

《双碳目标下工业废气制氢的协同优化路径研究》

——技术-经济-社会三维框架与政策杠杆效应

吴广林 高蝉娟 陈小蓝 杨飞 龚秀*

贵州大学, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要: 在全球“双碳”目标驱动下, 工业废气治理与氢能技术协同发展成为绿色转型的关键路径。研究表明, 政策激励显著推动企业减排投资, 碳排放交易政策每提升 1 单位, 企业制氢技术预算占比未来三年增加 0.48%。氢能技术可行性高但市场转化不足, 公众支付意愿滞后, 需通过科普和经济激励弥合认知-行为差距。社会协同方面, 公众更关注环保风险, 企业政策响应更强, 应建立“社区-园区”收益共享机制以增强治理合力。研究提出“技术-经济-社会”三维框架, 量化政策效应与市场接受度, 为政府、企业及公众参与提供依据, 建议短期强化碳价与税收激励, 中长期推进氢能产业链整合与区域协同。

关键词: 双碳; 碳排放; 废气治理; 氢能

Research on the Synergistic Optimization Pathway of Hydrogen Production from Industrial Waste Gas under the Dual Carbon Goals——A Technology-Economy-Society Three-Dimensional Framework and Policy Leverage Effects

Wu Guanglin, Gao Chanjuan, Chen Xiaolan, Yang Fei, Gong Xiu*

Guizhou University, China Guizhou Guiyang 550025

Abstract: Driven by the global "dual carbon" goals, the synergistic development of industrial waste gas treatment and hydrogen energy technology has become a key pathway for green transformation. Research shows that policy incentives significantly promote corporate investment in emission reduction: a 1-unit increase in carbon emission trading policy leads to a 0.48% rise in the proportion of corporate budgets allocated to hydrogen production technology over the next three years. Although hydrogen energy technology is highly feasible, its market transformation remains insufficient, and public willingness to pay lags behind. Efforts are needed to bridge the cognitive-behavioral gap through science communication and economic incentives. In terms of social synergy, the public is more concerned about environmental risks, while enterprises show stronger policy responsiveness. Establishing a "community-industrial park" benefit-sharing mechanism is essential to enhance collaborative governance. This study proposes a "technology-economy-society" three-dimensional framework, quantifies policy effects and market acceptance, and provides a basis for government, enterprises, and public participation. It recommends short-term strengthening of carbon pricing and tax incentives, with medium- to long-term efforts focused on integrating the hydrogen energy industry chain and promoting regional collaboration.

Keywords: Dual carbon; Carbon emissions; Waste gas treatment; Hydrogen energy

1 研究背景和研究问题

1.1 研究背景

随着工业化进程的持续加速, 工厂废气逐渐演变为影响环境质量与人类健康的关键因素。工业废气包含多种有害成分, 像一氧化碳、氮氧化物、硫化物等, 不但会对周边环境带来危害, 而且对人体健康和生态环境也会产生严重的不良影响^[1,2]。怎样解决这一问题已然成为国际减碳计划的重要组成部分, 同时也是推动国家工业发展的一条重

要路径。然而, 传统的废气处理方法通常存在一定的局限性, 比如成本较高、排放量大以及对设备运行性能产生影响等^[2,3]。而氢技术在这些方面为解决工业废气问题提供了新的契机。

工业废气中含有大量有害物质及可回收资源^[1]。例如, 中国焦炉煤气年排放量约 1114 亿立方米, 其中氢气含量高达 57%, 年潜在氢气回收量达 635 亿立方米^[4]。然而, 传统处理方式多采用焚烧或直接排放, 既造成资源浪费, 又加

剧温室气体排放^[5]。据测算，仅钢铁、化工等难脱碳行业，碳排放占中国工业总排放的 80% 以上^[6,7]，急需通过技术革新实现减排与资源化协同。工业副产氢技术通过变压吸附、膜分离等手段从废气中提纯氢气，具有显著成本优势^[2,4,8]。这一路径不仅减少化石能源制氢的碳排放还能将原本废弃的废气转化为低碳氢源，助力化工、冶金等行业替代传统高碳原料^[4,9]。以鞍钢氢冶金项目为例，其采用绿氢炼铁技术，可实现吨铁减排二氧化碳 50% 以上^[7,10]。同时助力氢能产业发展，推动氢能产业链的发展，预计到 2050 年，氢能产业链可创造超过 1000 万个就业岗位，产业规模将达到 10 万亿元以上^[11,12]。

在政策方面，中国近年密集出台政策支持氢能产业链发展^[13,14]。2025 年《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》明确提出优先利用工业副产氢，并规划到 2027 年在冶金、合成氨等领域实现规模化应用^[9,15,16]。地方层面，山西吕梁依托焦炉煤气资源建成 7.5 万吨制氢产能，山东、广东等地则通过氢能高速、氢能船舶等示范项目推动跨行业耦合^[6]。此外，国家能源局提出“电-氢-电”协同模式，利用绿氢储能解决可再生能源消纳问题，进一步拓宽废气制氢的应用场景^[7]。

全球范围内^[17]，欧盟碳边境税倒逼中国高碳行业加速氢能替代进程。中国作为全球最大氢气生产国，工业用氢占比 60%，但绿氢占比不足 1%^[7,9]。预计到 2030 年，钢铁、化工行业清洁氢年需求量将分别达 174 万吨和 376 万吨，市场潜力超千亿规模^[18]。若结合跨区域输氢设施建设（如“西氢东送”管道），工业废气制氢有望成为区域协同减碳的枢纽节点。

1.2 研究问题

调研旨在为国家和工厂的废气治理提供有效意见，研究问题为工业废气处理情况以及公众对此的了解程度。

2 研究过程

2.1 调研方法

为保证调研的充分性和科学性，调研分为群众和企业两部分，群众部分采取问卷调研法（随机抽样），对企业部分采用问卷法（特定行业抽样）。

2.2 有效样本

2.2.1 样本量计算公式

当总体规模较大时（如超过 10 万），使用简化公式

计算最小样本量：

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2}$$
(1)

其中：-Z= 1.96（95% 置信水平），-p=0.5，-e=0.05
计算过程：

$$n = \frac{1.96^2 \times 0.5 \times (1-0.5)}{0.05^2} = \frac{3.8416 \times 0.25}{0.0025} = 384.16$$
(2)

向上取整得 385 份有效问卷，这是单一目标群体的最低样本量要求。

2.2.2 分群体样本量调整及投放问卷数量

由于问卷需覆盖企业面和群众面两个独立群体，需分别计算样本量：企业面：截至 2024 年，全国化工厂的数量超过 20 万家，其中高危化工厂数量大约有 5 万座，总体规模超过 10 万，直接采用 385 份。群众面：总体规模超过 10 万，直接采用 385 份。假设回收率为 80%，考虑到实际回收率与分群分析，总样本量≥ 1000 份。

2.3 问卷设计

2.3.1 问卷具体设计

表1 可靠性统计与KMO和巴特利特检验

	可靠性统计	KMO和巴特利特检验			
群众问卷	克隆巴赫 Alpha	项数	KMO 取样适切性量数		0.878
	0.914	17	巴特利特球形度检验	近似卡方	411.000
				自由度	136
				显著性	0.000
	可靠性统计	KMO和巴特利特检验			
企业问卷	克隆巴赫 Alpha	项数	KMO 取样适切性量数		0.833
	0.91	17	巴特利特球形度检验	近似卡方	412.420
				自由度	136
				显著性	0.000

首先根据文献^[19, 20]和研究目的制定问卷初稿；之后分别对两份问卷进行预调研，样本数量各为 50 份，通过问卷星进行投放，最后根据预调研所反馈的问题，将问卷初稿逐一修改后形成最终问卷。两份问卷各包含 17 个问题，群众问卷：涉及基本信息，认知水平，技术信任，行为意愿，社会协同，政策感知 6 个部分。企业问卷：涉及基本信息，治理现状，技术革新，政策适配，合作生态，战略规划 6 个部分，采用李克特五级评分法，5 个级别分别为“非常了解 / 愿意”“比较了解 / 愿意”“一般了解 / 愿意”“不太了解 / 愿意”“很不了解 / 愿意”，对应的赋值为 5、4、3、2、1 分。群众问卷标准化信度 Cronbach’s α 系数为 0.914，效度 KMO 值为 0.817，巴特球型检验 P

< 0.01, 企业问卷标准化信度 Cronbach's α 系数为 0.910, 效度 KMO 值为 0.833, 巴特球型检验 $P<0.01$, 具有良好的信效度 (见表 1)。

2.4 问卷投放与数据分析

2.4.1 投放方式

通过问卷星的形式进行线上问卷发放和资料收集, 剔除数据缺失、专业不符合的问卷, 通过样本服务精确投放问卷。

2.4.2 数据分析

数据处理一用 Excel 软件对统计结果进行汇总。用 SPSS 27.0 软件对数据进行描述性分析、信度、效度及影响因素分析。

3 结果

3.1 基本情况

共收到来自全国各地的总计 988 份有效问卷, 其中群众问卷 490 份, 企业问卷 498 份。群众问卷中男性占比 48.4%, 女性占比 51.6%。在年龄方面, 25 岁以下占 23.1%, 26 至 35 岁占 30.4%, 36 至 45 岁占 23.1%, 46 至 55 岁占 20%, 50 岁以上占 15.5%, 占比基本均匀。企业问卷中男

性占比 54.4%, 女性占比 45.60%, 在年龄方面, 受访企业主中 25 岁以下占比 11.4%, 26 岁至 35 岁占比 26.1%, 36 岁至 45 岁占比 25.9%, 46 岁至 55 岁占比 21.1%, 56 岁以上占比 15.50% 性别与年龄分布均满足理想情况。见表 2。

3.2 群众问卷描述性分析

对群众问卷的描述统计可以看出 (见表 3), 各个维度的均值都在 3.8 至 3.9 之间, 受访者的态度处于中等偏上水平。

在认知水平, 技术信任, 社会协同, 政策感知上, 各维度问题的均分皆在 3.7 分以上, 表明群众在各个维度皆有良好的反馈。

3.3 企业问卷描述性分析

从企业问卷的描述性统计可以看出 (见表 4), 对比平均值可以看出, 各问题的的平均值大致分布在 3.88 到 4.01 之间, 说明企业在这些方面的态度或情况处于一个相对较高的水平, 表明受访企业对于废气制氢技术具有较高的认可度以及行动度。对比标准差可以看出, 标准差大多在 1.012 到 1.257 之间, 说明数据的离散程度不是特别大, 各问题的回答相对较为集中, 企业总体在各个维度的态度

表2 问卷基本情况

群众问卷			企业问卷		
性别	男	人数 (百分比)	性别	男	人数 (百分比)
	女			女	
年龄	25岁及以下	11.00%	年龄	25岁及以下	11.40%
	26岁-35岁	30.40%		26岁至35岁	26.10%
	36岁-45岁	23.10%		36岁至45岁	25.90%
	46岁-55岁	20.00%		46岁至55岁	21.10%
	56岁及以上	15.50%		56岁以上	15.50%

表3 群众描述统计

问题	平均值	标准差
3、您是否了解工业废气可通过技术手段转化为氢能源?	3.91	1.129
4、您认为本地工业区废气排放对健康的影响程度如何?	3.85	1.101
5、您是否了解过“废气制氢工厂”对空气质量改善的案例?	3.86	1.125
6、您是否相信将废气转化为氢能的技术能有效减少污染?	3.90	1.137
7、您对“零碳园区”中废气循环系统的安全性是否放心?	3.93	1.122
8、若社区附近建设废气制氢设施, 您关注环保性还是潜在风险?	3.95	1.102
9、您是否愿意为使用废气制氢生产的绿色商品支付10%溢价?	3.84	1.082
10、若开通废气治理公众监督平台, 您会定期查看数据吗?	3.79	1.157
11、您会优先选择参与工业碳减排认证企业的产品吗?	3.89	1.114
12、您认为居民社区与工业园区应如何协作治理废气?	3.93	1.129
13、您是否支持将废气制氢项目收益用于补偿周边居民?	3.88	1.172
14、若开展废气治理科普活动, 您更希望获得哪类信息?	3.86	1.108
15、您认为当前对废气超标排放的处罚力度是否足够?	3.91	1.116
16、您是否知晓通过手机App举报工业污染行为的渠道?	3.86	1.118
17、您对“以废养氢”模式(废气制氢反哺社区)的支持度如何?	3.92	1.162

较为统一，差异不大。

3.4 群众认知 – 行为矩阵与分析

矩阵各项指数源于各板块问题转化。通过分析群众认知 – 行为矩阵（见图 1）可以将人群分为四个群体，在群体分布上，低认知 – 低行为与高认知 – 高行为人群占比较多，高认知 – 低行为与低认知 – 高行为人群占比较少，表明群体中认知 – 行为综合分布成一定的两极化。通过分析认知指数与行为指数数据，两个数据不满足正态性（见表 5），通过相关性检验（见表 6）认知指数与行为指数的 P 值 <0.001，相关系数为 0.321, 证明认知指数与行为指数具有正相关性，提升认知指数可以促进行为的发生。低认知 – 低行为人群中各年龄段占比（见图 2）。可知中老年群体占比最大，合计 75%（其中 30 至 35 岁占比 16%），提升人群认知的主体为中老年。

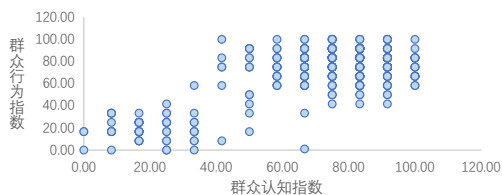


图1 群众认知-行为矩阵

3.5 政策对企业废气处理占比影响因素探究

通过探究政策因素与未来三年预算占比（见表 7）,P 值小于 0.001，具有显著的相关性，为探究两者间具体影响形式，建立政策杠杆效应分析模型，将企业 Q9（碳排放交易激励）与 Q15（预算分配）做回归分析：预算分配 = $\beta_0 + \beta_1 \times \text{政策激励} + \varepsilon$ ，其中系数待定。对两变量进行 OLS 回归分析（见表 7~10），有显著性 P 值均 <0.05，表明碳排放交易激励对未来废气处理预算有显著影响，R 方的值为 0.217，可以解释 21.7% 的方差改变，VIF 值小于 10，容差大于 0.1，表明有良好的共线性 F 值远大于 1，模型整体有效。通过对表 10 的解读，有政策激励系数为 0.48，常数项为 2.011，则有预算分配 = 2.011 + 0.48* 政策激励，表示政策激励每提升一个单位，预算分配占比就增加 0.48%。

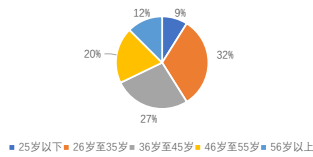


图2 低认知-低行为人群中各年龄段占比

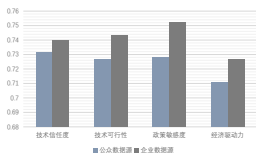


图3 公众-企业核心指标对比

表4 企业描述统计

问题	平均值	标准差
3、您企业当前废气处理成本占总环保投入的比例约为？	2.65	1.257
4、现有废气处理技术对资源化利用（如制氢）的支持度如何？	3.99	1.06
5、您是否监测废气成分数据用于潜在价值挖掘？	3.99	1.078
6、您认为氢储能技术与废气制氢系统的兼容性如何？	3.96	1.067
7、您是否考虑引入第三方技术团队开发定制化废气制氢方案？	3.94	1.072
8、您对“废气-绿氢-燃料电池”闭环生产模式的投资兴趣如何？	3.9	1.107
9、碳排放交易收益对您升级废气处理设备的激励作用如何？	4.01	1.066
10、现行环保补贴政策是否覆盖废气制氢设备的购置成本？	4.01	1.012
11、您如何评价地方政府对废气资源化项目的审批效率？	4.01	1.038
12、您是否愿与科研机构共建工业废气制氢实验室？	3.98	1.069
13、您认为工业园区共享式废气集中制氢设施的可行性如何？	3.99	1.084
14、您对氢能重卡物流替代柴油车的供应链协同需求如何？	3.93	1.098
15、未来3年您计划将多少比例的废气处理预算用于制氢技术？	3.93	1.094
16、是否会将废气制氢纳入企业ESG报告的核心指标？	3.96	1.044
17、您对“无废工厂”认证带来的品牌溢价预期如何？	3.88	1.087

表5 正态性检验

	柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 ^a			夏皮洛-威尔克		
	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性P值
认知指数	0.248	490	0.000	0.815	490	<0.001
行为指数	0.255	490	0.000	0.817	490	<0.001

a. 里利氏显著性修正

表6 相关性检验

			认知指数	行为指数
斯皮尔曼 Rho	认知指数	相关系数	1	0.321**
		显著性（双尾）		<0.001
		N	490	490
	行为指数	相关系数	0.321**	1
		显著性（双尾）	<0.001	
		N	490	490
** 在 0.01 级别（双尾），相关性显著。				

表7 政策因素与未来三年预算占比的相关性

			问题9	问题15
斯皮尔曼 Rho	问题9	相关系数	1.000	0.254**
		显著性（双尾）	<0.001	
		N	498	498
	问题15	相关系数	0.254**	1.000
		显著性（双尾）	<0.001	
		N	498	498

** 在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

表8 模型摘要

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错误	R 方变化量	F 变化量	自由度1	自由度2	显著性 F 变化量
1	0.468*a	0.219	0.217	0.96786	0.219	138.967	1	496	0
a 预测变量: (常量), 9、碳排放交易收益对您升级废气处理设备的激励作用如何？									

表9 ANOVAa

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
1回归	130.179	1	130.179	138.967	.000b
残差	464.634	496	0.937		
总计	594.813	497			

- a. 因变量: 15、未来 3 年您计划将多少比例的废气处理预算用于制氢技术？
- b. 预测变量: (常量), 9、碳排放交易收益对您升级废气处理设备的激励作用如何？

表10 模型

系数a											
模型		未标准化系数		标准化系数				相关性			共线性统计
1	常量	B	标准错误	Beta	t	显著性	零阶	偏	部分	容差	VIF
		2.011	0.169		11.913	0.000					
	问题9	0.480	0.041	0.468	11.788	0.000	0.468	0.468	0.468	1.000	1.000

- a. 因变量: 15、未来 3 年您计划将多少比例的废气处理预算用于制氢技术？

表格 11 数据源

指标类型	公众数据源	企业数据源
技术信任度	群众 Q6 – Q8 均值（技术信任风险）	企业 Q6（技术兼容性）
技术可行性	群众 Q3（技术认知）	企业 Q4 + Q6 均值（资源化支持）
政策敏感度	群众 Q15（处罚感知）	企业 Q9 – Q11 均值（政策响应）
经济驱动力	群众 Q9（支付溢价）	企业 Q15 + Q17 均值（预算分配 + 溢价预期）

3.6 公众 – 企业核心指标对比分析

如图 3, 各项指数来源为有关问题转化 (见表 11)。对比指标分析可知, 在总体特征具有高度一致性: 公众与企业四大指标得分均处于 0.71–0.75 区间, 表明社会 – 产业协同基础较好。同时企业得分全面略高于公众, 表明企业行动略超前于社会认知。具体表现如下, 企业技术可行性认知高于公众, 但公众支付意愿未同步提升, 表明技术成果难以转化为市场价值, 易形成“实验室 – 市场鸿沟”; 企业对政策敏感度显著高于公, 政策执行易出现“企业热、公众冷”的情况, 容易造成政策红利被少数企业垄断以及公众参与度不足削弱治理效果; 企业经济驱动力仅微弱领先公众绿色消费需求未充分释放, 影响产业可持续发展。

4 结语

4.1 政策杠杆效应显著

碳排放交易政策对企业减排投资的驱动作用明确。回归分析表明, 政策激励每提升 1 单位 (如碳价上涨 10 元 / 吨), 企业未来三年制氢技术预算占比增加 0.48%。这一发现为梯度化碳价机制设计提供了直接依据, 建议对高投入企业 (预算占比 > 18.6%) 给予额外碳配额奖励, 强化政策边际效应。

4.2 技术成熟与市场脱节

企业技术兼容性与资源化支持度表明氢能产业链已具备较高成熟度, 但公众支付意愿与技术认知存在滞后。通过认知 – 行为矩阵分析, 发现低认知 – 低行为群体占比达 32% (以中老年为主), 建议针对该群体开展社区科普活动, 并结合绿色消费券提升支付意愿。

4.3 社会协同机制薄弱

公众对环保风险的关注度显著高于企业对风险的评估, 而企业政策响应强度远超公众参与水平。为此, 需建立“社区 – 园区”收益共享机制, 例如将废气制氢项目收益的 5%–10% 用于补偿周边居民, 并开发公众监督平台, 实现环境共治。

参考文献:

- [1] 徐刚强, 张珂, 刘涛. 工业废气主要污染物治理措施研究[J]. 青海环境, 2024,34(02):92–95.
- [2] 何歆宇. 化工企业废气污染治理技术综述[J]. 中国石油和化工, 2024,(07):84–86.
- [3] 吴锡, 蒋馥阳. 石油化工企业废气污染治理与控制研究[J/OL]. 清洗世界, 1–9 [2025–03–11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4834.TQ.20250307.1701.016.html>.
- [4] 陈健, 姬存民, 卜令兵. 碳中和背景下工业副产气制氢技术研究与应用[J]. 化工进展, 2022,41(03):1479–1486.

DOI:10.16085/j.issn.1000–6613.2021–2240.

- [5] 翟振铎. 环境工程中工业生产废气污染源在线监控研究[J]. 环境科学与管理, 2024,49(11):126–129.
- [6] 张燕, 谢玮. 氢能产业调查[J]. 中国经济周刊, 2024,(19):26–37.
- [7] 阳国军. 绿氢在中国工业领域应用现状与前景[J]. 国际石油经济, 2023,31(06):63–69.
- [8] 周佳琦, 金海洋, 申晓彤. 工业有机废气治理的综述[J]. 化工安全与环境, 2022,35(49):22–24.
- [9] 赖奇春. 氢能成为工业降碳利器[N]. 经济日报, 2025–01–17(006). DOI:10.28425/n.cnki.njjrb.2025.000418.
- [10] 郑欣, 郭新良, 张胜寒. 氢能源及综合利用技术[M]. 化学工业出版社, 202211.265.
- [11] 吴博峰. 国家能源局: 推动燃料电池汽车试点应用[N]. 中国消费者报, 2025–03–04(004).
- [12] 彭永伦. 氢能在能源革命中的重要作用[J]. 能源与节能, 2025,(02):13–17.DOI:10.16643/j.cnki.14–1360/td.2025.02.055.
- [13] 舟丹.《2024 中国绿氢产业发展蓝皮书》发布[J]. 中外能源, 2024,29(10):17.
- [14] 韩忠楠. 加大政策支持力度推动氢能产业可持续发展[N]. 证券时报, 2025–03–04(A04).
- [15] 赵陈怡. 张国强: 两会建议落地有声氢能产业发展提速[N]. 中国财经报, 2025–03–04(003).
- [16] 国家发展改革委. 国家发展改革委举行新闻发布会 介绍氢能产业发展中长期规划 (2021–2035 年) 有关情况 [R/OL]. 北京: 国家发展改革委, 2022. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/xwfb/202203/t20220323_1320098.html.
- [17] International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2024[R/OL]. Paris: International Energy Agency, 2024. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024#overview>.
- [18] 尹碧波, 郑佳琦, 孙泽萱等. “双碳”目标下中国降碳减污扩绿增长协同: 效应测度、空间联系与区域差异[J/OL]. 环境科学研究, 1–17[2025–03–11] <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001–6929.2025.03.02>.
- [19] 钱晓燕. “双碳”目标下自我效能如何促进或抑制绿色消费? [J]. 当代济, 2025,42(03):67–74.
- [20] 武红, 许召元. 中国碳减排主体及其行为研究 – 基于李克特量表问卷调查方法[R]. 北京: 国务院发展研究中心, 2014:2014 年第 137 号 (总 4636 号)。
- 作者简介: 龚秀, 联系方式: xgong@gzu.cn。