	9.04E-04
人体健康-致癌物	CTUh	1.03E-09	9.65E-11	6.83E-10	2.19E-10	6.71E-14	1.95E-11	1.58E-12	1.20E-11
人体健康-致癌物(无机)	CTUh	2.77E-10	5.81E-11	1.69E-10	2.53E-11	2.30E-14	1.91E-11	3.65E-13	5.18E-12
人体健康-致癌物(有机)	CTUh	7.56E-10	3.84E-11	5.15E-10	1.94E-10	4.41E-14	4.03E-13	1.21E-12	6.82E-12
人体健康-非致癌物	CTUh	1.98E-08	5.78E-09	1.11E-08	2.12E-09	2.46E-12	2.41E-11	3.36E-11	6.77E-10
人体健康-非致癌物(无机)	CTUh	1.90E-08	5.40E-09	1.09E-08	2.02E-09	2.12E-12	2.33E-11	3.19E-11	6.35E-10
人体健康-非致癌物(有机)	CTUh	7.56E-10	3.81E-10	2.33E-10	9.71E-11	3.40E-13	8.69E-13	1.78E-12	4.14E-11
电离辐射	kBq U-235 eq	6.44E-02	9.33E-03	8.77E-03	4.50E-02	4.54E-06	2.55E-04	7.99E-05	9.15E-04
土地利用	Pt	1.08E+01	2.00E+00	3.44E+00	4.26E+00	2.83E-03	1.82E-02	1.30E-02	1.05E+00
臭氧层消耗	kg CFC11 eq	1.25E-08	2.06E-09	6.16E-09	3.21E-09	4.23E-12	1.86E-11	3.10E-11	1.00E-09
光化学臭氧生成	kg NMVOC eq	9.15E-03	8.26E-04	6.21E-03	1.72E-03	2.30E-06	2.01E-05	4.76E-06	3.71E-04
资源消耗-化石燃料	MJ	2.47E+01	2.08E+00	1.54E+01	6.13E+00	3.88E-03	4.03E-02	1.30E-02	1.06E+00
资源消耗-矿物和金属	kg Sb eq	7.74E-06	6.13E-06	9.86E-07	3.68E-07	8.32E-10	1.04E-08	3.89E-08	2.05E-07
水资源消耗	m ³ depriv.	2.51E-01	2.64E-02	1.55E-01	6.22E-02	2.03E-05	3.28E-04	9.21E-04	5.52E-03

表 S2 生产阶段的环境影响（所有数据均基于声明单位）

影响类别	单位	共计	水	废弃物填埋	市电	光伏电	天然气	汽运
酸化	mol H+ eq	6.29E-04	2.23E-06	1.46E-07	4.95E-04	5.16E-06	1.26E-04	5.04E-08
气候变化	kg CO ₂ eq	2.99E-01	4.17E-04	1.36E-05	8.09E-02	6.89E-04	2.17E-01	1.45E-05
气候变化-生物碳	kg CO ₂ eq	-4.97E-04	1.05E-06	6.02E-08	-5.14E-04	1.82E-06	1.38E-05	4.84E-09
气候变化-化石碳	kg CO ₂ eq	2.99E-01	4.16E-04	1.35E-05	8.14E-02	6.86E-04	2.17E-01	1.45E-05
气候变化-土地利用碳	kg CO ₂ eq	4.99E-05	5.41E-07	8.16E-09	3.55E-05	1.27E-06	1.26E-05	6.54E-09
淡水生态毒性	CTUe	5.17E-01	1.46E-03	2.10E-04	2.59E-01	6.19E-03	2.51E-01	3.38E-05
淡水生态毒性-无机物	CTUe	4.91E-01	1.43E-03	2.08E-04	2.58E-01	5.91E-03	2.26E-01	3.28E-05
淡水生态毒性-有机物	CTUe	2.59E-02	3.44E-05	1.59E-06	1.07E-03	2.80E-04	2.45E-02	1.05E-06
颗粒物	disease inc.	7.59E-09	2.99E-11	2.22E-12	6.71E-09	4.74E-11	7.97E-10	1.41E-12
海洋富营养化	kg N eq	1.40E-04	4.58E-07	3.62E-08	1.01E-04	7.93E-07	3.75E-05	1.62E-08
淡水富营养化	kg P eq	2.05E-05	1.58E-07	2.15E-08	1.69E-05	4.35E-07	2.98E-06	1.57E-09
陆地富营养化	mol N eq	1.48E-03	4.68E-06	3.93E-07	1.08E-03	8.32E-06	3.83E-04	1.76E-07
人体健康-致癌物	CTUh	2.76E-11	3.36E-13	5.27E-15	1.08E-11	4.41E-13	1.61E-11	2.34E-15

人体健康-致癌物（无机）	CTUh	1.04E-11	1.64E-13	3.37E-15	7.59E-12	2.52E-13	2.41E-12	1.01E-15
人体健康-致癌物（有机）	CTUh	1.72E-11	1.72E-13	1.90E-15	3.16E-12	1.88E-13	1.37E-11	1.33E-15
人体健康-非致癌物	CTUh	9.96E-10	1.27E-11	2.35E-13	7.21E-10	2.99E-11	2.32E-10	1.32E-13
人体健康-非致癌物（无机）	CTUh	9.21E-10	1.25E-11	2.29E-13	6.94E-10	2.86E-11	1.85E-10	1.24E-13
人体健康-非致癌物（有机）	CTUh	7.45E-11	1.43E-13	6.74E-15	2.65E-11	1.32E-12	4.65E-11	8.08E-15
电离辐射	kBq U-235 eq	4.56E-03	3.58E-05	2.30E-07	4.03E-03	6.00E-05	4.36E-04	1.79E-07
土地利用	Pt	2.65E-01	1.05E-03	7.14E-04	2.10E-01	2.69E-03	5.00E-02	2.05E-04
臭氧层消耗	kg CFC11 eq	3.84E-09	8.02E-11	3.30E-13	2.43E-10	5.79E-11	3.45E-09	1.95E-13
光化学臭氧生成	kg NMVOC eq	7.23E-04	1.43E-06	1.40E-07	2.86E-04	2.95E-06	4.32E-04	7.23E-08
资源消耗-化石燃料	MJ	4.34E+00	5.18E-03	3.01E-04	8.71E-01	8.80E-03	3.45E+00	2.07E-04
资源消耗-矿物和金属	kg Sb eq	4.81E-07	1.90E-09	2.52E-11	3.88E-07	4.17E-08	4.88E-08	3.99E-11
水资源消耗	m ³ depriv.	2.92E-02	1.48E-02	-1.97E-04	1.07E-02	5.03E-04	3.38E-03	1.08E-06