

# LCA 数据库专题竞赛

## 参赛报告

说明：请参赛小组参阅之前发布的《LCA 数据库指南与参赛评审要求》，参照本报告模板（以水泥为例）的章节内容，编写并提交参赛报告。

所有批注为补充说明，参赛小组提交报告时可删除。

### 参赛小组信息：

LCA 数据集名称：传统生物水泥柱的生命周期评价

小组成员：薛中林 刘统贵 陈甫风 韦朴玉 吴雄炜

指导老师：周文广 石磊

大学/学院：南昌大学 资源环境与化工学院

## 一、 技术代表性分类和目标代表性定义

本小组选择【生物水泥柱】作为 LCA 研究的目标产品。

通过查阅资料，对“生物水泥柱 LCA”的技术代表性进行了分类分析，并最终明确定义了本研究的目标代表性。

### 1、生物水泥产品的技术代表性分类分析

#### (1) 技术代表性的基本分类与单元过程划分

表 1 生物水泥的技术代表性基本分类与单元过程划分

| 分类方法        | 分类结果与解释                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1、按基本工艺技术分类 | <p>两种基本工艺技术：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 最普遍的利用微生物新陈代谢过程中发生的矿化作用诱导生成碳酸钙，其生成的方解石（碳酸钙的一种晶型）是一种有机—无机合成物，具有优异的粘结性和固结性能。微生物诱导碳酸钙沉积的传统生物水泥的基本工艺为“菌液培养、胶结液配置、沙柱胶结”。</li><li>• 然后基于利用农业废弃物快速热解产乙酸或者利用生物质制油过程中产生的副产物乙酸溶解矿业废弃物生成乙酸钙，并进行</li></ul> |

|                  |                                                                                                                                                      |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | <p>产甲烷发酵生成具有胶结能力的方解石。新型生物水泥基本工艺：“农业废弃物的收集—快速热解产乙酸—乙酸钙制备—产甲烷发酵”。（由于实验正在进行，故数据不完善，本来想做传统生物水泥与新型生物水泥的对比试验）。</p> <p><b>本表以下分类均基于“微生物诱导碳酸钙沉积”工艺技术</b></p> |
| 2、按主要原料种类分类      | <p>• 根据菌种不同，作用机理不同，可有基于反硫酸盐还原硫化、氨基酸代谢的、还原硝酸盐、有机酸脱羧反应以及利用脲酶使尿素水解等诱导碳酸钙沉积的菌。</p> <p><b>本表以下分类均属于是基于利用脲酶是尿素水解传统生物水泥</b></p>                             |
| 3、在数据调查范围中划分单元过程 | <p>实验室制备传统生物水泥通常从石英砂的购买筛选到水泥胶结为止。</p> <p>从各种资料中分生产过程的数据可得性考虑，LCA 模型中可以划分 3 个单元过程：菌液培养、胶结液配置、沙柱胶结</p>                                                 |

## (2) 单元过程的技术代表性细分

表 2 传统生物水泥柱生产单元过程的技术代表性细分

| 单元过程<br>技术<br>代表性细分 | 菌液培养                                                                                                  | 胶结液配置                                                                              | 沙柱胶结                                                                                                                                                                              |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 产品规格型号          | <p>酵母膏为培养基成分之一，但是缺乏数据统计。虽然有其他替代的培养基，但是目前实验所用的培养基均含有酵母膏，并且通过把酵母膏的肠粉一一列出来寻找数据，也是没有相应的上游数据库。</p>         | <p>• 尿素 1mol/L，氯素 1mol/L 该浓度是进行一系列的优化实验得出的。</p>                                    | <p>• 菌液循环 2h，胶结液循环 6h 依次循环胶结</p> <p>• 直径为 5cm, 高为 50cm 的水泥柱沙柱，直径与高度对菌液和胶结液的循环时间有影响，对循环次数也有影响。缺乏资料数据，并未区分。</p> <p>• 菌液与胶结液是在沙柱上面还是下面注入，相同还是相反方向注入对于沙柱有一定影响，但沙柱试模不大，判定影响不大，未区分。</p> |
| (2) 原辅料类型           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 酵母膏</li> <li>• 硫酸铵</li> <li>• 巴氏芽孢杆菌</li> <li>• 水</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 尿素</li> <li>• 氯化钙</li> <li>• 水</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 菌液, 菌液的光密度 OD600 对胶结下过有一定影响，但我们取细菌生长对数期后期的菌液，此时胶结效果好。</li> <li>• 胶结液</li> <li>• 石英砂（一般的建筑用沙）</li> </ul>                                  |
| (3) 能耗类型            | <p>主要使用电力，未区分</p>                                                                                     | <p>未区分</p>                                                                         | <p>主要使用电力，未区分</p>                                                                                                                                                                 |

|              |                        |                        |               |
|--------------|------------------------|------------------------|---------------|
| (4) 工艺设备类型   | • 振荡培养箱                | 未区分                    | 蠕动泵循环泵入菌液或胶结液 |
| (5) 生产规模类型   | 实验室小试<5L<br>实验室中试<500L | 实验室小试<5L<br>实验室中试<500L | 未区分           |
| (6) 辅助工艺设备类型 | 未区分                    | 未区分                    | 未区分           |

## 2、目标代表性定义

### (1) 选定技术代表性

从资料调研中知道，以菌液、胶结液、石英砂为主要原料、以电力为主要能源、采用小型蠕动泵的生产生物水泥，国内处于研发阶段，且处于后期优化检测阶段，国外已有公司进行中试，在生产生物转，铺设道路方面有相应试验，但是由于数据收集困难，并未收集到他们在此方面的数据。因此我们的数据是基于国内利用能够分解尿素的细菌诱导碳酸钙沉淀相关实验文献以及自己的实际实验得出的。通过实验室小型规模（一个小型蠕动泵可生产 8 个水泥柱）试验数据对传统生物水泥能耗以及产生的污染进行分析可以一定程度上反应该技术的前景，另外生物水泥已经在国际上有了广泛的关注，且其他形式的生物水泥技术基本上是在本报告中传统生物水泥的基础上改进的。另外，本文以生物水泥柱作为目标产品来进行分析，而不是利用其在修补道路裂缝，生产砖块来评判，一方面是因为实验数据原因，另一方面就是一起胶结沙柱的成功与否更能反映七胶结性能。因此生产传统生物水泥柱 LCA 是数据集开发的首选基本技术代表性。

### (2) 选定目标代表性：

本 LCA 研究的目标代表性定义为：以石英砂、菌液、胶结液为主要原料、以电力为主要能源、采用小型蠕动泵生产传统的生物水泥柱，数据应代表中国 2017 年方案 LCA-基于试验的测算。

选定的目标代表性应写入 LCA 模型的目标与范围定义中（如下图中 eFootprint 界面截图所示），最后也应写入 LCA 数据集文档（见后）和 LCA 报告中。

| ■传统生物水泥柱                                                                                                                                                                                       |  | 目标与范围定义 |  | 生命周期模型 |                                    | LCA结果 |  | 评审 |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------|--|--------|------------------------------------|-------|--|----|--|
| <b>研究目标</b>                                                                                                                                                                                    |  |         |  |        |                                    |       |  |    |  |
| *产品名称：<br>传统生物水泥柱                                                                                                                                                                              |  |         |  |        | 产品类别：<br>传统生物水泥                    |       |  |    |  |
| 规格型号：<br>                                                                                                                                                                                      |  |         |  |        | 形状与形态：<br>单件/套/套                   |       |  |    |  |
| *研究类型：<br>方案LCA-基于试验或典型方案的测算（用于新技术/典型产品或情景分析）                                                                                                                                                  |  |         |  |        | 功能单位与基准流：<br>生产一直径为5cm、高为50cm高的水泥柱 |       |  |    |  |
| <b>研究范围</b>                                                                                                                                                                                    |  |         |  |        |                                    |       |  |    |  |
| *系统边界：<br>生命周期-生产阶段（从资源开采到产品出厂）                                                                                                                                                                |  |         |  |        | 度量过程范围：<br>从菌液培养到水泥柱胶结             |       |  |    |  |
| 产地：<br>中国                                                                                                                                                                                      |  |         |  |        | *基准年：<br>2017                      |       |  |    |  |
| 工艺设备：<br>小型蠕动泵                                                                                                                                                                                 |  |         |  |        | 生产规模：<br>每台小型蠕动泵生产8个生物水泥柱          |       |  |    |  |
| 主要原料：<br>菌液、胶结液、石英砂                                                                                                                                                                            |  |         |  |        | 主要能耗：<br>电力、水                      |       |  |    |  |
| 取舍规则：<br>1. 普通物料重量<1%产品重量时，以及含稀液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；总并忽略的物料重量不超过 5%<br>2. 低价值废物作为原料，如粉煤灰、矿渣、尾料、生活垃圾等，可忽略其上游生产数据！<br>3. 大多数情况下，生产设备、厂房、生活设施等可以忽略！<br>4. 在选定环境影响类型范围内的已知排放数据不应忽略。 |  |         |  |        | 数据质量评估：<br>CLCD方法                  |       |  |    |  |
| 项目信息：<br>1) 项目名称<br>2) 委托方<br>3) 委托目的<br>4) 潜在应用                                                                                                                                               |  |         |  |        |                                    |       |  |    |  |

图 1 LCA 模型的目标代表性定义（eFootprint 截图）

另外，通过上述分析还可以注意到：除上述目前主要研究的技术代表性之外，还有一些技术因素会导致 LCA 结果显著变化，例如我们胶结沙柱的方式，沙柱的胶结是否采用压力成型，沙柱菌液、胶结液的注入方式，其 LCA 结果将有显著不同，应该单独收集数据，开发独立的 LCA 数据集，但不在本次的 LCA 研究范围之内，本次 LCA 试模较小，影响不大。

## 二、 LCA 数据集文档

数据集名称：传统生物水泥柱—一半米高沙柱—中国-2017

### 1、系统功能与系统边界

系统功能与基准流：传统生物水泥柱生产，1 件

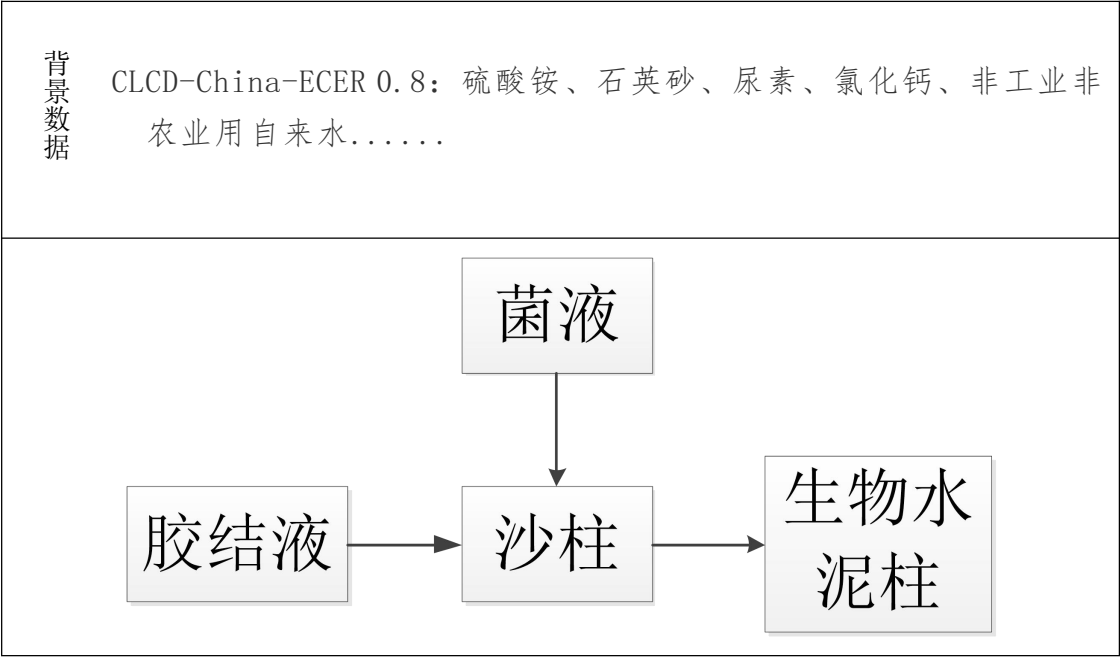
LCA 研究类型：方案 LCA-基于试验或典型方案的测算

产地：中国

基准年：2017 年

系统边界：从各种主要资源开采到沙柱胶结为止（“从摇篮到大门”）

- 实景过程：划分为菌液培养、胶结液配置、沙柱胶结三个单元过程，包含主要生产工序、末端治理。
- 背景过程：采用背景数据库，追溯了各种原料的上游生产过程直到资源开采为止。



2、实景过程数据代表性

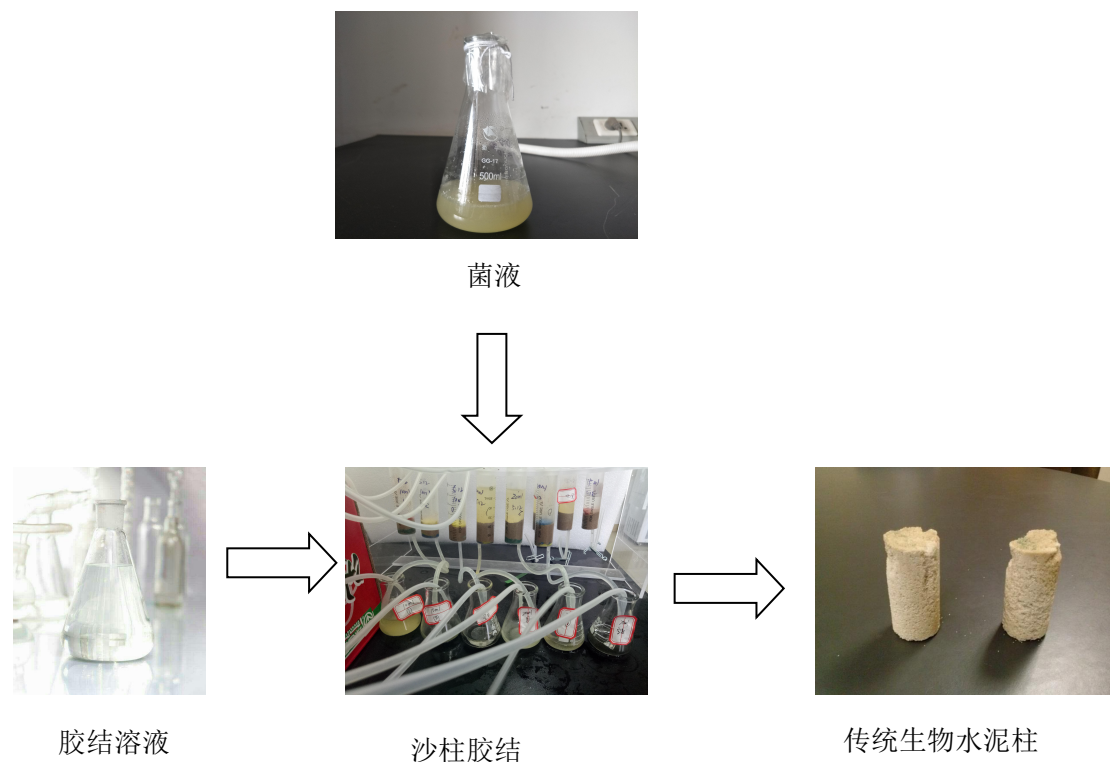
产品种类与规格：传统生物水泥（高 50cm 直径为 5cm 的圆柱）

主要技术代表性：尿素分解菌诱导碳酸钙沉淀

| 过程名称<br>类别 | 工艺设备与规模       | 主要能耗         | 主要排放                                  |
|------------|---------------|--------------|---------------------------------------|
| 菌液培养       | 高压蒸汽灭菌锅、振荡培养箱 | 酵母膏、硫酸铵、水、电力 | CO <sub>2</sub>                       |
| 胶结液配置      | 直接用水配置        | 氯化钙、尿素、水     | 无                                     |
| 沙柱胶结       | 蠕动泵           | 电力           | CO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、颗粒物 |

主要数据来源：国内外生物水泥行业研究论文、实验室实验数据。

## 实景过程工艺流程图：实验室实际操作流程图



## 2、建模方法

副产品：无副产品

再生循环：无再生原料消耗，无废弃再生过程

取舍规则：符合 CLCD 取舍规则。由于酵母膏数据库不可得，且寻找不到一个可以替代且可以找到上游数据库的替代原料，故忽略。

缺失过程：无

背景过程数据库：主要原料均采用 CLCD 0.9，

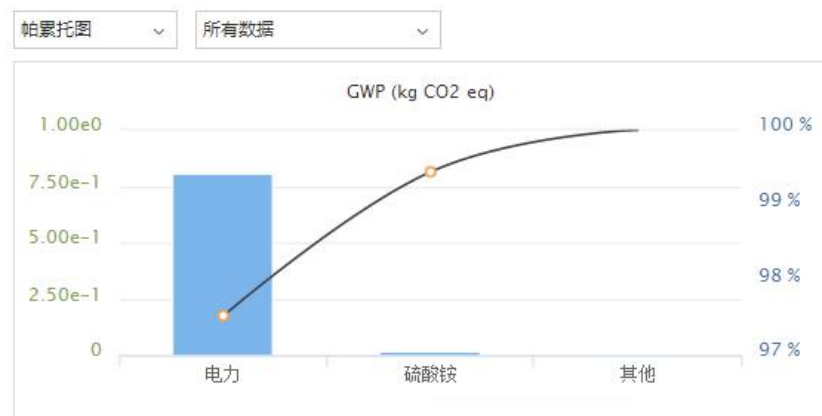
软件工具：采用亿科 eFootprint 系统，在线完成全部 LCA 工作，包括建模、计算分析、数据质量评估、LCA 结果发布。

## 3、LCA 结果分析

- 过程累积贡献分析：以 GWP（全球暖化/碳足迹）、WU（水资源消耗）、AP（酸化）、EP（水体富营养化）四个指标为例。



- 单个过程的贡献分析：以菌液培养过程的全球暖化指标的 Pareto 图和双饼图为例。





- 清单数据灵敏度分析：实景过程的各项消耗与排放对 LCA 结果的贡献率（即灵敏度），由此排序可以识别重要的消耗排放。

eFootprint 官方操作指南 积分: 60 563754472...

■ 传统生物水泥柱 目标与范围定义 生命周期模型 LCA结果 评审

累积贡献 灵敏度分析 完整性检查 数据质量评估 报告与发布

■ 基准流: 传统生物水泥柱-沙柱胶结-传统生物水泥柱(1Item(s))

| 过程名称         | 清单名称                                          | 上游数据类型 | GWP (kg CO2 eq) | WU (kg) | AP (kg SO2 eq) |
|--------------|-----------------------------------------------|--------|-----------------|---------|----------------|
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 菌液培养                                          | 实践UP   | 55.94%          | 14.92%  | 54.35%         |
| 菌液培养         | 电力                                            | 背景AP   | 54.56%          | 10.15%  | 52.01%         |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 电力 (移动源)                                      | 背景AP   | 18.29%          | 3.40%   | 17.47%         |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 胶结液配置                                         | 实践UP   | 24.90%          | 41.85%  | 23.69%         |
| 胶结液配置        | CaCl2                                         | 背景AP   | 15.49%          | 3.07%   | 8.70%          |
| 胶结液配置        | 尿素                                            | 背景AP   | 9.40%           | 36.15%  | 14.98%         |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 石英砂制备                                         | 背景AP   | 0.49%           | 39.84%  | 4.49%          |
| 菌液培养         | 硫酸铵                                           | 背景AP   | 1.07%           | 1.78%   | 2.33%          |
| 菌液培养         | 水                                             | 背景AP   | 0.01%           | 2.99%   | 0.01%          |
| 胶结液配置        | 水                                             | 背景AP   | 0.01%           | 2.62%   | 0.01%          |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 二氧化碳 (生物源) [排放到大气 (未指定类型, 长期)]                | 排放     | 0%              | 0%      | 0%             |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | CFC-11 [排放到大气 (未指定类型, 长期)]                    | 排放     | 0.38%           | 0%      | 0%             |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 氟氯 [排放到水体 (未指定类型, 长期)]                        | 排放     | 0%              | 0%      | 0%             |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | Particles (PM0.2 - PM2.5) [排放到大气 (未指定类型, 长期)] | 排放     | 0%              | 0%      | 0%             |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 化学需氧量 [排放到水体 (未指定类型, 长期)]                     | 排放     | 0%              | 0%      | 0%             |

1 - 15 of 21 items

#### 4、CLCD 数据质量评估

- 识别重要数据：eFootprint 计算每一项消耗或排放对各项 LCA 指标的灵敏度，然后按其最大的灵敏度排序。

eFootprint 官方操作指南 积分: 60 563754472...

■ 传统生物水泥柱 目标与范围定义 生命周期模型 LCA结果 评审

累积贡献 灵敏度分析 完整性检查 数据质量评估 报告与发布

■ 基准流: 传统生物水泥柱-沙柱胶结-传统生物水泥柱(1Item(s))

提示：评估灵敏度(绝对值)≥1%的清单，即可查看评估结果(忽略了灵敏度(绝对值)≤1%清单造成的不确定度)

全部 一键评估

| 过程名称         | 清单名称                       | 最大灵敏度                     | 评估状态 |
|--------------|----------------------------|---------------------------|------|
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 氟氯 [排放到大气 (未指定类型, 长期)]     | EP (kg PO43-eq):87.94%    | 已评估  |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 菌液培养                       | ADP (kg Sb eq):69.01%     | 已评估  |
| 菌液培养         | 电力                         | POFP (kg NMVOC eq):57.33% | 已评估  |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | CFC-11 [排放到大气 (未指定类型, 长期)] | ODP (kg CFC-11 eq):55.48% | 已评估  |
| 菌液培养         | CFC-11 [排放到大气 (未指定类型, 长期)] | ODP (kg CFC-11 eq):44.39% | 已评估  |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 胶结液配置                      | WU (kg):41.85%            | 已评估  |
| 传统生物水泥柱-沙柱胶结 | 石英砂制备                      | WU (kg):39.84%            | 已评估  |
| 胶结液配置        | 尿素                         | WU (kg):36.15%            | 已评估  |
| 菌液培养         | 硫酸铵                        | ADP (kg Sb eq):29.25%     | 已评估  |

- **不确定度评估：**eF/CLCD 系统采用谱系矩阵评估主要消耗和排放（灵敏度>1%）的不确定度，以及主要消耗连接的背景数据的匹配不确定度

清单数据不确定度评估

过程名称：传统生物水泥柱-沙柱胶结；清单名称：石英砂制备；数量单位：1.35(kg)

清单数据资料不确定度评估

关

清单数据基础不确定度（自定义）：± %

| 评估项      | 实型过程目标代表性 | 清单数据实际代表性 | 不确定度(±) |
|----------|-----------|-----------|---------|
| * 主要数据来源 | 代表设计方案... | 方案设定的数... | 5.00%   |
| * 时间代表性  | 2017      | 2017      | 0%      |
| * 地理代表性  | 中国        | 中国        | 0%      |
| * 技术代表性  | 过程名称...   | 工艺设备、主... | 0%      |

背景数据匹配不确定度评估

| 评估项       | 清单数据目标代表性   | 背景过程实际代表性 | 不确定度(±) |
|-----------|-------------|-----------|---------|
| * 主要数据来源  | 代表设计方案或试验数据 | 代表行业平均数据  | 5.00%   |
| * 时间代表性   | 2017        | 2013      | 5.00%   |
| * 地理代表性   | 中国          | 中国        | 0%      |
| * 种类规格代表性 | 消耗清单...     | 消耗与原料的... | 10.00%  |

评估

清单数据评估结果:±13.23%

清单数据不确定度评估

过程名称：传统生物水泥柱-沙柱胶结；清单名称：胶结剂配置；数量单位：0.8(kg)

清单数据资料不确定度评估

关

清单数据基础不确定度（自定义）：± %

| 评估项      | 实型过程目标代表性 | 清单数据实际代表性 | 不确定度(±) |
|----------|-----------|-----------|---------|
| * 主要数据来源 | 代表设计方案... | 方案设定的数... | 5.00%   |
| * 时间代表性  | 2017      | 2017      | 0%      |
| * 地理代表性  | 中国        | 中国        | 0%      |
| * 技术代表性  | 过程名称...   | 工艺设备、主... | 0%      |

评估

清单数据评估结果:±5.00%

- **LCA 结果的不确定度：**最终得到每项 LCA 指标结果的不确定度，如下图。用户可以根据不确定度结果，补充收集数据，迭代改进。

| 指标名称      | 缩写(单位)            | LCA结果   | 结果不确定度  | 上下限范围(95%置信区间)      |
|-----------|-------------------|---------|---------|---------------------|
| 气候变化      | GWP(kg CO2 eq)    | 1.48e0  | ±17.98% | [1.21e0 , 1.75e0]   |
| 初级能源消耗    | PED(MJ)           | 1.93e1  | ±18.47% | [1.58e1 , 2.29e1]   |
| 非生物资源消耗潜值 | ADP(kg Sb eq)     | 1.29e-6 | ±11.18% | [1.14e-6 , 1.43e-6] |
| 水资源消耗     | WU(kg)            | 2.65e1  | ±7.33%  | [2.45e1 , 2.84e1]   |
| 酸化        | AP(kg SO2 eq)     | 8.16e-3 | ±13.04% | [7.10e-3 , 9.23e-3] |
| 富营养化潜值    | EP(kg PO43-eq)    | 1.13e-2 | ±4.49%  | [1.08e-2 , 1.18e-2] |
| 可吸入无机物    | RI(kg PM2.5 eq)   | 2.70e-3 | ±11.42% | [2.39e-3 , 3.01e-3] |
| 臭氧层消耗     | ODP(kg CFC-11 eq) | 2.16e-6 | ±4.19%  | [2.07e-6 , 2.25e-6] |
| 光化学臭氧合成   | POFP(kg NMVOC eq) | 5.46e-4 | ±14.81% | [4.65e-4 , 6.27e-4] |



## 5、数据集适用范围

- 国内实验室（2017 年）做得的生物水泥大多是利用尿素分解菌诱导碳酸钙沉淀生产的传统生物水泥，因此绝大多数情况下实验室生产的传统生物水泥使均可采用本数据集所建立的水泥 LCA 模型。
- 传统生物水泥的能耗和排放量，很大程度上受我们的菌种酶活性影响，基于大量文献研究表明巴氏芽孢杆菌的脲酶活性较强，且应用较多，本次 LCA 分析的菌种主要是巴氏芽孢杆菌。对于一些通过基因工程改造后的菌可能并不适用。