

双碳目标下钢铁行业清洁生产评价中降碳指标比较研究

——以南京某个钢铁厂为例

文松赫^{1,2}, 吴雨晴¹, 任万颀¹, 周颖¹, 朱国伟^{1*}

¹南京师范大学环境学院, 江苏 南京

²金策工业综合大学, 朝鲜 平壤

收稿日期: 2022年12月25日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

清洁生产在中国各行各业得到广泛应用, 在整个生产活动的节能减排评价和控制中发挥着重要作用。因此, 应进一步发展清洁生产以实现双碳目标。发展清洁生产的根本问题是更新各行业的清洁生产指标。本文以第二产业为例, 在评价钢铁行业清洁生产指标体系中减碳项目现状的基础上, 强化了以基本降碳项目为主的具体指标的必要性, 如一些与能源相关的低碳项目指标。通过比较近年来国内外最新的碳减排相关规范和指标, 探索持续加入的新降碳项目, 得出实际存在改进空间的结论。最后, 根据综合分析, 建议今后加强碳减排指标项目建设。

关键词

清洁生产, 指标体系, 钢铁行业

Comparative Study on Carbon Reduction Indicators in Cleaner Production Assessment of Steel Industry under Dual Carbon Targets

—A Steel Plant in Nanjing as an Example

Songhyok Mun^{1,2}, Yuqing Wo¹, Wandi Ren¹, Ying Zhou¹, Guowei Zhu^{1*}

¹School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

²Kim Chaek University of Technology, Pyongyang Democratic People's Republic of Korea

*通讯作者。

文章引用: 文松赫, 吴雨晴, 任万颀, 周颖, 朱国伟. 双碳目标下钢铁行业清洁生产评价中降碳指标比较研究[J]. 可持续发展, 2023, 13(1): 324-335. DOI: 10.12677/sd.2023.131036

Abstract

Clean production is widely used in various industries in China and plays an important role in the evaluation and control of energy conservation and emission reduction of the entire production activities. Therefore, further develop clean production and quickly achieve the dual carbon goal. The basic problem of developing cleaner production is to update the cleaner production indicators of various industries. On the basis of evaluating the current situation of carbon reduction items in the cleaner production indicator system for the steel industry in the case of the secondary industry, this paper strengthens the necessity of specific indicators focusing on basic carbon reduction items, such as some low-carbon project indicators related to energy. In recent years, the latest international and domestic carbon reduction related specifications and indicators are compared and new carbon reduction projects that continue to be joined are explored to draw a conclusion that there is actually-room for improvement. Finally, according to the comprehensive analysis, it is suggested to strengthen the carbon reduction indicator project in the future.

Keywords

Clean Production, Indicator System, Steel Industry

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前工业碳排放量占全球温室气体排放量来源的 30% 以上。其中有近一半是来自炼钢、水泥等一些大型企业[1] [2]。钢铁行业对于实现双碳目标具有重要的地位, 中国努力创新钢铁行业低碳发展示范, 在 2020 年期间钢铁行业碳排放量占全国产业比率达 16% [3]。因此, 本文以钢铁行业清洁生产评价指标体系为例, 分析了清洁生产中降碳项目现状。

根据中国钢铁行业清洁生产评价指标体系, 将清洁生产指标权重分配如下: 生产工艺装备及技术(权重 0.15)、资源与能源消耗(权重 0.20)、节能装备技术(权重 0.20)、产品特征(权重 0.05)、污染物排放控制(权重 0.15)、资源综合利用(权重 0.15)、清洁生产管理(权重 0.10)。为了达到减污降碳的最终目标, 对企业的清洁生产评价中, 资源与能源消耗和资源综合利用等评价权重占比达 40% 以上, 因此在清洁生产审核评价中, 重点审核内容应为资源能源消耗和排放。关于钢铁行业中重点降碳任务方面, 具有高炉、炼钢、电炉短流程等[4], 通过对钢铁行业能耗利用评价现状的分析, 发现清洁生产指标方式是钢铁行业降碳项目评价的重要方法。因此, 本文对钢铁行业清洁生产评价指标的资源能源消耗权重及基准值来分析清洁生产评价现状, 为双碳目标下钢铁行业清洁生产指标的未来发展方向提出建议。

2. 分析方法

2.1. 指标定量计算

用指标定量计算方法分析了资源能源消耗[5], 大部分行业单位产品能耗是指企业内部在一定的计量

时间内(年), 在生产全过程中, 生产设备消耗的能量与产品产量的比值。

$$W_{\text{能}} = \frac{C}{G} \quad (1)$$

式中: W ——单位产品能耗(电, 燃料), (kW·h/Kg、kg/t 或 kgce/t);

C ——企业内部在一定的计量时间内(年), 生产设备消耗的能源量(kW·h/Kg、kg/t 或 kgce/t);

G ——产品总产量, (kg 或 t)。

单位产品新鲜水耗是指企业内部在一定的计量时间内(年), 在产品生产全过程中, 水耗量与产品总产量的比值。

$$W_{\text{水}} = \frac{V}{G} \quad (2)$$

式中: $W_{\text{水}}$ ——单位产品新鲜水耗, m^3/kg 或 m^3/t ;

V ——新鲜水总用量(或回水量), m^3 ;

G ——产品总产量, kg (或 t)。

单位产品可再生能源、二次能源发电、清洁燃料等一些新能源耗量指在一定的计量时间内(年), 在生产全过程中, 生产设备消耗的总能量中产品产量的比率。

$$W_{\text{其}} = \frac{R}{C} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $W_{\text{其}}$ ——单位产品其他能耗比率%;

C ——企业内部在一定的计量时间内(年), 生产设备消耗的总能源量(kW·h/Kg、kg/t 或 kgce/t);

R ——其他能耗量, (kW·h/Kg、kg/t 或 kgce/t)。

2.2. 评估指标水平法

本研究只涉及降碳项中占基本份额的资源能源消耗。为了评判 2015~2020 年期间南京某钢铁企业的资源能源消耗的现状来评估一下清洁生产指标水平, 当定量指标采用的模糊综合判断模型(隶属函数)如式(4)所示[6] [7]。

$$Y_{gk}(\delta_{ij}) = \begin{cases} 1, & \delta_{ij} \in G_k \\ 0, & \delta_{ij} \notin G_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: δ_{ij} 为第 i 年资源能源消耗一级指标下的第 j 个二级指标;

G_k 为二级指标基准值, 其中 G_1 为 I 级水平, G_2 为 II 级水平, G_3 为 III 级水平;

$Y_{gk}(\delta_{ij})$ 为二级指标 δ_{ij} 对于级别 G_k 的隶属函数;

根据清洁生产指标结构条件下 $k=1, 2, 3$

如公式(4)所示, 若指标 δ_{ij} 满足级别 G_k , 则隶属函数的值为 1 否则 0。

根据隶属函数计算式和钢铁行业实际值计算得到二级矩阵。

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{m1} & \delta_{m2} & \cdots & \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

设权重向量 $\omega_j = [\omega_{j1}, \omega_{j2}, \dots, \omega_{jm}]$ ，乘以 δ_{ij} 得到以及评估模型

$$\bar{\delta}_{ij} = \omega_j \times \delta_{ij} = [\omega_{j1}, \omega_{j2}, \dots, \omega_{jm}] \times \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{m1} & \delta_{m2} & \dots & \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

同理，计算行业清洁生产指标水平的第一级综合评估：

$$\theta_i = \omega \times \bar{\delta}_i \quad (7)$$

ω 表示为一级指标权重； $\bar{\delta}_i$ 表示为一级矩阵； θ_i 表示为等级隶属度矩阵。

最后利用归一化法得到隶属度矩阵 ϕ_i 。

为了评估行业清洁生产最终水平采取级别特征值法： G_k ($k=1,2,\dots,n$) 的变量是 k ，级别特征值计算式如下

$$E_i = (1, 2, \dots, n) \times (\phi_i)^T = \sum_{k=1}^n n\phi_{ik} \quad (8)$$

由式(8)可以知道行业资源能源消耗指标的级特征值 E_i 能满足 $1 \leq E_i \leq n$ ；

$[E_i]$ 表示 i 年行业资源能源消耗的 g_k 级清洁生产水平。

最后按照二元语义比较关系评估钢铁企业资源能源消耗的清洁生产水平。

二元语义评估的结果该钢铁企业特征值 E_i 满足：

$$P - 0.5 \leq E_i < P \quad (9)$$

则评估资源能源清洁生产水平为第 g_p 级，偏差值表示为 $\beta_{ip} = E_i - P$ ，

即 $-0.5 \leq \beta_{ip} < 0.5$ 。确定二元有序组： (G_p, β_{ip}) ， $\beta_{ip} \in (-0.5, 0.5)$ 。

由式(9)可以指定企业资源能源消耗的级别特征值。也可综合评判清洁生产指标达到的等级。

2.3. 对比分析法

对比分析法是通过各种社会、经济、环境指标对比揭示指标数量关系、确定数量差异的一种方法。对比分析法的作用在于揭露矛盾、评价水准、解释不足，挖掘潜力。可以分析清洁生产现行指标与其他有关环境控制指标规范之间状况[8]。

- 1) 对比分析法阶段：实际指标与其它选择对象指标对比，调查先进指标的差距程度；
- 2) 历史指标对比：考察行业清洁生产水平发展变化实况；
- 3) 本行业实际指标与同行行业指标比较：探索该行业在同行行业清洁生产指标中的水准与地位。

$$\bar{\delta}_{2n} = \frac{\sum_{t=1}^n \delta_{2n}}{n} \quad (10)$$

$$\Delta\delta = \bar{\delta}_{2n} - \delta_n \quad (11)$$

式中 $\bar{\delta}_{2n}$ 为清洁生产指标体系中二级指标中单位资源能耗值的平均值；

δ_{2n} 为二级指标 s 次单位消耗值；

δ_s 为同类其他先进水平值；

$\Delta\delta$ 为产业清洁生产指标与其他先进水平差值，根据清洁生产指标体系结构， $t=1, 2, 3$ 。

运行将清洁生产指标对比分析法时，应注意指标内涵与组成、计价权值标准、时期幅度和计算方法

的可比较性。

3. 钢铁企业清洁生产水平评估

国内钢铁行业清洁生产指标体系中资源能源消耗指标情况如表 1 所示。

Table 1. Weights and benchmark values of resource and energy consumption of cleaner production evaluation indicators in China's iron and steel industry

表 1. 中国钢铁行业清洁生产评价指标体的资源能源消耗权重及基准值

序号	指标项	分值权重 (w_j)	一级 基准值	二级 基准值	三级 基准值
1	焦化工序能耗, kgce/t焦	0.3	≤115	≤125	≤155
2	高炉燃料比, kg/t铁	0.2	≤495	≤515	≤540
3	球团工艺能耗, kgce/t矿	0.1	≤21	≤26	≤36
4	烧结工序能耗, kgce/t矿	0.2	≤50	≤53	≤56
5	炼铁工序能耗, kgce/t铁	0.35	≤380	≤417	≤446
6	转炉炼钢工序能耗, kgce/t钢	0.2	≤-20	≤-8	≤0
7	转炉炼钢钢铁料消耗, kg/t	0.1	≤1060	≤1080	≤1100
8	生产取水量, m ³ 水/t钢	0.2	≤3.5	≤3.8	≤4.1
9	二次能源发电量占总耗电量比率, %	0.15	≥45	≥35	≥25
10	热风炉风温, °C	0.1	≥1240	≥1200	≥1180

根据清洁生产评分中资源能源消耗定量式(1)、(2)、(3), 计算出南京市某钢铁企业 2015~2020 年状况, 如表 2 所示。

Table 2. Energy consumption of a steel industry in Nanjing

表 2. 南京某钢铁行业能耗情况

序号	指标项	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	焦化工序能耗, kgce/t焦	71.5	100.9	106.1	103.9	113.2	113.3
2	烧结工序能耗, kgce/t矿	52.8	54.7	54.1	54.4	48.9	48.2
3	球团工艺能耗, kgce/t矿	29	28.5	27	25	25	22
4	炼铁工序能耗, kgce/t铁	402.7	413.6	406.2	403.4	408.7	391.1
5	高炉燃料比, kg/t铁	499.5	500.2	501.3	498.3	510	515
6	转炉炼钢工序能耗, kgce/t钢	-10.0	-9.9	-11.2	-12.6	-14.5	-14.3
7	转炉炼钢钢铁料消耗, kg/t	1101.8	1108.5	1104.1	1098.3	1104.9	1096.2
8	生产取水量, m ³ 水/t钢	3.17	2.90	2.96	2.89	3.0	2.73
9	二次能源发电量占总耗电量比率, %	49.2	58.85	51.99	48.29	52.32	55.29
10	热风炉风温, °C	1155.0	1159.8	1150.8	1164.6	1169.9	1176.6

为了评判在 2015~2020 年期间南京某钢铁企业的资源能消耗现状, 分析了清洁生产指标水平, 根据表 2 和表 3, 可确定 $j = k = n = 3$ 、权重向量 ω_j 。把 $\delta_{年份}$ 来表示 δ_{ij} , 运用公式(4~6)来计算 2015~2020 年期间该企业资源能源消耗的二级模糊评估矩阵。

$$\overline{\delta}_{2015} = \omega_j \times \delta_{2015} = [0.16, 0.11, 0.05, 0.11, 0.18, 0.11, 0.05, 0.11, 0.07, 0.057] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [0.34, 0.85, 0.9]$$

同理，分别将 $\delta_{2016}, \delta_{2017}, \delta_{2018}, \delta_{2019}, \delta_{2020}$ 与 ω_j 相乘可进行该钢铁企业资源能源消耗项的二级综合多指标评估，如下：

$$\overline{\delta}_{2016} = \omega_j \times \delta_{2016} = [0.34, 0.74, 0.9]$$

$$\overline{\delta}_{2017} = \omega_j \times \delta_{2017} = [0.34, 0.79, 0.9]$$

$$\overline{\delta}_{2018} = \omega_j \times \delta_{2018} = [0.39, 0.79, 0.9]$$

$$\overline{\delta}_{2019} = \omega_j \times \delta_{2019} = [0.34, 0.79, 0.79]$$

$$\overline{\delta}_{2020} = \omega_j \times \delta_{2020} = [0.39, 0.79, 0.89]$$

本文只要评估关于清洁生产指标体系中资源能源消耗水平，因此采用二级综合多指标充分评判该钢铁行业的资源消耗情况，因此可无视一级模糊指标评估过程，故该分析中直接将 $\overline{\delta}_{\text{年份}}$ 代替 θ_i 。归一化法计算 $\overline{\delta}_{\text{年份}}$ 获得 ϕ_i ，如 ϕ_i 表示 $\phi_{\text{年份}}$ ：

$$\phi_{2015} = [0.163, 0.407, 0.430]$$

$$\phi_{2016} = [0.172, 0.373, 0.454]$$

$$\phi_{2017} = [0.167, 0.390, 0.443]$$

$$\phi_{2018} = [0.188, 0.380, 0.432]$$

$$\phi_{2019} = [0.178, 0.411, 0.411]$$

$$\phi_{2020} = [0.188, 0.382, 0.430]$$

为客观地评价钢铁企业资源能源消耗的清洁生产水平，运用式(8)计算级别特征值为如下所示。

$$E_{2015} = (1, 2, 3)(\phi_{2015})^T = 2.268$$

$$E_{2016} = (1, 2, 3)(\phi_{2016})^T = 2.283$$

$$E_{2017} = (1, 2, 3)(\phi_{2017})^T = 2.276$$

$$E_{2018} = (1, 2, 3)(\phi_{2018})^T = 2.245$$

$$E_{2019} = (1, 2, 3)(\phi_{2019})^T = 2.234$$

$$E_{2020} = (1, 2, 3)(\phi_{2020})^T = 2.241$$

其次采用二元语义评估方法分析评估, 则由式(8)可知该钢铁企业的等级特征值 E_i , 满足约束条件, 即 $1 \leq E_i \leq n$ 。用 $[E_i] = P$ 来评估资源能源消耗的 g_p 级的结果如下:

2.268, 2.283, 2.276, 2.245, 2.234, 2.241, 最终取值全为 2, 那么钢铁行业清洁生产中资源能源消耗水平可评估为二级。

再由式(9)可以将钢铁企业资源能源消耗的级别特征值表示为二元语义组的形式, 分别为:

$$E_{2015} = (2, +0.268)$$

$$E_{2016} = (2, +0.283)$$

$$E_{2017} = (2, +0.276)$$

$$E_{2018} = (2, +0.245)$$

$$E_{2019} = (2, +0.234)$$

$$E_{2020} = (2, +0.241)$$

$$-0.5 \leq 0.268, 0.283, 0.276, 0.245, 0.234, 0.241 < 0.5$$

根据基于二元语义的清洁生产审核评级方法做出的规定, 同为偏差值, 偏差值越小则该年份的清洁生产水平越好, 即钢铁企业资源能源消耗 2015~2020 期间的指标同属于国内清洁生产先进水平, 但相比而言它们之间的清洁生产水平有所差距。2016 年清洁生产水平比 2015 年稍差, 2017 比 2016 稍好, 在此 2020 年和 2015 的变化只有 0.027, 如此显示整个期间的水平提升速度极缓慢, 对 2030 年前碳达峰目标要求而言, 仍然不够。至此结果提示, 当前提升资源能源消耗水平以外, 还需要补充加入其他促进降碳的新方案, 使碳峰值提前实现。

为了直接分析该钢铁厂的生产过程中资源能源消耗具体情况采用对比分析, 根据表 1 和表 2, 如图 1 所示。

如下图 1 所述, 该钢铁企业清洁生产措施初期已经达到清洁生产资源和能源指标标准, 根据钢铁行业清洁生产评价指标, 该企业 2014 年清洁生产实施后焦化工艺能耗 2015~2020 年全年得分超过一级基准值。2015 年烧结工艺能耗为二级基准值, 2016 年至 2018 年期间为三级基准值, 2019 年至 2020 年超过了一级基准值。6 年期间炼铁工艺和高炉燃料为二级基准值。转炉炼钢工艺、生产取水量、二次能源发电量占总用电量的占比均高于一级基准值。6 年期间转炉炼钢料为二级基准值, 热风炉风温尚未达到三级基准值。因此, 行业清洁生产评价基准值在焦化、取水、二次能源和转炉炼钢方面得分较高。但有些部分(焦化工序、高炉工序等)能耗较高的项出现超过基准值后未有进一步提升, 反而减少的现象。这是原来大部分清洁生产指标标准以中国钢铁企业现行生产条件为基础, 对清洁生产能耗评价不高的结果。但如今, 与双碳目标规定的条件相比, 清洁生产政策要想发挥自己的作用, 就要进一步提高标准值。

据 2020 年全球钢铁协会发布的数据, 全球钢铁行业生产了 18.64 亿吨的粗钢, 其中中国粗钢产量在总产量中占比 56.76% [9]。中国粗钢生产大部分依赖高炉转炉长流程, 基本上烧结、炼焦等工艺等。据有关专家指出, 中国钢铁行业每年消耗了 5.5 亿吨标准煤, 约占全国总能耗的 11%, 全球钢铁生产中碳排放总量的 60% 左右。因此, 与碳达峰目标相比, 还是一些指标(焦化、高炉、烧结、球团)分值较低, 《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平(2021 年版)》的高炉工序能效标杆水平为 361 千克标准煤/吨、基准水平为 435 千克标准煤/吨, 但现有的钢铁清洁生产一级基准值仍在 490 千克标准煤/吨, 有所差距。

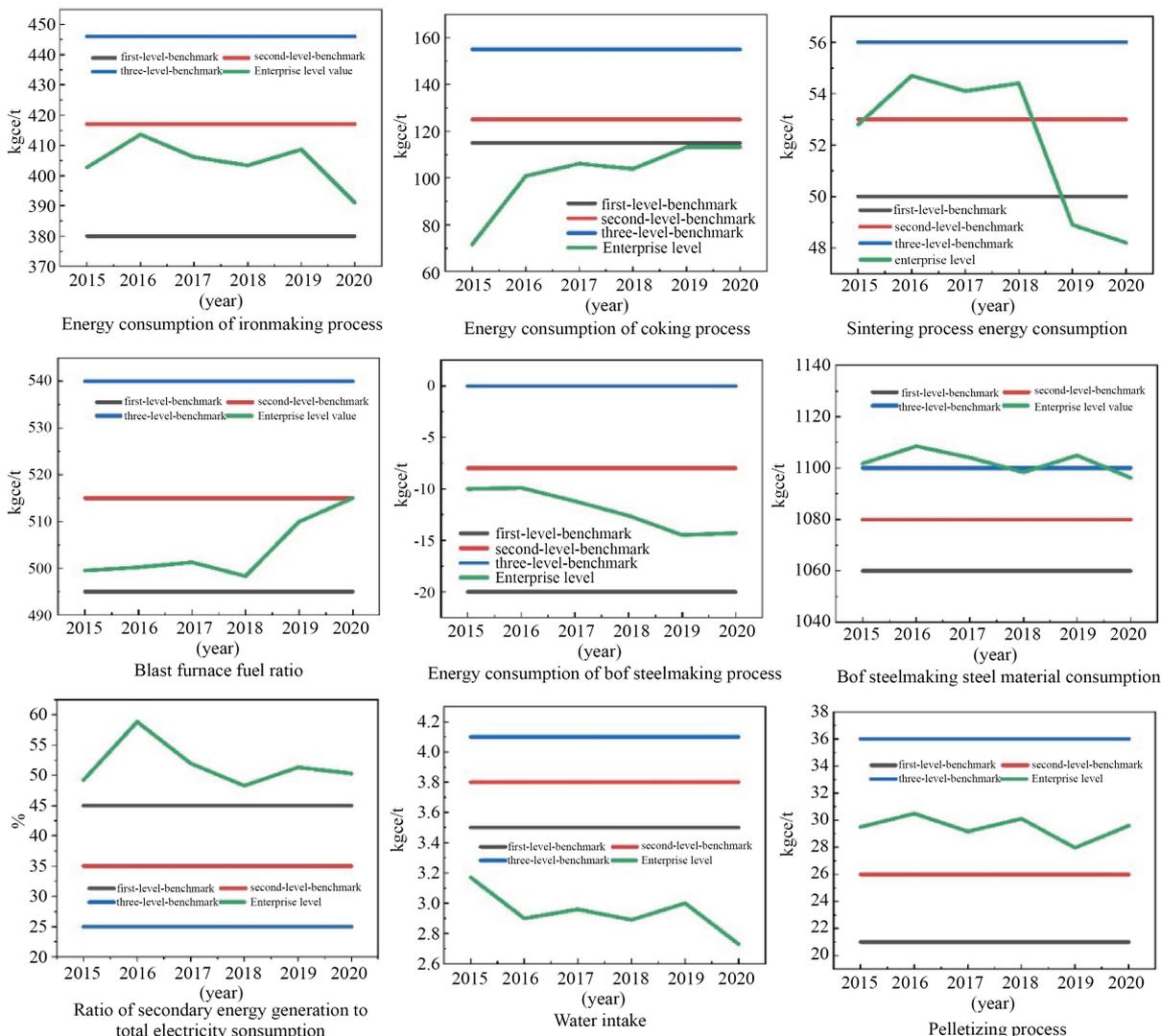


Figure 1. Energy consumption of cleaner production in an iron and steel industry in Nanjing
图 1. 南京某钢铁行业清洁生产能耗情况

根据目前钢铁清洁生产情况来看，能源消耗相关项目指标权重值较小，需要提高一些指标基准值，根据中国钢铁清洁生产评价指标、GB 21256、高耗能行业重点领域能效标杆水平(2021年版)、环境管理与绩效评估指南 ISO 14031: 2021 (国际标准化组织清洁生产审核)等高级国内外能耗标准来进行对比分析法(式 10、11)，结果如下面表 3 所示。

Table 3. The gap between the advanced value of energy consumption in main processes of the iron and steel industry and the existing benchmark value of energy consumption in clean production processes of the iron and steel industry

表 3. 钢铁行业主要工序能耗先进值和现有的钢铁行业清洁生产中工序能耗基准值差距

单位	清洁生产指标综合平均基准值kgce/t, (kW-h/t)	粗钢生产先进能耗基准 kgce/t	提升空间 (%)
高炉工序	390.0	361	7.40
转炉工序	-20.0	-30	33.3

Continued

烧结工序	55.0	45	18.18
球团工序	25.0	15	40.00
高炉工序炉顶余压发电量/(kW·h/t)	40.6	42	3.17
转炉工序能源回收量	33.0	35	5.70
烧结工序余热回收量	6.6	10	33.33

注意：现行清洁生产指标体系内基准值等级仍是以前(至少 2014 年以前)的国际先进水平、国内先进水平、国内一般水平。

4. 改进清洁生产指标的建议

4.1. 提升评估指标

4.1.1. 提升能耗相关基本项目体系指标

中国越早实现碳达峰, GDP 损失就越小, 经济福利越大[10], 因此清洁生产在现有的双碳目标前提下更新建降碳项目, 应该对照能效标杆水平鉴定实施, 推动能效水平提前上升。

按照在过渡期中清洁生产政策实施合理调整对一些能效低于钢铁行业基准水平的项目, 有利于钢铁行业有序开展节能降碳技术改造, 提高钢铁生产运行能效, 继续依法依规淘汰落后生产产能、落后工艺、落后产品。强化推进绿色低碳工艺装备、工程技术推广应用, 促进完善产业清洁生产。

在表 3 中, 提升空间的程度不是由一标准值与当前高级标准值的差值来确定的, 发展空间是通过设定一、二、三级基准值的总平均值从整体的角度呈现的, 因为中国钢铁企业的清洁生产和发展水平是不同的, 不能由任何一个标准值来决定。还有上述的一些参考规定(如 GB 21256), 在过去的清洁生产指标体系草案中也有参考, 但在目前明确制定碳达峰目标的条件下, 需按照已经制定的高级标杆水平来进一步提高台阶。现有的清洁生产中基准值(表 1)与先进标杆值之间的对比分析, 结果清洁生产的一级基准值满足国家能耗水平条件(现有), 但仍少于国家高级标杆水平。二、三级基准值与现有的高级标杆值之间存在差距。表 2 与表 3 所示清洁生产基准值中转炉、球团烧结工序的一级基准值以外的其他工序能效基准值未达到高级标准值, 清洁生产基准平均值与标杆值之间的提升空间也是不少的。关于基准水平按该钢铁行业清洁生产发展实况和能耗高级标准制修订情况进行补充完善提升及调整。

4.1.2. 提升控制碳排放管理体系指标

在一个行业实现碳达峰的道路上, 强化企业管理体系有助于加快低碳持续发展[11] [12], 尤其是改善能耗管理和加强相应降碳负责管理成员的培训。当前碳达峰目标前提下该项目有更加迫切的必要性, 持续发展碳审计与碳排放管理在钢铁行业降碳过程中有很大的帮助[13]。在实现碳峰值目标的前提下, 该项目的实施更加迫切和必要。这就要求清洁生产进一步提高能源与低碳管理体系(节能管理、评估碳排放管理以及人力资源管理)。因此, 在清洁生产指标中, 与碳减排相关的能源管理体系评估及其审议体系的作用也应随之提高。

4.2. 钢铁行业清洁生产指标当中添加降碳的新项目

4.2.1. 添加新能源利用率

在清洁生产指标当中需插入该行业中节能、清洁能源、废钢回收利用、碳捕获以及碳储存能力项目。在 2022 年 3 月中国工程院发布的重要咨询研究成果《中国碳达峰碳中和战略及路径》报告中

表明, 实现双碳目标, 必要清洁能源占比在 2035 年达到 32%, 2050 年达到 64%, 2060 年达到 80% 以上。为了减少钢铁行业碳排放, 发达国家研究用氢气、生物质能和天然气等清洁能源来替代煤炭 [14]。目前, 发达国家已开始加大对能源再利用应用的研究和投资, 这包括政府出台推动用新能源以及可再生能源生产应用发展的支持策略, 各个行业, 特别是钢铁行业也在加大投资开发新能源技术与绿色经济管理运营策略措施, 寻找掌握碳中和生产技术, 减少使用化石能源生产钢铁。每吨钢铁生产消耗量已达到接近基于热力学所施加的限制, 因此, 用新能源技术推进钢铁生产方案是最好的选择 [15]。

例如, 在钢铁生产中使用氢能, 特别是使用“绿色氢”来大大减少钢铁行业的碳排放, 为此, 许多外国钢铁企业已投资研发将氢能用于钢铁生产。德国和波兰等一些欧洲钢铁企业已开始试图开发氢能产钢铁。中国在钢铁生产工艺中利用氢能源是不错的选择, 长远在清洁生产更新与补充方案中清洁能源电转氢、甲烷化、适配可再生能源(风, 太阳)自备电厂)工艺设备及一些经营低碳优化措施等可以成为钢铁行业清洁生产零碳起点 [15] [16]。因此, 将来在钢铁行业清洁生产指标中添加用新能源项目是 indispensable 的方案。

4.2.2. 增加废钢利用率

回收利用废钢也是一个近年来钢铁降碳问题决解的重要途径之一, 为了实现碳达峰目标, 钢铁行业必须扩大可持续的生产实践。再利用废铁与废钢是钢铁生产碳减排最有效的方法之一, 因为它具有补充原料供应和节能的双重优势。当回收利用废钢时, 电弧炉(EAF)技术可以节省 60% 的能源和 40% 的用水量, 同时减少 86% 的废气排放, 76% 的废水和 70% 的废料 [17], 而中国钢铁工业中仍然广泛使用的陈旧碱性氧气炉(BOF)技术 [18]。因此, 利用回收废钢进行钢铁生产对中国钢铁行业具有战略意义。中国“十四五”循环经济发展规划中提到了到 2025 年时, 回收利用废钢量将达到 3.2 亿吨。中国冶金工业规划研究院(MPI)提到了中国废钢产量增加, 预计到 2025~2030 期间废钢比将提升 30%, 大约达到 4 亿吨。因此, 它的回收利用率增加导致钢铁行业降碳效果提升。

为了促进钢铁行业实现循环经济、降碳工作, 探究出废钢等钢铁废料的再生和恢复利用评估 [19] [20] [21]。废钢循环利用对于实现钢铁行业的低碳发展具有至关重要的作用, 因此添加回收利用废钢项目, 使清洁生产指标快速推进钢铁行业的降碳活动。

4.2.3. 添加碳捕集与封存(CCS)

CCS 也是一个钢铁清洁生产中重要的降碳项目。CCS 在钢铁行业的应用方向有两方面。一是高炉工序, 主要在碳排放点源的钢铁厂, 二是用碳捕集技术来研发新型的高炉 [9] [22]。CCS 现在基本用于发电厂, 原则上也可以应用于钢铁行业 [14]。因此, 未来钢铁行业清洁生产降碳项目中添加 CCS 是被认为是有前景的指标。

图 2 展示了改进清洁生产指标的方案总结。

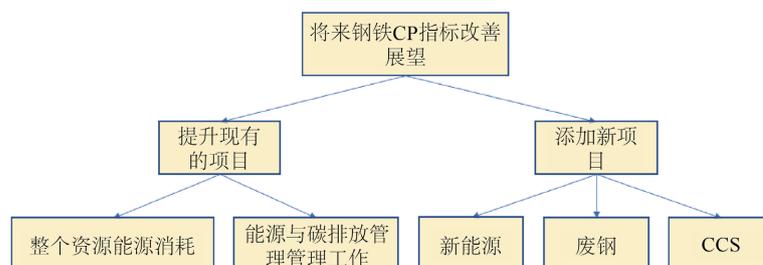


Figure 2. Outlook of iron and steel cleaner production indicators
图 2. 钢铁清洁生产指标展望

总体而言, 为了在推动钢铁行业绿色低碳转型事业过程中提高清洁生产作用, 一些清洁生产降碳指标项目该在清洁生产指标中添加或更新。

5. 结论

中国在经济急速发展条件下不断发展重点行业清洁生产体系和方法, 用清洁生产指标体系控制产业生命周期方式的减污降碳活动。本文通过钢铁行业清洁生产指标中的降碳工作, 探讨清洁生产开展推进双碳目标的整体概况, 分析在双碳目标开展情况下钢铁行业资源能源消耗的清洁生产现状, 为提前实现双碳目标, 开展清洁生产降碳工作提供理论依据和参考措施。

其次, 该研究发现现有的清洁生产指标体系以行业内一些高能耗项目为主的结构而忽略了清洁生产指标当中其他具有降碳潜力的项目。这种不够发挥的指标使清洁生产的降碳作用踏步不前, 仍然是一些能耗极高的项目参与双碳目标的措施, 没有整个减碳可行性范围的支持。因此, 将来积极改进处于过渡期的一些清洁生产指标体系是推进钢铁行业的双碳目标的有效措施。

参考文献

- [1] Van Ruijven, B.J., van Vuuren, D.P., Boskaljon, W., *et al.* (2016) Long-Term Model-Based Projections of Energy Use and CO₂ Emissions from the Global Steel and Cement Industries. *Resources, Conservation and Recycling*, **112**, 15-36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.016>
- [2] Speelman, M.W.E. (2018) Decarbonization of Industrial Sectors: The Next Frontier. <https://www.energy-transitions.org/publications/decarbonization-of-industrial-sectors/#download-form>
- [3] Zhu, X.H., He, M. and Li, H.L. (2021) Environmental Regulation, Governance Transformation and the Green Development of Chinese Iron and Steel Enterprises. *Journal of Cleaner Production*, **328**, Article ID: 129557. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129557>
- [4] Zhang, Y.L., Gu, L.Y. and Guo, X. (2020) Carbon Audit Evaluation System and Its Application in the Iron and Steel Enterprises in China. *Journal of Cleaner Production*, **248**, Article ID: 119204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119204>
- [5] 李琰琰. 热电厂主要能耗指标计算方法与分析[J]. 节能, 2016, 35(11): 41-46.
- [6] Wu, Y.N., Li, L.W., Song, Z.X., *et al.* (2019) Risk Assessment on Offshore Photovoltaic Power Generation Projects in China Based on a Fuzzy Analysis Framework. *Journal of Cleaner Production*, **215**, 46-62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.024>
- [7] Zhang, Q.Y., Xu, P.P., Chen, J., *et al.* (2021) Evaluation of Groundwater Quality Using an Integrated Approach of Set Pair Analysis and Variable Fuzzy Improved Model with Binary Semantic Analysis: A Case Study in Jiaokou Irrigation District, East of Guanzhong Basin, China. *Science of the Total Environment*, **767**, Article ID: 145247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145247>
- [8] 冰刘. 对比分析法在环境空气质量预报业务中的应用[J]. 中国环境监测, 2018, 34(4): 1-7.
- [9] Shen, J.L., Zhang, Q., Xu, L.S., *et al.* (2021) Future CO₂ Emission Trends and Radical Decarbonization Path of Iron and Steel Industry in China. *Journal of Cleaner Production*, **326**, Article ID: 129354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129354>
- [10] Zhang, S. and Chen, W.Y. (2022) Assessing the Energy Transition in China towards Carbon Neutrality with a Probabilistic Framework. *Nature Communications*, **13**, 87. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27671-0>
- [11] Fernando, Y. and Hor, W.L. (2017) Impacts of Energy Management Practices on Energy Efficiency and Carbon Emissions Reduction: A Survey of Malaysian Manufacturing Firms. *Resources, Conservation and Recycling*, **126**, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.023>
- [12] Finnerty, N., Sterling, R., Coakley, D., *et al.* (2017) Development of a Global Energy Management System for Non-Energy Intensive Multi-Site Industrial Organisations: A Methodology. *Energy*, **136**, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.049>
- [13] Cui, Y.Y., Yang, L., Shi, L., *et al.* (2022) Cleaner Production Indicator System of Petroleum Refining Industry: From Life Cycle Perspective. *Journal of Cleaner Production*, **355**, Article ID: 131392. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131392>
- [14] Conejo, A.N., Birat, J.-P. and Dutta, A. (2020) A Review of the Current Environmental Challenges of the Steel Indus-

-
- try and Its Value Chain. *Journal of Environmental Management*, **259**, Article ID: 109782. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109782>
- [15] Wang, R.Q., Jiang, L., Wang, Y.D., *et al.* (2020) Energy Saving Technologies and Mass-Thermal Network Optimization for Decarbonized Iron and Steel Industry: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **274**, Article ID: 122997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122997>
- [16] Wesseling, J.H., Lechtenböhmer, S., Åhman, M., *et al.* (2017) The Transition of Energy Intensive Processing Industries towards Deep Decarbonization: Characteristics and Implications for Future Research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**, 1303-1313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.156>
- [17] Wei, G., *et al.* (2021) Optimal Strategies for Reverse Logistics Network Construction: A Multi-Criteria Decision Method for Chinese Iron and Steel Industry. *Resources Policy*, **74**, Article ID: 101353. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.008>
- [18] Peng, J.Y. (2018) Energy-Related CO₂ Emissions in the China's Iron and Steel Industry: A Global Supply Chain Analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, **129**, Article ID: 392401. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.019>
- [19] Ma, Y.Q. and Wang, J.H. (2021) Time-Varying Spillovers and Dependencies between Iron Ore, Scrap Steel, Carbon Emission, Seaborne Transportation, and China's Steel Stock Prices. *Resources Policy*, **74**, Article ID: 102254. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102254>
- [20] Dworak, S. and Fellner, J. (2021) Steel Scrap Generation in the EU-28 since 1946—Sources and Composition. *Resources, Conservation and Recycling*, **173**, Article ID: 105692. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105692>
- [21] Harvey, L.D.D. (2021) Reconciling Global Iron and Steel Mass Flow Datasets, with an Update to 2011-2015 and an Assessment of Uncertainty in Global End-of-Life Scrap Flow. *Resources, Conservation and Recycling*, **182**, Article ID: 106281. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106281>
- [22] Ren, M., Lu, P.T., Liu, X.R., *et al.* (2021) Decarbonizing China's Iron and Steel Industry from the Supply and Demand Sides for Carbon Neutrality. *Applied Energy*, **298**, Article ID: 117209. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117209>