



中科国生（杭州）科技有限公司



2,5-呋喃二甲酸 (FDCA)

产品生命周期评价报告

2024 年

报告编制单位（盖章）：杭州瑞欧优合科技有限公司

报告编号：RCSLCA-R-CNT20250405-1-01

报告编制日期：2025年06月12日

免责声明

本报告的评估撰写基于委托方提供的信息和数据，并结合相关现行法律法规和标准进行。这些内容仅适用于本报告中明确描述的产品情况。对于与本报告描述不符的任何其他企业或产品，本报告不适用。

鉴于所依赖的数据库、分析模型和相关平台可能会不断进行更新和改进，本报告仅反映当前状态，并不保证绝对完善或永久有效。

本报告的使用者在采纳本报告内容之前，应仔细阅读并充分理解，根据自身具体实际情况，审慎评估其适用性。请注意，本报告不构成任何形式的法律意见，使用者应自行承担采纳本报告内容后可能产生的任何风险和后果。

企业名称	中科国生（杭州）科技有限公司	企业地址	浙江省杭州市余杭区仓前街道龙泉路 20 号 5 号楼 12 楼	
产品生命周期评价标准及方法学				
➤ 《环境管理生命周期评价原则与框架》（ISO 14040:2006） ➤ 《环境管理生命周期评价要求与指南》（ISO 14044:2006）				
产品生命周期评价结论				
杭州瑞欧优合科技有限公司受中科国生（杭州）科技有限公司委托，对该公司生产的 2,5-呋喃二甲酸（FDCA），进行“摇篮到大门”的生命周期评价。杭州瑞欧优合科技有限公司确认：				
1) 评价标准及方法学中所要求的内容已在本次工作中覆盖； 2) 2024 年 1kg 未包装 FDCA 的产品生命周期影响为：				
气候变化 (kg CO ₂ eq)	能源-不可再生 (MJ)	臭氧消耗 (kg CFC-11 eq)	颗粒物 (disease incidence)	
1.92	14.68	1.30E-07	1.09E-07	
光化学氧化剂形成 (kg NMVOC eq)	人体毒性-非致癌 (CTUh)	人体毒性-致癌 (CTUh)	电离辐射 (kBq U235 eq)	
5.87E-03	1.68E-08	8.06E-10	0.11	
酸化 (mol H ⁺ eq)	富营养化-陆地 (mol N eq)	富营养化-淡水 (kg P eq)	富营养化-海洋 (kg N eq)	
1.15E-02	2.88E-02	7.09E-04	8.53E-03	
生态毒性-淡水 (CTUe)	土地利用 (dimensionless)	水资源消耗 (m ³ world eq deprived)	资源利用-矿物和金属 (kg Sb eq)	
83.17	85.98	5.40	5.43E-05	
评价组组长	张航	签名	日期	2025.06.10
评价组成员	张怡、黄晨、鄢祎祺			
技术复核人	王肖梅	签名	日期	2025.06.12

目录

1 背景.....	1
1.1 生命周期评价方法介绍.....	1
1.2 项目背景.....	1
2 目标与范围定义	2
2.1 企业概述.....	2
2.2 产品概述.....	2
2.3 评价目的.....	3
2.4 声明单位.....	3
2.5 系统边界.....	3
2.6 过程划分.....	3
2.7 分配原则.....	4
2.8 取舍准则.....	4
2.9 生命周期评价方法.....	5
2.10 数据库介绍.....	6
3 实景过程描述	8
3.1 过程基本信息	8
3.2 数据代表性.....	8
3.3 生命周期清单分析（LCI）	8
4 生命周期影响评价	9
4.1 计算公式.....	9
4.2 LCIA 结果.....	9
5 数据质量评估	10
6 生命周期贡献度分析.....	11
7 产品环境影响对比分析.....	12
8 结语.....	14

1 背景

1.1 生命周期评价介绍

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）作为一种国际公认且日益受到重视的环境管理核心工具，提供了一套系统化、结构化且基于定量数据的科学方法论。LCA 可以全面评价产品或服务在其整个生命周期中对环境可能造成的各类潜在影响，涵盖了从原材料的获取、产品的制造、运输、使用到报废和回收的整个生命过程。

LCA 不仅仅关注企业运营范围内的直接环境排放，更致力于揭示那些常常被忽略的间接环境影响。这些间接影响可能源自上游供应链，如供应商的生产活动、原材料运输过程中的碳排放；也可能体现在下游环节，如产品使用阶段的能源消耗或废弃阶段的处理方式。通过这种全方位的审视，生产者能够更清晰地识别其产品或服务在整个生命周期中对环境贡献的“热点”环节。

此外，LCA 结果能够显著地突出最具改进潜力的领域。这使得企业、政策制定者以及研发人员能够有的放矢，制定出更为精准和有效的策略来减少产品或服务对环境的整体负荷，从而推动整个行业向循环经济模式转型。

1.2 项目背景

中科国生（杭州）科技有限公司（以下简称“中科国生”）委托，由杭州瑞欧优合科技有限公司（以下简称“瑞欧优合”）对中科国生 2024 年生产的 2,5-呋喃二甲酸（以下简称“FDCA”）进行产品生命周期评价。

本项目按照 ISO 14040: 2006 及 ISO14044: 2006 的要求，建立“摇篮到大门”的生命周期模型，编写 LCA 评价报告。为了满足各相关方沟通的需要，本项目将声明单位定义为：1kg 未包装的 FDCA（纯度≥99.7%）。

在生命周期评价过程中，实景调查了中科国生生产 FDCA 的过程。实景过程相关数据来自企业实际生产统计数据，背景过程相关数据采用数据库内的行业平均值，采用的数据库包括 Ecoinvent 数据库、IPCC 排放因子数据库、世界粮食生命周期评价数据库（WFLDB）以及生态环境部发布的相关文件。本次评价选用的数据库在国内外 LCA 研究中被高度认可和广泛应用，可保证数据和计算结果的可溯性和可再现性。

2 目标与范围定义

2.1 企业概述

企业名称	中科国生（杭州）科技有限公司
成立日期	2021-07-30
注册地址	浙江省杭州市余杭区仓前街道龙泉路 20 号 5 号楼 12 楼
法定代表人	王磊
统一社会信用代码	91330108MA2KJCKB2W
注册资本	181.3987 万元
企业类型	有限责任公司（港澳台投资、非独资）
所属行业	研究和试验发展
经营范围	一般项目：新材料技术研发；生物基材料技术研发；新材料技术推广服务；技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广；合成材料销售；专用化学产品销售（不含危险化学品）；生物基材料销售；新型金属功能材料销售；塑料制品销售；涂料销售（不含危险化学品）；国内贸易代理；畜牧渔业饲料销售；合成材料制造（不含危险化学品）；塑料制品制造；生物基材料制造；专用化学产品制造（不含危险化学品）；技术进出口；进出口代理；货物进出口(除依法须经批准的项目外，凭营业执照依法自主开展经营活动)。

2.2 产品概述

产品名称	2,5-呋喃二甲酸（FDCA）
规格型号	粉末，纯度≥99.7%
产品类别	有机化学品
产品状态	粉末状固体，常温下稳定
CAS 号	3238-40-2

2.3 评价目的

生命周期评价是中科国生实现绿色、可持续发展的基础和关键，披露产品生命周期信息是中科国生开展环境保护工作和履行社会责任的一部分。本项目的评价结果将为中科国生内部人员提供生命周期环境影响指标结果，同时为 2,5-呋喃二甲酸（FDCA）的采购商和第三方的有效沟通提供良好的途径，为未来选择更为环境友好的工艺技术创造条件。

2.4 声明单位

为方便系统中输入/输出的量化，声明单位定义为：1kg 未包装的 FDCA（纯度≥99.7%）。

2.5 系统边界

根据评价目的，按照 ISO 14040: 2006、ISO 14044: 2006 的相关要求，确定 FDCA 产品生命周期评价的系统边界如表 2-1。

表 2-1 FDCA 系统边界（摇篮到大门）

包含的过程	未包含的过程
原材料、燃料的生产	与生产无关的产品
能源消耗	产品运输
原材料入厂运输	员工通勤/商务旅行
公共工程	产品包装
产品的生产	投资所需物资及设备的生产，如资本品/基础设施等
产品包装	服务，如工程或基础设施服务、研发活动
厂内运输	
废气、废水、固废的处理	

2.6 过程划分

（1）实景过程与背景过程

本次评价根据相关数据的来源，将系统边界内各个过程划分为实景过程与背景过程。图 2-1 中绿色实线框内过程为实景过程，相关活动数据来自企业实际生产统计数据；蓝色虚线框内为背景过程，相关数据来自数据库。

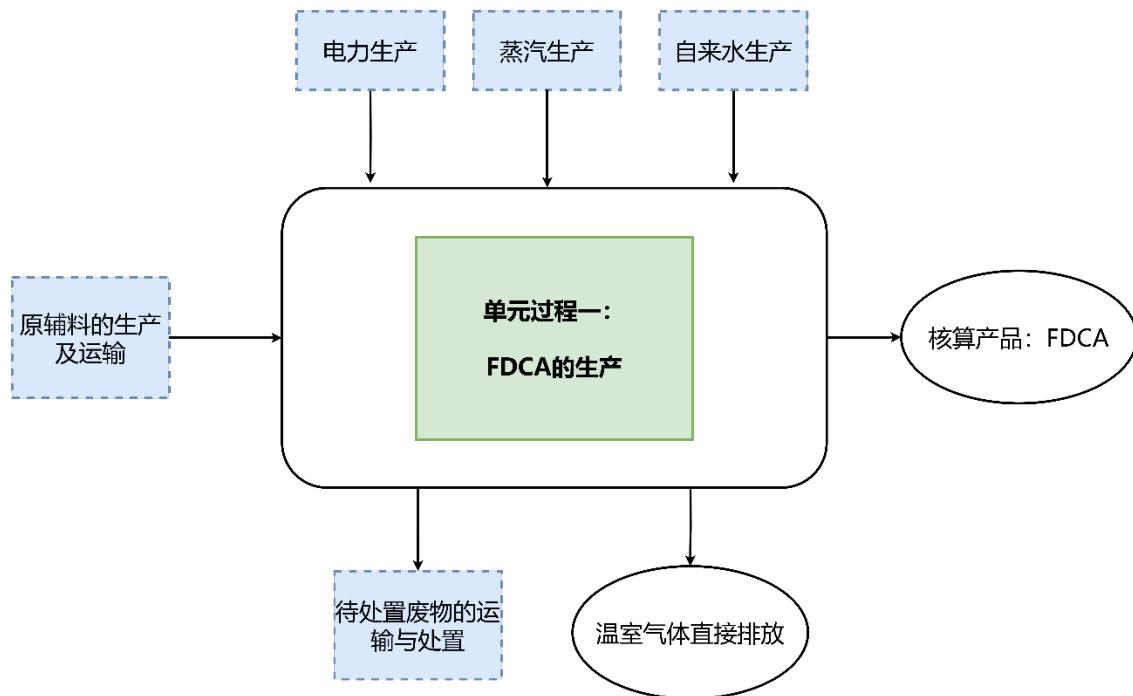


图 2-1 产品系统边界内过程划分

(2) 单元过程划分

单元过程是生命周期清单模型中考虑的最小元素，是数据收集与检验输入输出平衡的最小单位。根据中科国生企业内部统计数据现状，测量仪表安装情况，将实景过程划分为如图 2-1 中的 FDCA 生产一个单元过程。

2.7 分配原则

同一单元过程生产多种产品的情况下，根据各类产品的质量比分配原辅料、能源等消耗量及废弃物产生量。复杂多样的多产品系统需采用合理的建模方法对整个系统的资源环境影响进行分配，从而得到产品各自的环境影响，常见的方法有分段法、物理化学性质分配法、经济价值分配法、系统扩展法（替代法）等。本项目不涉及分配。

2.8 取舍准则

本项目的取舍规则以各项原材料投入占产品重量或过程总投入的重量比为依据，具体如下：

- 普通物料重量 < 1% 产品重量时，以及含稀贵或高纯成分的物料重量 < 0.1% 产品重量时，可忽略该物料的上游生产数据，总共忽略的物料重量不超过 5%；
- 低价值废物作为原料，如粉煤灰、矿渣、秸秆、生活垃圾等，可忽略其上游生产数据；
- 大多数情况下，生产设备、厂房、生活设施等可以忽略；
- 在选定环境影响类型范围内的已知排放数据不应忽略。

2.9 生命周期评价方法

鉴于所评价对象生产过程的特点，且任一产品的生产都会同时造成能源与资源的消耗，均涉及到多目标的评价与综合分析。本项目选择 EF 3.1 方法体系与 IPCC 2021 结合进行生命周期环境影响评价。

EF 3.1 是由欧盟委员会联合研究中心（JRC）发布的环境足迹影响评估方法的 3.1 版本。它是一套标准化的科学规程，专门用于在 LCA 框架下，将产品或组织在其整个生命周期中所消耗的资源和产生的排放（即生命周期清单数据），系统地转化为一系列可量化的潜在环境影响。该方法旨在为欧盟的产品环境足迹研究提供统一、可比且更可靠的计算基础，涵盖了如气候变化、资源消耗、水资源利用、毒性效应等多个关键环境影响类别，并通过最新的科学共识更新了其特征化因子。该方法凭借其科学性和系统性已在国内外生命周期评价领域得到广泛应用和高度认可。

根据 EF 3.1，本次评价考虑的环境影响类别具体如表 2-2。

表 2-2 环境影响类型指标

环境影响类型	影响指标单位	详述
气候变化	kg CO ₂ eq	评估温室气体排放对全球气候变暖的潜在贡献。
臭氧消耗	kg CFC-11 eq	评估消耗臭氧层物质对平流层臭氧的破坏程度。
人体毒性-致癌	CTUh	评估有毒物质排放对人类健康的潜在致癌风险。
人体毒性-非致癌	CTUh	评估有毒物质排放对人类健康的潜在非致癌风险。
颗粒物	disease incidence	评估颗粒物及其前体物排放对人类健康的潜在影响。

续表 2-2 环境影响类型指标

环境影响类型	影响指标单位	详述
电离辐射	kBq U235 eq	评估放射性物质排放对人类健康和生态系统的潜在影响。
光化学氧化剂形成	kg NMVOC eq	评估挥发性有机化合物和氮氧化物等物质在阳光作用下形成地面臭氧的潜力，对人类健康和生态系统造成影响。
酸化	mol H ⁺ eq	评估酸性气体（如 SO ₂ , NO _x ）排放导致的酸化现象对土壤和水体的潜在影响。
富营养化-陆地	mol N eq	评估氮、磷等营养物质排放对陆地生态系统造成的富营养化影响。
富营养化-淡水	kg P eq	评估氮、磷等营养物质排放对淡水生态系统造成的富营养化影响。
富营养化-海洋	kg N eq	评估氮、磷等营养物质排放对海洋生态系统造成的富营养化影响。
生态毒性-淡水	CTUe	评估有毒物质排放对淡水生态系统的潜在毒性影响。
土地利用	dimensionless	评估土地占用和土地利用变化对生物多样性、土壤质量等方面的潜在影响。
水资源消耗	m ³ world eq deprived	评估对水资源的消耗及其对水资源可利用性的潜在影响。
能源-不可再生	MJ	评估对化石能源的消耗。
资源利用-矿物和金属	kg Sb eq	评估对矿物和金属资源的消耗。

2.10 数据库介绍

数据库中生产和处置过程数据都是“从摇篮到大门”的汇总数据，评价过程中用到的数据分别介绍如下：

Ecoinvent 数据库，全球范围内广受认可的生命周期清单核心数据库之一，由瑞士非营利组织 Ecoinvent 协会负责开发和维护。目前，Ecoinvent 数据库包含了超过 20,000 个独立过程数据集，详细记录了各种产品、服务和技术在全球不同地区从“摇篮到大门”或“摇篮到坟墓”的资源消耗、能源使用以及向环境（空气、水、土壤）的排放情况。其数据覆盖了能源、材料生产、运输、农业、废物管理、工业制造等众多领域，并以其严格的数据质量控制、详细的元数据记录、清晰的建模方法以及持续的版本更新而著称。Ecoinvent 数据库是

国际 LCA 领域使用最广泛的数据库之一也是许多机构指定的基础数据库之一，目前最新版本为 Ecoinvent V3.11。

IPCC 数据库，是由国家温室气体清单计划(NGGIP)支持的项目，该数据库由 IPCC 国家温室气体清单工作组(TFI)管理，提供了大量用于估算特定活动（如燃料燃烧、工业过程、农业活动、废弃物处理等）温室气体排放量的排放因子和相关参数。这些因子是计算碳足迹和进行 LCA 中气候变化影响评估的关键输入数据，全球的研究人员和机构在缺乏本地实测数据时，可以在其中找到排放因子和其他参数以及可用于估算温室气体排放和清除的背景文件或技术参考资料。

世界粮食生命周期评价数据库（World Food Life Cycle Database, WFLDB）是一个专门针对农产品和食品行业的综合性国际生命周期清单数据库，是由可持续发展公司 Quantis 与瑞士农业研究机构 Agroscope 以及众多食品行业的领导者共同发起和开发。该数据库于 2012 年启动，包含了大量关于各种农作物种植、动物养殖、食品加工、运输、储存乃至消费等环节的详细生命周期清单数据，覆盖了多种产品类别和不同国家及地区的生产实践，为整个农业食品价值链的参与者提供高质量的排放因子和环境足迹数据。该数据库的最新版本为 2024 年发布的 V3.10，包含 3,800 多个数据集和 12,000 个子数据集。

2025 年 1 月 21 日，生态环境部联合国家统计局、国家能源局印发了《关于发布 2023 年电力碳足迹因子数据的公告》，该文件发布的碳足迹因子在数据获取上严格遵循了国际碳足迹核算的基本规则。此外，在测算过程中深入调研了大量典型代表案例，大部分采用了国内企业的实测数据，确保了案例的丰富度与代表性。所得数据相较于 Ecoinvent、GaBi 等国际数据库中的中国电力碳足迹因子数值更低，更贴近我国电力发展的实际情况。

3 实景过程描述

3.1 过程基本信息

- 单元过程一：FDCA 的生产
- 过程边界：从原料运输至中科国生工厂，到 FDCA 生产完成
- 基准流：生产 1kg FDCA

3.2 数据代表性

- 主要数据来源：企业 2024 年生产统计台账
- 产地：中国浙江省丽水市
- 主要物耗：果葡萄糖浆等
- 主要生产工艺如图 3-1：



图 3-1 FDCA 生产工艺流程

3.3 生命周期清单分析

表 3-1 单元过程一活动数据清单及排放因子来源

数据类别		数量	单位	数据来源	排放因子来源
物料输入	果葡萄糖浆	数据涉密不公开	kg	企业台账	WFLDB
	自来水		kg		Ecoinvent V3.11
	醋酸		kg		
	醋酸钴		kg		
	醋酸锰		kg		
	溴化钠		kg		
能源输入	电力	kg	kWh	生态环境部	
	蒸汽		kg		
待处置废弃物	废活性炭	m ³	kg	Ecoinvent V3.11	
	废水		m ³		

4 生命周期影响评价（LCIA）

4.1 计算公式

$$\lambda_i = \sum_k g_k \times CF_{i,k}$$

公式中，

$CF_{i,k}$ 为影响类别*i*中物质*k*的 CF 量；

g_k 为所考虑的生命周期内排放/消耗的物质*k*的数量；

λ_i 为类别*i*中的 LCIA 分数。

4.2 LCIA 结果

根据以上各阶段的数据收集，计算得到 1kg FDCA 的生命周期评价结果，各项计算指标结果见表 4-1。

表 4-1 生命周期评价结果

影响指标	指标单位	FDCA
气候变化	kg CO ₂ eq	1.92
能源-不可再生	MJ	14.68
臭氧消耗	kg CFC-11 eq	1.30E-07
颗粒物	disease incidence	1.09E-07
光化学氧化剂形成	kg NMVOC eq	5.87E-03
人体毒性-非致癌	CTUh	1.68E-08
人体毒性-致癌	CTUh	8.06E-10
电离辐射	kBq U235 eq	0.11
酸化	mol H ⁺ eq	1.15E-02
富营养化-陆地	mol N eq	2.88E-02
富营养化-淡水	kg P eq	7.09E-04
富营养化-海洋	kg N eq	8.53E-03
生态毒性-淡水	CTUe	83.17
土地利用	dimensionless	85.98
水资源消耗	m ³ world eq deprived	5.40
资源利用-矿物和金属	kg Sb eq	5.43E-05

5 数据质量评估

数据质量代表环境影响评价的目标代表性与数据实际代表性之间的差异，根据 ISO 14040: 2006、ISO 14044: 2006 的相关要求，从地理代表性、技术代表性、时间代表性等六个数据质量标准进行评估，具体如下：

(1) 地理代表性

排放因子的选择考虑到地区之间的差别，优先选用中国本土数据库，中国地区排放因子缺失时进行本土上游数据追溯调查或选用代表平均水平的全球数据。

(2) 技术代表性

实景过程数据来自中科国生实际生产的统计台账；背景过程数据优先选用与所用原辅料、能耗生产工艺相同或规格相同的 LCI 结果，相同生产技术/规格的 LCI 结果缺失时采用“市场平均”的 LCI 结果。

(3) 时间代表性

实景过程中的原始数据自于中科国生 2024 年的生产台账；背景过程中的二手数据尽可能采用最新版本数据库中 LCI 结果。

(4) 完整性

主要数据涵盖了所有相关流量，几乎所有相关数据都被量化，取舍准则在前文已有详细解释，因此数据是完整的。

(5) 可靠性

实景过程数据中，中科国生的台账是对各车间能耗、物耗、废弃物的实际统计、记录。

(6) 精确性

台账统计数据经过中科国生内部审核统计后，瑞欧优合评价组进一步开展了审核校准。瑞欧优合评价组对单元过程输入输出平衡、计算等评价过程/结果进行了重点审核与评估，保障了数据的精确性。

6 生命周期贡献度分析

生命周期贡献度分析的核心目的是识别出产品整个生命周期中，哪些阶段、哪些过程、或者哪些物质对总环境影响的贡献最大，从而为制定精准、高效的环境改进策略提供科学依据。

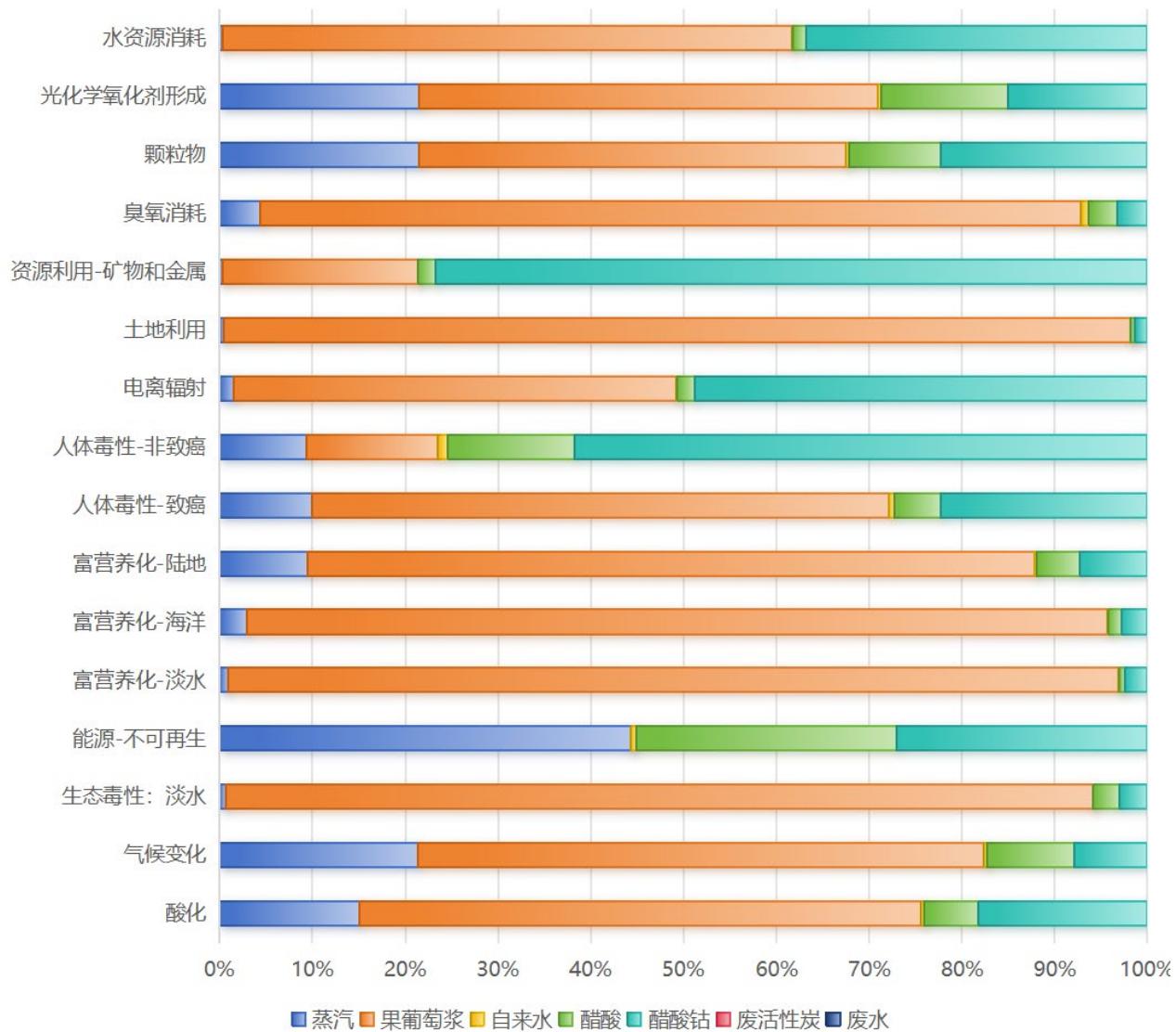


图 6-1 FDCA 生产过程环节对环境影响类别的贡献度占比图

图 6-1 清晰地揭示了 FDCA 生产过程中的关键环境影响环节。总体来看，绝大部分环境负荷集中在果葡糖浆、蒸汽和醋酸三个关键部分，其他投入和产出在大多数影响类别中贡献较小。果葡糖浆作为生物基原料，其农业生产阶段是导致土地、水资源消耗和营养化等生态

影响的最主要原因。蒸汽作为核心工艺能源，其生产过程是温室气体排放、化石能源消耗和大气酸化等影响的首要贡献者。醋酸的使用是光化学氧化剂形成潜值的主要来源。

FDCA 的生物基属性虽然带来了碳减排优势，但其环境足迹高度集中于上游的农业供应链。任何针对这些生态影响的改进措施都必须聚焦于原料的可持续采购和农业实践优化。生产过程中使用的蒸汽是与能源消耗和燃烧相关环境影响的最大贡献者，将能源供应转换为可再生能源（如生物质蒸汽、太阳能供热）是降低这些环境影响最有效的途径。醋酸与醋酸钴等化学品的选择和管理对特定环境类别有显著影响。优化溶剂回收率以减少醋酸逸散，以及寻找更环保的催化剂替代醋酸钴，是针对性降低特定环境风险的重要方向。通过对这三大热点环节的系统性优化，可以全面提升生物基 FDCA 的环境竞争力，真正实现其作为可持续材料的价值。

7 产品环境影响对比分析

生物基 FDCA 与化石基对苯二甲酸是构建高性能聚酯材料的两种关键单体，二者在根源上存在本质区别。生物基 FDCA 生产始于可再生的生物质资源，通过发酵或化学催化等方式，将植物中的糖类（如葡萄糖、果糖）转化为关键中间体 5-羟甲基糠醛（HMF），再进一步氧化得到 FDCA。而 PTA 是传统石化工业的产物，其主要原料对二甲苯来自于石油经过炼化过程得到的石脑油，严重依赖不可再生的化石资源。为了更直观地比较二者在不同影响指标上的相对表现，我们将每个环境影响指标中的最大值设定为基准“1”，该指标下的其他数值则按其与最高值的比例进行折算。下文从多个环境影响指标对这两种材料进行详细的对比分析，以供参考。

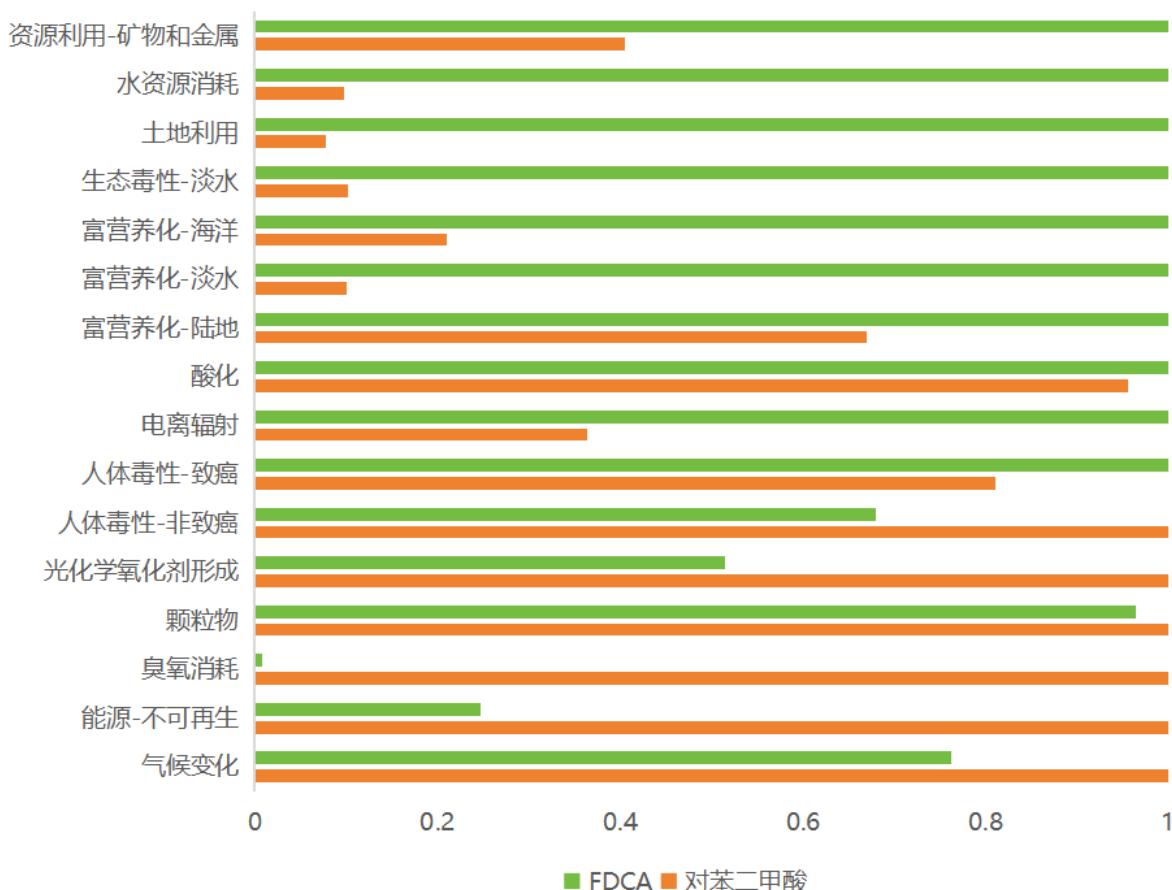


图 7-1 环境影响对比图

(1) FDCA 的环境优势：源于生物基，赋能可持续

FDCA 的环境绩效优势在于其以果葡萄浆等生物质为原料的创新路径。这种天然原料基础使其在以下关键领域展现出相对于对苯二甲酸的显著领先性：

- 不可再生能源消耗锐减 75%：** FDCA 生产过程对不可再生能源的消耗仅为对苯二甲酸的约 25%。这一突破源于其生物基原料的直接利用，极大程度地减少了对有限化石燃料的依赖。这不仅是能源效率的飞跃，更是迈向可持续能源未来的关键一步。
- 产品碳足迹降低 24%：** 在气候变化影响（即碳足迹）方面，FDCA 较对苯二甲酸降低了 24%。其核心优势在于生物质原料在生长过程中能够有效吸收大气中的二氧化碳，有效抵消了生产环节的部分碳排放。FDCA 从源头上赋予“碳中和”甚至“碳负”的潜力，为企业应对全球气候变暖提供了强有力的绿色解决方案。

- **臭氧消耗影响微乎其微：** FDCA 的臭氧消耗潜势极低，几乎可以忽略不计，而对苯二甲酸的影响是其百倍以上。这一数据证实，FDCA 生产过程对平流层臭氧层的破坏风险极低，是生态友好型的选择。
- **更优的人体健康与辐射安全表现：** FDCA 在人体毒性-非致癌和电离辐射两项指标上均低于对苯二甲酸，在生产安全和产品使用安全层面展现了双重优势。

(2) FDCA 环境绩效的持续优化方向

当前 LCA 结果显示，FDCA 在土地利用、水资源消耗、生态毒性以及富营养化等环境指标上影响值相对较高，这些影响主要源于生物基原料果葡萄浆农业生产阶段的土地占用、水肥投入及伴随排放。

需注意的是，现有数据结果主要基于通用的、平均化的 LCA 背景数据库，尚未充分反映特定绿色供应链中优化农业实践和先进生产技术的真实效果。未来可通过与上游供应商的紧密合作，积极推动实施绿色生态农业或现代化作物管理，优化投入与排放管控，并采用上游原料获取过程实景数据，对 FDCA 的环境指标优化空间大有所在。例如，优化农作物品种和种植技术，提高单位土地产量以减少土地占用；引入精准灌溉、雨水收集和水循环利用系统降低农业用水量；推广高效施肥和有机肥料，结合土壤健康管理，减少富营养化和酸化影响等等。

8 结语

本项目对中科国生 2024 年生产的 2,5-呋喃二甲酸（FDCA）开展生命周期评价，并与 Ecoinvent V3.11 中的化石基对苯二甲酸进行了对比分析。结果表明，在“摇篮至大门”的生命周期评价范围内，FDCA 相较传统的化石基对苯二甲酸：

- **低碳优势显著：** 碳足迹降低 24%，不可再生能源消耗减少 75%，印证了其作为低碳替代方案的核心价值

- 环境挑战聚焦上游农业端：土地利用、水资源消耗、生态毒性及富营养化等指标负荷高于化石基材料，上游农业生产阶段的土地占用、水肥投入成为主要影响源。

基于贡献度分析，本报告明确了造成 FDCA 环境负荷的三大“热点”环节：以果葡糖浆为代表的原料端，以蒸汽为代表的能源端、以醋酸等化学品为代表的工艺端，建议企业可从这三大关键环节入手，通过推动可持续农业、转向可再生能源供应、以及深化绿色化学工艺，来系统性地提升产品的环境表现。

- **原料端：**与供应商合作，采用可持续农业认证的果葡糖浆，推广节水灌溉和精准施肥，以显著降低生态毒性、富营养化和水足迹。
- **工艺端：**持续优化化学反应效率与分离提纯技术，同时开展低毒性催化剂替代研究，以减少资源消耗和废物产生。
- **能源端：**逐步以可再生能源替代化石能源，进一步削减产品的碳足迹。

值得关注的是，中科国生（泰兴）新材料科技有限公司的商业化工厂即将在泰兴投产。相较于当前的小规模生产阶段，商业化生产线通常具备更高的能源效率、更优化的溶剂回收系统和更集中的废物处理能力，可推动 FDCA 在气候变化、能源消耗等关键环境指标上的表现实现跨越式提升与改善。本次评估不仅为当前的产品环境表现提供了关键基准，更为未来的技术优化和可持续决策提供了坚实的数据支持。

综上所述，作为极具潜力的生物基化学品，FDCA 的市场价值不仅依托优异材料性能，更依赖全价值链的技术创新与环境精细化管理。通过持续攻克生命周期“热点”问题，FDCA 将加速兑现“下一代绿色材料”的承诺，为低碳转型提供核心支撑。