

引用格式: 曾维康, 万伟, 马莉莉. 多重目标约束下中国省际产业能源协同的碳排放效应[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 549–563.
[Zeng W K, Wan W, Ma L L. The carbon emission effects of cross-regional cooperation under multiple objective constraints in China
[J]. Resources Science, 2023, 45(3): 549–563.] DOI: 10.18402/resci.2023.03.07

多重目标约束下中国省际产业能源协同的碳排放效应

曾维康, 万伟, 马莉莉

(西北大学经济管理学院, 西安 710127)

摘要:【目的】加快构建清洁低碳能源系统和集约高效产业系统是实现经济发展动能转换、形成绿色低碳循环发展经济体系的关键。【方法】本文基于Kaya恒等式构建了产业系统碳排放影响因素模型,以中国30个省份发展规划中政策性目标作为约束条件,利用多目标规划模型对“孤立式”与“协同式”两种优化策略下省际能源结构、产业结构、碳排放量等特征进行分析。【结果】研究发现:①在当前能源与产业结构下,经济增长与节能减排目标难以兼顾,“协同式”优化策略下中国二氧化碳潜在减排规模更大,为78082.90万t。②能源强度是现阶段影响碳排放的主导因素,省际产业能源协同的碳排放效应具有两面性,应重视碳排放随产业发生转移的问题。③在充分实现能源调配和产业转移的情况下,东中西部总产值平均增长幅度为7.98%,经济结构显著优化,地区特色更为突显,一定程度上打破了地区间产业同构的窘境。【结论】本文通过对多重目标约束下地区差异化发展策略的碳排放效应进行探讨,证实了多重目标约束下省际“协同式”策略的碳减排效应更为显著,为构建中国绿色低碳循环发展经济体系提供方法借鉴和政策启示。

关键词:碳排放效应;多目标规划;能源调配;产业转移;区域协同;中国

DOI: 10.18402/resci.2023.03.07

1 引言

在工业化和城市化快速推进过程中,中国经历经济增长奇迹的同时,大规模的化石能源消耗导致二氧化碳排放大幅增加。据国家统计局公布数据,2021年中国能源消耗量达52.4亿t标准煤,其中化石能源占比83.4%,产生二氧化碳排放119亿t,占全球排放总量的33%,中国的能源消耗量与二氧化碳排放量均位居世界首位。2021年10月,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》指出2030年中国单位GDP二氧化碳排放应较2005年下降65%以上,并进一步将“碳达峰”所需采取的措施具体化。能源系统与产业系统的有机融合直接关系到“双碳”任务期内经济增长和减排目标达成进度,更关乎中国经济高质量发展。利用多目标规划模型分析省

际产业能源协同的碳排放效应,能够更为贴近实际地探讨地方发展目标约束下资源配置与节能减排间的关系,为合理设定地方发展目标,优化资源空间调配,构建绿色低碳经济体系提供理论支撑与政策建议。

放眼全球,产业系统深度脱碳是应对全球气候变暖的主要行动,能源消费、产业发展和碳排放三者具有内在紧密联系。从能源需求端来看,当前中国经济增长依靠大量廉价化石能源作为支撑^[1],而化石能源的反弹效应是导致其消耗额外增加与二氧化碳排放不断上升的重要原因^[2]。发展低碳工业将使绿色发展得以实现^[3],但在将经济增速作为目标函数首要目标的情况下,低碳工业并非地方政府产业发展首选。从能源供给侧来看,可再生能源中

收稿日期:2022-11-14 修订日期:2023-02-10

作者简介:曾维康,男,湖南娄底人,博士生,主要从事资源环境经济研究。E-mail: 625710961@qq.com

通讯作者:马莉莉,女,江苏无锡人,教授,主要从事城市、区域经济与世界经济研究。E-mail: nihaolili@sina.com

风能、光伏、水电的消纳问题制约其进一步开发,而氢能开发尚处于起步阶段,短期内无法满足产业系统对能源的巨大需求。现阶段,化石能源依然是经济平稳运行的“压舱石”,而在保障能源安全稳定供应前提下,打破“一煤独大”的能源结构,是经济低碳转型的基本原则^[4]。“双碳”目标的实现迫在眉睫,但中国发展低碳经济面临着能源供给端新能源开发受限和能源需求侧化石能源巨大市场的“双重压力”。因此,依托能源调配与产业转移,解决中国可再生能源生产与负荷中心逆向分布问题,可能是达成经济增长、能源强度与碳排放强度等多重发展目标,并推动整个产业系统深度脱碳的最优解。

中国不同省份间能源禀赋与产业特征存在较大差异。能源开发利用所产生的碳排放会随着能源调配而发生流动,能源生产地与消费地的碳排放情况往往存在较大差异^[5],而产业转移同样会使碳排放中心发生位移^[6]。能源与产业特征会对不同地区产业系统的碳排放产生重要影响,Kaya恒等式可将产业碳排放强度影响因素分解为能源碳排放密度、能源结构、能源消费强度、产业结构^[7]。此外,地方政府发展规划所产生的影响不容忽视,不同省份二氧化碳排放往往面临经济发展和资源环境等方面的多重约束^[8],探索经济增长、节能减排等多重发展规划目标下低碳经济实现路径具有重要实践价值。然而,较多研究忽略了不同地区政策层面约束性指标对产业低碳转型的异质性影响^[9,10]。随着生态文明建设深入推进,环保政策往往会对企业行为产生刚性约束^[11],忽略政策刚性约束可能会导致所得结论准确性存疑。多目标规划模型引入二氧化碳排放影响因素的研究中^[12,13],可减少因缺乏政策刚性约束考量所导致研究结果的偏误。

目前与本文相关的文献主要涉及以下3个方面:碳排放影响因素、多目标规划与节能减排以及节能减排路径研究。①在碳排放影响因素研究方面,部分学者研究了生产方式和技术进步对碳排放的影响^[14,15],如杨军等^[16]发现人口规模、经济发展水平以及城市化水平等因素会对碳排放产生差异化影响。此外,还有学者重点研究了产业结构的碳排

放效应,分析了产业结构优化将有效减少碳排放^[17],认为产业结构调整是解决环境问题、减少碳排放的重要途径^[18]。能源对碳排放的影响同样应引起重视,但目前大多数研究将产业、能源作为相互独立的变量,考察其对碳排放的影响^[19],缺乏对产业、能源系统协同减排效应的讨论。②在多目标规划与节能减排研究方面,不同地区产业发展和能源消耗存在差异,地区间可以通过产业转移和能源调配的方式,以满足其产业发展、能源消耗和碳排放的要求,这一过程可以通过构建跨区域多目标规划模型来实现,于是多目标规划方法被应用到相关研究中^[20]。张捷等^[21]发现采取差异化的产业结构调整政策,广东省可以同时实现降低碳排放与经济高增长的双重目标。Liu等^[22]通过线性规划模型,模拟了河北省水-能约束下地区内产业结构的优化。刘黎明等^[23]则以环境保护和经济增长为双重目标,构建了具有政策权重的产业结构双目标优化模型。现有研究政策约束目标数量设置较少,多目标规划模型与现实的符合度有待提高。③在节能减排路径的研究方面,张华明等^[24]认为在实现低碳发展的过程中,准确把握自身碳排放相关特征是不同类型城市规划减排路径的前提。王勇等^[25]认为基于市场机制对碳排放权进行配额是降低碳排放的有效手段。张诗卉等^[26]在将不同省份基于经济发展、产业结构、能源消费和排放等特征划分类别的基础上,对不同类型省份给出了差异化的碳达峰行动路径。

现有相关研究已取得了丰富成果,但在经济发展和节能减排多重政策目标约束下,能源与产业系统的相关特征及协同优化方式尚未得到充分研究。本文中多重目标是政策背景,产业能源协同是方法,二氧化碳减排是目的。研究多重约束下省际产业能源协同的碳排放效应的实质,是将地方政府视作理性决策主体,面对中央分解的经济增速、二氧化碳减排、能源效率提升等约束目标,通过“孤立式”或“协同式”策略,实现经济增长、节能减排等一系列目标函数。本文可能的边际贡献在于:①将目标规划模型与碳排放因素分解模型结合起来,模拟了面临多重政策约束,在不同优化策略下,论证了能源与产业系统协同优化的必要性。②以能源调

2023年3月

配与产业转移为着眼点,将各省份能源与产业状况结合其不同优化策略下节能减排的具体表现,给出差异化的节能减排政策建议。

2 产业系统碳排放影响因素分解

生产环节碳排放相对集中且排放量大,是节能减排的重点,因此本文对产业系统碳排放情况进行考察,利用Kaya恒等式,借鉴张伟等^[7]的思路,对产业系统二氧化碳排放的影响因素进行分解,构建产业系统碳排放模型:

$$C_t = \sum_m \sum_j (C_{mjt}/E_{mjt}) \times (E_{mjt}/E_{jt}) \times (E_{jt}/G_{jt}) \times (G_{jt}/G_t) \times G_t \quad (1)$$

式中: C_t 为产业系统在 t 时期所产生的二氧化碳排放量; C_{mjt} 为 j 行业在 t 时期消费 m 能源所产生的二氧化碳排放量; E_{mjt} 、 E_{jt} 分别为 j 行业在 t 时期 m 能源消耗量和总能源消耗量; G_{jt} 、 G_t 分别为 j 行业在 t 时期的产出值和产业系统的总产出值。由式(1)可推导:

$$CI_t = C_t/G_t = \sum_m \sum_j CD_{mjt} \times ES_{mjt} \times EI_{jt} \times IS_{jt} \quad (2)$$

式中: CI_t 为产业系统在 t 时期的碳排放强度; CD_{mjt} 为 j 行业在 t 时期 m 能源的碳排放系数; ES_{mjt} 表示 j 行业在 t 时期 m 能源消费所占比重; EI_{jt} 为 j 行业在 t 时期的能源强度; IS_{jt} 为 j 行业在 t 时期的产出值占比。由式(2)可知能源碳排放系数、能源结构、能源强度、产业结构均会对碳排放强度产生影响。对式(2)两边取自然对数,并对时间 t 求导,得到式(3):

$$\frac{d \ln CI_t}{dt} = \sum_m \sum_j \left(\frac{d \ln CD_{mjt}}{dt} + \frac{d \ln ES_{mjt}}{dt} + \frac{d \ln EI_{jt}}{dt} + \frac{d \ln IS_{jt}}{dt} \right) \quad (3)$$

对式(3)两边求解定积分,得到式(4):

$$\ln \frac{CI_t}{CI_0} = \sum_m \sum_j \int_0^t \left(\lambda \frac{d \ln CD_{mjt}}{dt} + \lambda \frac{d \ln ES_{mjt}}{dt} + \lambda \frac{d \ln EI_{jt}}{dt} + \lambda \frac{d \ln IS_{jt}}{dt} \right) dt \quad (4)$$

由于公式中对数形式的项能实现乘法和加法的互相转换,借鉴Ang^[27]以及李国璋等^[28]的处理方法,采用对数平均权重分解法(LMDI)对不同影响因素

赋予对数平均权重 $\lambda = L(w_{mj0}, w_{mjt})$,可以得出基于加法LMDI分解公式(5):

$$\begin{aligned} \Delta CI &= CI_t - CI_0 \\ &= \sum_m \sum_j \lambda \left(\ln \frac{CD_{mjt}}{CD_{mj0}} + \ln \frac{ES_{mjt}}{ES_{mj0}} + \ln \frac{EI_{jt}}{EI_{j0}} + \ln \frac{IS_{jt}}{IS_{j0}} \right) \\ &= \sum_m \sum_j L(w_{mj0}, w_{mjt}) \ln \frac{CD_{mjt}}{CD_{mj0}} + \dots + \\ &\quad \sum_j L(w_{j0}, w_{jt}) \ln \frac{IS_{jt}}{IS_{j0}} \\ &= \Delta CI_{CD} + \Delta CI_{ES} + \Delta CI_{EI} + \Delta CI_{IS} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: λ 、 w 分别为式(6)、(7)所示:

$$\lambda = L(w_{mj0}, w_{mjt}) = \frac{w_{mjt} - w_{mj0}}{\ln w_{mjt} - \ln w_{mj0}} \quad (6)$$

$$w_{mjt} = CD_{mjt} \times ES_{mjt} \times EI_{jt} \times IS_{jt} \quad (7)$$

式中: ΔCI 、 ΔCI_{CD} 、 ΔCI_{ES} 、 ΔCI_{EI} 、 ΔCI_{IS} 分别为产业系统总的碳排放强度变化,以及能源碳排放系数、能源结构、能源强度、产业结构4项影响因素变化所导致的产业系统碳排放强度的变化,该关系可用函数 θ 表示:

$$\Delta CI = \theta(\Delta CD, \Delta ES, \Delta EI, \Delta IS) \quad (8)$$

参考张伟等^[7]的处理方式,对式(8)两边取自然对数,并对时间求一阶导数,可得碳排放强度变化率:

$$\Delta CI' = \zeta_{CD}(\Delta CD') + \zeta_{ES}(\Delta ES') + \zeta_{EI}(\Delta EI') + \zeta_{IS}(\Delta IS') \quad (9)$$

式中: ζ_{CD} 、 ζ_{ES} 、 ζ_{EI} 、 ζ_{IS} 分别为能源碳排放系数变化、能源结构变化、能源强度变化、产业结构变化的碳排放强度弹性; $\Delta CI'$ 、 $\Delta CD'$ 、 $\Delta ES'$ 、 $\Delta EI'$ 、 $\Delta IS'$ 分别为产业系统碳排放强度变化率、能源碳排放系数变化率、能源结构变化率、能源强度变化率、产业结构变化率。由此可见,能源碳排放系数、能源结构、能源强度、产业结构四者的变化率将影响产业系统碳排放强度变化率。

3 多目标规划模型构建与数据说明

政策性约束目标加入碳排放效应研究中,将在经济高质量发展阶段赋予研究更强现实意义。由理论模型分析可知,不同地区二氧化碳排放量将受到能源碳排放系数、能源结构、能源强度、产业结构、经济发展水平的影响,结合各省份《国民经济和

社会发展第十三个五年规划纲要》中的经济发展和资源环境目标,对多目标规划模型的约束条件进行设定。

3.1 约束条件

能源碳排放系数取决于不同能源的特性,往往在研究中被视作常量,且各省份国民经济与社会发展十三五规划(以下简称“十三五规划”)中无相应目标,所以不将能源碳排放系数作为约束条件。而在以化石能源为主的能源消费结构中,能源消耗量将直接影响到二氧化碳排放量,有必要将能源消耗量设置为一项资源环境规划目标。考虑到不同约束条件的优先级差异,本文采用目标规划的方法进行求解,因此在模型中引入正负偏差变量, d_n^+ 、 d_n^- ($n=1, 2, \dots, 6$) 分别表示 i 省份 ($i=1, 2, \dots, 30$; I 为所有省份集合) 第 n 个软约束的正、负偏差变量,均为非负数。多目标规划模型包括经济增速、碳排放强度、能源结构、能源强度、产业结构、能源消耗量这6个约束条件,均根据各省份政府“十三五规划”中的发展规划目标设定:

(1) 经济持续增长。经济增长是解决社会发展问题的基础,通过GDP对经济增长进行衡量。各省份均在其“十三五规划”中设定了地区生产总值年均增速最低目标。

(2) 碳排放强度下降。保障经济发展前提下,逐步减少二氧化碳排放量是实现“双碳”目标的核心,碳排放强度为资源环境类约束性目标。

(3) 能源结构优化。能源结构优化即在保障能源系统安全稳定运行的基础上,逐步扩大非化石能源使用比例,从源头上减少能源消费所产生的碳排放。能源结构优化同样作为资源环境类的约束性目标。

(4) 能源强度降低。能源利用效率的提升表现为单位GDP能耗降低,这反映了产业系统与能源系统有机融合程度的提高,能源强度为资源环境类约束性目标。

(5) 产业结构优化。产业结构的优化调整能够推动产业系统升级,从而增强国民经济发展动力。各省份在“十三五规划”中将服务业增加值所占比重大设定为经济发展类预期性指标。

(6) 能源消耗量约束。本文将“十三五”阶段内

2019年数据选取为研究截面。因此,2019年各省份能源消耗量不能超出“十三五”阶段能源消耗量区间。

3.2 模型构建

考虑到部分省份可能无法满足所有约束条件,导致优化模型无可行解。利用多目标规划模型把这些约束条件转换为相应目标,从而将问题变为如何在一定约束范围内实现这些目标,最终实现整体优化。多目标规划模型通过将经济增速、碳排放强度等指标与目标值偏差之和最小化确定为目标函数,设置经济发展与资源环境方面的目标,并将目标分为 P_1 — P_4 四个层级(同一层级目标的权重相同,赋予目标不同优先级会导致结果产生差异),从而对不同优化情景下各省份经济增速、节能减排等目标是否达成进行考察。

3.2.1 单区域优化模型

在“孤立式”优化策略下,假设各省份为相互独立的“孤岛”,其在能源与产业方面不发生联系,依靠加强自身非化石能源开发利用进行能源结构优化,而产业结构优化则通过行政区域内部产业比例合理调整和提升劳动生产率得以实现。虽然这一优化策略可能导致经济发展速度下降,但同时也避免了伴随能源调配和产业转移而来的二氧化碳排放增量。为了模拟这一优化策略的情景,本文构建单区域优化模型,并观察此假设条件下各省份能源结构内部调整的碳排放效应以及经济发展、资源环境目标的实现情况。单区域优化模型如下:

$$\min p_1 \left(\sum_{i=1}^I d_{i1}^- \right) + p_2 \left(\sum_{i=1}^I d_{i2}^+ \right) + p_3 \left(\sum_{i=1}^I d_{i3}^- + \sum_{i=1}^I d_{i4}^+ + \sum_{i=1}^I d_{i5}^- \right) + p_4 \sum_{i=1}^I d_{i6}^- \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} - x_{i0} (1 + \alpha_i) + d_{i1}^- - d_{i1}^+ = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J CI_{ij} \times x_{ij} - CI_{i0} (1 - \beta_i) \sum_{j=1}^J x_{ij0} + d_{i2}^- - d_{i2}^+ = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J E_{ij}^{\text{nfc}}}{\sum_{j=1}^J E_{ij}} - ES_{i0} (1 + \psi_i) + d_{i3}^- - d_{i3}^+ = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J EI_{ij} \times x_{ij} - EI_{i0} (1 - \gamma_i) \sum_{j=1}^J x_{ij0} + d_{i4}^- - d_{i4}^+ = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} - IS_{i0} (1 + \nu_i) \sum_{j=1}^J x_{ij0} + d_{i5}^- - d_{i5}^+ = 0 \quad (15)$$

2023年3月

$$\sum_{j=1}^J EI_{ij} \times x_{ij} + d_{i6}^- - d_{i6}^+ = E_i \quad (16)$$

$$x_{ij}^{\min} \leq x_{ij} \leq x_{ij}^{\max} \quad (17)$$

式(10)为“孤立式”优化情景下的目标函数。式(11)中: x_{ij} 为分省分行业2019年地区生产总值, j 代表不同行业($j=1, 2, \dots, 6; J$ 为行业集合); x_{i0} 为各省份2018年地区生产总值; α_i 为各省份“十三五规划”中所设定的地区生产总值年均最低增速。式(12)中: CI_{ij} 为分省分行业2019年的碳排放强度; CI_{i0} 各省份2018年碳排放强度; β_i 为各省份“十三五规划”中所设定的碳排放强度年均最低下降速度。式(13)中: E_{ij}^{nfe} 、 E_{ij} 分别表示分省分行业非化石能源消费量和能源消费总量; ES_{i0} 各省份2018年能源消费结构; ψ_i 为各省份“十三五规划”中所设定的非化石能源消费占比年均最低增速。式(14)中: EI_{ij} 为分省分行业的能源强度; EI_{i0} 为各省份2018年能源强度; γ_i 为各省份“十三五规划”中所设定的能源强度年均最低减少程度。式(15)中: IS_{i0} 为各省份2018年服务业所占比重; ν_i 为各省份“十三五规划”中所设定的服务业占比年均最低增速。式(16)中: EI 表示各省份2019年能源消耗量的上限, 具体取值为各省份在“十三五”期间能源消耗最大值。式(17)中: x_{ij}^{\min} 、 x_{ij}^{\max} 表示分省分行业在“十三五”期间生产总值的最大和最小值。

此外,第一层级目标为保持经济增长,即满足经济最低年均增速要求下,地区生产总值的规划值与预期值的负向偏差尽可能小;第二层级目标为碳排放强度降低,即满足碳排放强度年均最低下降速度要求下,碳排放量规划值与预期值的正向偏差尽可能小;第三层级目标包括能源结构优化、产业结构优化、能源强度降低,即能源结构和产业结构与预期目标的负向偏差尽可能小,以及满足能源强度年均最低减少程度要求下,能源消耗量规划值与预期值的正向偏差尽可能小;此外,考虑到“十三五”期间能源消耗量不能超过各年能源消耗量的最大值,所以将能源消耗上限设置为第四层级目标。

3.2.2 跨区域优化模型

“协同式”优化策略下,不同省份间存在较大规模的能源调配和产业转移,能源系统与产业系统是

协同变化的。这一优化策略提升了整体经济活动效率,经济增长目标相较“孤立式”优化策略更具灵活性,能源与产业结构也能实现快速调整,但活跃的经济可能导致能源消耗量攀升,二氧化碳排放难以控制。本文针对“协同式”优化策略相应构建跨区域优化模型,将该情景下各省份碳排放效应以及经济发展、节能减排目标的实现情况与“孤立式”优化策略情景的差异进行对比分析。跨区域优化模型如下:

$$\min p_1 \left(\sum_{i=1}^I d_{i1}^- \right) + p_2 \left(\sum_{i=1}^I d_{i2}^+ \right) + p_3 \left(\sum_{i=1}^I d_{i3}^- + \sum_{i=1}^I d_{i4}^+ + \sum_{i=1}^I d_{i5}^- \right) \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} - x_{i0} (1 + \alpha_i) + d_{i1}^- - d_{i1}^+ = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^J CI_{ij} \times x_{ij} - CI_{i0} (1 - \beta_i) \sum_{j=1}^J x_{ij0} + d_{i2}^- - d_{i2}^+ = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J E_{ij}^{nfe}}{\sum_{j=1}^J E_{ij}} - ES_{i0} (1 + \psi_i) + d_{i3}^- - d_{i3}^+ = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^J EI_{ij} \times x_{ij} - EI_{i0} (1 - \gamma_i) \sum_{j=1}^J x_{ij0} + d_{i4}^- - d_{i4}^+ = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} - IS_{i0} (1 + \nu_i) \sum_{j=1}^J x_{ij0} + d_{i5}^- - d_{i5}^+ = 0 \quad (23)$$

$$E_{\min}^{\text{et}}(i) \leq \sum_{j=1}^J EI_{ij} \times x_{ij} \leq E_{\max}^{\text{et}}(i) \quad (24)$$

$$x_{ij}^{\min} (1 - \phi) \leq x_{ij} \leq x_{ij}^{\max} (1 + \phi) \quad (25)$$

$$G_{\min}(j) \leq \sum_{i=1}^I x_{ij} \leq G_{\max}(j) \quad (26)$$

式中: $E_{\max}^{\text{et}}(i)$ 、 $E_{\min}^{\text{et}}(i)$ 分别表示考虑到能源跨区调配情形下,不同省份在“十三五规划”期间能源消耗量的最大和最小值。

式(18)为“协同式”优化情景下的目标函数。式(19)、(20)、(21)、(22)、(23)与单区域优化模型中保持一致,分别表示各省份在经济增速、碳排放强度、能源结构、能源强度、产业结构方面的约束条件。在此基础上,该模型同时考虑了能源跨区调配与产业跨区转移,模型中的符号含义与单区域多目标规划模型保持一致,将考虑能源跨区调配情形下各省能源消耗区间取代单区域优化模型中的能源消耗上限目标,同时,参考Zhu等^[29]的思路,在式(25)中对各省份间产业转移比例 ϕ 进行相应设置,而式(26)中 $G_{\max}(j)$ 、 $G_{\min}(j)$ 则将所有省份不同产业产值限定在“十三五规划”期间实际值范围内。

3.3 数据来源和变量说明

本文从2019与2020年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各省份的统计年鉴中获取地区生产总值以及不同种类能源消耗量数据。此外,基于数据可得性与完整性考虑,研究样本选择除西藏和港澳台以外的30个省份;为了地区生产总值与能源消耗量行业划分口径的一致性,将行业划分为农林牧渔业、工业、建筑业、交通运输仓储邮政业、批发零售住宿和餐饮业以及其他行业。

本文用单位GDP二氧化碳排放量反映碳排放强度,其计算相对较为复杂,需先计算出不同地区二氧化碳排放量。目前中国产业系统的二氧化碳排放量缺少直接监测数据,现有研究一般通过能源消耗量对二氧化碳排放量进行估算。本文参照程叶青等^[30]以及蒋金荷^[31]的思路,采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的方法估算二氧化碳排放量,选取原煤、原油、天然气等17种化石能源,由于不同化石能源计量单位(万t、亿m³)存在差异,先将上述30个省份6大行业的不同类型能源消耗量乘以折算系数,统一转换为标准煤消耗量(万t),然后乘以各自平均低位发热量与二氧化碳排放系数获得二氧化碳排放量,如式(27)所示:

$$C = \sum_{j=1}^6 \sum_{m=1}^{17} E_{mj} \times NCV_m \times CEF_m \quad (27)$$

式中: C 表示二氧化碳排放总量; NCV_m 表示 m 能源的平均低位发热量,单位是 kJ/kg 或 kJ/Nm³; CEF_m 表示 m 能源二氧化碳排放系数,单位是 kg-CO₂/TJ。其中,标煤折算系数数据来源于《各种能源折标准煤参考系数》,平均低位发热量数据来源于《各种能源平均低位发热量》,二氧化碳排放系数数据来源于《IPCC收录的各种燃料CO₂排放系数》。

为了明确各省份减排优化空间,并进一步探索节能减排路径,本文参考魏楚等^[32]对于减排潜力的测度研究,通过实际二氧化碳排放量及能源消耗量超出最优值的比重来衡量减排潜力的大小。鉴于跨区域优化情景下中国二氧化碳排放量更低,因此将跨区域多目标规划模型运算所得的二氧化碳排放量作为减排特征事实分析的最优值^①,对不同省

份的减排潜力进行测算。将 i 省份在 t 时期的减排潜力 PER (Potential of Emission Reduction) 定义如式(28)所示:

$$PER_{it} = \frac{AE_{it} - OE_{it}}{AE_{it}} \quad (28)$$

式中: AE_{it} 表示实际二氧化碳排放量; OE_{it} 表示多目标规划模型下最优二氧化碳排放量。 PER_{it} 的数值越高,说明生产过程中二氧化碳过度排放情况越严重,意味着该地区的减排潜力越大。

此外,各省份经济增速、碳排放强度、能源结构、能源强度、产业结构预期目标均按照其《国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》确定,并将规划期总目标分解为年均目标。在“十三五规划”期间,经济增速、碳排放强度、能源结构、能源强度、产业结构的年均最低增长目标由不同省份结合当地实际情况制定,其生产总值最低年均增长率在6%~10%之间;非化石能源占一次能源消费比重最低年均增长率目标差异较大;服务业增加值占比最低年均增长率均小于11%。此外,各省份碳排放强度与能源强度年均最低减少目标与国家规划保持一致,其中单位GDP能源消耗最低年均减少3.2%,而单位GDP二氧化碳排放量最低年均减少3.89%。

4 结果与分析

4.1 区域减排及产业能源特征识别与分析

本文测算了不同省份的二氧化碳减排潜力,并对各省份产业与能源特征进行聚类分析,得出了中国省级层面的产业结构、能源消耗、碳排放的特征事实。在此基础上,利用多目标规划模型对不同优化情景下,各省份的能源结构、能源消耗量、二氧化碳排放量以及产业结构变动进行了对比分析。

4.1.1 减排潜力测算及分析

通过将各省份不同优化策略下的碳排放与实际碳排放量进行对比,测算其减排潜力,并根据这些地区2019年减排潜力均值0.160区分减排潜力高低,测算结果如表1所示。

由表1可以看出,高减排潜力省份大多集中成片分布于西部地区,其产业结构以传统工业为主,

① 在前述目标规划模型的求解过程中,在各省份一级目标(GDP增速目标)均得到满足的条件下,二级目标(碳排放强度目标)无法有效满足,导致下一级目标优化求解无法继续。鉴于此,本文放松对二级目标的要求,以各省份均达成一级目标基础上所能得到的二级目标函数的最优值(最小值)作为新的二级目标约束值,进行下一级目标优化。此时,新的二级目标优化值即为各区域理论上所能达到的最小二氧化碳排放值。

2023年3月

表1 2019年各省份减排潜力

Table 1 Emission reduction potential of 30 provinces in China, 2019

省份	减排潜力	省份	减排潜力	省份	减排潜力
北京	0.037	浙江	0.000	海南	0.020
天津	0.161	安徽	0.183	重庆	0.078
河北	0.217	福建	0.000	四川	0.174
山西	0.209	江西	0.234	贵州	0.040
内蒙古	0.203	山东	0.157	云南	0.217
辽宁	0.208	河南	0.000	陕西	0.210
吉林	0.168	湖北	0.000	甘肃	0.187
黑龙江	0.131	湖南	0.000	青海	0.129
上海	0.000	广东	0.000	宁夏	0.133
江苏	0.175	广西	0.210	新疆	0.168

注:表中部分省份由于实际二氧化碳排放量小于多目标规划排放量,因此其减排潜力为0。

化工、冶金等高耗能行业规模较大,能源利用效率较低,造成大量二氧化碳排放,其中,陕西、内蒙古、新疆、山西4省份为化石能源富集区,能源的开采转运以及电热生产供应过程产生较多碳排放。但与此同时,位于西北、西南地区的省份可再生能源较为丰富,为当地及邻近省份优化能源结构,实现产业系统“脱碳”提供了更大可能性。如青海省工业整体发展水平较低,化工行业具有一定发展优势,导致能耗偏高,而当地可再生能源的开发利用减少了产业发展所产生的碳排放。

东中部省份整体减排潜力处于较低水平。近年来,在发展低碳产业的政策导向下,这些省份产业结构调整趋势显著,改善了当地的二氧化碳排放状况。此外,较高的经济发展水平也使得这些东中部省份能够在减排技术与设备上投入更多投入,同样能有效减少产业系统发展带来的二氧化碳排放。值得注意的是,作为能源稀缺的工业大省,山东的石油、冶金、化工等高耗能行业规模较大,能源多靠外省调入,但其产业系统非化石能源消费占比超过了40%,一定程度上缓解了碳排放问题。由此可见,不同省份差异化减排路径的探索需结合当地产业与能源特征进行分析。

4.1.2 产业与能源特征聚类分析

在前文基础上,为了呈现不同省份产业与能源的异质性特征,本部分将各省份减排潜力、节能潜力、产业结构、能源结构、人均GDP、能源生产量、能源消费量数据导入SPSS软件进行聚类分析,并基

于聚类分析结果,参考庄贵阳等^[33]的划分思路和方法以各省份人均GDP、能源生产量、节能减排潜力为主要依据,综合考虑了其产业结构、能源结构、能源消费量,归纳出政治经济中心、能源生产中心、经济先导型、均衡发展型四大类省份,考虑到均衡发展型省份数量较多,且均处于产业结构转型阶段,于是在该大类下依据其工业结构和生产集约程度,进一步划分为装备制造大省和经济转型省份,不同类型省市通过环状聚类分析图呈现如图1所示。

(1)均衡发展型省份。以河北、宁夏、湖北、山东等21省份为代表,其二、三产业发展相对较为均衡,经济发展、能源产量方面表现一般,正处于城市化快速推进阶段。根据工业发展状况,可进一步细分为经济转型省份与装备制造大省。①经济转型省份。河北、宁夏等17省份经济发展相对滞后,但在“十三五规划”期间产业结构升级趋势明显。工业结构中,高耗能行业仍然占有较大比重,且除西部可再生能源富集省份外,大多化石能源消费占比超过70%,导致减排潜力较大。②装备制造大省。广东、重庆、湖北3省份相较经济转型类省份发展程度更高,服务业为主导产业,且具备较强工业基础,汽车、电子设备等装备制造业较为发达,而高耗能行业所占比例相对较小。此外,装备制造业发达省份能源结构总体优于经济转型省份,减排潜力较低,但山东较大的石油、化工、冶金行业发展规模增大了其减排压力。

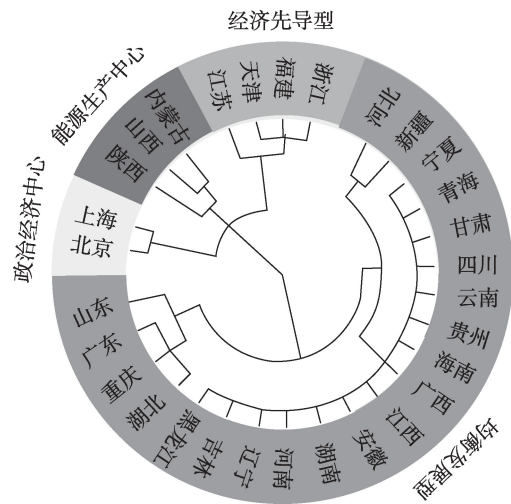


图1 不同省份产业与能源特征聚类过程

Figure 1 Industrial and energy characteristics clustering process of 30 provinces in China

(2)经济先导型省份。地处东部沿海地区的浙江、福建、天津、江苏均属于该类省份,其经济发展水平高,人均GDP明显高于除经济中心以外省份;服务业较为发达,高端装备制造业发展迅速,但当地部分高耗能行业仍存在转移粘性;这些省份能源主要靠外省能源调入,非化石能源消费占比均超过30%,且对于节能减排的投入力度较大,总体减排潜力较低。

(3)能源生产中心省份。陕西、山西、内蒙古的化石能源储量大,可再生能源条件优,其采掘及电热生产供应业较为发达,向外输送各类能源;服务业占比低于全国平均水平,经济对于能源工业依赖性强,使得其存在较大减排潜力。

(4)政治经济中心省份。北京、上海市经济发展水平高,人均GDP、服务业占比远高于其他省份;两市作为政治经济中心,对于减排工作一向较为重视,在低碳环保方面具有示范作用,但也导致其减排潜力远低于全国平均水平;其人口稠密,对能源需求量大,但能源稀缺,主要依靠外省调入。

4.2 模型优化结果及分析

基于对30个省份产业、能源、减排特征以及变量指标、模型的整理,本文将单区域和跨区域两种优化情景下,各省份低碳经济核心目标(经济增速、

碳排放强度、能源强度)的实现情况进行分析,对能源与产业结构调整的节能减排效应进行比较,并进一步将能源结构、产业结构、能源强度的碳排放强度贡献度进行分解。

4.2.1 核心目标达成情况分析

本文重点考察不同优化情景下,各项发展规划目标的实现情况以及能源与产业结构调整的节能减排效应。经济增速、能源强度、碳排放强度3项核心目标达成情况如表2所示。

根据多目标规划模型所得结果,西部省份虽然经济发展水平相对落后,但其节能减排目标实现情况较东中部省份更好。所有省份经济增速目标均能实现,但能源强度目标与碳排放强度目标达成情况不理想,仍有一定数量的省份无法达成目标,这表明经济增长与能耗、碳排放目标的实现可能存在矛盾。此外,跨区域优化情景下,能源强度目标达成情况较好,但碳排放强度目标达成情况不如单区域优化情景。

4.2.2 碳排放强度影响因素贡献分解

为掌握不同优化情景下驱动因素及其贡献差异,本文进一步结合前文LMDI模型对不同优化情景下产业系统碳排放强度驱动因素进行了加法分解及比较分析,如图2所示。

表2 不同优化情景下核心目标达成情况

Table 2 Achievement of core objectives under different optimization scenarios

省份	经济增速		能源强度		碳排放强度		省份	经济增速		能源强度		碳排放强度	
	单区域	跨区域	单区域	跨区域	单区域	跨区域		单区域	跨区域	单区域	跨区域	单区域	跨区域
北京	✓	✓	✓	×	✓	✓	河南	✓	✓	✓	×	✓	×
天津	✓	✓	×	✓	×	×	湖北	✓	✓	✓	×	✓	×
河北	✓	✓	×	✓	×	×	湖南	✓	✓	✓	×	✓	×
山西	✓	✓	×	✓	×	×	广东	✓	✓	✓	×	✓	×
内蒙古	✓	✓	×	✓	✓	✓	广西	✓	✓	×	✓	×	×
辽宁	✓	✓	×	✓	×	×	海南	✓	✓	×	✓	✓	✓
吉林	✓	✓	×	✓	×	×	重庆	✓	✓	✓	✓	✓	✓
黑龙江	✓	✓	×	×	×	×	四川	✓	✓	✓	✓	✓	✓
上海	✓	✓	×	×	×	×	贵州	✓	✓	×	✓	✓	✓
江苏	✓	✓	×	✓	×	×	云南	✓	✓	✓	✓	✓	✓
浙江	✓	✓	✓	×	✓	×	陕西	✓	✓	✓	✓	✓	✓
安徽	✓	✓	✓	✓	✓	✓	甘肃	✓	✓	✓	✓	×	✓
福建	✓	✓	✓	×	✓	×	青海	✓	✓	✓	✓	✓	✓
江西	✓	✓	✓	✓	×	✓	宁夏	✓	✓	✓	✓	✓	✓
山东	✓	✓	×	✓	×	×	新疆	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2023年3月

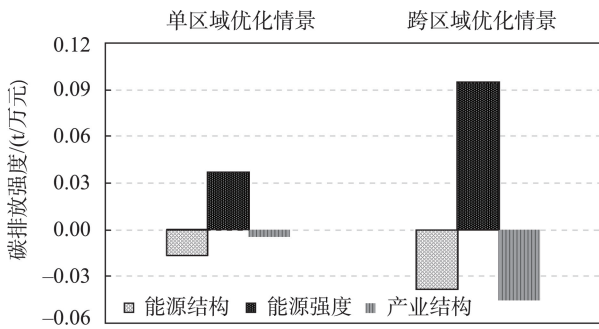


图2 产业系统碳排放强度驱动因素分解

Figure 2 Decomposition of the driving factors of industrial carbon emission intensity

能源结构、能源强度、产业结构因素对碳排放的影响方向在不同优化情景下保持一致,能源强度(EI)对碳排放强度具有促增效应,而能源结构(ES)、产业结构(IS)对碳排放强度具有促降效应,但是在影响程度上存在明显的差异。在单区域优化情景下,能源强度(EI)对碳排放强度提高的贡献最大,为0.0374 t/万元;能源结构(ES)对碳排放强度起到主要促降效应,使碳排放强度降低了0.0165 t/万元,而产业结构(IS)的促降效应相对较小,为0.0042 t/万元。在跨区域优化情景中,能源调配与产业转移在将能源强度对碳排放强度的促增效应增强至0.0945 t/万元的同时,也放大了能源结构(ES)与产业结构(IS)对碳排放强度的促降效应,二者促降效应分别增强至0.0381 t/万元和0.0452 t/万元。在两种优化情景下能源强度都是导致碳排放强度发生

变化的主导因素,说明目前中国经济增长与化石能源消费的关系密切,经济发展与二氧化碳排放仍未实现有效“脱钩”。

4.2.3 不同优化情景下多重特征比较分析

(1) 能源结构

目前中国产业能源消费以化石能源为主,除浙江外,其余省份产业非化石能源消费占比均小于50%。总体来看,清洁能源开发利用技术较为先进的东部沿海以及风光能源丰富的西北内陆省份,相较其他省份非化石能源消费占比更高。而华北、东北、华中地区非化石能源消费占比相对较低。西南地区风能、太阳能资源有限,而水能季节性特征较为明显,这些因素共同制约了西南地区可再生能源的进一步开发利用。不同优化情景下各省份非化石能源消费占比如图3所示。

能源中心与负荷中心逆向分布的客观事实要求中国必须依靠大规模跨区域能源调配来解决能源供需空间失衡的问题。对比图3中各省份不同情景下的产业系统能源消费结构,发现大多数省份能源结构存在一定优化空间。此外,从全国总体层面看,2019年在单区域优化情景下与跨区域优化情景下,非化石能源消费占比相较实际值分别提升1.01%和1.15%,并且大多数省份在跨区域优化情景下能源结构优于单区域优化情景。这说明,如果从能源结构优化效果来看,“协同式”优化策略要优于“孤立式”优化策略。

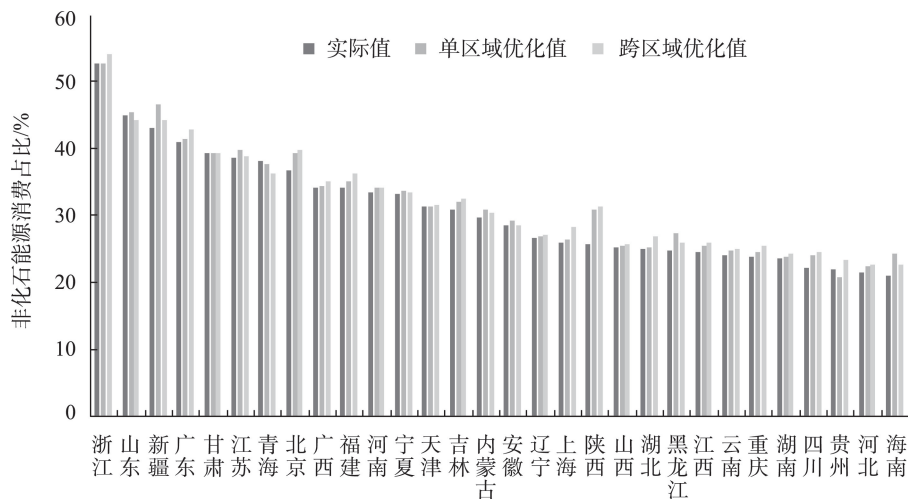


图3 不同优化情景下各省份非化石能源消费占比

Figure 3 Non-fossil energy consumption proportion of 30 provinces in China under different optimization scenarios

(2) 能源消耗量

中国不同省份能源消耗总体呈现出东多西少、南多北少的局面,经济发达的东部省份能源消耗量较大,2019年平均能耗为10172.99万t标准煤,与西部省份7554.99万t标准煤的平均能耗差距较大。此外,中部与东北省份的平均能源消耗量分别为9926.53万t和8799.67万t标准煤,这反映了能源消耗量与产业发展水平存在较高关联度。随着能源传输技术的快速发展,能源跨区域调配在协调不同地区的能源供需中发挥着重要作用。西气东输、西电东送等跨区域能源调配工程既降低了能源禀赋对地区经济发展的制约,也为中国跨区域能源结构优化调整提供了有效途径。

不同优化情景下各省份能源消耗量如图4所示。从图中来看,中国产业系统能源消耗优化潜力较大,单区域优化与跨区域优化情景下,分别实现节能32919.81万t、32499.86万t标准煤,且大多省份能源消耗量在跨区域优化情景下更少。但东部地区的广东、浙江等6省份,中部地区的河南、湖北、湖南3省份,以及西部的重庆、贵州2省份,在跨区域优化情景下能源消耗较多。可能的原因是,在跨区域优化情景下,能源跨区调配为这些省份的工业化发展持续提供动力,使当地产业发展集聚趋势不断增强,但与此同时也使得当地能源消耗量有所增加。此外,东中部省份并非能源富集区,且对能源

需求大,能源的跨区域调配过程中也会造成较大能源消耗。

(3) 二氧化碳排放量

一个地区的二氧化碳排放量会直接受到能源结构以及能源消耗量的影响。非化石能源占比较高的浙江、广东等省份,虽然经济发展对于能源需求量较大,但其二氧化碳排放控制较好。反观化石能源消费占比较高的河北省,其二氧化碳排放量远高于能源消耗量更大的山东省。分地区来看,产业基础较薄弱的西部省份2019年平均二氧化碳排放量为14075.32万t,显著低于产业发展迅速的东部省份(23739.24万t)与中部省份(20888.52万t),同样低于作为老工业基地的东北省份(19328.39万t)。

不同优化情景下各省份二氧化碳排放量如图5所示。2019年,中国整体二氧化碳减排潜力较大,单区域优化情景和跨区域优化情景相较于实际值分别实现减排72314.56万t、78082.90万t。广东、河南等7省份在跨区域优化情景下将产生更多二氧化碳排放,除去能源结构与能源消耗量因素外,产业结构变动对地区二氧化碳排放的影响不容忽视。

在跨区域优化情景下,各省份产业结构升级、优势产业集聚发展趋势明显,其不同行业产值变动情况如图6所示。从空间维度来看,各省份经济显著增长,东中部地区经济增长明显高于西部地区;从行业维度来看,不同省份的新兴服务业发展迅

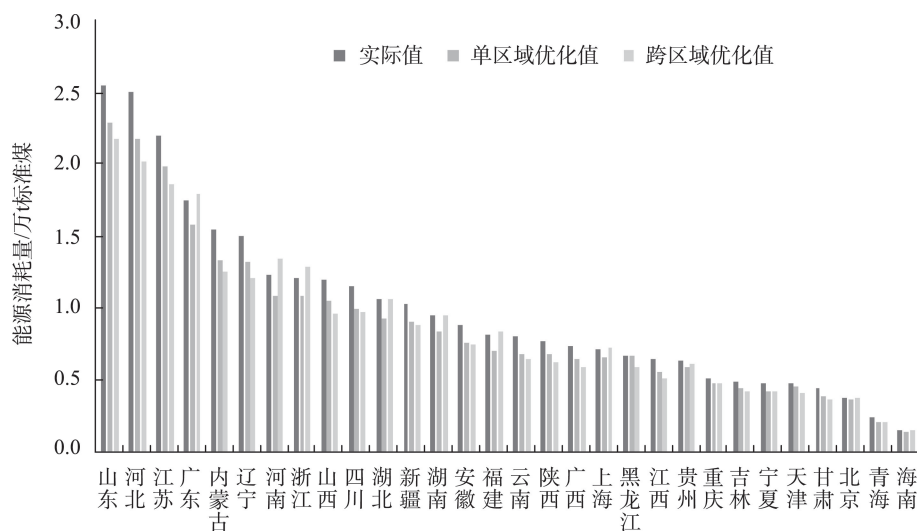


图4 不同优化情景下各省份能源消耗量

Figure 4 Energy consumption of 30 provinces in China under different optimization scenarios

2023年3月

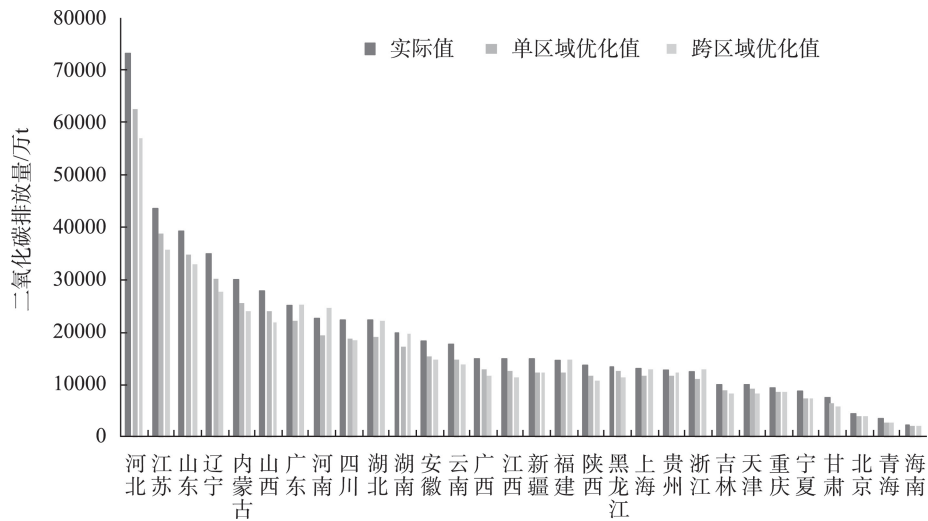


图5 不同优化情景下各省份二氧化碳排放量

Figure 5 Carbon dioxide emissions of 30 provinces in China under different optimization scenarios

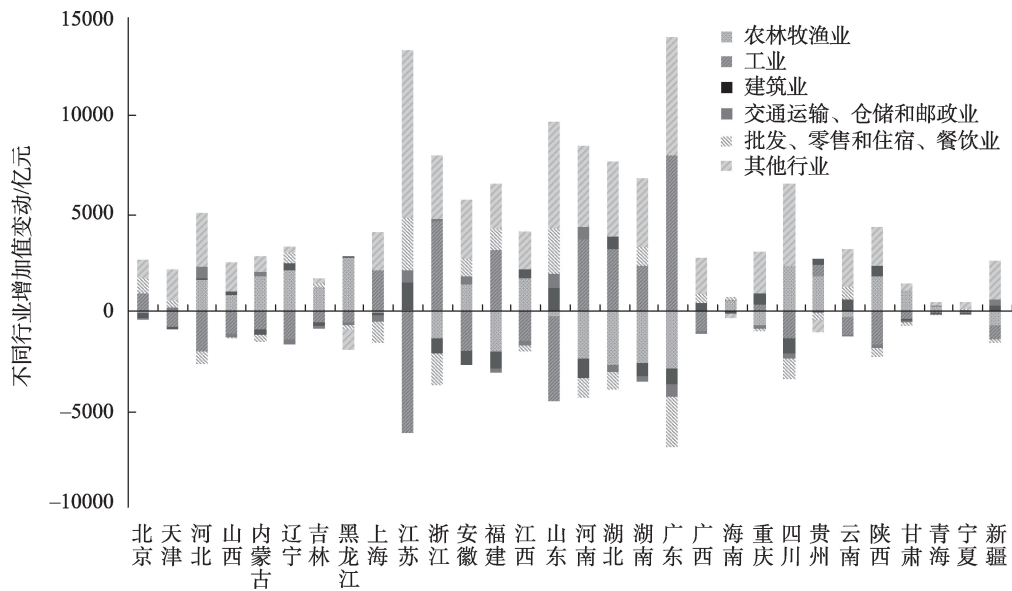


图6 跨区域优化情景下各省份不同行业增加值变动

Figure 6 Changes in the added value of different industries in 30 provinces in China under the cross-regional optimization scenario

速,工业正面临结构调整,农林牧渔业则在少数具有农业生产优势的省份得到发展。整体来看,跨区域优化情景下各省份产业结构更为合理,其根据各自比较优势来决定产业的承接和转移,优势产业集聚发展趋势明显,这将进一步改善地区生产效率。值得注意的是,上述在跨区域优化情景下,二氧化碳排放量不降反升的7个省份经济增长迅速,工业发展势头明显,这些省份经济快速集聚增长可能是驱动这些省份能源消耗量和二氧化碳排放增加的

重要因素。

通过比较不同优化情景的模拟结果,发现在跨区域优化情景下,能源结构优化效果更佳,跨区域能源调配与产业转移能有效降低二氧化碳排放量,整体效果优于单区域优化情景,是实现节能减排的重要方法。但中国经济尚未实现真正意义上的绿色低碳发展,部分省份经济发展仍以大量二氧化碳排放为代价。在发展经济过程中需进一步优化能源结构和促进产业结构升级,厘清能源与产业系统

二者的关联,进而探索通过能源、产业协同实现节能减排的有效路径。

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文通过对30个省份的产业、能源、减排3项特征的识别,结合基于多重目标约束的不同优化情景下各省份低碳经济核心目标达成情况、碳排放强度驱动因素以及3项特征变动情况,重点研究了跨区域能源与产业结构优化的碳排放效应以及不同省份差异化的节能减排路径。研究结论如下:

(1)多重发展规划目标难以兼顾,“协同式”优化策略减排效果更为突出。在两种优化情景下,所有省份处于优先级的经济增速目标均能达成,但碳排放强度、能源强度等次级目标的达成情况差异明显,大多数省份无法同时达成经济增长与节能减排目标。通过对比发现,“协同式”优化策略能有效优化地区能源与产业结构,并进一步实现碳减排。

(2)能源强度为碳排放主导因素,“协同式”优化策略存在两面性。“协同式”优化策略下,能源结构、产业结构对于碳排放强度的促降效应相较“孤立式”优化策略更为显著。但值得注意的是,不同省份通过跨区域能源调配与产业转移,在推动能源与产业结构对于碳排放的促降效应的同时,也放大了能源强度对碳排放的促增效应。

(3)通过跨区能源调配和产业转移,区域高质量发展有望实现。通过对比分析发现,跨区域优化情景下多数省份在能源结构、能源消耗、二氧化碳排放等方面,相较单区域优化情景均存在一定优化空间。跨区域能源调配与产业转移,实现了不同地区资源要素与优势产业的匹配,提升了经济发展效率,有助于经济增长与节能减排的协同推进。

5.2 政策建议

在总结前文所得研究结论的基础上,为实现省际产业能源协同提出相应政策建议:

(1)目前不同省份的能源强度与碳排放强度目标设定并未考虑到各省份间能源与产业系统的异质性。为避免目标设定偏误导致经济发展与节能减排工作失衡,鉴于中国经济发达省份节能减排潜力有限,可考虑适当下调经济增速目标,保障实现

国家设定的总体节能减排目标;而能源富集省份应提高节能减排目标,逐步摆脱自身能源禀赋对其节能减排的“负向锁定”;对于大多处于经济转型阶段的省份,则应适当提高节能减排目标,倒逼其实现产业升级,开发经济增长新动能。在此基础上,通过完善跨区域碳交易市场及其相关制度准则,用市场手段推动不同省份协同减排。

(2)在能源跨省调配的过程中,需根据不同能源的特性,通过能源运输路线与方式的优化,最大程度实现能源运输过程中的节能减排。与此同时,不同省份应围绕当地优势特色产业形成配套产业系统。在推动产业跨区转移的过程中,应不断改进生产的效率和耗能,做好相关碳排放强度监测,基于产业互补与减排责任共担的原则实行跨区域产业转移协调,避免盲目产业转移带来不同省份间碳排放的“零和博弈”。

(3)实现高质量发展,应综合考量不同地区的能源禀赋与产业优势,对于能源富集地区,挖掘当地新能源开发潜力,压缩能源开发转运过程中的碳排放;对于能源缺乏地区,应重点培育具有高产品附加值的先进制造业集群以及具有低能源强度特征的生产性服务业,不断提升能源利用效率。与此同时,通过加强跨区域长距离高压电网以及储能系统以及电网电力大数据管理系统的建设,以实现电力高效传输和熨平可再生能源发电波动,保证电力供应的稳定与安全。此外,应破除行业垄断壁垒与地方保护,增强产业双向协同,实现产业链协同减碳。

参考文献(References):

- [1] 林伯强,李江龙.环境治理约束下的中国能源结构转变:基于煤炭和二氧化碳峰值的分析[J].中国社会科学,2015,(9):84-107. [Lin B Q, Li J L. Transformation of China's energy structure under environmental governance constraints: A peak value analysis of coal and carbon dioxide[J]. Social Sciences in China, 2015, (9): 84-107.]
- [2] 孔丽,胡广文,穆献中.北京市居民消费配置的能源反弹效应[J].资源科学,2022,44(10):2022-2037. [Kong L, Hu G W, Mu X Z. Energy rebound effects associated with consumption distribution of residents in Beijing[J]. Resources Science, 2022, 44(10):

2023年3月

- 2022-2037.]
- [3] 史丹, 李鹏. “双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击[J]. 改革, 2021, (12): 30-44. [Shi D, Li P. Industrial carbon emission structure simulation and policy impact under the target of “Double Carbon”[J]. Reform, 2021, (12): 30-44.]
- [4] 林伯强. 碳中和背景下的广义节能: 基于产业结构调整、低碳消费和循环经济的节能新内涵[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2022, 72(2): 10-20. [Lin B Q. Energy conservation in a broad sense in the context of carbon neutrality: A new connotation of energy conservation comprising industrial restructuring, low-carbon consumption and the circular economy[J]. Journal of Xiamen University (Arts & Social Sciences), 2022, 72(2): 10-20.]
- [5] 魏文栋, 张鹏飞, 李佳硕. 区域电力相关碳排放核算框架的构建和应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 38-46. [Wei W D, Zhang P F, Li J H. The framework of regional electricity-related carbon emissions accounting and its application[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(7): 38-46.]
- [6] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118. [Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO₂ emissions at the county level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3103-3118.]
- [7] 张伟, 朱启贵, 高辉. 产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J]. 经济研究, 2016, 51(12): 62-75. [Zhang W, Zhu Q G, Gao H. Upgrading of industrial structure, optimizing of energy structure, and low carbon development of industrial system[J]. Economic Research Journal, 2016, 51(12): 62-75.]
- [8] 林伯强, 姚昕, 刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J]. 中国社会科学, 2010, (1): 58-71. [Lin B Q, Yao X, Liu X Y. The strategic adjustment of China's energy use structure in the context of energy-saving and carbon emission-reducing initiatives[J]. Social Sciences in China, 2010, (1): 58-71.]
- [9] 戴彦德, 吴凡. 基于低碳转型的宏观经济情景模拟与减排策略[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2017, 19(2): 1-8. [Dai Y D, Wu F. Macroeconomic scenario simulation and carbon reduction strategies based on low-carbon transition[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2017, 19(2): 1-8.]
- [10] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展: 基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69. [Shao S, Fan M T, Yang L L. Economic restructuring, green technical progress, and low-carbon transition development in China: An empirical investigation based on the overall technology frontier and spatial spillover effect[J]. Journal of Management World, 2022, 38(2): 46-69.]
- [11] 张新文, 张国磊. 环保约谈、环保督查与地方环境治理约束力[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(4): 39-46. [Zhang X W, Zhang G L. Environmental protection interview, environmental protection supervision and the binding force of local environmental governance[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(4): 39-46.]
- [12] Yan Y, Zhang H, Meng J, et al. Carbon footprint in building distributed energy system: An optimization-based feasibility analysis for potential emission reduction[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117990.
- [13] Zhang Y, Fu Z H, Xie Y L, et al. Multi-objective programming for energy system based on the decomposition of carbon emission driving forces: A case study of Guangdong, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127410.
- [14] Elsoragaby S, Yahya A, Mahadi M R, et al. Analysis of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) of transplanting and broadcast seeding wetland rice cultivation[J]. Energy, 2019, DOI: 10.1016/j.energy.2019.116160.
- [15] Najafi B, Ardabili S F, Shamshirband S, et al. Application of ANNs, ANFIS and RSM to estimating and optimizing the parameters that affect the yield and cost of biodiesel production[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12 (1): 611-624.
- [16] 杨军, 杨泽, 丛建辉, 等. 责任和收益匹配原则下中国省域碳排放责任共担方案优化[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1745-1758. [Yang J, Yang Z, Cong J H, et al. Optimization of China's provincial carbon emission responsibility sharing scheme based on the principle of responsibility and benefit matching[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1745-1758.]
- [17] Zhu B, Shan H Y. Impacts of industrial structures reconstructing on carbon emission and energy consumption: A case of Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118916.
- [18] Wu Y L, Xiong Y L, Tian X, et al. Decoding the carbonization mode of the south coastal economic zone in China from the perspective of a dynamic industrial structure[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 518-528.
- [19] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 等. 产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2606-2622. [Wang S J, Tian S S, Cai Q N, et al. Driving factors and carbon transfer of industrial carbon emissions in Guangdong province under the background of industrial transfer[J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2606-2622.]
- [20] Mi Z F, Pan S Y, Yu H, et al. Potential impacts of industrial structure on energy consumption and CO₂ emission: A case study of Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 455-462.
- [21] 张捷, 赵秀娟. 碳减排目标下的广东省产业结构优化研究: 基于投入产出模型和多目标规划模型的模拟分析[J]. 中国工业经

- 济, 2015, (6): 68–80. [Zhang J, Zhao X J. The optimization of Guangdong Province's industrial structure under the objective of carbon emissions reduction: A simulating analysis based on input-output model and multi-objective programming model[J]. China Industrial Economics, 2015, (6): 68–80.]
- [22] Liu Y Z, Bian J C, Li X M, et al. The optimization of regional industrial structure under the water-energy constraint: A case study on Hebei Province in China[J]. Energy Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111558.
- [23] 刘黎明, 崔江龙. 空气污染视角下北京市产业结构调整的政策模拟研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(4): 85–94. [Liu L M, Cui J L. Policy simulation study on industrial structure adjustment in Beijing from the perspective of air pollution[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(4): 85–94.]
- [24] 张华明, 元鹏飞, 朱治双. 黄河流域碳排放脱钩效应及减排路径[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 59–69. [Zhang H M, Yuan P F, Zhu Z S. Decoupling effects of carbon emissions and reduction path in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 59–69.]
- [25] 王勇, 王丁玉, 陈彦汝. 不同配额分配方式对中国碳交易市场运行的影响: 基于流动性、波动性与有效性视角的考察[J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2503–2513. [Wang Y, Wang D Y, Chen Y R. Impact of different quota allocation methods on the operation of China's carbon trading market: From the perspective of liquidity, volatility and effectiveness[J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2503–2513.]
- [26] 张诗卉, 李明煜, 王灿, 等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 45–54. [Zhang S H, Li M Y, Wang C, et al. Carbon emission trend analysis of China's provinces and their differentiated peak strategy design[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 45–54.]
- [27] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method[J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131–1139.
- [28] 李国璋, 王双. 区域能源强度变动: 基于GFI的因素分解分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, (4): 62–66. [Li G Z, Wang S. Regional energy intensity change decompositions based on GFI technique[J]. China Population, Resources and Environment, 2008, (4): 62–66.]
- [29] Zhu B, Zhang T L. The impact of cross-region industrial structure optimization on economy, carbon emissions and energy consumption: A case of the Yangtze River Delta[J]. Science of the Total Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146089.
- [30] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418–1431. [Cheng Y Q, Wang Z Y, Zhang S Z, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1418–1431.]
- [31] 蒋金荷. 中国城镇住宅碳排放强度分析和用能政策反思[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(6): 90–104. [Jiang J H. China's urban residential carbon intensity decomposition and energy policy rethink[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2015, 32(6): 90–104.]
- [32] 魏楚, 杜立民, 沈满洪. 中国能否实现节能减排目标: 基于DEA方法的评价与模拟[J]. 世界经济, 2010, 33(3): 141–160. [Wei C, Du L M, Shen M H. Whether China can achieve energy conservation and emission reduction targets: Evaluation and simulation based on DEA method[J]. The Journal of World Economy, 2010, 33(3): 141–160.]
- [33] 庄贵阳, 魏鸣昕. 城市引领碳达峰、碳中和的理论和路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 114–121. [Zhuang G Y, Wei M X. Theory and pathway of city leadership in emission peak and carbon neutrality[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 114–121.]

The carbon emission effects of cross-regional cooperation under multiple objective constraints in China

ZENG Weikang, WAN Wei, MA Lili

(School of Economics & Management, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: [Objective] Accelerating the construction of low-carbon energy system and efficient industrial system is the key to converting driving force of China's economic growth and constructing green and low-carbon circular economic development system. [Methods] This paper decomposes the carbon emission effect through the Kaya identity, meanwhile, it takes several policy objectives in the different provinces' development plans as constraints and uses the multi-objective planning model to analyze the characteristics of the local energy structure, industrial structure, carbon dioxide emissions, etc. [Results] The results show that under the current energy structure and industrial structure, it is difficult to keep a balance between economic growth and energy-conservation and emission-reduction, through interregional energy allocation and industrial transfer, the emission reduction potential is greater under the synergistic optimization strategy, which is 780.829×10^6 tons; Energy structure, energy intensity, industrial structure and economic development level will significantly affect the carbon dioxide emissions of different provinces and energy intensity is the dominant factor affecting carbon emissions at this stage. The industrial transference has two sides, while adjusting the industrial structure in different regions, industrial transfer may lead to the increase of carbon dioxide emission in the regions where industrial transfer in, attention should be paid to the level raise of carbon dioxide emissions that lead by industry transfer; With sufficient energy allocation and industrial transfer, the GDP of 30 provinces increases significantly, with growth rates of 7.98% on average. Meanwhile, the economic structure of these provinces is further optimized, and the industrial development highlights the regional characteristics, breaking the dilemma of industrial isomorphism between regions to a certain extent. [Conclusion] By considering the carbon emission effect of regional differentiated development strategy under the constraints of multiple objectives. It is confirmed that the synergistic optimization strategy under the constraint of multiple objectives produces less carbon dioxide emissions, while adopting collaborative optimization strategies, carbon dioxide emissions from energy allocation and industrial transfer should be reduced. This paper provides some enlightenment for the construction of green and low-carbon circular economic development system.

Key words: carbon emission effects; multi-objective programming; energy allocation; industrial transfer; regional collaboration; China