

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.04.003

基于复杂系统优化的京津冀产业共生空间化 管理与效益评估^①

曹 馨¹, 吴明暄¹, 刘 畅², 钱 媛³, 温宗国⁴

(1. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249; 2. 南洋理工大学人文社会学院, 新加坡 639798; 3. 中石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 深度挖掘产业共生系统的节能减排潜力, 推进工业、城市多源固体废物跨行业、跨地区协同消纳利用, 是解决以京津冀区域为代表的重工业及人口集聚区复合型环境污染问题的重要抓手。当前, 科学设计匹配大区域废弃物产排空间特征的产业共生方案面临多源固体废物产排底数不清、共生路径不明、节能减排潜力评估困难三大挑战。研究以京津冀区域为例, 绘制多源固废产排特征空间图谱; 在此基础上, 引入复杂系统优化方法, 构建多源固废跨行业、跨地区的共生利用方案; 进而自底向上的模拟和评估共生利用方案的环境经济效益, 识别重点共生区域、企业和技术, 为其他地区乃至全国范围内的产业共生空间化、精细化管理提供可复制样板。

关键词: 京津冀; 多源固体废物; 产业共生; 复杂系统优化; 节能减排

中图分类号: C93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2025)04-0032-15

0 引 言

园区化的产业集群模式逐渐成为各国工业发展的共同趋势^[1]。目前, 中国约 60% 的企业集中分布在 2 543 家国家级和省级产业园区^[2]。高度聚集的工业生产活动带来的资源消耗和污染物排放问题对各地生态环境造成了严重威胁。在占全国国土面积不足 2.3%, 工业固废产量却高达全国 8.0% 的京津冀区域^[3], 这一问题尤为突出, “无废城市”建设已刻不容缓。另一方面, 各类型产业聚集带来的空间临近性也为废弃物的协同处置和共生利用提供了可能^[4]; IPCC 第六次评估报告指出, 跨行业、跨地区的产业共生已成为继单一行业内部节能减排技术推广后, 2020 年—2050 年全球最重要的工业节能减排途径^[5]。在世界各国、各地区的零碳行动计划里, 产业共生潜力的深

度挖掘都被认为是实现 1.5℃ 温控目标的必要、核心手段^[6-11]。

如何在考虑主要企业的空间位置、产量规模、工艺技术水平、产废利废现状等现实条件下, 构建大尺度、精细化、可落地的废弃物跨行业、跨地区共生利用方案, 推动区域产业共生系统的空间化管理, 对于进一步挖掘产业共生的节能减排潜力空间, 缓解经济发展与环境之间的尖锐矛盾具有重要意义^[12-15]。

当前大多数关于产业共生系统模拟及效益评估的研究局限于案例企业、园区和城市等中观、微观尺度^[16-18], 针对大尺度、精细化、可落地的产业共生系统构建与评估的研究较少, 主要原因有三:

其一, 区域范围内的企业级产业共生数据获取和处理困难^[19]。精细化、可落地的产业共生方案构建需要区域内所有共生单元的空间位置、工

① 收稿日期: 2023-01-25; 修订日期: 2024-05-29。

基金项目: 国家自然科学基金资助青年科学基金项目(71904202); 国家自然科学基金资助项目(72274214)。

作者简介: 曹 馨(1990—), 女, 河南濮阳人, 博士, 副教授, 博士生导师。Email: caoxin0301@163.com

艺设备、原料产量、固废产生及可共生产纳规模等信息,数据量巨大,采集与统计分析难度高。以本研究关注的京津冀区域为例,涉及规模以上钢铁企业 111 家、水泥企业 142 家、火力发电企业 177 家以及 635 家垃圾、污水、危废处理厂的数十万条信息。繁杂的数据类别与众多企业规模、工艺、设备型号、技术参数的不一致造成大量零散信息获取困难。此外,来源于地方统计年鉴、企业官网、调研访谈等渠道的多源异构数据质量参差不齐,导致数据清洗、校准、分析困难。

其二,基于复杂系统优化的大尺度产业共生方案构建困难^[20, 21]。目前各国纷纷开发了适合本土国情的自底向上节能减排路径优化模型,具有代表性的包括国际能源署(IEA)开发的 MARKAL 模型和 TIMES 模型^[22, 23],奥地利国际应用系统分析研究所(IIASA)开发的 MESSAGE 模型^[24],日本国立环境研究所(NIES)开发的 AIM-enduse 模型^[25],欧盟开发的 EFOM 模型等^[26]。上述自底向上的节能减排路径优化模型在模拟分析重点行业的低碳转型策略领域取得了系列成果,但各模型均局限于对单一行业线性工艺流程的模拟分析,无法模拟产业共生系统中多行业、多废弃物、多共生技术、多共生产品交叉对应的复杂网状结构,也无法反映废弃物产生的“源”企业和消纳的“汇”企业之间在运输距离、生产规模、共生技术适用性等方面的多重嵌套匹配关系,因此不适用于复杂网状的区域产业共生系统优化构建。

其三,大尺度产业共生系统的环境经济效益评估困难。已有研究多局限于微观园区尺度的产业共生效益评估,如 Wei 等^[27]应用物质代谢分析方法(MFA)系统量化了以火电厂为核心的工业园区碳减排潜力;Wang 等^[28]基于生命周期分析方法(LCA)量化核算了能源密集型工业园区中共生路径可实现的环境效益;Hu 等^[29]采用数据包络分析方法(DEA)评估了静脉产业园区的生态环境效率和成本收益。上述微观尺度的研究可以通过园区、企业的投入产出和物质代谢观测数据直接量化产业共生路径的环境经济效益^[30]。然而,应用于宏观城市、区域乃至全国尺度的产业共生系统分析,废弃物共生利用替代的原材料、燃料使用量和减少的各类污染排放量无法直接观测得到;且同一种废弃物通过不同共生技术再利用时

会对源、汇行业的能源消耗和污染物排放产生不同影响,进一步增加了大尺度产业共生系统环境经济效益的评估困难^[31]。为准确评估大尺度产业共生系统的环境经济效益,需根据产业共生系统中各项共生技术的具体节能减排机制确定其对应的参考基准技术,全面衡量各共生技术相对参考基准技术的能耗和污染物排放水平差异,通过所节约原材料、能源的折标煤系数统一计算各项共生技术的节能量;根据所节约原材料、能源的具体类型确定各原材料、能源生产或燃烧过程中的污染物排放系数,并考虑共生技术所作用的具体工序环节的污染物排放末端削减率,计算各项共生技术的实际污染物减排效果,工作量、信息量巨大。

针对上述研究不足,本研究拟构建京津冀区域多源固废数据库;考虑废弃物共生利用的源、汇行业之间的距离、生产规模、工艺技术匹配性等现实约束,建立以最大化收益为目标的产业共生方案;量化评估其节能减排潜力空间及经济效果,识别重点共生区域、企业、废弃物和共生技术,为产业共生系统的空间化、精细化管理提供科学支撑。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究边界

作为我国四大工业区之一,京津冀区域以 2.3% 的占地面积覆盖了中国 6.4% 的工业增加值,8.1% 的工业园区数量,以及 7.8% 的常住人口数^[1, 3, 32]。高度集聚的重工业及人口发展模式给京津冀区域带来了巨大的资源环境承载压力,具体在各地区表现又有所不同:

对于河北而言,钢铁、电力、水泥三大支柱性产业产值占比高达 47.3%,2022 年其粗钢产量、水泥产量和煤电装机容量分别约占全国总量的 20.5%、4.2%、4.7%^[33, 34],重工业集聚特征突出。工业、农业废弃物排放增量,处置设施利用不足,区域内缺乏有效的废弃物跨行业协同消纳利用是河北省面临的突出问题。对于北京、天津而言,人口集聚特征突出:两地人口密度均超过 1 300 人/平方公里,是我国平均人口密度的近

10 倍^[33],也是全国城市生活垃圾产生量最大的两个地区.生活固废产量大且工业设施快速压减,新增处理处置项目或利用工业设施协同处置废弃物难度大是京津两地面临的主要困难.

京津冀区域目前缺乏工业、城市部门多源废弃物跨行业、跨地区的协同利用方案,废弃物资源错配蕴藏的节能减排潜力空间有待进一步释放,推动多源固废在各类型工业企业与城市处理处置设施间的优化配置与共生利用是未来京津冀区域协同发展的重点方向.因此,本研究将以京津冀区域为例,聚焦于该地区的三大支柱性产业部门(钢铁、电力、水泥行业)及主要环卫基础设施(垃圾处理厂、污水处理设施、危废处理设施),尝试构建以工业固废为主、城市生活固废为辅的京津冀产业共生方案.

1.2 模型框架

研究总体框架如图 1 所示,亟待解决的核心问题如下:1)构建源、汇企业高精度数据库,收集处理 430 家工业企业以及 635 家环卫设施的各类多源异构数据;2)摸清京津冀区域产废利废底数,采用 Arcmap 模拟 1 057 家核心共生单元主要固体废弃物的空间产排特征;3)构建精细化、可落地的京津冀产业共生方案,调用高德 API 行驶距离模块获取各源汇企业间的距离矩阵,并以经济效益最大化为目标构建复杂网络运输模型,利用 Python 求解经济最优的产业共生路径和共生消纳量;4)通过节能减排机制分析,量化评估京津冀区域跨行业、跨地区产业共生的节能减排潜力空间及经济效果,识别重点共生地区、企业、废弃物和共生利用技术.

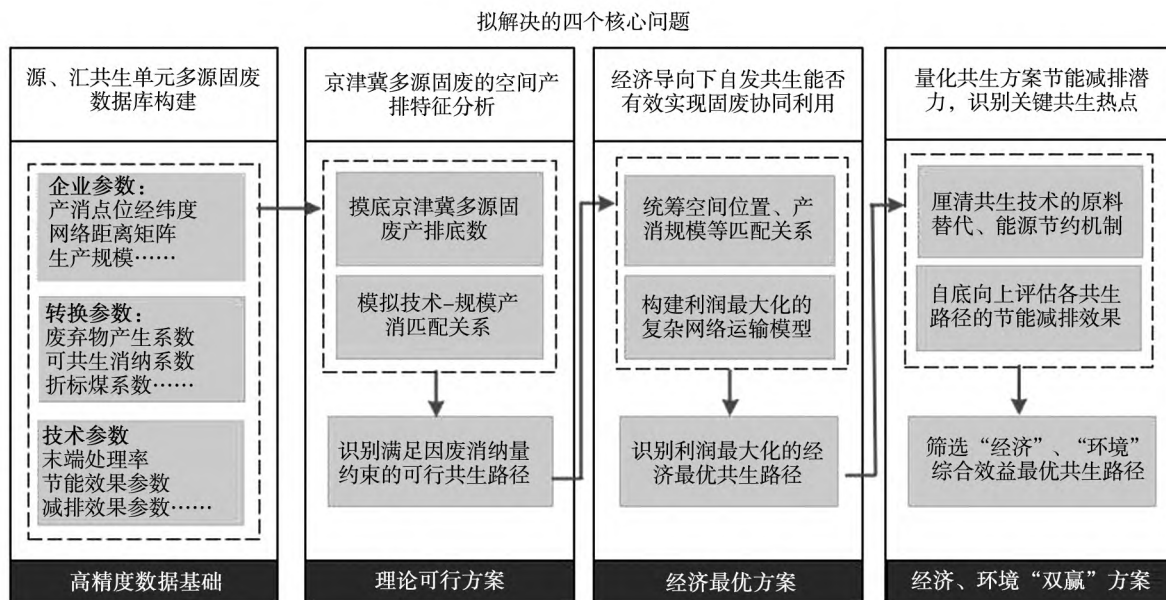


图 1 模型总体框架

Fig. 1 Research framework

研究将围绕上述四个核心问题,从“理论可行”、“经济最优”以及“经济、环境双赢”三个角度分别构建京津冀产业共生方案并量化其节能减排潜力空间,具体如下:

“理论可行”的产业共生方案从技术可行角度出发.废弃物跨行业、跨地区的协同处置应以满足“汇企业”的生产工艺要求及不影响“汇企业”的产品质量为前提.如水泥生产对所需的四类主要原料(铝、硅、钙、铁质原料)的品位要求很低,可以根据各类工业固废获取难易程度和成本高低,灵活进行原

料替代^[35].为保证上述固废在水泥生产的协同处理过程中不至于影响到熟料和水泥的性能稳定,需根据各标号水泥(52.5 号、42.5 号、32.5 号等)的配料要求和产量占比,设定各类固废利用总量占熟料、水泥产量的比例系数上限.因此,“理论可行”方案以京津冀区域 1 057 家核心共生单元主要固体废弃物的空间产排特征数据为基础,考虑产生、消纳各类废弃物的“源企业”与“汇企业”在技术结构、消纳总量方面的匹配关系,为考虑废弃物共生利用技术可行性的产业共生方案.

“经济最优”的产业共生方案是能带来最大经济效益的废弃物跨行业共生利用方案. 在市场环境下,京津冀产业共生系统将朝着经济效益最大化的方向自然发展. 企业间共生行为的产生本质上是为了降低生产成本,因此,需在“理论可行”的产业共生方案考虑技术可行性的基础上进一步加入成本效益核算. 本研究将以经济利润最大化为优化目标,构建复杂网络运输模型,探索经济效益最优的京津冀产业共生方案,明确各类废弃物跨行业协同利用的运输路径、运输量和共生利用方式.

“经济、环境双赢”的产业共生方案强调废弃物的跨行业共生利用不仅应带来经济收益,也应兼顾在二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘减排等多环境目标上的表现. 因此,本研究将通过各产业共生路径的节能减排效果分析,筛选经济、环境效果突出的共生路径,识别共生重点区域、企业和技术.

1.3 多源固废产排特征空间图谱模拟

精细、准确的废弃物产排信息是构建和优化京津冀区域产业共生方案的前提. 对区域多源废弃物调度、配置的精准管控不仅需要识别其产排特征,还需要考虑产生与消纳点位之间的共生技术参数、空间位置、主体规模等多重匹配关系. 本研究按照“源/汇行业－生产环节－主体工艺技术－废弃物”链条,自底向上摸清工业、城市部门多源废弃物的产排清单,广泛采集来源于 1 057 家核心企业及环卫基础设施包含规模、地理坐标、生产工艺、设备容量等在内的高维数据信息. 同时,对这些来源复杂、统计口径不同、质量参差的多源异构数据进行清洗、校准、转换、降维等集成处理,检验数据之间的拓扑关联结构,构建京津冀区域多源固废的产排特征空间图谱^②. 涉及的参数信息及数据来源如表 1 所示,其中部分技术参数可通过 1.5 节获得.

表 1 参数信息及数据来源
Table 1 Parameter information and data sources

参数类型	参数名称	数据来源
企业参数	生产规模:粗钢产量、发电量、水泥产量、生活垃圾清运量、危废核准经营规模、污泥设计处理能力 基础地理信息:位置坐标、源汇企业行驶距离矩阵 工艺设备:废弃物副产品类别、设备规模、工艺流程	天眼查、企业官网、中国水泥网、国家数据、高德等网站;《中国钢铁工业年鉴》、《中国城市统计年鉴》等年鉴;钢铁、水泥、电力行业协会目录;文献调研;《国家重点节能技术推广目录》、《全国大、中城市固体废物防治公告》等发改委、环境厅部门政策报告;《固废污染防治信息公告》等各级政府信息公开统计年报;项目环评报告
转换参数	废弃物、副产品产生系数:钢渣、高炉渣、炉渣、粉煤灰、脱硫石膏 废弃物、副产品消纳系数:钢渣、高炉渣、炉渣、粉煤灰、脱硫石膏、垃圾、危废、污泥 一、二次能源折标煤系数 能源燃烧以及产品生产过程的污染物排放系数	文献调研;《中国能源统计年鉴》等年鉴、《建材行业循环经济发展规划研究》、《武安新峰循环经济示范园区建设规划》等研究所报告;《环境统计手册公式》、《水泥窑协同处置生活垃圾试点项目实施方案提纲》等工信部文件
技术参数	环境参数:各项共生技术节能效果参数、技术减排效果参数(SO ₂ 、NO _x 、PM)、末端处理率、运输能源消耗 经济参数:技术运营费用、技术初始固定资产投资成本、折现率、收益、单位运输成本、净现值	文献调研;《产业关键共性技术发展指南》、《工业固体废物综合利用先进适用技术目录》等发改委技术目录;模型计算结果

考虑京津冀区域的产业结构特色,本研究构建的产业共生系统主要关注京津冀区域三大支柱性产业部门及主要环卫基础设施产生的八类固废(钢渣、高炉渣、炉渣、粉煤灰、脱硫石膏、生活垃圾

② 具体方法略,有需要者可向作者索要.

圾、污泥、危险废弃物). 研究首先根据“源企业”与“汇企业”的主体工艺技术、生产规模、固废类别、固废产生或消纳系数测算得到八类固废的企业级产排底数与可协同消纳上限. 通过企业实地调研、问卷访

谈等方式对摸底结果校准发现, 所得固废产排量覆盖了京津冀区域 2022 年八类固废总产生量的 94.3%^[3, 36-38]. 核心企业及环卫基础设施的八类固废产生及可协同消纳量的摸底情况如表 2 所示.

表 2 京津冀区域重点固废的产生量与可协同消纳量摸底

Table 2 Generation and synergistic consumption of key solid waste in Beijing-Tianjin-Hebei region

固废类型	共生技术	产生系数	消纳系数	产生量 (万 t)	可消纳量 (万 t)
钢渣	T1: 钢渣替代粘土原料制熟料	0.130 粗钢	0.030 熟料	6 202.9	427.4
	T2: 钢渣制矿渣微粉替代熟料生产水泥	0.130 粗钢	0.235 水泥		359.3
高炉渣	T3: 高炉渣替代粘土原料制熟料	0.330 粗钢	0.045 熟料	15 745.7	641.1
	T4: 高炉渣制矿渣微粉替代熟料生产水泥	0.330 粗钢	0.235 水泥		451.0
电厂炉渣	T5: 炉渣替代粘土原料制熟料	0.035 t/MWh	0.075 熟料	905.9	489.1
	T6: 炉渣制矿渣微粉替代熟料生产水泥	0.035 t/MWh	0.235 水泥		1 617.9
粉煤灰	T7: 粉煤灰替代粘土原料制熟料	0.083 t/MWh	0.075 熟料	2 148.3	579.4
	T8: 粉煤灰制矿渣微粉替代熟料生产水泥	0.083 t/MWh	0.235 水泥		1 798.4
脱硫石膏	T9: 脱硫石膏制水泥缓凝剂	0.018 t/MWh	0.065 水泥	465.9	1 276.5
生活垃圾	T10: 水泥窑协同处置生活垃圾制 RDF		0.080 水泥	1 695.4	1 572.0
危废	T11: 水泥窑协同处置危险废弃物		0.050 水泥	498.0	982.5
市政污泥	T12: 水泥窑协同处置污泥		0.100 水泥	270.8	1 965.0

1.4 基于复杂网络运输模型的产业共生方案构建

现实环境中, 各共生主体作为理性人, 其对废弃物的自发共生利用行为是以经济效益目标驱动的. 因此, 本部分构建以经济利润最大化为目标的复杂网络运输模型, 同时考虑废弃物产生的源行业 and 消纳的汇行业之间在空间位置、产消规模及技术水平等各方面的匹配关系, 并兼顾物质平衡、供需关系、行业标准、经济政策等重要现实性约束, 构建一个尽可能贴近现实产业共生系统的优化模型.

企业利润最大化目标函数拟考虑废弃物的价格、运输成本, 共生利用过程中废弃物替代原材料、节约能源所减少的成本支出, 以及共生技术引入的工艺设备改造费用和政府共生政策补贴:

目标函数

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^n \left(\text{Income}_i - \sum_{j=1}^m \text{Waste}_{ij} \times (\text{Tra}_{\text{waste}} \times \text{Dis}_{ij}^{\text{waste}} + P_{\text{waste}}) + \sum_{k=1}^l \text{EC}_{ik} \times P_e + \right. \\ \left. (\text{PC}_{ik} \times P_{\text{raw}} - \text{Upg}_{ik}) + \text{Sub}_i \right) \quad (1)$$

其中 Income_i 为企业 i 在年内的实际销售收入; Waste_{ij} 是企业 i 消纳的来自企业 j 的废弃物的量, $\text{Tra}_{\text{waste}}$ 为京津冀地区废弃物运输价格, $\text{Dis}_{ij}^{\text{waste}}$ 为企业 i 与企业 j 之间的运输距离, P_{waste} 为当地废弃物的价格; EC_{ik} 是企业 i 利用共生技术 k 的能源节约量, P_e 是能源价格; RC_{ik} 是企业 i 利用共生技术 k 的原材料节约量, P_{raw} 是原材料价格; Upg_{ik} 是企业 i 利用共生技术 k 的设备改造成本; Sub_i 为企业 i 获得的财政补贴.

供需约束

$$\sum_{i=1}^n \text{Waste}_{ij} \leq \text{Waste}_j \quad (2)$$

供需约束反映各企业之间产生的某类废弃物的共生利用不能超出其全年产量. Waste_{ij} 为企业 i 利用来自企业 j 废弃物的量, Waste_j 为企业 j 当年产生的废弃物总量.

标准约束

$$\text{Waste}_i / \text{Product}_i \leq \text{Starate} \quad (3)$$

标准约束即为了保证“汇企业”的产品质量, 国家标准对其生产过程中废弃物的添加比例有一定限制. 其中 Waste_i 为企业 i 消纳的废弃物業量,

$Product_i$ 为企业 i 的产品产量. 不等式的左边部分为企业 i 生产的产品中所含废弃物比例, 右边的 $Starate$ 为国家标准对该比例上限的规定.

经济约束

$$\frac{P_{waste} + Trs_{waste} \times Dis_{waste,ij} - Sub_i}{Product_i} \leq P_{product} \quad (4)$$

经济约束, 即表示企业利用废弃物生产某产品时的成本不应超过当地该产品的售卖价格. 其中, P_{waste} 为废弃物价格, Trs_{waste} 为废弃物的运输价格, $Dis_{waste,ij}$ 为企业 i 与企业 j 之间的运输距离, Sub_i 为企业 i 因消纳废弃物获得的财政补贴, $Product_i$ 为企业 i 的产品产量, $P_{product}$ 为当地的产品价格.

政策约束

$$Sub_i = \begin{cases} Subrate \times Tax \times Income_i, & \text{(情形 1)} \\ 0, & \text{(情形 2)} \end{cases} \quad (5)$$

当前京津冀相关产业共生政策中, 直接影响企业经营决策的是资源综合利用增值税优惠政策^[39]. Sub_i 为企业 i 当年从政府获取的税收优惠, $Subrate$ 是税收补贴优惠比率 (目前是 70% 的增值税即征即退政策), Tax 为行业税率 (一般为 17%), $Income_i$ 为企业 i 在年内的实际销售收入. 情形 1 是指企业当年生产时, 利用的废弃物比例达到触发补贴优惠给定的比率. 例如对于生产普通硅酸盐水泥的企业, 固体废物利用比例超过 20% 可触发增值税税收优惠, 退税比例为 70%. 情形 2 是指低于政策规定的废弃物共生利用比例, 无法触发税收优惠.

1.5 产业共生方案的节能减排效果量化评估

在明晰系统内部各共生路径原料替代、能源节约的节能减排机制基础上, 通过工序间关联关系分析, 自底向上的完成产业共生方案的环境效益评估^[40].

具体来看, 废弃物共生利用的能源节约效果由直接节能量、间接节能量及运输能耗三部分组成. 其中, 直接节能量来自于各项共生技术相对参考基准技术的能耗降低, 间接节能量来自于共生技术的原料替代效果间接实现的节能量, 运输能

耗部分来自于废弃物在运输过程中的能耗量. 产业共生系统的能源节约量核算式如 (6) 所示.

式中 E 表示能源的消耗量, R 表示原料的消耗量, S 表示共生技术 k 下废弃物的运输距离, CU 表示运输的单位能源消耗量, k 表示共生技术种类, e 为节约的能源种类, r 表示废弃物替代的原材料种类, b 表示共生技术应用之前的情况, $\delta_{r,e}$ 表示生产单位原料 r 对能源 e 的消耗量, ζ_e 表示能源 e 的折标煤系数, Q_k 表示共生技术对应的废弃物产量

$$TEC = \sum_k \left(\left(\sum_e (E_b - E) + \sum_l (R_b - R) \times \delta_{r,e} \right) \times \left(\zeta_e \times Q_k - \sum_i \sum_j (S \times x_{ij}) \times CU \times \zeta_r \right) \right) \quad (6)$$

$$TER = \sum_k \left(\left(\left(\frac{(DER_{b,p} - DER_{k,p}) + \sum_l (E_{b,e} - E_{k,e}) \times Q_k \times EI_{e,p} \times (1 - \theta_{k,p}) + \sum_l (R_{b,r} - R_{k,r}) \times \delta_{r,p} + (E_{b,e} - E_{k,e}) \times EI_{e,p}}{\sum_i \sum_j (S \times x_{ij}) \times CU \times \zeta_r} \right) \right) \right) \quad (7)$$

废弃物共生利用的污染物减排总量核算如式 (7) 所示, 也由三部分组成, 第一部分是各项共生技术相对参考基准技术的直接污染物排放削减; 第二部分是共生技术的节能效果带来的污染物间接减排; 第三部分为共生技术的原料节约效果带来的污染物间接减排.

式中 DER 为应用技术的直接污染物排放量, EI 表示能源消耗带来污染物产生系数, $\delta_{r,p}$ 表示原料生产带来的污染物产生系数, $\theta_{k,p}$ 为技术 k 对污染物 P 的末端治理率. 污染物种类 P 分别为 SO_2 、 NO_x 、 PM .

2 研究结果

2.1 多源固废的产排特征空间图谱

京津冀区域 1 057 家重点共生单元、八类固体废弃物的产量及可共生消纳量如图 2、图 3 所示.

总体来看,京津冀区域重点固废的总产量与水泥行业可共生消纳的废弃物总量匹配度不高,即使实现全部固废的跨行业共生利用,仍将存在 43.5% 的固废可共生利用缺口,需要依靠传统的填埋、焚烧、堆存等形式处理.具体到各类型匹配关系后,固废产消之间的“不平衡”特征会进一步放大.区域内能够被临近水泥厂共生利用的高炉渣、钢渣可共生消纳量约占其对应总产量的 12.7%、6.9%,呈现明显的“产”大于“消”特征;粉煤灰、炉渣、生活垃圾的产量与可共生消纳量处于较为均衡的状态;而水泥企业对脱硫石膏、危废、污泥的协同消纳能力分别存在 63.5%、49.3% 与 86.2% 的处置缺口,呈现明显的“消”大于“产”特征.针对当前多源固废产消不匹配现状,研发并推广钢渣、高炉渣等固废的新型高附加值共生利用技术,增加临近水泥企业的可共生消纳量;新增并优化危废处理厂、垃圾清运站等环卫基础设施位置及规模,考虑与农业、市政等更多部门进行多源固废共

生处理能够更充分的利用水泥企业的剩余消纳能力,进一步挖掘京津冀区域的产业共生潜力空间.

从区域分布特征来看,工业部门钢渣、高炉渣产量的集聚特征明显,且集中分布于唐山、邯郸等工业发达的河北城市;粉煤灰、炉渣、脱硫石膏产量分布相对零散.城市部门生活垃圾、危废的产排较多聚集在北京、天津及其周边地区;污泥的产排更为广泛、均匀地分布于天津、廊坊、保定等中心地带.与之相对,八类废弃物的消纳量主要随水泥企业重点分布在唐山、邯郸等河北城市.京津冀区域多源固废产排及可共生消纳量的空间分布错位现象也是促使该区域固废跨行业、跨地区协同共生利用的重要驱动因素.

综上所述,京津冀区域内各城市在固废协同共生利用方面具备不同的比较优势,以多源废弃物的产排特征空间图谱为基础系统设计精细化、可落地的产业共生方案,可以将潜在区域的产业共生优势转化为实际的环境、经济效益.

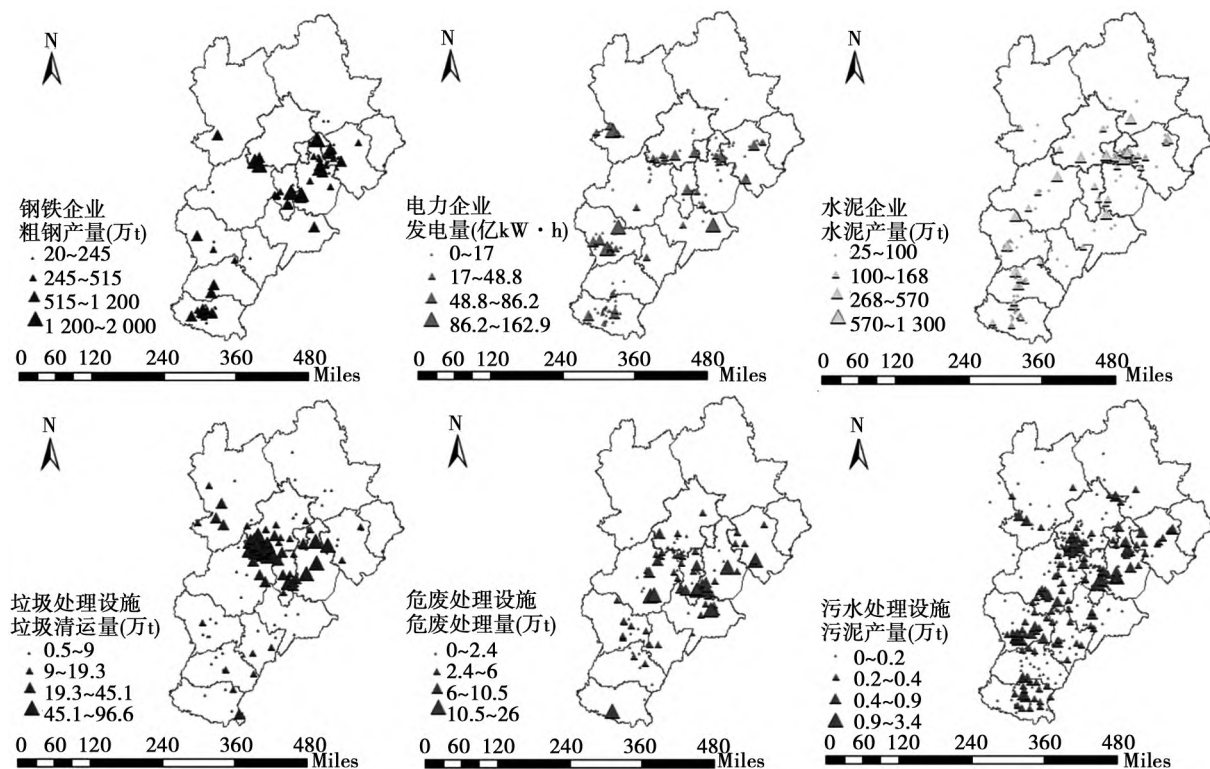


图 2 京津冀区域 1 057 家核心共生单元的位置及规模模拟

Fig. 2 Location and scale simulation of 1 057 core symbiotic units in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

注: 根据自然资源部审图号 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改.

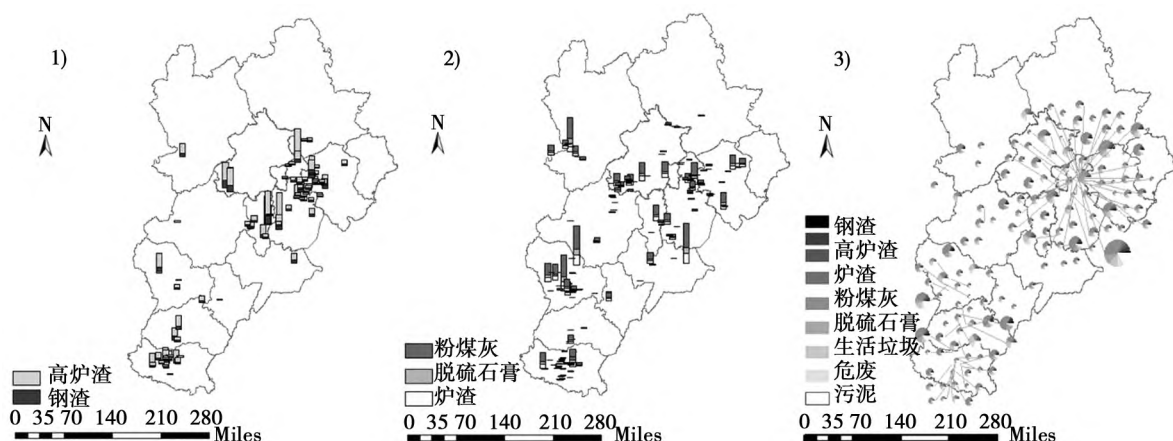


图3 京津冀区域主要固体废弃物的产量及可共生消纳量空间模拟

Fig. 3 Spatial modelling of the co-producible consumption of major solid wastes in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

注: 1. 根据自然资源部审图号 GS(2016)1610 的标准地图制作, 底图无修改;

2. 图1)、图2)为京津冀区域主要钢铁、电力企业的固废产量空间模拟, 图3)为主要水泥企业可共生利用各类废弃物的消纳潜力空间模拟, 单位均为万 t

2.2 最优产业共生方案分析与共生重点识别

以经济利润最大化为目标的复杂网络运输模型, 考虑了京津冀重点源行业和汇行业之间在空间位置、产销规模及技术水平等各方面的匹配关系, 并兼顾物质平衡、供需关系、行业标准、经济政策等现实性约束, 构建了一个尽可能贴近现实的京津冀最优产业共生方案。

结果显示, 该共生方案包含 1 201 条共生路径, 可消纳八类固废共 11 405.4 万 t, 固废综合协同利用效率达 61.1%, 如图 4 所示。从各类固废的协同利用效率来看, 高炉渣、钢渣、炉渣、粉煤灰、脱硫石膏、生活垃圾、污泥、危废在此共生方案中可被跨行业、跨地区协同利用量分别占其总产量的 12.7%、6.9%、78.3%、63.2%、10.0%、58.6%、59.8% 与 86.1%。由此可见, 炉渣、粉煤灰、危废是经济效益目标导向下能够被较为充分共生利用的关键废弃物。

从“工业-工业”共生路径的空间区域特征来看, 邯郸-唐山是五类工业固废的关键协同消纳区域, 共生利用的潜力空间最大, 预计未来两地将是产业共生管理的关键地区。在钢渣-熟料、高炉渣-熟料、炉渣-水泥、粉煤灰-水泥四种消纳利用固废量较高的共生体系中, 邯郸、唐山两地间的跨区域产业共生路径可消纳固废量占各体系总

消纳量的 6.4%、6.6%、21.0%、27.8%。此结果也进一步印证了跨行业、跨地区产业共生的必要性和经济可行性。此前, 大多数产业共生行为局限于企业内部或小范围临近企业间, 由于较远的废弃物运输距离, 跨地区产业共生往往被认为缺少经济价值。而在该产业共生方案中, 邯郸、唐山两地虽相距较远, 其跨地区产业共生依然能够带来良好的经济收益。

为此, 研究进一步分析了各类废弃物的运输距离与其共生利用经济收益间的关联关系。如图 5 所示, 总体来看, 废弃物共生利用的经济收益与其运输距离具有较强的负相关性 (Spearman 相关系数 = -0.219 2, $R^2 = 0.784 7$), 但不同废弃物的有效共生利用半径差异显著。其中, 脱硫石膏-水泥、粉煤灰-熟料共生路径集中于左下角区域, 各路径的经济利润及废弃物协同消纳量均随运输距离增大而迅速下降, 有效共生利用半径小于 50 km; 而炉渣-水泥/熟料、粉煤灰-水泥、钢渣-水泥/熟料与高炉渣-水泥/熟料共生路径的有效共生利用半径最大可达 130 km, 不仅能在城市内部临近共生, 还可以进行经济有效的跨区消纳利用, 存在多个经济利润较大的长距离共生路径。

这表明运输距离并不是判断产业共生行为是否可行的决定性因素。当两地废弃物产生及可共

生消纳量达到一定规模水平时(聚集效应),运输距离的影响会进一步减弱,共生带来的资源能源节约收益与产业共生技术改造的固定投资、运营费用、废弃物产排信息获取成本等对共生经济可行性的影响增强.政府在运输成本、技术改造投资等方面提供的经济补贴及针对共生企业实行的税收优惠等政策,可以显著提高废弃物的有效共生利用半径.此外,建议将唐山、邯郸两地设为试点城市,探索跨地区产业共生的适用性、环境经济效果和精细化管理手段;并在加强产业集聚形成两地产业共生特色区位优势的同时,引入补链企业,缩短各产业共生路径的运输距离,进一步降低废弃物循环利用的成本.

从“社会-工业”共生路径的空间区域特征来看,三类社会废弃物的跨行业协同消纳较“工业-工业”共生的区域集中度较低,重点分布在北京、天津地区.例如,北京-邯郸、北京-石家庄对污泥的跨区域消纳以及天津-廊坊对危废的跨

区域协同消纳.总体来看,废弃物跨区域协同处置的共生路径数量更多而分散较为零散.通过该产业共生方案可协同消纳处理的生活垃圾、污泥及危废量占三类废弃物总产量的 59.5%、63.1%、62.4%.

综合考虑各企业路径数量及废弃物共生利用量可知,钢铁厂 S62、S80、S90,火电厂 P45、P137、P127 与水泥厂 C96、C44、C19 为京津冀产业共生体系的关键节点.保障上述重点企业的连续生产是相关废弃物循环利用,京津冀区域跨行业、跨地区产业共生系统稳定运行的重要前提.然而当前钢铁、火电、水泥行业经常面临行业出清政策以及季节性停产、限产措施的制约^[41, 42].这些“一刀切”的停产、限产政策会对产业共生系统的稳定运行造成较大冲击,建议京津冀相关行业的规模调整及运作管理政策考虑适当放宽对关键共生企业生产的调控力度,以此提升京津冀区域产业共生系统的运行效率与风险抵抗能力.

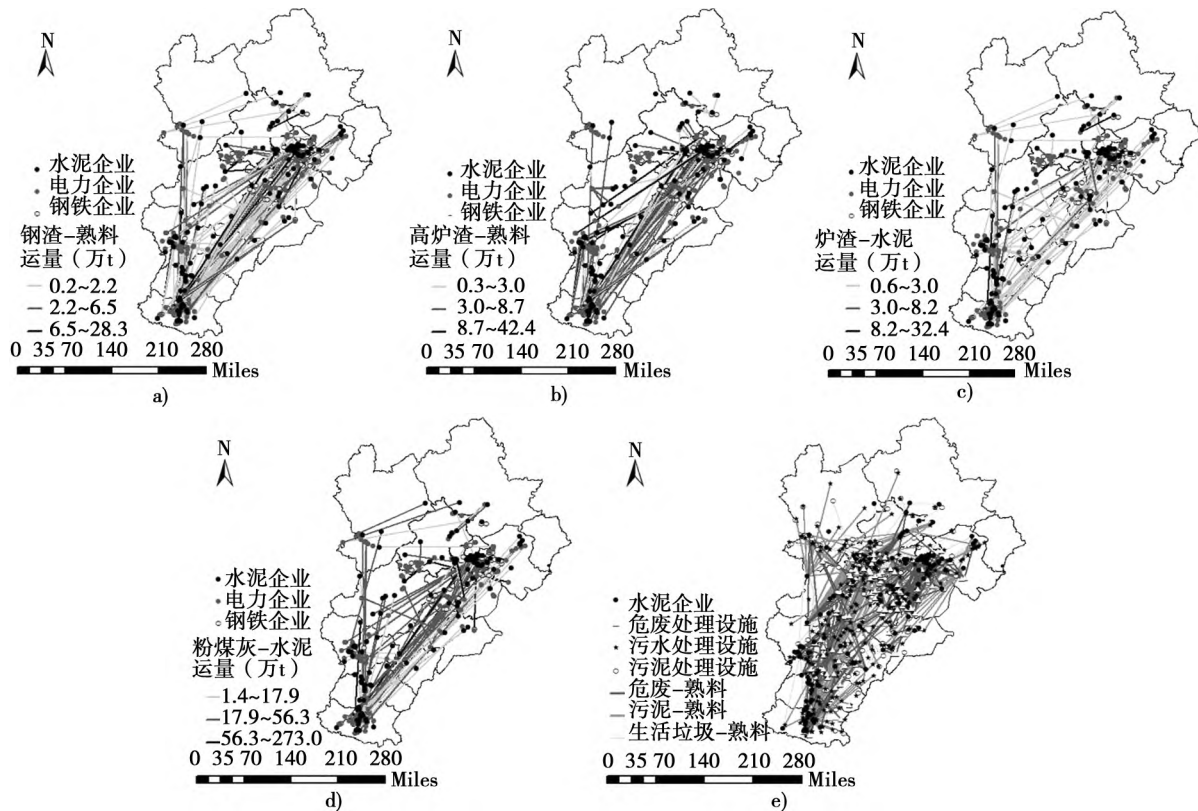


图4 京津冀区域经济最优产业共生方案的运输路线图

Fig.4 Transport roadmap for the economically optimal industrial symbiosis solution in Beijing-Tianjin-Hebei Region

注: 1. 根据自然资源部审图号 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改;

2. a) 钢渣-熟料共生体系;b) 高炉渣-熟料共生体系;c) 炉渣-水泥共生体系;d) 粉煤灰-水泥共生体系;e) 社会(垃圾、污泥、危废)-熟料共生体系.

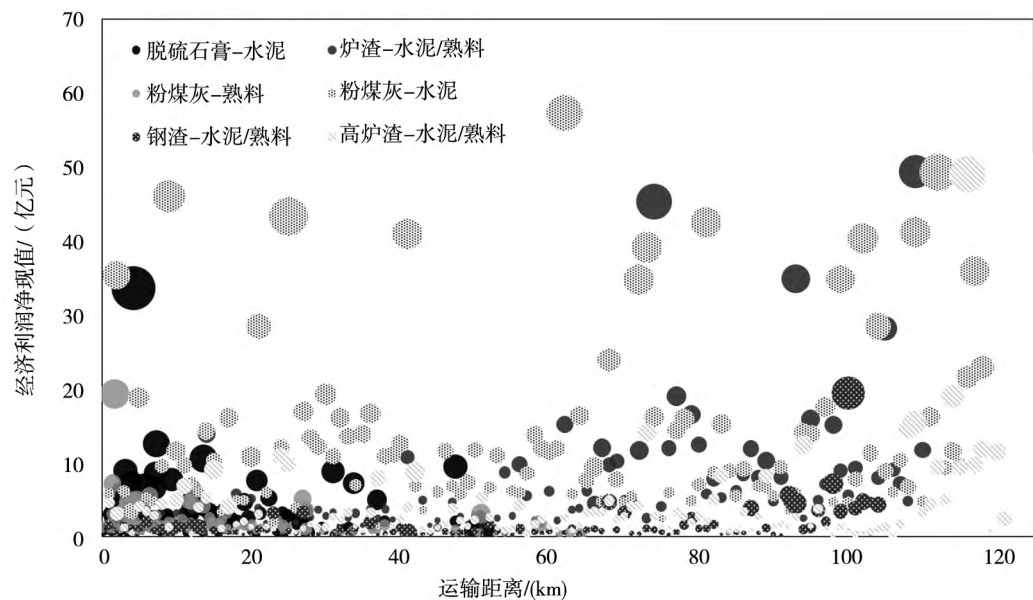


图 5 共生距离与共生经济收益的关联关系分析

Fig.5 Relationship between economic performance of industrial symbiosis paths and the transportation distances

2.3 产业共生节能减排效果评价

研究根据产业共生系统中各项共生技术的具体节能减排机制确定对应的参考基准技术,全面衡量共生技术相对参考基准技术的能耗和污染物排放水平差异,同时考虑共生技术所作用的具体工序环节的污染物排放末端削减率,计算各项共生技术的实际污染物减排效果,自底向上的评估京津冀区域理论可行、经济最优及经济环境“双赢”三类产业共生方案的环境经济效益.结果如图 6 所示.“理论可行”的京津冀跨行业、跨地区产业共生方案可节能约 607.9 万 tce,同时减少

SO₂排放约 2.3 万 t,NO_x 7.0 万 t,PM 3.4 万 t.“经济最优”的京津冀产业共生方案预计可节能约 578.4 万 tce,同时减少 SO₂、NO_x、PM 排放分别约为 2.2 万 t、6.7 万 t、3.3 万 t.高炉渣、钢渣、炉渣、粉煤灰、脱硫石膏、生活垃圾、危废、污泥的跨行业、跨地区协同利用预计分别能带来 813.0 亿元、270.9 亿元、1 305.5 亿元、1 028.7 亿元、356.4 亿元、27.7 亿元、10.2 亿元、152.3 亿元的净收益现值,有效降低三地相关企业的生产成本,经济收益可观.其中,与其他固废共生利用的经济价值相比,炉渣、粉煤灰的经济效益最为突出.

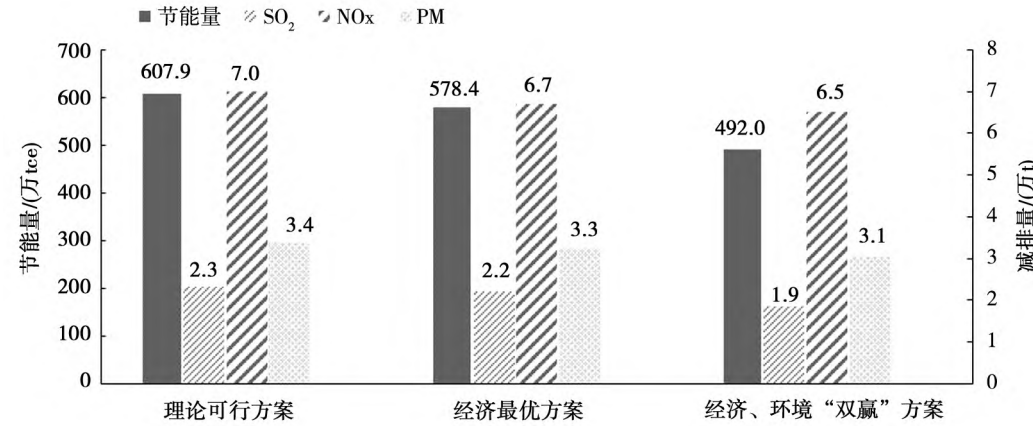


图 6 京津冀区域三类产业共生方案的节能减排潜力

Fig.6 Energy conservation and emission reduction potential of three types of industrial symbiosis schemes in Beijing-Tianjin-Hebei Region

满足经济、环境“双赢”目标的京津冀产业共生方案预计可节能 492.0 万 tce, 同时减少 SO_2 、 NO_x 、PM 排放量分别为 1.9 万 t、6.5 万 t 和 3.1 万 t. 与“理论可行”的产业共生方案的环境效益相比, 由于受到废弃物产消空间位置、规模、技术水平、运输条件等多现实因素影响, 满足经济、环境“双赢”目标的京津冀产业共生方案节能效果预期下降 19.1%, SO_2 、 NO_x 、PM 减排效果预计下降约 17.4%、7.1%、8.8%.

进一步将京津冀区域三类产业共生方案的节能减排潜力分解到各共生利用技术, 如图 7 所示.

以经济、环境“双赢”的产业共生方案为例, 使用炉渣、粉煤灰制矿渣微粉部分替代熟料生产水泥预计可实现的环境经济效益约占产业共生方案总节能量的 62.7%、主要污染物减排总量的 65.0% (其中 SO_2 71.0%、 NO_x 64.4%、PM

57.6%)、总收益现值的 71.5%, 应作为京津冀区域未来产业共生模式推广的重点共生技术. 钢渣、高炉的共生利用预计可贡献产业共生方案总节能量的 28.9%、总污染物减排量的 25.8%、总收益现值的 21.2%. 与炉渣、粉煤灰相比, 钢渣、高炉渣共生利用的环境效益潜力较小, 所需技术改造投资成本也相对更高, 导致在“双赢”产业共生方案下, 钢渣、高炉渣的有效共生利用率仅达到 6.9%、12.7%, 远远低于炉渣、粉煤灰 (63.2% ~ 78.3%). 提升钢渣、高炉渣共生利用技术的经济附加值, 提高水泥窑协同利用两类废弃物的可消纳上限, 应作为京津冀区域未来产业共生技术研发的重点方向. 此外, 社会-工业共生系统的节能潜力约为 21.3 万 tce, 减排 SO_2 、 NO_x 、PM 分别为 0.3 万 t、0.2 万 t、0.001 万 t, 所需技术投资总成本约为 235.5 亿元.

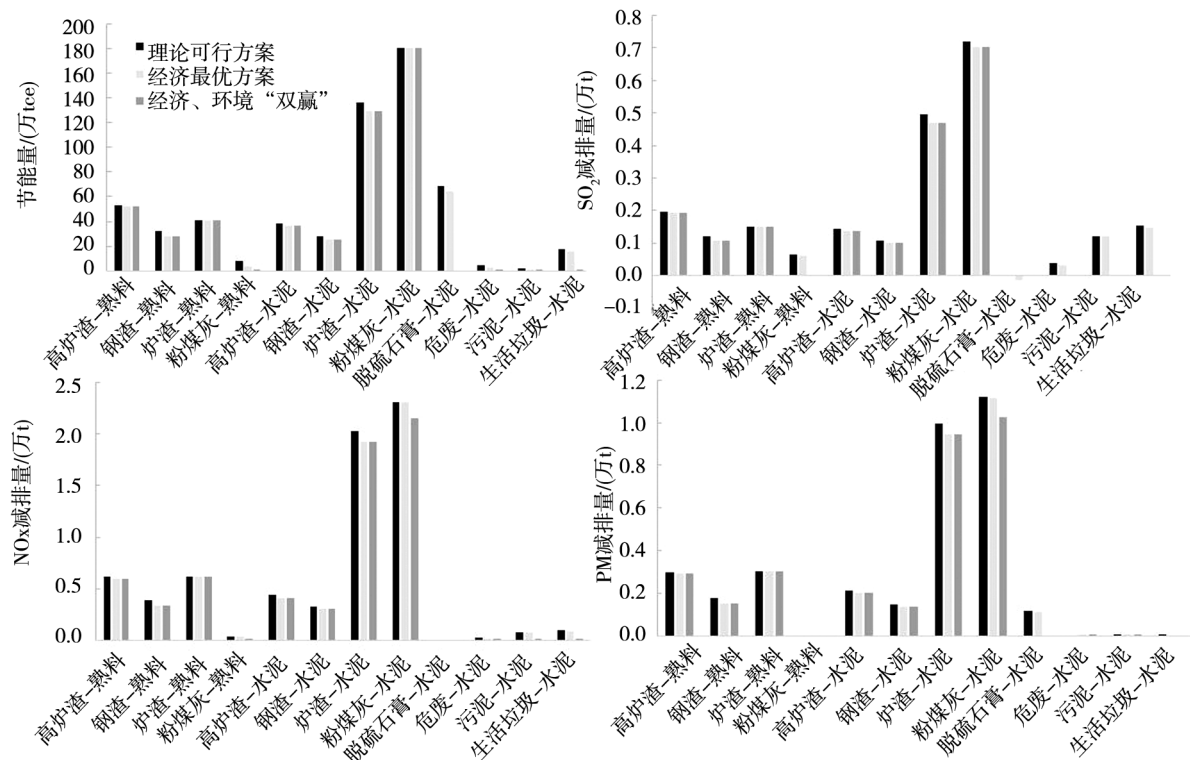


图 7 京津冀区域三类产业共生方案的节能减排潜力分解情况

Fig. 7 Decomposition of energy conservation and emission reduction potential of three types of industrial symbiosis schemes in Beijing-Tianjin-Hebei Region

3 结束语

产业聚集在造成严重压缩型、复合型环境污

染问题的同时, 也为废弃物的循环利用创造了有利条件. 本研究主要从理论可行、经济最优、经济环境“双赢”三个层次出发, 构建京津冀区域跨行业、跨地区的固废协同消纳方案, 系统性评估其节

能减排潜力,为大尺度、精细化、可落地的产业共生管理提供参考。

从固废产排空间特征入手,研究发现区域八类重点固废的总产量与可协同消纳总量匹配度不高,存在43.5%的可共生利用缺口。考虑重点固废产消规模匹配的理想化产业共生方案,预计可实现607.9万tce节能量2.3万t~7.0万t主要大气污染物减排,进一步印证了京津冀区域固废跨行业、跨地区协同共生利用的必要性。研发并推广钢渣、高炉渣等固废的新型高附加值共生利用技术;新增并优化危废处理厂、垃圾清运站等环卫基础设施位置及规模;考虑与农业、市政等更多部门进行多源固废共生处理,更充分利用水泥企业的剩余消纳能力,应是京津冀区域未来产业共生空间化管理的重点方向。

考虑主要企业的空间位置、工艺技术水平、产废固废现状等现实条件,研究进一步构建了可落地、经济最优的京津冀产业共生方案。相较于理论共生方案,该方案下共生路径的经济有效率达61.1%。其中,邯郸、唐山两地固废的协同消纳量

占京津冀区域八类重点固废摸底总量的26.5%,应作为试点城市,探索跨行业、跨地区产业共生精细化管理的实际效果及适用性。S62、S80、S90、P45、P137、P127、C96、C44、C19是该方案中的重点共生企业,应给予适当指标倾斜,避免“一刀切”的停产、限产等行业调整政策对重点共生企业正常生产运行的冲击,提高产业共生系统的稳定性。

解析该产业共生系统中各共生路径的节能减排机制,研究发现,满足经济、环境“双赢”目标的京津冀产业共生方案预计可节能492.0万tce,同时减少主要大气污染物排放量1.9万t~6.5万t,占2025年京津冀规定的能耗增量控制目标及SO₂、NO_x减排量目标的10.4%、8.5%、28.5%^[43],可极大缓解京津冀区域严峻、复杂的环境污染压力。其中,使用炉渣、粉煤灰替代熟料生产水泥预计可实现的环境经济效益约占产业共生方案总节能量的62.7%、主要污染物减排总量的65.0%,应作为京津冀区域跨行业、跨地区产业共生模式推广的重点技术。

参 考 文 献:

- [1]郭 扬,吕一铮,严 坤,等. 中国工业园区低碳发展路径研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 49–58.
Guo Yang, Lü Yizheng, Yan Kun, et al. Low-carbon development pathways of industrial parks in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 49–58. (in Chinese)
- [2]Guo Y, Tian J P, Chen L J. Managing energy infrastructure to decarbonize industrial parks in China[J]. Nature Communications, 2020, (11): 981.
- [3]中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴(2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. China Urban Construction Statistical Yearbook (2022) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022. (in Chinese)
- [4]Courtens F M, Haezendonck E, Dooms M, et al. Accelerating the circular economy transition process for gateway ports: The case of the Port of Zeebrugge[J]. Maritime Transport Research, 2023, 4(1): 100088.
- [5]IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 2021.
- [6]IEA. Net Zero by 2050[R]. Paris: IEA, 2021.
- [7]United States Department of Energy. Industrial Decarbonization Roadmap[R]. Washington D. C: DOE, 2021.
- [8]Guo Y, Mauzerall D L, Lyu Y Z, et al. Benefits of infrastructure symbiosis between coal power and waste water treatment [J]. Nature Sustainability, 2022, (5): 1070–1079.
- [9]Xie X, Fu H, Zhu Q S, et al. Integrated optimization modelling framework for low-carbon and green regional transitions through resource-based industrial symbiosis[J]. Nature Communication, 2024, (15): 3842.
- [10]Wang L, Zhang Q, Zhang G Q, et al. Can industrial symbiosis policies be effective? Evidence from the nationwide industri-

- al symbiosis system in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331(1): 117346.
- [11] Mendez-Alva F, Cervo H, Krese G, et al. Industrial symbiosis profiles in energy-intensive industries: Sectoral insights from open databases[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, (314): 128031.
- [12] 张朋, 谢云东, 吴强, 等. 我国管理科学与工程学科研究热点及演化趋势[J]. *管理科学学报*, 2022, 25(5): 1-12.
- Zhang Peng, Xie Yundong, Wu Qiang, et al. Hot topics and thematic evolutionary trends of researches on management science and engineering in China[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2022, 25(5): 1-12. (in Chinese)
- [13] 黄季焜, 陈彬, 邓祥征, 等. 区域社会经济的协调发展管理研究热点分析[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 163-170.
- Huang Jikun, Chen Bin, Deng Xiangzheng, et al. Analysis of research hotspots in management of coordinated development of economy and society[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(8): 163-170. (in Chinese)
- [14] 张增凯, 彭彬彬, 解伟, 等. 能源转型与管理领域的科学研究问题[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 147-153.
- Zhang Zengkai, Peng Binbin, Xie Wei, et al. Scientific research issues in the field of energy transition and management[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(8): 147-153. (in Chinese)
- [15] 赵曼仪, 王科. 减污降碳协同效应综合评估的研究综述与展望[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(2): 58-69.
- Zhao Manyi, Wang Ke. Comprehensive evaluations of the synergistic effects of carbon emission reduction and air pollution control: A literature review[J]. *China Population Resources and Environment*, 2024, 34(2): 58-69. (in Chinese)
- [16] Wang L, Zhang Q, Wang H. Effect of policy on industrial symbiosis: Simulation study from the perspective of enterprise operation[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, (30): 962-972.
- [17] Xie X, Wei B Y, Hu S Y, et al. Integrated network analysis on industrial symbiosis: Case study of Qinghai salt lake industrial park[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, (429): 139235.
- [18] Lu C Y, Wang S S, Wang K, et al. Uncovering the benefits of integrating industrial symbiosis and urban symbiosis targeting a resource-dependent city: A case study of Yongcheng, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, (255): 120210.
- [19] 陈宋璇, 王云, 吕东, 等. 京津冀工农城固废跨产业跨区域协同利用解决方案研究[J]. *中国有色冶金*, 2021, 50(5): 85-90, 104.
- Chen Songxuan, Wang Yun, Lü Dong, et al. Study on the solution for cross-industry and cross-region coordinated utilization of solid waste in the Beijing-Tianjin-Hebei industrial, agricultural and urban areas[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2021, 50(5): 85-90, 104. (in Chinese)
- [20] 盛昭瀚, 于景元. 复杂系统管理: 一个具有中国特色的管理学新领域[J]. *管理世界*, 2021, 37(6): 36-50, 2.
- Sheng Zhaohan, Yu Jingyuan. Complex systems management: An emerging management science with Chinese characteristics[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(6): 36-50, 2. (in Chinese)
- [21] 汪寿阳, 胡毅, 熊熊, 等. 复杂系统管理理论与方法研究[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 1-9.
- Wang Shouyang, Hu Yi, Xiong Xiong, et al. Complex systems management: Theory and methods[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(8): 1-9. (in Chinese)
- [22] Nagatomo Y, Ozawa A, Kudoh Y, et al. Impacts of employment in power generation on renewable-based energy systems in Japan: Analysis using an energy system model[J]. *Energy*, 2021, (226): 120350.
- [23] Di Leo S, Caramuta P, Curci P, et al. Regression analysis for energy demand projection: An application to TIMES-Basili-cata and TIMES-Italy energy models[J]. *Energy*, 2020, (196): 117058.
- [24] Huppmann D, Gidden M, Fricko O, et al. The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the IX modeling platform (IXmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, (112): 143-156.
- [25] Li Z L, Hanaoka T. Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO2 emissions in China's iron and steel sector[J]. *One Earth*, 2022, 5(8): 932-943.
- [26] Kotzur L, Nolting L, Hoffmann M, et al. A modeler's guide to handle complexity in energy systems optimization[J]. *Advances in Applied Energy*, 2021, (4): 100063.

- [27] Wei X T, Qiu R, Liang Y T, et al. Roadmap to carbon emissions neutral industrial parks: Energy, economic and environmental analysis[J]. *Energy*, 2021, (238): 121732.
- [28] Wang S S, Lu C Y, Gao Y, et al. Life cycle assessment of reduction of environmental impacts via industrial symbiosis in an energy-intensive industrial park in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, (241): 118358.
- [29] Hu W Q, Tian J P, Chen L J. Assessment of sustainable water stewardship and synergistic environmental benefits in Chinese industrial parks[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, (170): 105589.
- [30] Chen X Y, Dong M X, Zhang L, et al. Comprehensive evaluation of environmental and economic benefits of industrial symbiosis in industrial parks[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, (354): 131635.
- [31] Luo Y M, Zhou D Y, Tian Y Y, et al. Spatial and temporal characteristics of different types of pollution-intensive industries in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China by using land use data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, (329): 129601.
- [32] 首都经济贸易大学特大城市经济社会发展研究院. 京津冀发展报告(2023)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2023.
Academy of Metropolis of Economic and Social Development, Capital University of Economics and Business. Annual Report on Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region Development(2023)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2023. (in Chinese)
- [33] 国家统计局. 中国统计年鉴(2023)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook(2023)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023. (in Chinese)
- [34] 河北省统计局. 河北统计年鉴(2023)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
Hebei Provincial Bureau of Statistics of China. Hebei Statistical Yearbook(2023)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023. (in Chinese)
- [35] Cao Z, Myers R J, Lupton R C, et al. The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle[J]. *Nature Communications*, 2020, (11): 3777.
- [36] 北京市生态环境局. 2022 年北京市固体废物污染环境防治信息通告[EB/OL]. <https://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/index.html>, 2023-5-29.
Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Announcement on the Prevention and Control of Environment Pollution Caused by Solid Wastes (2022)[EB/OL]. <https://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/index.html>, 2023-5-29. (in Chinese)
- [37] 天津市生态环境局. 2022 年天津市固体废物污染防治公告[EB/OL]. https://sthj.tj.gov.cn/YWGWZ7406/HJGL7886/GTFWGL6110/202306/t20230605_6267499.html, 2023-6-5.
Tianjin Municipal Ecology and Environment Bureau. Announcement on the Prevention and Control of Environment Pollution Caused by Solid Wastes (2022)[EB/OL]. https://sthj.tj.gov.cn/YWGWZ7406/HJGL7886/GTFWGL6110/202306/t20230605_6267499.html, 2023-6-5. (in Chinese)
- [38] 中国生态环境部. 中国生态环境统计公报(2022)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb>, 2023-12-29.
Ministry of Ecology and Environment of China. Report on the State of the Ecology and Environment in China(2022)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb>, 2023-12-29. (in Chinese)
- [39] 财政部, 国家税务总局. 资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录(2022)[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/28/content_5676109.htm, 2021-12-30.
Ministry of Finance of China, State Administration of Taxation of China. Catalogue of Preferential Value-added Tax on Products and Services for Comprehensive Utilization of Resources (2022)[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/28/content_5676109.htm, 2021-12-30. (in Chinese)
- [40] Cao X, Wen Z G, Zhao X L, et al. Quantitative assessment of energy conservation and emission reduction effects of nationwide industrial symbiosis in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, (717): 137144.
- [41] 唐山大气污染防治工作领导小组办公室. 关于报送钢铁行业企业限产减排措施通知[EB/OL]. <https://3g.163>

com/dy/article/G5H7MELN055212EB. html, 2021 - 3 - 19.

Tangshan Municipal Air Pollution Prevention and Control Leading Group Office. Notice on Reporting Production Restriction and Emission Reduction Measures for Enterprises in the Iron and Steel Industry[EB/OL]. [https://3g.163.com/dy/article/G5H7MELN055212EB. html](https://3g.163.com/dy/article/G5H7MELN055212EB.html), 2021 - 3 - 19. (in Chinese)

- [42] 中国国家发展和改革委员会. 完善能源消费强度和总量双控制度方案[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/17/content_5637960. htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/17/content_5637960.htm), 2021 - 9 - 11.

National Development and Reform Commission of China. Measures to Improve the Dual Control System on Energy Intensity and Total Consumption[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/17/content_5637960. htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/17/content_5637960.htm), 2021 - 9 - 11. (in Chinese)

- [43] 国务院. “十四五”节能减排综合工作方案[EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202. htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm), 2022 - 1 - 24.

The State Council of China. 14th Five-Year Plan on Energy Conservation and Emission Reduction[EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202. htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm), 2022 - 1 - 24. (in Chinese)

Spatial management and benefit evaluation of Beijing-Tianjin-Hebei industrial symbiosis based on complex system optimization

CAO Xin¹, WU Ming-xuan¹, LIU Chang², QIAN Yuan³, WEN Zong-guo⁴

1. School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;
2. School of Humanities and Social Sciences, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore;
3. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China;
4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: A deep exploration of the energy conservation and emission reduction potential of the industrial symbiosis system, along with promoting cross-industry and cross-regional synergistic consumption and utilization of multi-source solid waste, is an important tool for addressing the compound environmental pollution problems of heavy industries and population-dense areas, such as the Beijing-Tianjin-Hebei Region. At present, the scientific design of a systematic industrial symbiosis solution that matches the spatial characteristics of regional waste generation and discharge faces three major challenges: Unclear data on multi-source solid waste generation and discharge, unclear symbiosis pathways, and difficulties in assessing the energy conservation and emission reduction potential of the industrial symbiosis solution. The purpose of this study is to use the Beijing-Tianjin-Hebei Region as an example to construct a spatial map of multi-source solid waste generation and discharge. Based on this, a complex system optimization method is introduced to develop a multi-source solid waste cross-industry and cross-region symbiotic utilization plan. Finally, the environmental and economic performance of the plan is quantitatively evaluated using a bottom-up approach, with key symbiotic regions, enterprises, and technologies identified. The methodology of this study is expected to provide a replicable model for the spatial and refined management of industrial symbiosis in other regions and even across the country.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei; multi-source solid waste; industrial symbiosis; complex system optimization; energy conservation and emission reduction