

大气污染源头和过程控制技术 评价方法

*Evaluation method of air pollution source
and process control technology*

大气污染防治技术评价系列

南开大学 主编

2021年6月

目 录

| | |
|--|-----------|
| 1 总则 | 1 |
| 1.1 适用范围 | 1 |
| 1.2 评价目的 | 1 |
| 1.3 评价原则 | 1 |
| 1.4 工作程序 | 1 |
| 2 术语和定义 | 2 |
| 2.1 生命周期评价 Life Cycle Assessment (LCA) | 2 |
| 2.2 层次分析法 Analytic Hierarchy Process (AHP) | 3 |
| 3 生命周期评价 | 3 |
| 3.1 系统边界 | 3 |
| 3.2 清单分析 | 4 |
| 3.3 影响评价 | 5 |
| 4 节能减排效益评价 | 6 |
| 4.1 环境效益 | 6 |
| 4.2 经济效益 | 7 |
| 4.3 节能减排效果分析 | 7 |
| 5 综合评价 | 7 |
| 5.1 评价指标与权重 | 7 |
| 5.2 评分体系 | 9 |
| 5.3 综合评价计算 | 11 |
| 6 评价结论 | 12 |

1 总则

1.1 适用范围

大气污染源头和过程控制技术评价方法适用于对生产设备具有节能减排改造需求的工业企业，通过评价，工业企业能够对生产设备中能耗高或耗材多或污染大的部分进行优化改进；此外，通过对比改造前后设备生产单位产品的评价结果，可为工业企业建立改造方案提供参考。

1.2 评价目的

为评价我国当前大气污染源头和过程控制技术对生产设备的改造情况，淘汰和改进落后的技术和产品，为新技术创新和开发应用提供方法手段，制定大气污染源头和过程控制技术评价方法。

1.3 评价原则

本方法实施过程中应符合以下原则：（1）科学性原则；（2）实用性原则；（3）先进性原则。

1.4 工作程序

（1）通过调查接受评估的生产设备或系统，统计技术参数和生产单位产品耗材耗能和污染物排放情况，确定研究范围，在生命周期评价计算软件中建立模型，得出改造前后生产单位产品的能源消耗清单、主要资源消耗清单、主要污染物排放清单，通过清单分析可分析节能减排改造措施对控制源头和过程中产生的大气污染的影响；此外，在模型计算结果中也可得到各环境影响指标，用于评价和对比改造前后生产单位产品的污染物排放对各类环境问题的影响。

（2）通过对比改造前后生产设备产能、能耗、原材料使用量、污染物排放量等技术参数，可得出生产设备实施改造对增产、降耗、减排的环境效益，另一方面比较生产设备改造经济投入和改造带来的生产节支总额，可分析改造的经济

效益，从而实现对节能减排综合效益的评价。

(3) 对从源头和过程产生大气污染的生产过程建立了关于经济、技术、环境、资源等各方面综合性评价方法，采用层次分析法建立了三个层次的指标体系，调查所得各类指标取值情况，按照评分体系计算得出综合评分，从而对生产过程的节能减排改造实现综合评价。

(4) 从生命周期评价、节能减排效益评价、综合评价三个维度对改造源头和过程大气污染技术的评估，实现对改造前后生产过程、节能减排效益、综合绩效的考量，形成大气污染源头和过程控制技术评价结论。

大气污染源头和过程控制技术评价技术流程见下图：

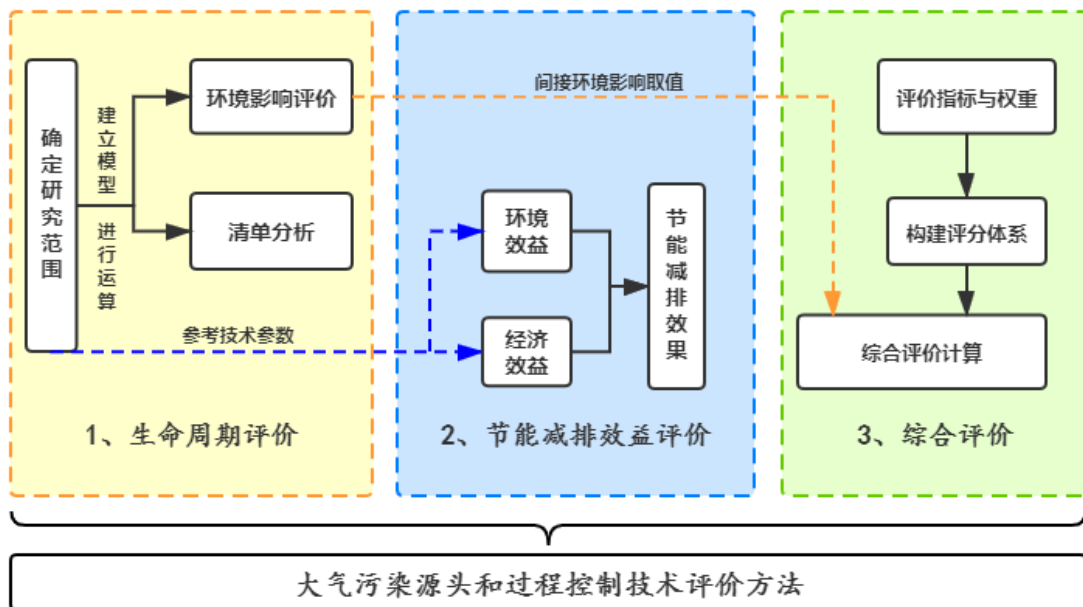


图 1.1 大气污染源头和过程控制技术评价技术流程图

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1 生命周期评价 Life Cycle Assessment (LCA)

量化分析和评估各种产品及技术在生命周期全过程（即生产消费全过程）的资源环境效率及潜在影响，从而为全过程协同改进和持续改进（即生命周期管理 LCM）提供分析方法、数据和决策支持。

2.2 层次分析法 Analytic Hierarchy Process (AHP)

根据问题的性质和要达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次的分析结构模型，从而最终使问题归结为最低层(供决策的方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要权值的确定或相对优劣次序的排定。

3 生命周期评价

3.1 系统边界

在生命周期评价中，研究范围的确定即界定产品系统边界。本评价方法中的生命周期评价依托于对比改造前后生产设备生产产品的生命周期，因此选择功能单位为生产设备产出单位产品，并规定系统边界如下：

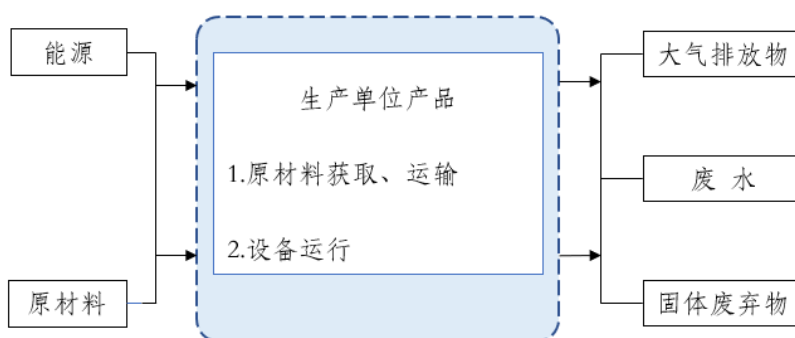


图 3.1 生产单位产品系统边界

此外，需统计生产设备相关工艺参数，并列入下表：

表 3-1 生产设备工艺参数统计示例表

| 工艺参数 | 单位 | 数值 |
|---------|--------------------|----|
| 产量 | t/年 | |
| 产生烟气量 | Nm ³ | |
| 各项污染物浓度 | mg/Nm ³ | |
| 年运行时间 | h | |
| 设备寿命 | 年 | |
| ... | ... | |

注：应依据实际情况收集尽可能丰富的工艺参数数据，包括但不限于上表

所列参数。参数主要囊括直接资源消耗、直接能源消耗、污染物排放以及必要的技术性能参数。

3.2 清单分析

统计生产单位产品消耗的能源、原材料以及排放的污染物，对改造前后生产单位产品分别列表：

表 3-2 生产单位产品清单分析表

| 序号 | 原材料 | 消耗量/kg | 年消耗量/kg |
|-----|-----|---------|---------|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| ... | | | |
| 序号 | 能源 | 消耗量/kwh | 年消耗量 |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| ... | | | |
| 序号 | 污染物 | 排放量 | 年排放量 |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| ... | | | |

根据以上调查结果，在 LCA 应用软件（如 GaBi、WebLCA）中对设备改造前后生产单位产品的过程分别建立计算模型，输出改造前后生产单位产品的耗能清单、主要资源消耗清单和主要污染物排放清单：

表 3-3 生产单位产品耗能清单

| | 原料能耗 | 运输能耗 | 生产加工能耗 |
|-------|------|------|--------|
| 能耗/MJ | | | |
| 总计/MJ | | | |

表 3-4 生产单位产品主要资源消耗清单

| 序号 | 物质名称 | 生产单位产品消耗量/kg |
|-----|------|--------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| ... | | |

表 3-5 生产单位产品主要污染物排放清单

| 类别 | 序号 | 物质名称 | 生产单位产品排放量/kg |
|-----------|-----|------|--------------|
| 向大气中排放的物质 | 1 | | |
| | 2 | | |
| | ... | | |
| 向水中排放的物质 | 1 | | |
| | ... | | |
| 向土壤中排放的物质 | 1 | | |
| | ... | | |

3.3 影响评价

清单分析的过程侧重于定量呈现评价对象在评价范围内的输入和输出，而影响评价是对清单结果的整理和分析，通过量化和分类环境影响负荷，系统地呈现影响情况。主要步骤有影响分类，特征化，归一化和加权评估。

影响分类的依据是按照 CML-2001 评价法中的环境影响指标，将系统各阶段的环境排放归为以下几类，包括：

不可再生资源消耗（Abiotic Depletion，简称 ADP）

全球变暖（Global Warming Potential，简称 GWP）

酸化效应（Acidification Potential，简称 AP）

水体富营养化（Eutrophication Potential，简称 EP）

新鲜水水生生态毒性（Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential，简称 FAETP）

人体健康损害（Human Toxicity Potential，简称 HTP）

海洋生态毒性（Marine Aquatic Ecotoxicity Potential，简称 MAETP）

臭氧层破坏（Ozone Layer Depletion Potential，简称 ODP）

光化学烟雾形成（Photochemical Ozone Creation Potential，简称 POCP）

陆地生态毒性（Terrestrial Ecotoxicity Potential，简称 TETP）

环境影响中的各种因素采用一种影响特征因素进行衡量和表达的步骤称为特征化。在 LCA 应用软件中打开平衡表，可获得生产单位产品过程的环境潜值表。各类环境影响潜值除以选定基准值计算得出归一化结果，可采用的基准值有特定范围内人均排放总量或资源消耗总量、特定范围内排放总量和资源消耗量等。

本文表格中按照 Gabi 软件提供的 2000 年全球人均排放总量为基准值计算。加权评估是通过对环境影响类型赋予不同的权重从而让不同环境影响类型可以相互比较大小。本文表格中所示权重是由 Gabi 软件根据前面所选择的基准值提供的。

表 3-6 生产单位产品环境影响潜值表

| 环境影响指标 | 单位 | 环境影响潜值 |
|----------------|----------------------------|--------|
| ADP (elements) | kg Sb-Equiv. | |
| ADP (fossil) | MJ | |
| AP | kg SO ₂ -Equiv. | |
| EP | kg Phosphate-Equiv. | |
| FAETP | kg DCB-Equiv. | |
| GWP | kg CO ₂ -Equiv. | |
| HTP | kg DCB-Equiv. | |
| MAETP | kg DCB-Equiv. | |
| POCP | kg Ethene-Equiv. | |
| TETP | kg DCB-Equiv. | |

表 3-7 环境影响潜值归一化及加权过程

| 环境影响指标 | 单位 | 环境影响潜值 | 标准化基准 | 标准化结果 | 权重因子 | 加权结果 |
|----------------|----------------------------|--------|-----------------------|-------|------|------|
| ADP (elements) | kg Sb-Equiv. | | 3.61×10^8 | | | |
| ADP (fossil) | MJ | | 3.8×10^{14} | | | |
| AP | kg SO ₂ -Equiv. | | 2.39×10^{11} | | | |
| EP | kg Phosphate-Equiv. | | 1.58×10^{11} | | | |
| FAETP | kg DCB-Equiv. | | 2.36×10^{12} | | | |
| GWP | kg CO ₂ -Equiv. | | 4.22×10^{13} | | | |
| HTP | kg DCB-Equiv. | | 2.58×10^{12} | | | |
| MAETP | kg DCB-Equiv. | | 1.95×10^{14} | | | |
| POCP | kg Ethene-Equiv. | | 3.68×10^{10} | | | |
| TETP | kg DCB-Equiv. | | 1.09×10^{12} | | | |

对加权后的环境影响指标进行排序，得出对环境影响最大的指标。

4 节能减排效益评价

4.1 环境效益

对于生产设备而言，进行节能减排改造后相比于原有的设备，生产单位产品的能源消耗降低、污染物排放减少，可以认为对环境产生了正向影响，由此称之为环境效益。

根据实际情况调查，可获得设备改造前后生产单位产品的能源消耗情况和污染物排放情况，计算得出降耗/减排百分比，分析节能减排的环境效益。

4.2 经济效益

分析设备改造过程整体的经济效益考虑经济投入和节约支出两方面。一方面，对于生产设备的改造需要一定的经济投入，如前期实验、对设备的改造、人工等费用；另一方面，经过改造的生产设备，往往具有增产的效果，因此具有一定的经济效益，此外，由于污染物排放量的降低，工业企业所缴纳的环境税也相应减少，两者相加称作节约支出总额。

4.3 节能减排效果分析

环境效益和节约支出总额属于正向指标，其值越大说明生产设备改造的环境绩效越高，经济投入属于负向指标，其值越小说明生产设备改造的成本越低。在实际改造过程中，应根据企业实际环境充分考虑，根据不同的侧重点进行客观合适的选择。

5 综合评价

5.1 评价指标与权重

大气污染防治技术评价指标参照体系（附录 1）所有指标划分为目标层、准则层、状态层和变量层 4 个层次，总目标即目标层为大气污染防治技术绩效评价指标体系，总目标又分为资源指标、能源指标、原辅材料指标、经济指标和生产副产品指标 5 个准则层，最低层变量层由 41 个指标组成。

运用系统论分析法收集目前大气污染防治源头控制技术方面的指标、参数，

并对其基本要素、存在问题进行分析、比较和综合，提炼共性和代表性指标，设为定量评价指标；对不易量化指标，设置定性评价指标。

结合源头和过程控制技术实施现状将评价指标分为经济指标、技术指标、环境指标和资源能源指标四个类别，即一级准则层。其次，将各一级指标进一步划分出二级指标以及尽可能全面的三级指标，以此构建包括目标层、准则层和指标层在内的初步指标体系。由于涉及大量定性指标以及环境等问题，因此采取 Delphi 专家调查法对初步建立的指标体系进行优化筛选，调查表详见附录 2。筛选的过程包括两部分，一是对提供的指标进行建议和修改，去除重复或者不必要评价的指标，补充遗漏指标；二是根据评价指标重要性程度进行赋值。

最终，指标体系分为三级，间接环境影响权重由 3.3 节得出，其他指标权重采用层次分析法中九层标度原则结合 Delphi 专家调查法计算得出，如表 5-1 所示为烧结技术改造示例综合评价指标与权重（本文中含有“烧结技术改造示例”的内容只适用于烧结工艺，其他源头和过程控制技术需要按实际情况进行适当调整）。

表 5-1 烧结技术改造综合评价指标与权重

| 一级指标 | 二级指标 | 评价指标 | 权重 |
|---------------|--------|---------------------|--------|
| 经济指标 | 生产成本 | 原辅材料成本 | 0.0186 |
| | | 能源成本 | 0.0114 |
| | | 人工成本 | 0.0041 |
| | | 排污缴纳成本 | 0.0114 |
| | 运行维护成本 | 设备运行成本 | 0.0455 |
| 技术指标 | 技术性能 | 厚料层技术 | 0.1022 |
| | | 智能烧结控制技术 | 0.0851 |
| | | 固体燃料使用量 | 0.0571 |
| | | 电力消耗 | 0.0570 |
| | | 工序能耗 | 0.0565 |
| | | 降低漏风率技术 | 0.0575 |
| | | 保温措施 | 0.0341 |
| | | 粒度组成 | 0.0393 |
| | | 余热回收率 | 0.0284 |
| | | 烧结料湿度 | 0.0284 |
| 环境指标 | 直接环境影响 | PM 2.5 排放量 | 0.0605 |
| | | NO _x 排放量 | 0.0605 |
| | | SO ₂ 排放量 | 0.0605 |
| | 间接环境影响 | 全球变暖 (GWP) | 0.0075 |
| | | 酸化效应 (AP) | 0.0113 |
| | | 水体富营养化 (EP) | 0.0105 |
| | | 新鲜水水生生态毒性 (FAETP) | 0.0101 |
| | | 人体健康损害 (HTP) | 0.0097 |
| | | 海洋生态毒性 (MAETP) | 0.0101 |
| | | 臭氧层破坏 (ODP) | 0.0111 |
| | | 光化学烟雾形成 (POCP) | 0.0106 |
| 陆地生态毒性 (TETP) | 0.0101 | | |
| 资源指标 | 资源指标 | 水资源消耗量 | 0.0227 |
| | | 矿产资源消耗潜值 | 0.0227 |
| | 能源指标 | 化石燃料消耗潜值 | 0.0455 |

注：表中“↑”代表正向指标，即指标值越高越好；“↓”代表负向指标，指标值越低越好。

5.2 评分体系

一级指标中，经济指标和技术指标（无法定量测量的部分指标）视为定性指标，采用图 5.1 所示标准进行赋值。对于正向指标，指标值越高，指标所赋

数值越大；对于负向指标，赋值情况则相反。

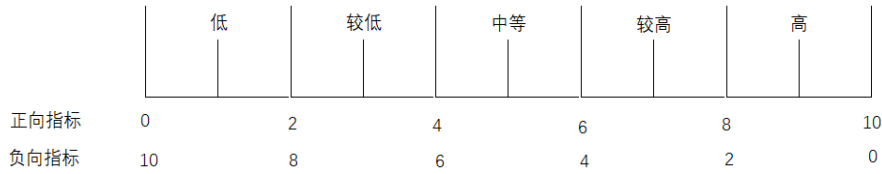


图 5.1 定性指标赋值表

环境指标中直接环境影响指标以及能够实现定量测量的技术指标采用九级标度法，烧结技术改造示例赋值区间划分如下：

表 5-2 烧结技术改造直接环境影响指标赋值表

| 指标 | 9—7 | 6—4 | 3-1 |
|---------------------|------------|------------|------------|
| 厚料层技术 | ≥800 mm | ≥700 mm | ≥600 mm |
| 固体燃料使用量 | ≤41 kgce/t | ≤43 kgce/t | ≤55 kgce/t |
| 电力消耗 | ≤40 kwh/t | ≤45 kwh/t | ≤50 kwh/t |
| 工序能耗 | ≤45 kgce/t | ≤50 kgce/t | ≤58 kgce/t |
| 降低漏风率技术 | 漏风率≤35% | 漏风率≤43% | 漏风率≤50% |
| PM 2.5 排放量 | ≤0.04 kg/t | ≤0.08 kg/t | ≤0.20 kg/t |
| SO ₂ 排放量 | ≤0.09 kg/t | ≤0.13 kg/t | ≤0.50 kg/t |
| NO _x 排放量 | ≤0.12 kg/t | ≤0.25 kg/t | ≤0.74 kg/t |

对于间接环境影响以及化石燃料和矿产资源消耗潜值指标，其数值由生命周期评价软件计算得到，根据数量级进行赋值区间划分。烧结技术改造过程选择生产单位产品进行生命周期评价，环境影响潜值指标如下表，其他源头和过程控制技术若以生产单位产品作为功能单位，可参考下表，若非生产单位产品，应按实际情况作出区间调整。

表 5-3 烧结技术改造环境影响潜值指标赋值表

| 赋值区间 | 9-7 | 6-4 | 3-1 |
|-------|-------|-----------|-------|
| 指标值区间 | ≤E-11 | E-08~E-11 | ≥E-08 |

对于水资源消耗指标，由生命周期评价软件计算得出，同样根据数量级进行划分。区间是否需要调整同表 5-3 评价标准。

表 5-4 烧结技术改造水资源消耗指标赋值表

| 赋值区间 | 9-7 | 6-4 | 3-1 |
|-------|-------|-----------|-------|
| 指标值区间 | ≤E+05 | E+05~E+10 | ≥E+10 |

5.3 综合评价计算

根据 5.2 对大气污染源头和过程控制技术改造前后进行各项评分，烧结技术改造示例综合评价评分如下表：

表 5-5 烧结技术改造综合评价评分表

| 评价指标 | 改造前 | 改造后 | 指标权重 |
|---------------------|-----|-----|--------|
| 原辅材料成本 | | | 0.0186 |
| 能源成本 | | | 0.0114 |
| 人工成本 | | | 0.0041 |
| 排污缴纳成本 | | | 0.0114 |
| 设备运行成本 | | | 0.0455 |
| 厚料层技术 | | | 0.1022 |
| 智能烧结控制技术 | | | 0.0851 |
| 固体燃料使用量 | | | 0.0571 |
| 电力消耗 | | | 0.0570 |
| 工序能耗 | | | 0.0565 |
| 降低漏风率技术 | | | 0.0575 |
| 保温措施 | | | 0.0341 |
| 粒度组成 | | | 0.0393 |
| 余热回收率 | | | 0.0284 |
| 烧结料湿度 | | | 0.0284 |
| PM 2.5 排放量 | | | 0.0605 |
| NO _x 排放量 | | | 0.0605 |
| SO ₂ 排放量 | | | 0.0605 |
| 全球变暖 (GWP) | | | 0.0075 |
| 酸化效应 (AP) | | | 0.0113 |
| 水体富营养化 (EP) | | | 0.0105 |
| 新鲜水水生生态毒性 (FAETP) | | | 0.0101 |
| 人体健康损害 (HTP) | | | 0.0097 |
| 海洋生态毒性 (MAETP) | | | 0.0101 |
| 臭氧层破坏 (ODP) | | | 0.0111 |
| 光化学烟雾形成 (POCP) | | | 0.0106 |
| 陆地生态毒性 (TETP) | | | 0.0101 |
| 水资源消耗量 | | | 0.0227 |
| 矿产资源消耗潜值 | | | 0.0227 |
| 化石燃料消耗潜值 | | | 0.0455 |
| 综合加权值 (Ez) | | | |

最后对各指标评分进行加权计算，按式 (1)：

$$Ez = \sum e_i w_i \quad (1)$$

式中：

Ez —综合加权值；

e_i —各指标评分值；

w_i —各指标权重。

6 评价结论

评价结论是对评价工作成果的归纳和总结，应明确、简洁、清晰。

在大气污染源头和过程控制评价结论中应重点明确以下内容：

(1) 某生产设备的能耗清单、主要资源消耗清单、主要污染物排放清单、各类环境影响潜值，分析能源消耗、资源消耗、污染物排放的主要过程和环境影响潜值较大的指标，以明确某生产技术的改进方向。

(2) 对比改造前后生产设备产能、能耗、原材料使用量、污染物排放量等技术参数，得出生产设备改造的环境效益；比较生产设备改造经济投入和改造带来的生产节支总额，分析改造的经济效益，实现对节能减排综合效益的评价。

(3) 对某生产设备改造前后的综合评价总评分进行比较，得出改造前后生产技术经济、技术、环境、资源四个方面的综合性能优化程度。

(4) 结合以上三个维度的分析，对某生产技术提出改进方案，为新技术研发与利用提供新思路。

附录一：大气污染防治技术评价指标参照体系

| 目标层 | 准则层 | 状态层 | 变量层 |
|------------------------------|-----------------|-------------|--|
| 大气污染防治 技术评价 指标 体系 A | 资源指标 B01 | 资源消耗 C01 | D01 单位污染物消耗水资源量 (t) D02 土地资源消耗 (m ²) |
| | | 资源消耗利用率 C02 | D03 水资源利用率 (%) D04 水资源回收利用率 (%) |
| | 能源指标 B02 | 能源消耗 C03 | D05 单位污染物一次能源消耗量 (t) D06 单位污染物二次能源消耗量 (t) D07 单位污染物新能源消耗量 (t) D08 单位污染物耗能工质消耗量 (t) |
| | | 能源利用率 C04 | D09 一次能源利用率 (%) D10 二次能源利用率 (%) D11 新能源利用率 (%) D12 耗能工质利用率 (%) |
| | | 能源消费结构 C05 | D13 清洁能源占能源消费总量的比例 (%) D14 煤炭消费量占能源消费总量的比例 (%) |
| | 原辅材料指 标 B03 | 原辅材料消耗 C06 | D15 原辅材料单位消耗量 (t) D16 催化剂单位消耗量 (t) |
| | | 原辅材料利用率 C07 | D17 原辅材料回收利用率 (%) D18 催化剂的重复利用率 (%) D19 原辅材料利用率 (%) D20 催化剂利用率 (%) |
| | | 原辅材料性质 C08 | D21 毒性 D22 再生性 D23 是否可回收利用 D24 是否规定相关法律文件 |
| | 经济指标 B04 | 投入 C09 | D25 设备成本 (万元) D26 设备维修费用 (万元) D27 购买能源资源、原辅材料费用 (万元) D28 专业人员培训费用 (万元) D29 环保专项资金 (万元) |
| | | 产出 C10 | D30 少缴纳的排污费 (万元) D31 设备折旧费 (万元) |
| | | 潜在经济 C11 | D32 工人健康的改善、减少了医疗费用 (万元) D33 提高企业声誉, 扩大市场占有率 |
| | 生产副产品 指标 B05 | 副产物的性质 C12 | D34 毒性 D35 再生性 D36 是否可回收利用 |

| | | | |
|--|-------------|-------------|--|
| | | | D37 是否规定相关法律文件 |
| | | 副产物产量 C13 | D38 减排单位污染物产生的副产物的量 (t) |
| | 环境指标 B06 | 污染物减排比例 C14 | D39 二氧化硫减排比例 (%) D40 氮氧化物减排比例 (%) D41 粉尘减排比例 (%) |