

基于NSGA-II和混合加权算法的 环境管理多目标优化 ——以中国水泥行业为例

温宗国 黄 达 丁 加 王奕涵*

摘要:工业节能减排管理涉及的多个环境和经济目标之间存在着复杂的权衡。然而,现有的节能减排管理研究采用的是单目标优化方法,没有考虑这些权衡,可能导致节能减排目标在经济上不可行,或者在全面改进所有目标方面效果不佳。针对这一问题,本文首先构建了中国水泥行业节能减排管理的多目标优化模型,以达到使能源强度、二氧化碳排放强度和清洁生产技术部署的经济成本同时最小化的目标。其次,采用NSGA-II算法对多目标优化模型进行求解,得到最优的技术部署方案。最后,采用TOPSIS方法和混合目标函数加权算法,根据不同的决策偏好选择最终方案。研究表明:同时优化多个目标的效率更高,可以实现环境和经济绩效的整体改善;在110.58~116.27元/吨水泥的经济成本范围内,可实现能耗和CO₂排放分别降低15.95%和32.77%;与国家规划目标相比,CO₂排放目标不可行,能源强度降低目标无效;23种清洁生产技术因能够以可行的经济成本实现重要的节能减排目标,需要加大推广力度。

关键词:水泥行业;节能减排;多目标优化;NSGA-II算法;多准则决策

一、引言

水泥是工业化和城市化建设中不可或缺的原料,对国民经济发展至关重要。然而,水泥的生产过程伴随着大量的能源消耗以及污染物、温室气体排放,其产生的环境影响受到广泛

*温宗国(通讯作者),清华大学环境学院,邮政编码:100084,电子信箱:wenzg@tsinghua.edu.cn;黄达,清华大学环境学院,邮政编码:100084,电子信箱:huangd14@mails.tsinghua.edu.cn;丁加,清华大学环境学院,邮政编码:100084,电子信箱:dingjia19@mails.tsinghua.edu.cn;王奕涵,清华大学环境学院,邮政编码:100084,电子信箱:thu-wyh@foxmail.com。

本文系“十三五”国家重点研发计划项目“钢铁-化产-建材联产过程污染物协同优化控制”(2016YFB0601305)和国家杰出青年科学基金项目“环境与生态管理”(71825006)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见,文责自负。

关注。相关统计数据表明,2020年我国水泥生产量约为23.95亿吨^①,占全球水泥总产量的58%;与此同时,2020年我国水泥行业的二氧化碳(CO₂)排放也高达12.7亿吨,约占全国温室气体净排放总量的10%(黄晶等,2021)。在碳达峰、碳中和目标的约束下,水泥行业面临严峻的节能减排压力。

为促进水泥行业的清洁低碳生产,我国政府已实施了多项严格的节能减排措施。例如,推行强制性清洁生产技术、调整工业生产和设备规模、征收污染物排放税和执行更严格的节能减排标准等。然而,上述节能减排措施的实施面临着诸多现实障碍,其主要原因是,在工业节能减排管理中,环境目标和经济目标之间往往存在着复杂的冲突关系。过度优先考虑环境保护需求、大力推广清洁生产措施将会导致企业的节能减排成本过高;而过度优先考虑经济成本,则会导致企业的节能减排效果不佳,难以实现预期目标。为加强对水泥行业节能减排的管理,制定经济可行且环境有效的节能减排目标,需在政府决策者和水泥企业生产者的偏好之间进行平衡,以兼顾环境保护、能源消耗与企业经济效益等多重目标的协同,降低目标间隐性转移的风险。因此,水泥行业的节能减排管理本质上是多目标优化问题,需针对当前水泥行业节能减排工作中多目标协同管理的实际需求,统筹应对各目标之间的协同及冲突关系,进而对水泥行业节能减排的技术系统进行优化和选择。

在多目标优化问题中,各目标之间存在冲突及协同关系,导致没有最佳解决方案。因此,众多学者均在探索如何获得帕累托最优解集。传统的多目标优化方法主要包括:加权法和法、约束法、模糊隶属函数法、距离函数法等(冯茜等,2021),这些传统方法的本质是将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解。如Liu等(2017)建立了水泥行业节能减排的多目标优化模型,并将其转化为单目标优化模型进行处理。在无法找到存在于整个帕累托边界中的最佳权衡解决方案的情况下,这种解决方法是次优的,这意味着该方法能为决策者提供的可用于全面节能减排管理的替代方案较少。因此,经典求解方法无法找到最佳的权衡解决方案,从而导致通过这种方法得出的节能减排方案的应用效果较差。近年来,智能化算法逐步取代传统经典算法被用于处理多目标优化问题,如粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO),而这类方法的局限在于对离散问题的处理效果不佳,易陷入局部最优。因此,部分学者开始采用带精英策略的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II, NSGA-II)处理多目标优化问题,该算法的优势在于引入精英策略,扩大了采样空间,且该算法帕累托最优解分布均匀,收敛性较好(Huang et al., 2019; Xiao et al., 2021)。目前已有学者将该算法应用于钢铁行业节能减排管理领域(Wang et al., 2020a),但水泥行业的节能减排管理与钢铁行业存在差异,NSGA-II算法在水泥行业节能管理中的应用尚有待深入探讨。

^①数据来源:国家统计局《工业产品产量》, <http://https--data--stats--gov--cn.proxy.www.stats.gov.cn/easy-query.htm?cn=C01>。

如前文所述,多目标优化问题并没有单一的解决方案,而是一组被称为帕累托最优解的解决方案,根据算法参数的不同,其范围从数十到数千不等。在优化过程结束时,决策者需要根据自己的实施偏好在这些众多解决方案中进行选择。多准则决策方法通常用于选择帕累托最优解的解决方案,而确定目标函数的权重是从帕累托最优解的解决方案中选择唯一解决方案的重要步骤。对目标函数进行加权通常有两种计算方法:主观加权法和客观加权法。主观加权法准确反映了决策者的偏好,但这种方法要求专家对问题非常熟悉,并且决策者对目标函数的相对重要性没有意见冲突。客观加权法是基于数据信息,因此可以科学地消除任何偏差。但是,客观加权法在加权过程中没有考虑专家意见。

目前,多准则决策方法已被一些研究人员应用于评估清洁生产技术支持工业节能减排管理。Wang等(2020b)使用熵-TOPSIS方法评估中国钢铁行业的共生技术,但该研究仅使用客观加权法(熵权法)进行目标函数加权,没有充分考虑决策者的偏好,因此可能导致节能减排目标的设置不够合理。Balsara等(2019)综合运用了层次分析法和DEMATEL技术评估水泥行业的气候变化减缓策略,并指出在减缓气候变化背景下,燃料减排是水泥行业的首要选择。Mokhtar和Nasooti(2020)则使用了层次分析法和TOPSIS方法辅助水泥厂选择效果最佳的能效措施。上述研究中涉及的客观评价方法和主观评价方法各有优势,但在实际决策过程中,全面考虑决策意见的客观评价信息和决策者的主观偏好差异,能够使决策结果更加真实,从而更有利于行业节能减排管理。基于上述分析,本文针对中国水泥行业节能减排管理建立了多目标优化模型,并采用NSGA-II算法进行求解,优化环境和经济目标之间的内在权衡,同时采用多准则决策方法对各方案进行评价。最后,基于上述分析结果,为中国水泥行业的节能减排提供相关政策建议。

二、研究方法

(一)研究框架

本文所采用研究方法的整体逻辑框架如图1所示,主要包括以下步骤:(1)收集水泥行业清洁生产数据和多目标优化模型输入参数;(2)建立并求解多目标优化模型,提出可能的决策方案,并确定不同决策方案的权重,进而应用TOPSIS方法根据不同的决策偏好方案选择最佳解决方案;(3)将最佳解决方案中清洁生产的普及率与五年后的预测普及率进行比较,并筛选出具有较高普及率的清洁生产技术;并将步骤(2)中确定的内生权重与TOPSIS一起使用,根据不同决策偏好方案和目标下的性能对筛选出的清洁生产技术进行排名;(4)提出水泥行业节能减排的相关政策建议。

(二)多目标优化模型

本文共设立3个目标函数,包含2项环境目标与1项经济目标,即水泥行业能源强度最小

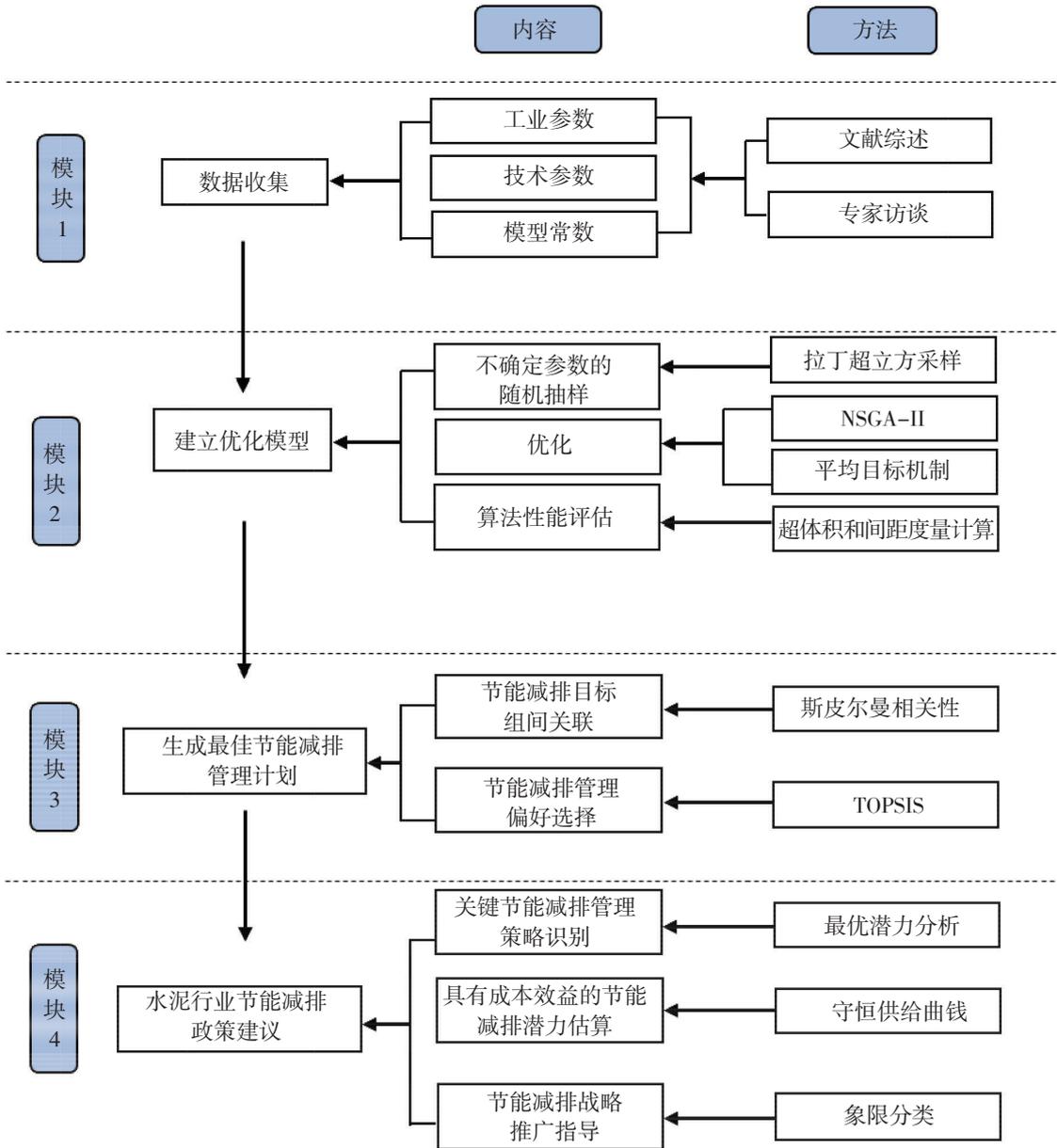


图1 研究逻辑框架图

化、CO₂排放强度最小化以及节能减排总成本(投资成本、运营和维护成本)最小化。具体建模过程如下:

目标函数1—能源强度最小化:基准年能源强度减去清洁生产技术实现的最大节能量,以获得优化年的最小能源强度。

$$\text{Min } E_i^{NI} - \sum_i \sum_p E_{i,p}^{NS} \times C_p^R \times (X_{i,p,T}^{PR} - X_{i,p,t}^{PR}) \quad (1)$$

式中, E_t^{MI} 表示基准年能源强度; i 表示清洁生产技术集合; $E_{i,p}^{NS}$ 表示节能潜力; C_p^R 表示工艺 p 水泥配比; $X_{i,p,T}^{PR}$ 和 $X_{i,p,t}^{PR}$ 分别表示优化年和基准年的清洁生产技术普及率; T 和 t 分别表示优化年指数和基准年指数。

目标函数2—CO₂排放强度最小化:基准年排放强度减去清洁生产技术实现的最大CO₂减排量,以获得优化年的最小CO₂排放强度。

$$\text{Min } E_t^{MI} - \sum_i \sum_p E_{i,p}^{MS} \times C_p^R \times (X_{i,p,T}^{PR} - X_{i,p,t}^{PR}) \quad (2)$$

式中, E_t^{MI} 表示基准年排放强度; $E_{i,p}^{MS}$ 表示减排潜力。

目标3—经济成本最小化:清洁生产技术的固定投资成本、运营成本和维护成本之和最小化。

$$\text{Min } \sum_i \sum_p I_{i,p}^{NC} \times \frac{r}{1 - (1+r)^{-TL}} \times (X_{i,p,T}^{PR} - X_{i,p,t}^{PR}) + \sum_i \sum_p O_{i,p}^{MC} \times (X_{i,p,T}^{PR} - X_{i,p,t}^{PR}) - CSEM - CSEN \quad (3)$$

其中,

$$CSEM = \sum_i \sum_p E_{i,p}^{NS} \times C_p^R \times (X_{i,p,T}^{PR} - X_{i,p,t}^{PR}) \times T_T^{AX} \quad (4)$$

$$CSEN = \sum_i \sum_p \sum_f E_{i,p}^{NS} \times C_p^R \times (X_{i,p,T}^{PR} - X_{i,p,t}^{PR}) \times E_f^C \quad (5)$$

式中, $I_{i,p}^{NC}$ 表示投资成本; $O_{i,p}^{MC}$ 表示运营和维护成本; TL 表示技术寿命; r 表示折现率; $CSEM$ 表示减排成本; $CSEN$ 表示节能成本; T_T^{AX} 表示碳排放税; f 表示燃料集合; E_f^C 表示燃料成本。

针对上述目标函数,本文共设立3项约束条件,如下所示:

约束条件1:决策变量的约束范围。技术普及率非负且不能超过100%。

$$0 \leq X_{i,j,k}^{PR} \leq 100 \quad (6)$$

约束条件2:基准年普及率约束。优化年清洁生产技术的普及率不应低于基准年,以确保实现节能减排目标。

$$X_{i,p,T}^{PR} \geq X_{i,p,t}^{PR} \quad (7)$$

约束条件3:能效技术推广政策约束。每年清洁生产技术的普及率应大于上一年,以确保清洁生产技术的普及推广。

$$X_{i,p,t+1}^{PR} \geq X_{i,p,t}^{PR} \quad (8)$$

为求解上述模型,本文采用了NSGA-II算法,该优化算法流程和相关参数分别如图2

所示。其基本思路为通过特定方式对决策变量进行编码,并对初始种群的目标函数及种群的拥挤距离进行计算,然后以此作为非支配排序的依据。在此基础上,从种群中选出较优解作为父本,然后设计遗传、杂交及变异算子以产生新的子代。算法中相关参数的设置见表1。

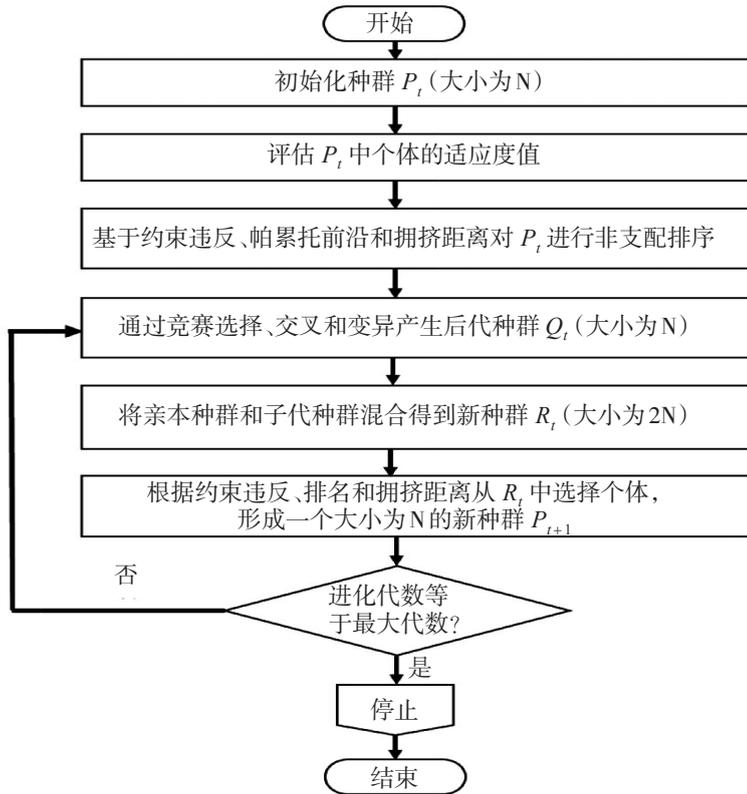


图2 NSGA-II 优化算法流程

表1 NSGA-II 算法参数设置

参数名称	种群大小 (N)	最大进化代数 (MG)	变异概率 (MP)	变异尺度 (MS)	交叉概率 (CP)
参数取值	300	200	0.2	0.1	0.9

(三) 目标函数权重确定方法

在本研究中,根据决策者可能的偏好制定了四种决策偏好方案,具体包括:(1)CO₂排放强度降低偏好;(2)能源强度降低偏好;(3)经济成本控制偏好;(4)系统决策方案。前3种方案中目标函数权重使用最佳—最差法(Annema et al., 2015; Mathew, 2019a)计算,该方法是一种用于确定主观权重的多准则决策方法。而系统决策方案则反映了决策者可能有不同意见或不确定标准时权重对节能减排管理决策结果的影响程度,因此采用主观和客观混合的多准则

决策方法用于确定该方案中目标函数的权重(Mathew, 2019b)。

(四)逼近理想解的排序方法(TOPSIS)

为解决在首选决策方案下如何选择最优解决方案这一问题,本文采用TOPSIS方法对经过多目标优化所生成的200个理想解进行相似度排序。该方法由Hwang和Yoon(1981)首次开发,是一种基于最佳替代方案与理想解决方案的欧几里得距离最短原理(Mathew, 2018),在备选方案列表中筛选最佳方案的方法,计算过程主要包括以下步骤:

获得每个备选方案的归一化性能值 X_{ij}^N :

$$X_{ij}^N = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (9)$$

求解归一化决策矩阵 NDM :

$$NDM = \begin{bmatrix} x_{11}^N & x_{12}^N & \cdots & x_{1m}^N \\ x_{21}^N & x_{22}^N & \cdots & x_{2m}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1}^N & x_{n2}^N & \cdots & x_{nm}^N \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据每个准则各自的权重,得到加权归一化决策矩阵 $WNDM$:

$$WNDM = \begin{bmatrix} w_1 x_{11}^N & w_2 x_{12}^N & \cdots & w_m x_{1m}^N \\ w_1 x_{21}^N & w_2 x_{22}^N & \cdots & w_m x_{2m}^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 x_{n1}^N & w_2 x_{n2}^N & \cdots & w_m x_{nm}^N \end{bmatrix} \quad (11)$$

为每个标准确定理想最佳值 V_i^+ 和理想最差值 V_i^- ,并根据以下方法计算每个备选方案与其理想最佳和理想最差值的欧几里德距离 S_j :

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_i^n (V_{ij} - V_i^+)^2} \quad (12)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_i^n (V_{ij} - V_i^-)^2} \quad (13)$$

计算备选方案的性能得分 P_j ,并设置性能得分矩阵 PSM 。然后,根据其各自的性能得分 P_j 对备选方案进行排名。具有最高得分的备选方案(NSGA-II解决方案)是最好的,其余的方案按照得分递减从好到差排名。

$$P_j = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (14)$$

$$PSM = \begin{bmatrix} S_1^+ & S_1^- & S_1^+ + S_1^- & P_1 \\ S_2^+ & S_2^- & S_2^+ + S_2^- & P_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_n^+ & S_n^- & S_n^+ + S_n^- & P_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

综合考虑数据可获性、技术应用广泛性及技术普及率(10%以上)等因素,本研究共收集了水泥行业33项清洁生产技术及其数据,评估对象为中国的16家水泥厂(Hasanbeigi et al., 2010)。此外,将水泥生产分为两个主要过程进行建模,以2015年为基准年,2025年为最终优化年,以协助环境决策者制定中国“十四五”水泥行业节能减排目标(2025年目标)。

三、结果分析

为了加强中国水泥行业节能减排管理,本研究构建了多目标优化模型来开展研究,优化能源强度、CO₂排放强度和经济成本这三个目标函数,并使用NSGA-II算法生成最优权衡解决方案。本文使用主观与客观相结合的多准则决策方法设置了四种决策偏好方案;再运用TOPSIS排序技术针对不同的决策偏好确定了各自的单一解决方案来实施,并根据不同评估标准对入围的清洁生产技术进行了排名。其中,优化模型有330个决策变量和1287个约束条件,且由于每次运行NSGA-II时,每个解返回的结果略有差异,因此将算法运行10次以计算客观解的平均值来提高结果的准确性。优化年和基准年各目标值的解范围如图3所示,表2则为优化后的目标范围。

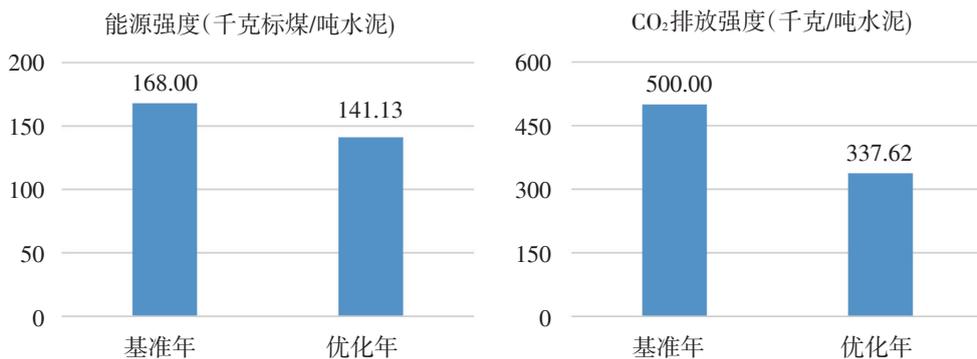


图3 基准年和最终优化年目标值的基准化

表2 目标函数的优化值范围

目标	基准年值	优化值范围	
		最大值	最小值
能源强度(千克标煤/吨)	168	143.15	142.98
CO ₂ 排放强度(千克/吨)	500	355.07	353.63
经济成本(元/吨)	-	116.27	110.58

与基准年的能源排放强度相比,优化第五年(2020年)的能源强度和CO₂排放强度均大幅下降,能源强度从基准年的168千克/吨平均下降了13.01%至优化年的145.84千克/吨,CO₂排

放强度从基准年的500千克/吨平均下降了26.55%至优化年的367.26千克/吨,节能减排实现成本增加在110.58~116.27元/吨水泥之间变动。至最终优化年(2025年),在110.58~116.27元/吨水泥的经济成本下,可实现能源强度降低16%和CO₂排放量降低约33%。由此可见,通过优化节能减排管理中的多个目标,可以设定更有效的节能减排目标,从而同时实现环境和经济绩效的整体改善。本研究所设定的四种决策方案下最终优化年(2025年)的目标值如表3所示。

表3 不同决策方案下的目标值

决策方案	优化目标值		
	能源强度 (千克标煤/吨)	CO ₂ 排放强度 (千克/吨)	经济成本 (元/吨)
能源强度降低偏好	141.21	336.90	111.51
CO ₂ 排放强度降低偏好	141.38	336.13	116.27
经济成本控制偏好	141.51	337.27	110.59
系统决策方案	141.40	337.02	111.31

在水泥行业中,从节能减排政策发布之日起的未来五年内所推广清洁生产技术的普及率通常由专家评估。这个过程涉及设置技术普及率的上限和下限,以及它们在五年规划范围内的预估扩散率。其中,一些技术在优化年的普及率高于它们的未来五年预估普及率。简而言之,在可行的经济成本范围内,某些清洁生产技术的推广速度快于专家所设定的目标。如表4所示,打勾数字所代表的技术即是优化年推广速度快于未来五年推广速度的技术。因此,在设定节能减排目标时,可以强调这些技术。此外,有23项清洁生产技术可作为经济可行的有效节能减排管理措施,其具体排名如表5所示。

表4 筛选节能减排目标实现能效技术(打勾)

清洁生产技术	基准年普及率 (%)	未来五年普及率 (%)	能源强度降低偏好 (%)	CO ₂ 排放强度降低偏好 (%)	经济成本控制偏好 (%)	系统决策方案 (%)
T1	39.88	51	44.46	47.55	48.89	49.79
T2	50.98	62	72.87 ✓	68.46 ✓	67.97 ✓	71.87 ✓
T3	43.68	55	51.56	62.33 ✓	64.17 ✓	45.88
T4	16.18	27	22.60	29.33 ✓	18.55	24.20
T5	27.38	39	37.33	38.26	32.55	29.36
T6	65.08	76	66.82	73.42	80.42 ✓	81.96 ✓
T7	20.18	31	30.41	24.37	25.49	21.96
T8	10.88	22	24.67	13.51	19.59	12.58
T9	74.48	85	82.10	77.37	82.46	75.24

续表4 筛选节能减排目标实现能效技术(打勾)

清洁生产 技术	基准年普 及率 (%)	未来五年 普及率 (%)	能源强度降 低偏好(%)	CO ₂ 排放强 度降低偏好 (%)	经济成本控 制偏好(%)	系统决策方 案(%)
T10	10.88	22	22.03	22.14 ✓	20.92	13.35
T11	79.78	91	80.12	80.65	82.15	81.99
T12	39.58	50	40.12	53.62 ✓	59.49 ✓	44.74
T13	43.48	54	55.87 ✓	64.13 ✓	48.28	55.03 ✓
T14	25.88	37	42.34 ✓	33.00	32.10	25.94
T15	19.98	31	29.98	30.57	32.41 ✓	36.41 ✓
T16	50.68	62	72.66 ✓	53.99	71.87 ✓	58.30
T17	10.88	22	11.23	21.53	21.20	23.08 ✓
T18	10.88	48	20.28	34.96	47.19	14.39
T19	62.78	75	80.65 ✓	77.47 ✓	74.91	64.77
T20	68.48	79	81.63 ✓	71.22	82.38	73.19
T21	10.88	22	25.65 ✓	15.04	18.48	11.28
T22	35.28	46	36.17	42.50	45.60	41.99
T23	20.88	32	34.18	25.35	24.60	38.08 ✓
T24	40.88	52	46.07	42.50	46.99	44.83
T25	19.98	56	65.10 ✓	58.15 ✓	53.16	56.29 ✓
T26	36.38	72	66.29	47.41	64.90	41.08
T27	17.48	28	23.65	21.07	33.16 ✓	24.39
T28	39.58	50	52.31 ✓	54.96 ✓	62.96 ✓	42.51
T29	47.08	58	52.90	60.93 ✓	53.98	55.60
T30	50.58	61	58.30	71.16 ✓	72.01 ✓	71.20 ✓
T31	66.28	77	68.13	75.83	12.35	68.76
T32	6.40	17	15.68	8.05	36.59 ✓	19.04 ✓
T33	12.98	49	40.03	48.22	36.59	32.12

表5 不同评价标准下所筛选出清洁生产技术的表现排名

排序	评价标准的偏好			
	节能	减排	投资花费	综合标准
1	T32	T32	T29	T32
2	T25	T25	T20	T25
3	T12	T12	T9	T6
4	T13	T13	T3	T12
5	T6	T17	T2	T13
6	T17	T15	T23	T14

续表5 不同评价标准下所筛选出清洁生产技术的表现排名

排序	评价标准的偏好			
	节能	减排	投资花费	综合标准
7	T15	T6	T15	T27
8	T14	T14	T16	T28
9	T27	T27	T10	T29
10	T28	T28	T14	T8
11	T30	T8	T12	T19
12	T8	T19	T30	T10
13	T19	T10	T21	T2
14	T10	T2	T4	T4
15	T2	T4	T9	T21
16	T4	T21	T13	T23
17	T21	T23	T27	T16
18	T23	T21	T25	T17
19	T16	T16	T17	T9
20	T9	T9	T19	T3
21	T3	T3	T29	T29
22	T29	T29	T8	T20
23	T20	T20	T6	T15

四、讨论与政策建议

在《水泥工业“十三五”发展规划》(中国水泥协会,2017)中,中国制定了一系列节能减排目标,例如:水泥制造业CO₂排放强度比2015年水平降低30%;能源强度总体降低30%,与2015年的水平相比应减少7%。将本文研究所得的优化结果与“十三五”水泥行业的节能减排目标进行比较后可以发现,能源强度降低目标较为宽松,可以进一步提高目标,而CO₂排放强度降低目标过于严格(优化的帕累托解无法达到该目标)。此外,由于本研究的多目标优化是针对适用于每个单独过程的每组清洁生产技术分别执行,因而可以确定最经济有效地实现节能减排目标的清洁生产技术,从而用于制定节能减排管理建议。

根据上述研究结果,本文分别提出对中国水泥行业节能减排管理的短期和长期建议。短期建议包括:第一,“十三五”能源强度降低目标为7%,但在终期可有效实现降幅13%,余量较大。因此,未来五年节能减排规划(即“十四五”规划)能源强度降低目标应该更加严格。而CO₂排放强度降低的“十三五”目标是削减30%,但终期仅能有效削减27%,CO₂减排难度较

大。因此,“十四五”规划中CO₂减排目标应适度放宽。第二,本文在所评估的33项清洁生产技术中共筛选出23项重要技术(表5),这些技术在经济可行的前提下,在水泥行业的普及率可进一步提高。因此,应大力推广上述23项清洁生产技术,以强化节能减排管理措施。例如,在制定中国“十四五”水泥工业规划时上述23项技术应被纳入技术参考目录。在技术的实际部署过程中,可以采取政府低息担保或零息贷款、货币补贴、退税、风险补偿和融资优惠等经济激励措施并进一步刺激其推广应用。

水泥行业长期节能减排管理建议包括:第一,水泥行业结构调整,将工艺完整的传统水泥厂转变为单一功能的水泥粉磨厂。随着中国经济社会的不断发展,人民生活水平将不断提高,对环境质量的期望必将相应提高。重工业生产结构调整将在满足愈发严格的环境标准方面发挥关键作用。这将需要经济结构从以重工业为基础向以服务业等第三产业为基础转变,许多发达国家也都遵循了同样的发展路线图。但这种转变不能是激进的,而应该是平稳的。以水泥行业为例,多项研究预测中国未来的水泥产量将持续下降,因此,未来环境质量改善的第一步很可能是对包括原料破碎和熟料烧制等环节的水泥生产工艺进行改造,从而将传统水泥厂转变成单一功能的水泥粉磨厂。第二,提高对碳捕集技术和生产绿色低碳水泥的研发投资。与其它重工业不同,水泥行业的CO₂排放既产生于其生产过程(石灰石煅烧)也来源于化石燃料的消耗(Talaei et al., 2019),其中,约60%的CO₂排放来自石灰石煅烧,30%来自化石燃料燃烧,其余10%来自工厂的运营与维护(电力消耗)。这意味着即使在实现清洁生产技术100%普及的理想情况下,原材料煅烧产生的CO₂排放也将不可避免。因此,应用富氧燃烧、液氨吸收和高温钙循环等碳捕集技术以及创新绿色低碳水泥的生产工艺至关重要,通过这些技术措施可以将水泥行业CO₂排放降低63%~85%(Kajaste & Hurme, 2016)。因此,政府可以为技术研发提供资金支持,以推动其商业化实施。此外,水泥窑燃料替代也是水泥行业重要减碳措施,未来应予以关注和推广。

五、结论

本文将多目标优化方法与三种多准则决策方法相结合,以期帮助决策者平衡水泥行业节能减排管理过程中所涉及的多种权衡,实现能源强度、CO₂排放强度和节能技术部署经济成本等目标之间的优化。此外,采用NSGA-II算法对多目标优化模型进行求解,并利用TOPSIS方法和混合目标函数加权法对生成的帕累托最优解进行选择,最后根据不同的决策偏好选择出最终的技术部署方案。在本文所评估的33项清洁生产技术中,23项技术可以通过较低的经济成本实现节能减排目标,因此未来可大力推广。基于上述研究结果,本文提出了针对水泥行业的短期和长期节能减排管理建议,以帮助决策者采取有效的节能减排措施,加强水泥行业的节能减排管理。

参考文献:

- [1] 冯茜,李擎,全威,裴轩墨. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745–753.
- [2] 黄晶,孙新章,张贤. 中国碳中和技术体系的构建与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 24–28.
- [3] 中国水泥行业协会. 中国水泥工业“十三五”发展规划[R]. 2017.
- [4] Annema, J. A., N. Mouter, and J. Razaeei. Cost-Benefit Analysis (CBA), or Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) or Both: Politicians' Perspective in Transport Policy Appraisal[J]. *Transportation Research Procedia*, 2015, 10: 788–797.
- [5] Balsara, S., P. K. Jain, and R. Anbanandam. An Integrated Approach Using AHP and DEMATEL for Evaluating Climate Change Mitigation Strategies of the Indian Cement Manufacturing Industry[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 863–878.
- [6] Hasanbeigi, A., L. Price, H. Y. Lu, and L. Wang. Analysis of Energy Efficiency Opportunities for the Cement Industry in Shandong Province, China: A Case Study of 16 Cement Plants[J]. *Energy*, 2010, 35: 3461–3473.
- [7] Huang, Z. Y., Z. L. Xie, C. Z. Zhang, S. H. Chan, J. Milewskic, Y. Xi, Y. L. Yang, and X. S. Hua. Modeling and Multi-Objective Optimization of a Stand-Alone PV-Hydrogen-Retired EV Battery Hybrid Energy System[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181: 80–92.
- [8] Hwang, C. L. and K. Yoon. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*[M]. Berlin : Springer-Heidelberg, 1981.
- [9] Kajaste, R. and M. Hurme. Cement Industry Greenhouse Gas Emissions-Management Options and Abatement cost[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4041–4052.
- [10] Liu, X. W., Z. W. Yuan, Y. Xu, and S. Y. Jiang. Greening Cement in China: A Cost-Effective Roadmap[J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 233–244.
- [11] Mathew, M. Best Worst Method-Finding Subjective Weights of Criteria[EB/OL]. (2019a-06-17)[2021-08-30]. <https://www.youtube.com/watch?v=vZjVXrTy3TQ&list=PLFsDe5VTLOGONrBajWDMh6J2MdzrW0U-wM&index=22>.
- [12] Mathew, M. CRITIC Method (for Weight Determination of Criteria/Attributes) [EB/OL]. (2019b-03-27)[2021-08-30]. <https://www.youtube.com/watch?v=lrVshTAKz7A&list=PLFsDe5VTLOGONrBajWDMh6J2MdzrW0U-wM&index=16>.
- [13] Mathew, M. Multi Criteria Decision Making Method Based on Euclidean Distance from the Ideal Solution, TOPSIS[EB/OL]. (2018-04-25)[2021-08-30]. <https://www.youtube.com/watch?v=kfcN7MuYVeI&t=41s>.
- [14] Mokhtar, A. and M. Nasooti. A Decision Support Tool for Cement Industry to Select Energy Efficiency Measures[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 28: 100458.
- [15] Talaei, A., D. Pier., A. V. Lyer, M. Ahiduzzaman, and A. Kumar. Assessment of Long-Term Energy Efficiency Improvement and Greenhouse Gas Emission Mitigation Options for the Cement Industry[J]. *Energy*, 2019, 170: 1051–1066.
- [16] Wang, Y. H., Z. G. Wen, and H. F. Li. Symbiotic Technology Assessment in Iron and Steel Industry Based on Entropy TOPSIS Method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020a, 260: 120–900.
- [17] Wang, Y. H., Z. G. Wen, J. G. Yao, and C. D. Dinga. Multi-Objective Optimization of Synergic Energy Conservation and CO₂ Emission Reduction in China's Iron and Steel Industry Under Uncertainty[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020b, 134: 110128.
- [18] Xiao, W., A. D. Cheng, S. Li, X. B. Jiang, X. H. Ruan, and G. H. He. A Multi-Objective Optimization Strategy of Steam Power System to Achieve Standard Emission and Optimal Economic by NSGA-II [J]. *Energy*, 2021, 232: 120953.

A Multi-Objective Optimization for Environmental Management Using NSGA-II and a Hybrid Weighting Technique as Evaluation Criteria: A Case Study of China's Cement Industry

Wen Zongguo, Huang Da, Ding Jia, Wang Yihan

(School of Environment, Tsinghua University)

Abstract: Complex trade-offs exist between the multiple environmental and economic objectives involved in industrial energy conservation and emission reduction (ECER) management. However, extant studies on ECER management mostly adopt single-objective optimization approaches, which do not take into account these trade-offs. This would lead to economically infeasible ECER targets, or less-effective ECER targets with respect to a comprehensive improvement in all objectives. To address this issue, this study builds a multi-objective optimization model for industrial ECER management in China's cement industry, aiming at simultaneously minimizing energy intensity, CO₂ emission intensity and economic cost for deployment of cleaner production technologies. We then adopt NSGA-II, a widely used multi-objective optimization algorithm, to solve the model and obtain the optimal technology deployment scheme. Finally, the TOPSIS method and a hybrid objective function weighting technique are adopted to select final schemes according to different decision preferences. The results show that, it is more efficient to simultaneously optimize multiple objectives as an overall improvement in both environmental and economic performance can be achieved. The energy consumption and CO₂ emission can be reduced by 15.95% and 32.77%, respectively, at an economic cost of 110.58~116.27 CNY/t cement. Compared with the national planning targets, the results reveal that the CO₂ emission target is infeasible while the energy intensity reduction target is ineffective. Altogether 23 cleaner production techniques require strong promotion policies as they can realize significant ECER targets at a feasible economic cost.

Keywords: Cement Industry; Energy Conservation and Emission Reduction; Multi-Objective Optimization; NSGA-II Method; Multi-Criteria Decision Making

JEL Classification: Q50

(责任编辑:卢玲)