

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域PM_{2.5}和臭氧复合污染气象影响评估..... 杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)

“2+26”城市PM_{2.5}与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析..... 吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)

武汉军运会前后大气PM_{2.5}化学组分和来源..... 刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)

2016~2020年邯郸市冬季PM_{2.5}污染特征与来源解析..... 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)

渭南市冬季PM_{2.5}化学组成及来源解析..... 郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)

长三角城郊冬夏PM_{2.5}中铵盐的形成过程及来源解析..... 项妍琨, 曹芳, 张雯淇, 范美益, 章炎麟 (6486)

上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析..... 杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)

吕梁市PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评估..... 车玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)

广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响..... 吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)

南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征..... 陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)

京津冀地区“煤改电”对PM_{2.5}污染的健康效益评估..... 张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)

基于化学损耗修正的青岛胶州市环境VOCs来源解析..... 孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)

聊城市城区夏季VOCs污染特征及来源解析..... 李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)

基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析..... 张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)

中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素..... 欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)

基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展..... 曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)

京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析..... 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)

中国水泥行业通过CCUS技术的减排潜力评估..... 魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)

钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估..... 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)

珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素..... 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)

东莞市低碳路径下加速电气化对CO₂和污染物协同减排影响..... 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)

县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系..... 刘贤赵, 李阳 (6664)

城市草坪温室气体排放特征及影响因素..... 陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)

双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应..... 刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)

中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估..... 赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)

黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险..... 彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)

黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价..... 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)

土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响..... 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)

内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价..... 王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)

锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系..... 孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷杰 (6754)

西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素..... 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)

巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价..... 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)

亚硫酸氢盐强化微量Fe²⁺活化过二硫酸盐降解扑热息痛..... 莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)

污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星..... 郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)

NaHCO₃活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附..... 魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)

竹基N、P共掺杂活性炭的制备及其锂离子吸附性能..... 王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)

西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析..... 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞思, 唐颖, 李鹏 (6833)

生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析..... 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)

农田土壤碳循环过程及其量化方法..... 孙昭安, 朱彪 (6857)

生物炭施用5a后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响..... 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霖, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)

喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征..... 蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)

中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估..... 陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)

基于MGWR的土壤pH值空间建模及其影响因素分析..... 赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)

某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析..... 张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)

重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析..... 张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)

高垦丘陵地区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征..... 陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)

有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响..... 邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)

有机肥处理对旱地土壤细菌群落及玉米生产力的影响..... 林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)

微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响..... 段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)

设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响..... 赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)

3种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系..... 李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)

河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构..... 刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)

玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析..... 汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)

外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染..... 王楷, 王丽, 王一钰, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)

1株肠杆菌与硫酸联合施用对水稻积累镉的影响..... 张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)

《环境科学》第44卷(2023年)总目录..... (7045)

《环境科学》征订启事(6507) 《环境科学》征稿简则(6620) 信息(6743, 6846, 6856)

钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估

宋晓聪¹, 杜帅², 邓陈宁¹, 谢明辉¹, 沈鹏^{1*}, 赵慈¹, 陈忱¹, 刘晓宇¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 北京国电富通科技发展有限公司, 北京 100070)

摘要: 钢铁行业是中国碳密集度最高的工业行业之一, 为分析钢铁行业生命周期碳排放及碳减排潜力, 从生命周期角度构建碳排放核算模型, 以 2020 年为例开展实证分析, 通过优化废钢使用量、化石燃料燃烧量、电力碳足迹因子以及清洁运输比例 4 项变量, 对钢铁行业生命周期碳减排潜力作预测评估, 同时使用敏感性分析确定影响钢铁生命周期碳减排因素的关键程度。结果表明, 2020 年中国钢铁行业全生命周期二氧化碳 (CO₂) 排放总量约 24.04 亿 t, 其中原料获取和加工生产阶段是钢铁行业碳排放的关键环节, 占钢铁行业生命周期 CO₂ 排放总量的 98% 以上。从 CO₂ 排放源类别分析, 化石燃料节约和外购电力清洁化是钢铁行业降碳的重中之重。到 2025 年, 通过推广低碳技术、优化电力结构、增加废钢炼钢量、提高清洁方式运输比例, 分别可使钢铁行业实现 20%、6%、5% 和 1% 的碳减排潜力。化石燃料燃烧量对钢铁行业生命周期 CO₂ 排放的影响最显著, 电力碳足迹因子和废钢炼钢使用量次之。关于钢铁行业节能低碳技术, 短期内以推广轧钢工序与高炉炼铁工序低碳技术为主, 未来随着电炉炼钢比例逐步增加, 以普及电炉炼钢工序低碳技术推动钢铁行业全生命周期碳减排潜力显著提升。

关键词: 钢铁行业; 生命周期; 碳排放; 减排潜力; 敏感性分析

中图分类号: X24; X322 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6630-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301074

Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry

SONG Xiao-cong¹, DU Shuai², DENG Chen-ning¹, XIE Ming-hui¹, SHEN Peng^{1*}, ZHAO Ci¹, CHEN Chen¹, LIU Xiao-yu¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Beijing Guo Dian Fu Tong Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: The steel industry is one of the most carbon-intensive industries in China. To analyze the carbon emission and carbon reduction potential of the steel industry in the life cycle, a carbon emission accounting model was built from the perspective of the life cycle. Taking the year 2020 as an example, an empirical analysis was carried out to predict and evaluate the carbon reduction potential of the steel industry in the life cycle by optimizing four variables, namely, scrap usage, fossil fuel combustion, electric power carbon footprint factor, and clean transportation proportion. At the same time, sensitivity analysis was used to determine the key degree of factors affecting carbon emission reduction in the life cycle of steel. The results showed that in 2020, the total life cycle CO₂ emissions of the steel industry in China was approximately 2.404 billion tons, of which the acquisition and processing of raw materials were the key links in the carbon emissions of the steel industry, accounting for more than 98% of the total life cycle CO₂ emissions of the steel industry. From the analysis of CO₂ emission source categories, fossil fuel savings and outsourcing power cleaning were the top priorities of carbon reduction in the steel industry. By 2025, the steel industry could achieve 20%, 6%, 5%, and 1% carbon emission reduction potential by respectively promoting low-carbon technology, optimizing the power structure, increasing the number of steel scraps, and increasing the proportion of clean transportation. The fossil fuel combustion had the most significant impact on the life cycle CO₂ emissions of the steel industry, followed by the electric power carbon footprint factor and scrap steelmaking usage. With regard to low-carbon technologies in the steel industry, in the short term, the promotion of low-carbon technologies in the steel rolling process and blast furnace ironmaking process should be the main focus. Later, with the gradual increase in the proportion of electric furnace steelmaking, the promotion of low-carbon technologies in the electric furnace steelmaking process will significantly improve the carbon emission reduction potential of the steel industry throughout its life cycle.

Key words: steel industry; life cycle; carbon emissions; emission reduction potential; sensitivity analysis

我国是钢铁生产大国, 2020 年钢铁总产量占世界钢铁总产量的 57%^[1], 碳排放量占比约 60% 左右^[2]. 我国在第七十五届联合国大会和气候雄心峰会上均强调了“双碳”战略目标^[3,4], 这充分表明了中国走低碳发展道路的决心. 据统计, 高炉-转炉炼钢吨钢碳排放是电炉炼钢的 4 倍左右^[5], 长期以来, 我国以高炉-转炉炼钢为主, 目前电炉钢产量仅占粗钢总产量的 10%^[6,7], 而美国发达国家电炉炼钢比例达到了 70%^[1]. 钢铁行业作为两高行业^[8], CO₂ 排放贡献最为突出^[9]. 因此, 钢铁产业碳排放核算和减排潜力研究对实现我国“双碳”战略目标具有

重要意义.

目前对于钢铁工业碳排放的研究主要分为两种: 一种从宏观的国家或城市行业层面出发, 分析行业碳排放总量情况. 例如, 杨楠等^[10]核算了唐山市钢铁行业化石燃料燃烧、工艺过程等碳排放, 不包含外购电力碳排放. 薛英岚^[8]等通过碳排放-能源集

收稿日期: 2023-01-11; 修订日期: 2023-03-19

基金项目: 宁波市重大科技攻关项目 (2021ZDYF020047); 中央财政科技计划结余经费专项 (2021-JY-07)

作者简介: 宋晓聪 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为钢铁行业全生命周期碳评价, E-mail: song_xiaocong@cares.org.cn

* 通信作者, E-mail: 3983720@qq.com

成模型预测我国钢铁行业碳排在 2025 年之前达到峰值,峰值在 16.5 亿 t 左右(含直接和外购电力等间接排放). 还有一些致力于钢铁能源领域碳排放及碳减排潜力的研究, Wang 等^[11]通过碳排放因子法探究了中国“十五”至“十二五”时期钢铁行业能源活动领域的碳排放特征. Nwachukwu 等^[12]分析了生物质替代在减少钢铁行业化石能源燃烧排放 CO₂ 的作用,结果表明,使用生物质产品最高可减少 43% 的 CO₂ 排放. Ren 等^[5]表示通过全面应用主流低碳技术可将 CO₂ 排放量减少 40% 左右. 综合分析行业层面的碳排放核算范围基本上只涉及钢铁生产阶段的直接碳排放(范围一)和外购电力、热力的碳排放(范围二),对于原料获取、运输以及废弃处置等的碳排放都未考虑在内.

另一种聚焦微观企业层面,评估不同工艺路线下钢铁生产的碳排放情况. 那洪明等^[13]分析某钢铁企业电炉炼钢的碳排放时排除了铁矿石等原材料获取阶段的碳排放. Feng 等^[14]基于投入产出模型对某钢材生产企业高炉-转炉冶炼工艺碳排放进行核算,同时比较了不同 CO₂ 捕集流程对碳排放的影响,未计算上游含碳材料消耗、运输以及粗钢产品出厂运输、废钢处置产生的 CO₂ 排放量;张孝存^[15]统计了电炉法中废钢炼钢的碳排放(0.48 t,以 CO₂ 计,下同),未包含间接碳排放. 赵艺伟等^[16]研究了某中小型高炉-转炉长流程钢厂的 CO₂ 排放量和排放强度,核算边界为从原材料进厂到成品出厂. 相比行业层面碳排放核算,有企业层面的研究增加了部分范围三的碳排放量像外购原料的碳排放,但是像运输以及废弃处置等阶段的碳排放(范围三)尚未考虑在内.

综上所述,虽然目前有关我国的钢铁碳排放核算无论是从行业层面还是企业层面都进行了一定的研究,但是大部分的碳排放核算只涉及范围一和二,并没有涵盖钢铁全生命周期阶段. 目前,许多发达国家从生命周期视角出发分析钢铁碳排放特征^[17~20],但是我国钢铁行业生命周期碳排放相关的研究仍然有限. 因此,亟需从全生命周期的角度开展覆盖范围一、范围二、范围三的钢铁行业碳排放核算和减排潜力评估工作. 本研究采用生命周期评价技术进行钢铁行业碳排放特征分析,通过敏感性分析辨识影响钢铁 CO₂ 减排关键因素,开展钢铁行业 CO₂ 减排潜力评估工作,以期为钢铁行业碳排放核算工作提供理论依据,并为钢铁行业碳减排提供技术参考.

1 材料与方 法

1.1 系统边界

本研究从碳足迹的角度对钢铁行业 2020 年碳

排放(即指 CO₂ 排放)进行核算,从粗钢产品入手,定义核算系统边界为钢铁行业粗钢产品的原料获取与加工生产阶段、运输阶段、使用阶段和废弃处置阶段. 系统边界图如图 1 所示.

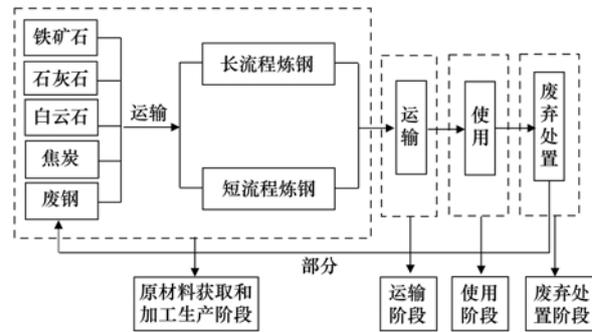


图 1 系统边界

Fig. 1 System boundary

1.2 核算模型

钢铁行业全生命周期主要碳排放源分布在原材料获取和加工生产阶段、运输阶段以及废弃处置阶段.

1.2.1 原料获取和加工生产阶段核算模型

钢铁行业的原材料获取和加工生产阶段碳排放可进一步划分成原料开采、大宗物料运输以及生产钢铁的能源燃烧、工艺过程和外购电力热力的碳排放. 即:

$$C_{\text{原-生}} = C_{\text{原开采}} + C_{\text{运输2}} + C_{\text{能源}} + C_{\text{生产}} + C_{\text{电热}} \quad (1)$$

式中, $C_{\text{原-生}}$ 表示原料获取和加工生产阶段碳排放, t; $C_{\text{原开采}}$ 表示原料开采产生的碳排放, t; $C_{\text{运输2}}$ 表示大宗物料运输至钢铁生产厂的碳排放, t; $C_{\text{能源}}$ 表示钢铁生产过程中化石能源燃烧产生的碳排放, t; $C_{\text{生产}}$ 表示钢铁生产工艺过程产生的碳排放, t; $C_{\text{电热}}$ 表示钢铁生产过程中外购电力热力产生的碳排放, t.

各部分碳排放计算方法如下.

原材料开采碳排放计算, 主要指铁矿石、石灰石和白云石等原料的开采产生的碳排放, 计算公式如下:

$$C_{\text{原开采}} = \sum_{j=1}^{\alpha} O_j \times m_j \quad (2)$$

式中, α 表示原材料使用种类, O_j 表示原材料的碳足迹因子, $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$; m_j 表示原料消耗量, t.

大宗物料运输碳排放计算, 主要指铁矿石、石灰石、白云石和废钢以及原煤、焦炭等大宗物料运输到钢铁生产厂的碳排放, 考虑到运输工具从钢铁生产厂返回时是空荷, 引入空车修正系数 $t^{[21]}$, 即实际运距 = 单程运输距离 $\times t$, 计算公式如下:

$$C_{\text{运输2}} = \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{j=1}^{\alpha} A_{ji} \times m_{ji} \times D_i \times t \quad (3)$$

式中, α 表示大宗物料运输种类, μ 表示大宗物料运输方式类别, A_{ji} 表示第 j 类物料用 i 种运输方式的运输距离, km; m_{ji} 表示第 j 类物料用 i 种运输方式的运输量, t; D_i 表示所选运输工具的碳足迹因子, $t \cdot (t \cdot \text{km})^{-1}$; t 表示空车修正系数, 根据文献[21]可知空载时的环境负荷是满载时的 0.67 倍, 故取 $t = 1.67$.

化石能源燃烧碳排放计算:

$$C_{\text{能源}} = \sum_{i=1}^n E_i \times F_i \quad (4)$$

式中, n 表示使用化石能源种类, E_i 表示钢铁行业能源 i 用量, t 或 m^3 ; F_i 表示能源 i 的碳足迹因子, $t \cdot t^{-1}$ 或 $t \cdot \text{m}^{-3}$.

钢铁生产工艺过程碳排放计算, 主要有两个来源: 炼铁熔剂高温分解和炼钢降碳过程.

$$C_{\text{生产}} = \sum_{r=1}^{\beta} O_r \times S_r - B \times b \quad (5)$$

式中, β 表示熔剂种类, O_r 表示钢铁行业熔剂 r 的净消耗量, t; S_r 表示熔剂 r 的碳足迹因子, $t \cdot t^{-1}$; B 表示钢铁行业粗钢产量, t; b 表示固碳产品的碳足迹因子, $t \cdot t^{-1}$.

外购电力热力碳排放计算:

$$C_{\text{电热}} = C_{\text{电}} + C_{\text{热}} = H_{\text{电}} \times h_{\text{电}} + H_{\text{热}} \times h_{\text{热}} \quad (6)$$

式中, $H_{\text{电}}$ 表示钢铁行业消耗的外购电力量, $\text{MW} \cdot \text{h}$; $h_{\text{电}}$ 表示电力碳足迹因子, $t \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$; $H_{\text{热}}$ 表示钢铁行业消耗的外购热力量, GJ; $h_{\text{热}}$ 表示热力碳足迹因子, $t \cdot \text{GJ}^{-1}$.

1.2.2 钢铁运输阶段核算模型

钢铁运输阶段的碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{运输1}} = \sum_{i=1}^{\gamma} G_i \times J_i \times D_i \times 1.67 \quad (7)$$

式中, γ 表示运输方式类别, G_i 表示第 i 类运输方式钢材运输量, t; J_i 表示钢材产品由产地至消费地的运输距离, km; D_i 表示所选运输工具的碳足迹因子, $t \cdot (t \cdot \text{km})^{-1}$.

1.2.3 钢铁废弃处置阶段核算模型

该阶段的碳排放源自废钢铁从产地运输到废钢铁加工厂以及废钢加工过程剪切机、落锤、破碎机等设备运行的电力消耗. 计算公式如下:

$$C_{\text{处置}} = C_{\text{运输3}} + C_{\text{电废钢}} \quad (8)$$

$$C_{\text{运输3}} = \sum_{i=1}^{\gamma} M_i \times K_i \times D_i \times 1.67 \quad (9)$$

$$C_{\text{电废钢}} = M \times P_{\text{电}} \times h_{\text{电}} \quad (10)$$

式中, $C_{\text{运输3}}$ 表示废钢由产地运输到废钢铁加工厂

的碳排放, t; $C_{\text{电废钢}}$ 表示废钢加工分选过程电力消耗产生的碳排放, t; γ 表示运输方式类别, M_i 表示第 i 类运输方式社会废钢运输量, t; K_i 表示废钢由产地至废钢加工厂的运输距离, km; D_i 表示所选运输工具的碳足迹因子, $t \cdot (t \cdot \text{km})^{-1}$; M 表示用于冶炼钢铁的社会废钢量, t; $P_{\text{电}}$ 表示 1 t 废钢加工消耗的电量, $(\text{MW} \cdot \text{h}) \cdot t^{-1}$; $h_{\text{电}}$ 表示电力碳足迹因子, $t \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$.

1.3 碳足迹因子

碳足迹因子是碳排放核算模型的重要参数, 由于能源结构和生产方式影响, 不同国家和地区碳足迹因子具有较大差异. 对于碳足迹排放因子数据的选择, 本研究遵循以下优先次序: ①参考国内成熟的数据库; ②参考国内文献研究; ③参考国外数据库及研究成果; ④对于数据质量无法保证的数据, 不予采用.

1.3.1 能源碳足迹因子

化石能源碳足迹因子包括能源开采、加工等上游阶段碳排放和能源直接燃烧两部分碳排放. 本研究根据 IPCC 温室气体清单指南、综合能耗计算通则计算化石能源燃烧阶段碳排放因子^[22~24], 化石能源开采、加工等上游阶段碳排放因子参考中国生命周期基础数据库 (CLCD) 和已有研究获取^[25,26]. 电力碳足迹因子参考贾铨修^[27]研究的数值 $[0.64 t \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$, 2021 年全国平均电网碳排放因子, 该数值选取 IPCC2006 提供的 95% 置信区间下限的结果偏于保守. 能源碳足迹因子具体如表 1 所示.

1.3.2 原辅料开采碳足迹因子

根据已有研究提供的资源与能耗消耗清单, 结合上文的能源碳足迹因子, 对数据进行更新, 整理后钢铁的原辅料碳足迹因子如表 2 所示.

1.3.3 工业生产阶段碳足迹因子

钢铁生产过程炼铁熔剂主要有白云石和石灰石生产过程的碳足迹因子如表 3 所示.

1.3.4 交通碳足迹因子

交通碳足迹因子采用《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019)^[31]中给出的建材运输碳足迹因子, 如表 4 所示.

1.4 减排潜力分析

本研究通过优化原料结构、化石燃料结构、电力结构和运输结构这 4 个方面 (达到 2025 年水平), 评估相应钢铁行业生命周期的碳减排潜力, 具体情景设置见表 5.

节能技术普及率通过 S 型曲线进行计算^[48], S 型曲线函数公式如下:

表 1 能源碳足迹因子¹⁾

Table 1 Energy carbon footprint factors

能源名称	平均低位发热量 /kJ·kg ⁻¹	折标煤因子 /kgce·kg ⁻¹	单位热值含碳量 (以 C 计)/t·tJ ⁻¹	碳氧化率	分阶段碳排放因子/kg·kg ⁻¹ 或 m ⁻³		碳足迹因子 /kg·kg ⁻¹
					燃烧阶段	上游阶段	
原煤	20 934	0.714 3	26.37	0.94	1.90	0.09 ^[25]	1.99
焦炭	28 470	0.971 4	29.50	0.93	2.86	0.20 ^[26]	3.06
原油	41 868	1.428 6	20.10	0.98	3.02	0.45 ^[25]	3.47
汽油	43 124	1.471 4	18.90	0.98	2.93	0.85 ^[25]	3.78
柴油	42 705	1.457 1	20.20	0.98	3.10	0.65 ^[25]	3.75
燃料油	41 868	1.428 6	21.10	0.98	3.17	0.33 ^[25]	3.50
液化石油气	50 242	1.714 3	17.20	0.98	3.11	0.68 ^[26]	3.79
炼厂干气	46 055	1.571 4	18.20	0.98	3.01	0.20 ^[26]	3.21
天然气	38 979	1.330 0	15.30	0.99	2.16	0.13 ^[25]	2.29
液化天然气	51 498	1.757 2	17.20	0.98	3.18	0.13 ^[25]	3.31
标准煤	29 308	1.000 0	25.80	1.00	2.77 ^[25]	— ²⁾	2.77 ^[25]
电力							0.64 ^[27]
热力							0.11 ^[25,28]

1) 电力碳足迹因子单位 t·(MW·h)⁻¹, 热力碳足迹因子单位 t·GJ⁻¹; 2) “—”表示文章中没有相关数据

表 2 原料开采的碳足迹因子

Table 2 Carbon footprint factors of raw material mining

原料类别	碳足迹因子/t·t ⁻¹	文献
铁矿石	0.054	[15]
白云石	0.017	[29]
石灰石	0.017	[29]

表 3 生产过程的碳足迹因子

Table 3 Carbon footprint factors of production process

熔剂类别	碳足迹因子/t·t ⁻¹	文献
白云石	0.471	[30]
石灰石	0.440	[30]
粗钢	0.015	[30]

表 4 各种运输方式的碳足迹因子

Table 4 Carbon footprint factors of various transport modes

运输方式类别	交通工具类别	碳足迹因子/kg·(t·km) ⁻¹	文献
公路运输	重型柴油货车运输(载重 30 t)	0.078	[31]
	纯电动重卡(载重 30 t)	0.032	[32,33]
铁路运输	铁路运输(中国市场平均)	0.010	[31]
水路运输	干散货船运输(载重 2500t)	0.015	[31]
	内河驳船运输(载重 5 000 t)	0.011	[34,35]
	干散货船运输(载重 20 000 t)	0.006	[34,35]
	干散货船 20 万 t	2.807	[34,35]
远洋运输 ¹⁾	25 万 t 矿砂船	2.089	[35~37]
	40 万 t 矿砂船(燃油)	2.091	[34~36]
	40 万 t 矿砂船(燃液化天然气, LNG)	1.573	[34~36,38]

1) 远洋运输碳足迹因子单位 g·(t·km)⁻¹

表 5 钢铁行业生命周期碳减排潜力评估情景设置^[39~47]

Table 5 Scenario setting for assessment of carbon emission reduction potential in the life cycle of the steel industry

情景类别	情景描述	关键参数选取	关键参数设定	说明
原料结构	提高废钢炼钢比例来降低钢铁行业全生命周期碳排放	废钢炼钢比例/%	30	①废钢炼钢比例参考《废钢铁产业“十四五”发展规划》;
化石燃料	通过应用各种燃料节能低碳技术减少化石能源的消耗来降低钢铁行业全生命周期碳排放	燃料节能低碳技术种类	18	②电力碳足迹因子参考国家发展改革委《以双碳目标为导向的产业链评估与发展路径研究》项目报告数据;
		燃料节能低碳技术普及率/%	30~95	
电力结构	通过两种方式降低钢铁行业全生命周期碳排放:一是调整我国电力结构,增加非化石能源发电量;二是提高电力节能低碳技术的应用降低用电量	非化石能源发电量占全部发电量比重/%	50	④运输结构情景中铁路、水路和公路占比为完成超低改造企业的物资运输
		电力碳足迹因子/t·(MW·h) ⁻¹	0.48	
		电力节能低碳技术普及率/%	25~75	
运输结构	通过推进钢铁企业超低排放改造,提高铁路、水路等清洁方式运输比例降低钢铁行业全生命周期碳排放	完成超低改造产能占比/%	80	
		铁路/%	40	
		水路/%	40	
		公路/%	20	

$$P_{t,y} = (P_{t,n} - P_f) e^{-\frac{(y-n)^2}{2s^2}} + P_f \quad (11)$$

式中, $P_{t,y}$ 和 $P_{t,n}$ 分别为第 y 年和第 n 年技术 t 的普及率; P_f 为技术的最大普及率, 考虑到技术普

及的实际情况, 将 P_f 设置为 95%; S 为渗透参数.

节能技术基本信息见表 6.

中国钢铁行业中间产品量对应单位粗钢折算系数见表 7.

表 6 节能技术基本信息

Table 6 Basic information of fuel-saving technology

工序	技术名称	燃料节约(以工序产品计)/GJ·t ⁻¹	文献	技术普及率/%	文献
烧结	环冷机液密封技术	0.03	[40]	38.57	[41, 42]
	厚料层烧结技术	0.1	[40]	94.44	[43]
	烧结余热发电	0.04	[44]	74.72	[41]
焦化	煤调湿技术(CMC)	0.06	[44]	47.61	[45]
	高炉喷煤技术	0.62	[44]	48.78	[45, 46]
炼铁	热风炉烟气余热回热器	0.3	[44]	87.48	[40, 44]
	高炉自动化控制技术	0.36	[44]	93.11	[40, 44]
	旋转式高风温顶燃热风炉技术	0.23	[40]	85.01	[42]
	高炉鼓风除湿节能技术	0.23	[40]	69.49	[41]
转炉炼钢	转炉烟气余热回收技术	0.5	[44]	86.59	[43, 44]
	钢水真空循环脱气工艺干式(机械)真空系统应用技术	0.1	[40]	22.35	[41]
电炉炼钢	电炉烟气余热回收技术	0.72	[44]	93.57	[45]
	热装热送技术	0.19	[44]	74.09	[40, 44]
轧钢	热轧过程控制模型关键技术	0.26	[44]	89.69	[44]
	加热炉黑体强化辐射节能技术	0.16	[40]	47.98	[42]
	加热炉蓄热式燃烧技术	0.7	[40]	93.92	[40]
	连续退火技术	0.38	[44]	92.19	[43, 40]
综合性技术	能源监测与管理系统	0.32	[44]	73.13	[45]

工序	技术名称	电力节约 GJ·t ⁻¹ (以工序产品计)	文献	技术普及率/%	文献
高炉炼铁	高炉煤气干式余压发电技术(TRT)	0.09	[44]	70.87	[45]
	高炉喷吹废塑料技术	0.11	[44]	60.22	[40, 44]
转炉炼钢	转炉烟气干法除尘技术	0.02	[44]	60.16	[44, 46]
电炉炼钢	废钢预热连续加料技术	0.22	[44]	29.34	[43]
综合性技术	能源监测与管理系统	0.01	[44]	73.13	[45]

表 7 中国钢铁行业中间产品量及原料
对应单位粗钢产品折算系数^[49]

Table 7 Intermediate product volume of iron and steel industry
and conversion coefficient of crude steel product
corresponding to raw materials

项目	烧钢比	焦钢比	铁钢比	粗钢比	轧钢比
数值	1.35	0.33	0.92	1	1.32

1.5 敏感性分析

采用敏感性系数定量分析影响钢铁行业全生命周期碳排放的影响因素^[50, 51], 敏感性系数越大代表该因素对钢铁行业碳排放的影响越大^[51]. 敏感性系数具体计算公式如下:

$$Z = \frac{\Delta C/C}{\Delta x/x} \quad (12)$$

式中, Z 表示敏感性系数; $\Delta C/C$ 表示钢铁行业碳排放变化率; $\Delta x/x$ 表示影响因素变化率.

1.6 不确定性分析

钢铁行业全生命周期碳排放核算需要大量活动水平数据以及碳足迹因子数据, 数据因为时

空异质等因素存在不确定性, 进而会对最终碳足迹核算结果准确性产生影响. 因此本研究基于误差传播方程^[52]对钢铁行业生命周期清单数据的不确定性进行分析, 以确保碳足迹核算结果的可靠有效.

$$L_{N_{ij}} = \sqrt{(L_{T_{ij}})^2 + (L_{R_{ij}})^2} \quad (13)$$

$$L_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(L_{N_1} \times N_1)^2 + (L_{N_2} \times N_2)^2 + \dots + (L_{N_i} \times N_i)^2}}{N_1 + N_2 + \dots + N_i} \quad (14)$$

式中, $L_{N_{ij}}$ 为第 i 个阶段中第 j 种碳源估算的不确定性, %; $L_{T_{ij}}$ 为碳足迹因子的不确定性, %; $L_{R_{ij}}$ 为钢铁行业活动水平数据的不确定性, %; L_{total} 为总的确定性, %; L_{N_i} 为第 i 个阶段的不确定性, %; N_i 为第 i 个阶段不同碳源的碳排放量, 万 t.

2 清单分析

2.1 原料获取和加工生产阶段

2020 年我国钢铁行业粗钢生产的资源能源消

耗清单见表 8, 原料获取阶段大宗物料运输量和距离见表 9。

表 8 钢铁行业粗钢生产的生命周期清单

Table 8 Life cycle inventory of crude steel production in iron and steel industry

种类	名称	单位	数值(2020 年)	文献	
废物利用	废钢	转炉	万 t	1.57×10^4	[49]
		电炉	万 t	7.53×10^3	
资源消耗	铁矿石	进口	万 t	1.17×10^5	[49]
		国产	万 t	9.17×10^4	
	石灰石	万 t	1.22×10^4	[53,54]	
	白云石	万 t	8.59×10^3	[55]	
能源消耗	原煤	万 t	9.80×10^3		
	原油	万 t	0.00		
	焦炭	万 t	4.03×10^4		
	汽油	万 t	2.50		
	柴油	万 t	40.95		
	燃料油	万 t	0.27	[56]	
	液化石油气	万 t	8.85		
	炼厂干气	万 t	0.92		
	天然气	亿 m ³	48.30		
	液化天然气	万 t	691.75		
	电力	MW·h	6.79×10^8		
热力	GJ	1.87×10^8			
粗钢产量		万 t	1.06×10^5	[49]	

表 9 2020 年大宗物料运输至钢铁生产厂的运输量和距离

Table 9 Transportation volume and distance inventory of bulk materials to steel plants in 2020

种类	国家	运输总量 m_i /万 t	文献	运输距离 A_i /km	文献	运输方式 ¹⁾
铁矿石境外运输	澳大利亚	71 312.66	[49,57]	7 000.00	[34]	20 万 t 船舶
	巴西	12 853.78	[34,49]	20 324.77	[36]	20 万 t 船舶
		10 720.00	[34]	20 324.77	[36]	40 万 t 船舶
	其他	22 434.57	[49]	6 494.00	[58]	20 万 t 船舶
境内运输	废钢	8 653.46		670.00		铁路
		5 955.07	[47,49,59,60]	176.00	[58]	公路
		8 653.46		1 390.00		水运
	石灰石	4 550.21		670.00		铁路
		3 131.32	[47,53,54,59,60]	176.00	[58]	公路
		4 550.21		1390.00		水运
	白云石	3 195.03		670.00		铁路
		2 198.73	[47,55,59,60]	176.00	[58]	公路
		3 195.03		1 390.00		水运
	铁矿石	99 125.47	[47,57,59,60]	514.00		铁路
		34 954.79	[33,47,59,60]	176.00	[58]	公路
		74 975.90		1 390.00		水运
	煤炭	30 082.17	[56,61]	670.00		铁路
		15 041.09	[56,62]	176.00	[58]	公路
5 013.70			1 390.00		水运	

1) 境内运输: 公路采用载重 30 t 重型柴油货车运输; 水运铁矿石采用载重 20 000 t 干散货船运输, 其他物资采用载重 5 000 t 的内河驳船运输

2.2 运输阶段

主要考虑将各类粗钢产品(钢材)由生产地向消费地运输, 此外, 2020 年约 95% 粗钢均在国内消费^[49,63,64], 因此, 主要计算国内消费钢材的碳排放。2020 年中国各区域市场钢材销售占比及来源地情况参考焦响^[65]的研究, 具体见图 2。

钢铁行业运输阶段的生命周期清单见表 10。

2.3 废弃处置阶段

2020 年进口废钢仅占废钢资源总量的 0.01%, 因此, 本研究假设钢铁行业所用废钢资源均来源于国内。2020 年钢铁行业废弃处置阶段生命周期清单见表 11。

表 10 钢铁运输阶段的生命周期清单

Table 10 Life cycle inventory of steel transportation stage

地区	运输方式 ¹⁾	运输量 $G^{[63,66]}$ /万 t	运输距离 J_i /km	文献	
华北	本地	铁路	4 228.16	1 289.99	[67]
		公路	10 147.59	332.35	[67]
		水路	2 536.90	1 166.63	[67]
	外地	铁路	527.98	670.00	[58]
		公路	323.00	176.00	[58]
		水路	831.92	1 390.00	[58]
东北	本地	铁路	839.74	605.57	[67]
		公路	2 015.37	210.25	[67]
		水路	503.84	2 549.77	[67]
	外地	铁路	496.60	670.00	[58]
		公路	341.74	176.00	[58]
		水路	496.60	1 390.00	[58]
华东	本地	铁路	6 467.49	528.04	[67]
		公路	15 521.98	194.22	[67]
		水路	3 880.50	1 010.07	[66]
	外地	铁路	3 963.16	670.00	[58]
		公路	2 496.38	176.00	[58]
		水路	7 630.28	1 390.00	[58]
中南	本地	铁路	2 903.44	1 226.33	[67]
		公路	6 968.27	146.76	[67]
		水路	1 742.07	1 003.73	[67]
	外地	铁路	2 197.09	670.00	[58]
		公路	1 367.17	176.00	[58]
		水路	4 496.33	1 390.00	[58]
西南	本地	铁路	1 445.20	1 073.62	[67]
		公路	3 468.48	98.42	[67]
		水路	867.12	446.40	[67]
	外地	铁路	1 689.67	670.00	[58]
		公路	616.54	176.00	[58]
		水路	962.46	1 390.00	[58]
西北	本地	铁路	667.85	919.07	[67]
		公路	1 602.83	146.76	[67]
		水路	400.71	16.34	[67]
	外地	铁路	701.49	670.00	[58]
		公路	218.08	176.00	[58]
		水路	349.14	1 390.00	[58]

1) 公路采用载重 30 t 重型柴油货车运输;水路采用载重 2 500 t 货船运输

表 11 2020 年钢铁废弃处置阶段的生命周期清单

Table 11 Life cycle inventory of steel waste disposal stage in 2020

类别	运输量 M /万 t	文献	运输距离 K_i /km	文献
运输	铁路	3 611.93	670.00	[58]
	公路 ¹⁾	14 447.73	176.00	[58]
类别	吨钢耗电 $P_{电}/(MW \cdot h) \cdot t^{-1}$	文献	所用社会废钢量 M /万 t	文献
废钢加工	电力	0.02	18 059.66	[49,68]

1) 公路采用载重 30 t 重型柴油货车运输

3 结果与讨论

3.1 全生命周期碳排放分析

以 2020 年数据为基准,中国钢铁行业生命周期各阶段的 CO₂ 排放情况见表 12. 本研究发现,钢铁行业 2020 年 CO₂ 排放总量约 24.04 亿 t,原料获取

阶段、加工生产阶段、运输阶段以及废弃处置阶段 CO₂ 排放总量分别为 2.10、21.65、0.23 和 0.06 亿 t. 钢铁生命周期 CO₂ 排放的主要来源为加工生产阶段,占 CO₂ 排放总量的 90.06%,这主要归因于高炉中煤炭等化石燃料的燃烧^[70,71];其次是原料获取阶段,其排放量占 CO₂ 排放总量的 8.73%;运

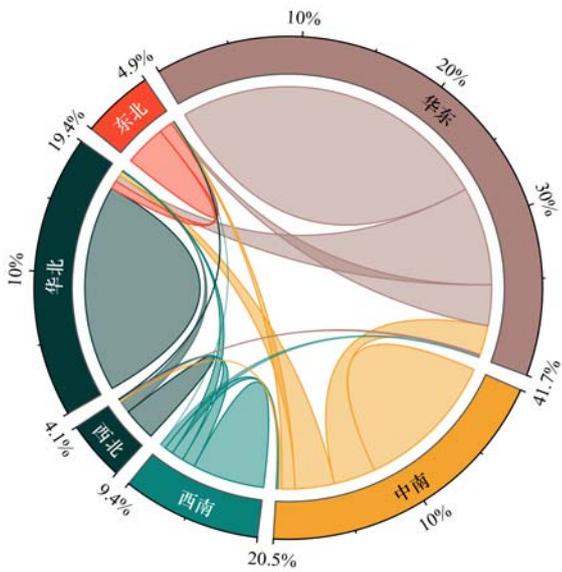


图2 2020年各区域市场钢材销量占比及来源地情况
Fig. 2 Proportion of steel sales volume in each regional market in 2020 and its origin

运输阶段和废弃处置阶段的 CO₂ 排放较低, 分别仅占 CO₂ 排放总量的 0.98% 和 0.24%, 因此钢铁行业减排应重点考虑原料获取和加工生产阶段^[5,71]。从生命周期角度分析, 目前, 中国粗钢的 CO₂ 排放强度为 2.26 t·t⁻¹, 高于钢铁企业广泛报道的 1.8 t·t⁻¹ 左右的碳排放水平^[72-74], 主要是因为本研究碳排放核算范围更大(原材料获取、运输和废钢处置)^[5,75]。

表12 钢铁行业生命周期 CO₂ 排放

生命周期阶段	CO ₂ 排放量/万 t	CO ₂ 排放强度/t·t ⁻¹
原料获取阶段	20 983.52	0.20
加工生产阶段	216 534.78	2.03
运输阶段	2 350.19	0.02
废弃处置阶段	572.75	0.01
合计	240 441.24	2.26

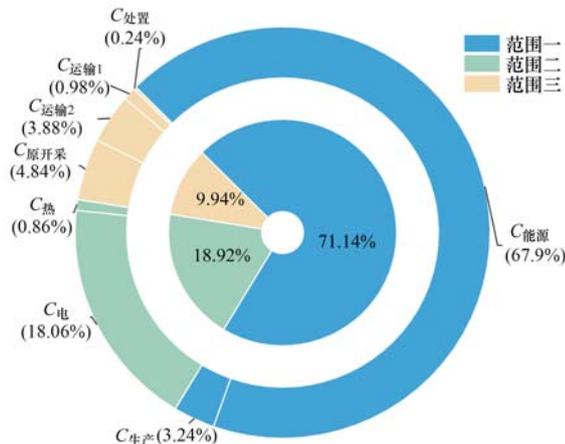


图3 钢铁行业生命周期各类 CO₂ 排放的贡献率
Fig. 3 Contribution rates of various CO₂ emissions in the life cycle of the steel industry

3.2 碳排放影响因素分析

钢铁行业生命周期内, 各类 CO₂ 排放源占比情况如图3所示。钢铁行业范围一、范围二和范围三的 CO₂ 排放量分别占总排放量的 71.14%、18.92% 和 9.94%。范围一涵盖了钢铁生产过程中化石燃料燃烧和生产工艺产生的 CO₂ 排放, 其中化石燃料燃烧贡献了 67.90% 的 CO₂ 排放量, 生产工艺过程仅贡献 3.24% 的 CO₂ 排放量, 即化石燃料燃烧减排是钢铁行业碳减排的重点之一^[71]。范围二指外购电力热力的 CO₂ 排放, 外购电力的 CO₂ 排放量占钢铁行业生命周期 CO₂ 排放总量的 18.06%, 尽管电力行业一直在飞速发展, 但我国目前仍以火力发电为主, 这使我国电力碳足迹因子相对较高^[76], 因此, 外购电力清洁化是钢铁行业降碳的一个重点。范围三包括原料开采、原料运输、成品钢材外部运输以及废钢加工处置的碳排放, 原料开采和外部运输分别贡献了总 CO₂ 排放量的 4.84% 和 4.86%, 废钢的再次加工处置仅贡献 0.24% 的 CO₂ 排放, 因为目前我国废钢用于炼钢, 同时废钢再处理仅消耗一小部分电能^[77]。因此, 原料开采以及外部运输同样是钢铁行业减碳的关键环节。

3.3 碳减排潜力评估

通过上文分析可知废钢使用量、化石燃料燃烧量、电力碳足迹因子以及清洁运输比例是影响钢铁行业全生命周期碳排放的重点因素。因此, 通过优化以上 4 个方面(达到 2025 年水平), 评估钢铁行业生命周期的碳减排潜力。

3.3.1 原料结构

据世界钢铁协会统计, 每吨废钢制成新钢材可以至少节约 1.4 t 铁矿石、0.74 t 煤和 0.12 t 石灰

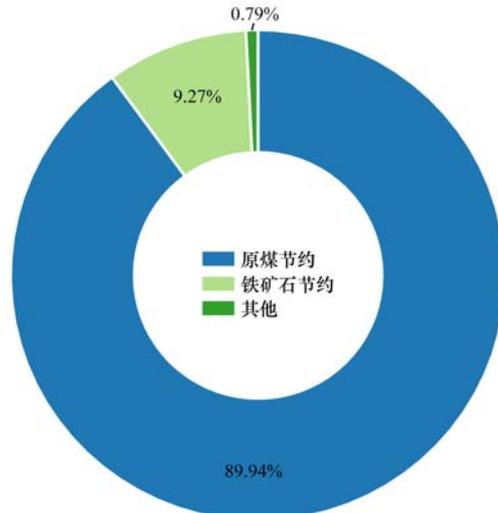


图4 原料结构优化 CO₂ 减排贡献率
Fig. 4 CO₂ emission reduction contribution rate of raw material structure optimization

石^[78]. 假设节约的这些铁矿石均从国外进口, 当全国炼钢废钢比达到 30% 时^[39], 通过优化原料结构

降低的碳排放量具体见表 13.

由表 13 分析可知, 当废钢比由 2020 年的

表 13 原料结构调整减碳潜力分析¹⁾

Table 13 Analysis on carbon reduction potential of raw material structure adjustment

阶段	类型	节约量/万 t	CO ₂ 减排量/万 t	碳减排潜力/%	
原料获取阶段	原料开采	铁矿石	12 153.54	656.29	0.27
		石灰石	1 041.73	17.71	0.01
	运输	铁矿石	12 153.54	673.58	0.28
		石灰石	1 041.73	20.35	0.01
		原煤	6 424.01	103.71	0.04
		废钢	-8 681.10	-169.54	-0.07
加工生产阶段	原煤	6 424.01	12 801.13	5.32	
	石灰石	1 041.73	458.36	0.19	
废弃处置阶段	废钢	-8 681.10	-213.74	-0.09	
合计			14 347.84	5.97	

1) 负数表示增加量

21.85% 提高到 30% 时, 可实现 5.97% 的减碳潜力, 其中节省原煤贡献的碳减排量占到 89.94% (图 4), 是主要贡献环节, 节约铁矿石降低的碳排放占比为 9.27%, 侧面说明钢铁全生命周期碳排放中能消耗碳排放占比高^[71,74].

3.3.2 化石燃料

通过提高 18 项钢铁行业燃料节能低碳技术应用率, 钢铁行业全生命周期碳减排潜力结果见表 14.

表 14 燃料节能低碳技术推广碳减排潜力

Table 14 Promotion of carbon emission reduction potential of fuel energy-saving and low-carbon technology

阶段	2020 年 /万 t	低碳技术应用 /万 t	碳减排潜力 /%
原料获取阶段	20 983.52	20 745.50	0.10
加工生产阶段	216 534.78	169 586.28	19.52
运输阶段	2 350.19	2 350.19	0.00
废弃处置阶段	572.75	572.75	0.00
合计	240 441.24	193 254.72	19.62

通过应用燃料节能低碳技术使钢铁行业全生命周期碳排放降低 19.62%, 减排主要体现在钢铁加工生产阶段, 此阶段减少碳排放量 4.69 亿 t. 进一步分析钢铁加工生产阶段各工序燃料低碳技术的减排贡献度发现 (图 5), 轧钢工序技术贡献了 51.50% 的减排量, 高炉炼铁工序低碳技术进一步扩大应用, 碳减排贡献率达到 28.71%.

3.3.3 电力结构

优化我国电力结构, 非化石能源发电量占比达 50%, 同时增加电力节能低碳技术的应用, 此时, 钢铁行业全生命周期碳排放情况见表 15.

通过优化电力结构和推广电力节能低碳技术, 使得钢铁行业全生命周期碳排放降低 4.55%, 其中电力结构优化减排贡献 (99%) 占据绝对主导



图 5 燃料节能低碳技术减排贡献率

Fig. 5 Contribution rate of fuel energy-saving and low-carbon technology to emission reduction

表 15 电力结构优化前后钢铁行业全生命周期碳排放对比

Table 15 Comparison of life cycle carbon emissions of steel industry before and after power optimization

阶段	2020 年 /万 t	电力优化 /万 t	碳减排潜力 /%
原料获取阶段	20 983.52	20 983.52	0.00
加工生产阶段	216 534.78	205 649.63	4.53
运输阶段	2 350.19	2 350.19	0.00
废弃处置阶段	572.75	522.47	0.02
合计	240 441.24	229 505.82	4.55

地位. 电力节能低碳技术中高炉炼铁工序技术减排潜力占据主导地位, 达 80% 以上 (图 6), 目前国内转炉炼钢仍占据主导^[6,7], 未来随着电炉炼钢的增多, 电炉炼钢工序技术减排贡献度逐步增加^[79].

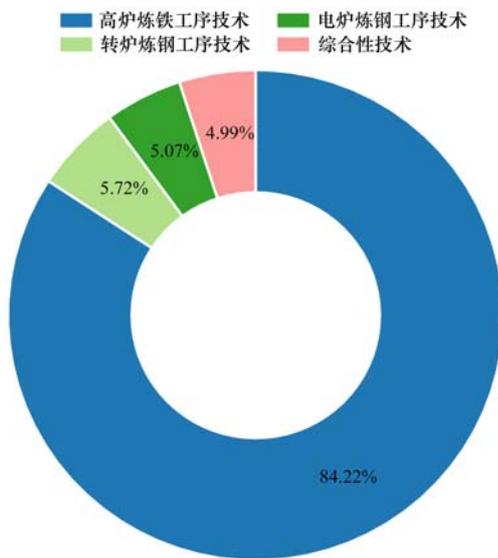


图6 电力节能低碳技术减排贡献率

Fig. 6 Contribution rate of energy conservation and low carbon technology to emission reduction

3.3.4 运输结构

铁矿石境外运输优化:假设用于巴西—中国航线的40万t超大型矿砂船中有30艘改为燃液化天然气(LNG)^[80],20万t远洋运输船型改为25万t海轮;境内原辅料运输优化见表5;成品运输和废弃处置阶段废钢运输:假设优化运输方式后,完成超低改造的企业公路运输均采用载重30t纯电动重卡,其他运输方式与目前保持一致.运输方式优化前后钢铁行业全生命周期碳排放情况见表16.

表16 运输方式优化碳减排潜力分析

Table 16 Analysis of carbon emission reduction potential of transportation mode optimization

阶段	2020年/万t	运输优化/万t	碳减排潜力/%
原料获取阶段	20 983.52	19 641.01	0.56
加工生产阶段	216 534.78	216 534.78	0.00
运输阶段	2 350.19	1 775.32	0.24
废弃处置阶段	572.75	377.41	0.08
合计	240 441.24	238 328.53	0.88

由表16分析可知,通过超低改造当钢铁行业大宗物料清洁运输比例由74%提升至78%,原料获取阶段可实现0.56%的减碳潜力,钢铁行业全生命周期合计可实现0.88%的减碳潜力.分阶段分析,在成品运输阶段,完成超低改造的企业公路运输采用新能源汽车,相比改造前可降低25.07%的碳排放;废弃处置阶段,若公路运输同样采用新能源汽车运输,与优化前相比可降低33.88%的碳排放.

通过推广低碳技术,优化原料结构、电力结构和运输结构,预计2025年钢铁行业分别可实现20%、6%、5%和1%的碳减排潜力.

为对碳减排潜力评估结果进行解释,进一步选

取废钢使用量、化石燃料燃烧量、电力碳足迹因子进行±10%的敏感性分析,清洁方式运输量取10%,敏感性分析结果见表17.

由敏感性分析结果可知,影响钢铁行业碳排放的最敏感因素是“化石燃料燃烧量”(0.68),其次是电力碳足迹因子和废钢使用量,以上两种因素变化对钢铁行业碳排放的影响相似.清洁方式运输量的敏感性系数最低,同时不管增加铁路运输还是水路运输,会对钢铁行业碳减排产生同等效果.因此,对于钢铁行业全生命周期的碳减排,从推广节能技术应用、增加非化石能源占比和提高废钢炼钢比例开始会具有更好的成效.

表17 敏感性分析结果

Table 17 Sensitivity analysis results

因素	变动率/%	敏感系数	
废钢使用量	±10	0.16	
化石燃料燃烧量	±10	0.68	
电力碳足迹因子	±10	0.18	
清洁方式运输量	铁路运输	10	0.02
	水路运输	10	0.02

3.4 不确定性分析

本研究基于误差传播方程量化评估了钢铁行业全生命周期碳足迹核算结果的不确定性.参照张晓梅等^[81]研究,本研究碳足迹因子的不确定性和活动水平数据的不确定性分别取10%和5%.结果显示,原料获取阶段、加工生产阶段、运输阶段和废弃处置阶段的碳排放结果不确定性分别为6%、8%、3%和8%,由此引入钢铁行业总排放的不确定性约为7%.与碳排放核算相关的研究^[52,81]对比本研究不确定性较小,在合理范围内.

4 结论

(1)从全生命周期视角分析,原料获取和加工生产阶段是钢铁行业碳排放的关键环节.2020年中国钢铁行业全生命周期CO₂排放总量约24.04亿t,原料获取阶段、加工生产阶段、运输阶段以及废弃处置阶段CO₂排放总量分别为2.10、21.65、0.23和0.06亿t.原料获取阶段和加工生产阶段CO₂排放量占钢铁行业全生命周期CO₂排放总量的98%以上,是钢铁行业实施碳减排的重点.从CO₂排放源类别分析,钢铁行业各类CO₂排序为:C_{能源}(68%)>C_电(18%)>C_{原开采}(5%)=(C_{运输1}+C_{运输2})(5%)>C_{生产}(3%),化石燃料节约和外购电力清洁化是钢铁行业降碳的重中之重.

(2)通过推广低碳技术降低化石燃料用量、提高废钢炼钢比例优化原料结构、构建新型电力系统

降低电力碳足迹因子均比优化运输结构对钢铁行业全生命周期碳减排具有更积极的影响。按照 2025 年社会经济发展水平预测,低碳技术推广、电力结构优化、废钢炼钢量增加和清洁方式运输比例提高,分别可使钢铁行业实现 20%、6%、5% 和 1% 的碳减排潜力。此外,关于钢铁行业节能低碳技术,短期内以推广轧钢工序与高炉炼铁工序低碳技术为主,后续随着电炉炼钢比例逐步增加,以普及电炉炼钢工序低碳技术推动钢铁行业全生命周期碳减排潜力显著提升。

(3) 敏感性分析结果显示,影响钢铁行业全生命周期碳排放的最敏感因素是化石燃料燃烧量。电力碳足迹因子和废钢炼钢使用量变化,对钢铁行业碳排放量的影响相似。清洁方式运输量对钢铁行业碳排放量的影响最小,此外不管增加铁路运输还是水路运输,对钢铁行业碳减排产生的效果是相同的。鉴于当前“双碳”战略目标,积极推广节能和低碳技术符合中国政府的最大利益,提高废钢炼钢的比例和建设新的电力系统也至关重要。

参考文献:

- [1] World Steel Association. World steel statistics 2021 [EB/OL]. https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND,2023-03-23.
- [2] Chen W, Zhang Q, Wang C X, *et al.* Environmental sustainability challenges of China's steel production: impact-oriented water, carbon and fossil energy footprints assessment [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **136**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108660.
- [3] Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century [J]. *Nature*, 2020, **586**(7830): 482-483.
- [4] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话 [J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2020, (35): 7.
- [5] Ren L, Zhou S, Peng T D, *et al.* A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **143**, doi: 10.1016/j.rser.2021.110846.
- [6] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(2): 339-346.
Wang X Y, Li B, Lü C, *et al.* China's iron and steel industry carbon emissions peak pathways [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(2): 339-346.
- [7] Zhang X Y, Jiao K X, Zhang J L, *et al.* A review on low carbon emissions projects of steel industry in the world [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **306**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127259.
- [8] 薛英岚, 张静, 刘宇, 等. “双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4392-4400.
Xue Y L, Zhang J, Liu Y, *et al.* Roadmap of coal control and carbon reduction in the steel industry under the carbon peak and neutralization target [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4392-4400.
- [9] 邢奕, 张文伯, 苏伟, 等. 中国钢铁行业超低排放之路 [J]. *工程科学学报*, 2021, **43**(1): 1-9.
- Xing Y, Zhang W B, Su W, *et al.* Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, **43**(1): 1-9.
- [10] 杨楠, 李艳霞, 吕晨, 等. 唐山市钢铁行业碳排放核算及达峰预测 [J]. *环境工程*, 2020, **38**(11): 44-52.
Yang N, Li Y X, Lü C, *et al.* Carbon emission accounting and peak forecasting of iron & steel industry in tangshan [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(11): 44-52.
- [11] Wang X L, Wei Y W, Shao Q L. Decomposing the decoupling of CO₂ emissions and economic growth in China's iron and steel industry [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **152**, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104509.
- [12] Nwachukwu C M, Wang C, Wetterlund E. Exploring the role of forest biomass in abating fossil CO₂ emissions in the iron and steel industry-The case of Sweden [J]. *Applied Energy*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116558.
- [13] 那洪明, 高成康, 郭玉华, 等. “中国式”电炉炼钢流程碳排放特点及其源解析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, **40**(2): 212-217.
Na H M, Gao C K, Guo Y H, *et al.* CO₂ Emissions characteristics and source analysis of “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, **40**(2): 212-217.
- [14] Feng C, Zhu R, Wei G S, *et al.* Typical case of carbon capture and utilization in Chinese iron and steel enterprises: CO₂ emission analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **363**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132528.
- [15] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Zhang X C. Research on the quantitative analysis of building carbon emissions and assessment methods for low-carbon buildings and structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [16] 赵艺伟, 左海滨, 余雪峰, 等. 钢铁工业二氧化碳排放计算方法实例研究 [J]. *有色金属科学与工程*, 2019, **10**(1): 34-40.
Zhao Y W, Zuo H B, She X F, *et al.* Case study on calculation method of carbon dioxide emission in iron and steel industry [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2019, **10**(1): 34-40.
- [17] Bhaskar A, Assadi M, Somehsaraei H N. Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen [J]. *Energies*, 2020, **13**(3), doi: 10.3390/en13030758.
- [18] Venkataraman M, Csereklyei Z, Aisbett E, *et al.* Zero-carbon steel production: the opportunities and role for Australia [J]. *Energy Policy*, 2022, **163**, doi: 10.1016/j.enpol.2022.112811.
- [19] Kuramochi T. Assessment of midterm CO₂ emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **132**: 81-97.
- [20] Chisalita D A, Petrescu L, Cobden P, *et al.* Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **211**: 1015-1025.
- [21] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究——以深圳为例 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
Mao R C. Assessing the environmental impacts of urban transport infrastructure via life cycle assessment: case study of a mega city-Shenzhen, China [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [22] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读 [J]. *环境工程*, 2019, **37**(8):

- 1-11.
Cai B F, Zhu S L, Yu S M, *et al.* The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(8): 1-11.
- [23] 程豪. 碳排放怎么算-《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. *中国统计*, 2014, (11): 28-30.
Cheng H. How to calculate carbon emissions-2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [J]. *China Statistics*, 2014, (11): 28-30.
- [24] 陈海红, 李鹏程, 王中航. GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》国家标准解读[J]. *标准科学*, 2021, (12): 107-111.
Chen H H, Li P C, Wang Z H. Interpretation of national standard GB/T 2589-2020, general rules for calculation of the comprehensive energy consumption [J]. *Standard Science*, 2021, (12): 107-111.
- [25] 罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
Luo Z X. Study on calculation method of building life cycle CO₂ emission and emission reduction strategies [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [26] 谷立静. 基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
Gu L J. Studies on the environmental impact of the building industry in China based on the life cycle assessment [D]. Beijing: Singhua University, 2009.
- [27] 贾铨修. 基于生命周期评价的3D打印建筑结构碳排放量化分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Jia C X. Quantitative analysis of carbon emission of 3D printing building structure based on life cycle assessment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [28] 蔡伟光, 蔡彦鹏. 全国建筑碳排放计算方法研究与数据分析[J]. *建设管理研究*, 2019, (2): 61-76.
Cai W G, Cai Y P. National construction carbon emission calculation method research and data analysis[J]. *Construction Management Research*, 2019, (2): 61-76.
- [29] 俞海勇, 杨辉, 张贺, 等. 水泥生命周期碳排放研究[J]. *四川建材*, 2017, **43**(1): 1-3.
Yu H Y, Yang H, Zhang H, *et al.* Research of carbon emission of cement in lifecycle[J]. *Sichuan Building Materials*, 2017, **43**(1): 1-3.
- [30] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[EB/OL]. <http://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1803.pdf>, 2013-10-15.
- [31] GB/T 51366-2019, 建筑碳排放计算标准[S].
- [32] 电车资源. 特百佳动力王永刚: 为市场提供全方位新能源商用驱动解决方案[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VmllLU33P5rZZoaD0-XzQ>, 2022-01-02.
- [33] 中国铁路总公司. 2018-2020年货运增量行动方案[EB/OL]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/ywsl/201812/t20181214_77740.html, 2018-07-02.
- [34] 王达川, 姚海元, 李宜军. 我国沿海港口40万吨级矿石码头新布局[J]. *水运工程*, 2021, (6): 54-60.
Wang D C, Yao H Y, Li Y J. New layout of 40, s000 DWT ore terminals in China's coastal ports [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021, (6): 54-60.
- [35] 郑浩. 宝武钢铁集团铁矿石运输路径优化研究[D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2020.
Zheng H. Research on transport route optimization of iron ore of Baowu steel group[D]. Hangzhou: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [36] 李贵成. 中国-巴西铁矿石运输航线分析[J]. *航海技术*, 2012, (2): 5-7.
Li G C. Analysis of China-Brazil iron ore shipping route [J]. *Marine Technology*, 2012, (2): 5-7.
- [37] 樊红元, 陈刚. 250000 DWT 超大型矿砂船总体设计[J]. *船舶设计通讯*, 2016, (S2): 23-27.
Fan H Y, Chen G. General design of a 250 000 DWT VLOC [J]. *Journal of Ship Design*, 2016, (S2): 23-27.
- [38] 李俊, 吴小康, 杨江. 超大型矿砂船 LNG READY 设计方案[J]. *船舶设计通讯*, 2017, (S2): 59-64.
Li J, Wu X K, Yang J. LNG ready design for very large ore carriers[J]. *Journal of Ship Design*, 2017, (S2): 59-64.
- [39] 郭达清, 吕林, 张雨恬. 全国炼钢综合废钢比“十四五”末将达30%[N]. *中国冶金报*, 2021-09-24(01).
- [40] 任明, 徐向阳. 京津冀地区钢铁行业能效提升潜力和环境协同效益[J]. *工业技术经济*, 2018, **37**(8): 20-26.
Ren M, Xu X Y. Energy efficiency improvement and environmental co-benefits of iron and steel industry in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018, **37**(8): 20-26.
- [41] 国家发展和改革委员会. 国家重点节能低碳技术推广目录(2017年本 低碳部分)技术简介[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201904/t20190419_700394.shtml, 2019-04-19.
- [42] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业 CO₂ 减排技术及成本研究[J]. *环境工程*, 2021, **39**(10): 23-31, 40.
Dong J C, Wang X Y, Cai B F, *et al.* Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China [J]. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(10): 23-31, 40.
- [43] Zhang Q, Zhao X Y, Lu H Y, *et al.* Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry [J]. *Applied Energy*, 2017, **191**: 502-520.
- [44] Li Y, Zhu L. Cost of energy saving and CO₂ emissions reduction in China's iron and steel sector [J]. *Applied Energy*, 2014, **130**: 603-616.
- [45] 戴颜德, 胡秀莲. 中国二氧化碳减排技术潜力和成本研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [46] 张琦, 沈佳林, 许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. *钢铁*, 2021, **56**(10): 152-163.
Zhang Q, Shen J L, Xu L S. Carbon peak and low-carbon transition path of China's iron and steel industry [J]. *Iron & Steel*, 2021, **56**(10): 152-163.
- [47] 生态环境部办公厅. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html, 2019-04-28.
- [48] Liu X W, Yuan Z W, Xu Y, *et al.* Greening cement in China: a cost-effective roadmap [J]. *Applied Energy*, 2017, **189**: 233-244.
- [49] 《中国钢铁工业年鉴》编辑委员会. 中国 2021 钢铁工业年鉴[M]. 北京: 2021.
- [50] 彭卓, 郭春梅, 汪磊磊, 等. 绿色建筑全生命周期 CO₂ 排放敏感性与减碳潜力研究[J]. *天津城建大学学报*, 2021, **27**(6): 436-441.
Peng Z, Guo C M, Wang L L, *et al.* Total life-cycle analysis of CO₂ emission sensitivity and reduction potential of green building [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2021, **27**(6): 436-441.
- [51] 张晔, 宋国华, 尹航, 等. 综合交通运输系统碳排放预测的不确定性分析[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2023, **21**(1): 64-79.
Zhang Y, Song G H, Yin H, *et al.* Uncertainty analysis of future carbon emissions of integrated transportation system [J]. *Journal*

- of Transportation Engineering and Information, 2023, **21**(1): 64-79.
- [52] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories [EB/OL]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/chinese/gpgaum_cn.html, 2001-06-15.
- [53] 贾楠楠, 李晓. 后疫情时代我国钢铁工业与冶金石灰产业发展方向[J]. 耐火与石灰, 2021, **46**(1): 1-4.
Jia N N, Li X. The development direction of China's iron and steel industry and metallurgical lime industry in the post epidemic era[J]. Refractories & Lime, 2021, **46**(1): 1-4.
- [54] 贾楠楠, 李晓. 我国钢铁与冶金石灰生产形势及发展预测[J]. 耐火与石灰, 2020, **45**(1): 1-4.
Jia N N, Li X. Production situation and development forecast of steel and metallurgical lime in China[J]. Refractories & Lime, 2020, **45**(1): 1-4.
- [55] 王少阳, 祁欣, 罗旭东, 等. 白云石的应用进展[J]. 耐火材料, 2022, **56**(1): 88-92.
Wang S Y, Qi X, Luo X D, et al. Application progress of dolomite[J]. Refractories, 2022, **56**(1): 88-92.
- [56] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [57] 董晖, 李杰. 我国铁路铁矿石运输发展对策研究[J]. 铁道货运, 2021, **39**(2): 1-5.
Dong H, Li J. Research on development strategies of railway transportation of iron ore in China [J]. Railway Freight Transport, 2021, **39**(2): 1-5.
- [58] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2021.
- [59] 弓原, 李晓新. 钢铁行业超低排放改造现状分析及对策建议[J]. 冶金经济与管理, 2021, (1): 16-18.
Gong Y, Li X X. Situation analysis and suggestions on ultra-low emission transformation of steel industry [J]. Metallurgical Economy and Management, 2021, (1): 16-18.
- [60] 李华. 2018-2019 中国煤炭和铁矿石铁路运输分析[EB/OL]. https://www.xianjichina.com/news/details_82353.html, 2018-08-29.
- [61] 曾维刚, 梁壮, 赵冠一, 等. 我国煤炭运输体系现状、问题及对策研究[J]. 煤炭经济研究, 2022, **42**(1): 17-21.
Zeng W G, Lang Z, Zhao G Y, et al. Research on the status quo, problems and countermeasures of China's coal transportation system[J]. Coal Economic Research, 2022, **42**(1): 17-21.
- [62] 前瞻经济学人. 十张图了解 2020 年中国铁路货运行业发展现状及市场趋势 煤炭铁路运输需求巨大[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1680509009693023062&wfr=spider&for=pc>, 2020-10-14.
- [63] 黄涛. 浅议国内钢材贸易流向[J]. 冶金管理, 2020, (20): 26-33.
- [64] 国家统计局. 2020 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content_5589283.htm, 2021-02-28.
- [65] 焦响. 2021 年各地区钢材销售流向简要分析[J]. 冶金管理, 2022, (8): 42-45.
- [66] 梁骁. 干货!钢铁行业真的是物流企业的噩梦? 大有文章的国民支柱产业 [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/312255730_747469, 2019-05-07.
- [67] 国家统计局. 地区分省年度货运量货物周转量数据[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103,2022>.
- [68] 李茂权. 中国废钢市场现状分析及前景预测[J]. 冶金经济与管理, 2021, (3): 21-22.
Li M Q. Current situation analysis and prospect forecast of scrap market in China [J]. Metallurgical Economy and Management, 2021, (3): 21-22.
- [69] 王宪恩, 栾天阳, 陈英姿, 等. 基于 LCA 的废旧资源循环利用节能减排效果评估模式与方法研究——以吉林省某钢铁企业为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, **26**(10): 69-77.
Wang X E, Luan T Y, Chen Y Z, et al. Research on the evaluation pattern and method of the energy conservation and emission reduction effects of waste resources recycling based on life cycle assessment: a case study of an iron and steel industry enterprise in Jilin Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, **26**(10): 69-77.
- [70] Li F, Chu M S, Tang J, et al. Life-cycle assessment of the coal gasification-shaft furnace-electric furnace steel production process [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125075.
- [71] Li Y L, Lü M Y, Li R D, et al. Life cycle assessment of melting reduction treatment for iron and steel waste slag: a case study in Tangshan, China [J]. Resources, Conservation & Recycling Advances, 2022, **15**, doi: 10.1016/j.rerad.2022.200108.
- [72] Chen Q Q, Gu Y, Tang Z Y, et al. Assessment of low-carbon iron and steel production with CO₂ recycling and utilization technologies: a case study in China [J]. Applied Energy, 2018, **220**: 192-207.
- [73] Zhang Q, Li Y, Xu J, et al. Carbon element flow analysis and CO₂ emission reduction in iron and steel works [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **172**: 709-723.
- [74] 王新东, 上官方钦, 邢奕, 等. “双碳”目标下钢铁企业低碳发展的技术路径[J]. 工程科学学报, 2023, **45**(5): 853-862.
Wang X D, Shangguan F Q, Xing Y, et al. Research on the low-carbon development technology route of iron and steel enterprises under the “double carbon” target [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, **45**(5): 853-862.
- [75] The World Steel Association. Life cycle assessment in the steel industry [EB/OL]. <https://worldsteel.org/publications/policy-papers/life-cycle-assessment-in-the-steel-industry/>, 2023-03-19.
- [76] Yan Q Y, Wang Y X, Li Z Y, et al. Coordinated development of thermal power generation in Beijing-Tianjin-Hebei region: evidence from decomposition and scenario analysis for carbon dioxide emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **232**: 1402-1417.
- [77] 张燕华. 低碳环境下废钢铁再制造系统生产调度研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
Zhang Y H. Research on the production scheduling of scrap iron and steel remanufacturing in low carbon environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [78] 世界钢铁协会. 资料概览钢铁和原料[EB/OL]. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/fact-sheet-raw-materials-2023_CN.pdf, 2023-03-19.
- [79] Yang L Z, Hu H, Yang S, et al. Life cycle carbon footprint of electric arc furnace steelmaking processes under different smelting modes in China [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, **35**, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00564.
- [80] 徐智. 400000DWT 超大型矿砂船[Z]. 江苏: 江苏扬子鑫福造船有限公司, 2019-02-01.
- [81] 张晓梅, 庄贵阳, 刘杰. 城市温室气体清单的不确定性分析[J]. 环境经济研究, 2018, **3**(1): 8-18, 149.
Zhang X M, Zhuang G Y, Liu J. Uncertainty analysis of urban greenhouse gas inventories [J]. Journal of Environmental Economics, 2018, **3**(1): 8-18, 149.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in "2+26" Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)