

# 2030年碳达峰刚性约束下的产业结构优化

## ——基于多目标规划模型

吴晓莹<sup>1</sup>, 杨洲木<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>南京信息工程大学, 江苏省应用数学研究中心, 江苏 南京

收稿日期: 2023年12月11日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年1月30日

### 摘要

本文基于投入产出模型建立经济-能源-环境的多目标规划模型, 分别设计了经济最大化情景、能源节约情景、二氧化碳排放约束情景、均衡发展情景和粗放发展情景。结果如下: 第一, 产业结构优化具有促进经济增长和节能减排的潜在作用, 均衡发展情景下, 到2030年, GDP为1574779.16亿元, 能源消费量为488791.23万吨标准煤, 二氧化碳排放量为1136833.55万吨, 粗放情景下, GDP翻倍, 能源消费量多549374.26万吨标准煤, 二氧化碳排放量多1087373.58万吨, 可见片面追求经济的增长, 会对生态环境造成不可逆的影响; 第二, 在均衡发展情景下, 应该着重发展金融业、房地产、租赁和商务服务业, 批发零售贸易、住宿和餐饮业的趋势是先上升后下降的, 有较大的减排潜力, 其中纺织、服装及皮革产品制造业、炼焦、燃气及石油加工业、化学工业、非金属矿物制品业、金属制品业、机械设备制造业、电力、热力及水的生产和供应业、建筑业在五种情景下比重都是下降的, 应该通过提高技术来降低这些行业的能源强度和碳排放强度, 促进行业内部升级, 提高行业活力, 防止产业空心化。

### 关键词

投入产出模型, 产业结构优化, 经济增长, 能源消耗, 二氧化碳排放

# Industrial Structure Optimization under Rigid Constraints of Carbon Peak by 2030

## —Based on Multi-Objective Programming Model

Xiaoying Wu<sup>1</sup>, Zhoumu Yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Center for Applied Mathematics of Jiangsu Province, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

## Abstract

This article establishes a multi-objective planning model for the economy-energy-environment based on the input-output model, and designs scenarios for economic maximization, energy conservation, carbon dioxide emission constraints, balanced development, and extensive development. The results are as follows: Firstly, industrial structure optimization has the potential to promote economic growth and energy conservation and emission reduction. Under a balanced development scenario, by 2030, the GDP will be 1574779.16 billion yuan, energy consumption will be 4887.9123 million tons of standard coal, and carbon dioxide emission will be 11368.3355 million tons. In the extensive scenario, GDP will double, energy consumption will increase by 5493.7426 million tons of standard coal, and carbon dioxide emission will increase by 10873.7358 million tons. It can be seen that a one-sided pursuit of economic growth will cause an irreversible impact on the ecological environment; secondly, in the context of balanced development, emphasis should be placed on the development of finance, real estate, leasing, and business services. The trend of wholesale and retail trade, accommodation, and catering sector is to first rise and then decline, which has greater potential for emission reduction. Among them, the proportion of the textile, clothing, and leather product manufacturing industry, coking, gas and petroleum processing industry, chemical industry, non-metallic mineral products, metal products industry, mechanical equipment manufacturing industry, production and supply of electricity, heat, and water, as well as the construction industry, has decreased in all five scenarios. It is necessary to improve technology to reduce the energy intensity and carbon emission intensity of these industries, promote internal upgrading, enhance industry vitality, and prevent industry hollowing out.

## Keywords

Input Output Model, Industrial Structure Optimization, Economic Growth, Energy Consumption, Carbon Dioxide Emission

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球气候变暖导致极端天气事件频发, 严重影响了人类的可持续发展, 而二氧化碳排放是全球气候变暖的诱因[1], 目前第二产业的占比较大, 第二产业发展依赖于能源消费的增长, 能源消费的增长会增加二氧化碳的排放[2], 由于经济系统、能源系统和环境系统之间是相互依存、相互影响的, 产业结构的优化升级可以实现减排, 也是实现双碳目标的关键方向[3]。

对于产业结构优化问题, 国内外的许多学者构建不同模型进行实证分析。崔北庆[4]以山东省为例, 运用国民经济学、产业经济学、动态投入产出模型以及多目标规划模型进一步探讨了山东省以节能减排为目标的情况下其产业结构调整的情况。张捷和赵秀娟[5]运用了投入产出模型探究了广东省 28 个产业结构部门之间的经济关联和碳排放关联。原毅军和董琨[6]以经济增长最大化为目标函数, 设定了经济增长、能源消耗以及污染物排放约束条件, 构建了基于投入产出模型的目标规划模型。何平等[7]对中国“十一五”期间的产业优化结构情况进行了实证分析。还有些学者[8] [9] [10]从构建回归模型对产业结构升级进

行分析, Mi 等[11]利用长距离能源替代规划系统(LEAP-BJ 模型), 研究了北京六个最终用户部门的能源消耗和二氧化碳排放量。

最近也有很多学者从能源、经济和环境三方面出发, 构建 3E 模型, 宋等[12]等在京津冀区域, 构建能源 - 环境 - 就业三重约束下的线性规划模型, 还有评估巴西经济 - 能源 - 环境权衡的多目标模型[13], Jia 等[14]探究了二氧化碳排放、经济发展和能源消费的优化路径。Fu 等[15]构建了基于多情景分析的碳排放和水消耗双重约束下的经济 - 能源 - 环境系统和政策组合的多目标规划。Wu 等[16]构建碳达峰的约束条件的经济 - 碳排放多目标规划模型, 讨论了产业结构变化、能源消费结构以及部门的减排潜力。Mi 等[17]为了评估经济结构变化如何影响碳排放, 构建了一个投入产出优化模型, 加快中国经济转型的步伐将非常有利于尽早实现二氧化碳排放峰值, 因为结构变化对碳排放的抑制作用呈现边际递增的趋势。

本文则从经济、能源和环境三方面设计目标函数, 并且基于投入产出模型, 假设在短期内投入产出关系不变, 在现有文献基础上加上最终消费、资本形成、净出口及碳达峰时间的约束条件, 将行业细分为 17 个行业, 构建了经济 - 能源 - 环境的多目标规划模型, 模拟了实现碳达峰的几条发展路径, 通过产业结构的优化升级, 进而实现了经济增长和碳减排双赢。

## 2. 经济 - 能源 - 环境多目标规划模型

产业结构优化目标的选取, 需要根据具体情况来设定。不同的国家在不同的历史时期, 其发展所看中的经济效益以及想要完成的阶段性目标会是有所不同的。在低碳经济和双碳目标的背景下, 我们从经济增长最大化、能源消耗最小化、二氧化碳排放最小化三者来设计我们的目标函数。

### 2.1. 目标函数的建立

#### 2.1.1. 经济增长目标

由于中国现阶段仍是发展中国家, 在未来一段时间内追求稳定的经济增长是实现国家繁荣富强的必要条件, 所以我们在本文中希望目标年 GDP 的优化值与 2020 年的实际值之比达到最大, 即为:

$$\max f(x) = \frac{E^T (I - A) X_t}{E^T (I - A) \bar{X}} \quad (1)$$

其中,  $X_t = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{17t})^T$  为目标年中的总产出列向量的优化值,  $x_{it}$  表示第  $t$  年产业部门  $i$  的总产出,  $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{17})$  为 2020 年国民经济生产过程中的总产出列向量的实际值,  $\bar{x}_i$  表示 2020 年产业部门  $i$  的总产出,  $I$  为单位矩阵,  $A$  为目标年中投入产出表中直接消耗系数矩阵,  $E = (1, 1, \dots, 1)^T$  为单位列向量, 其中  $i = 1, 2, 3, \dots, 17$ 。

#### 2.1.2. 能源消耗目标

由我国政府在“十四五”规划中, 对于“能源强度”目标进行了约束, 到 2025 年能源强度相较于 2020 年降低 13.5%。我国在有关文件中就明确指出在能源利用过程中, 我们应把低能消耗放在第一位, 用最低的能源消耗量来达到经济发展最大化。在本模型中设定目标年能源消费优化值与其 2020 年实际值之比最小, 具体表示为:

$$\min g(x) = \frac{e^T X_t}{e^T \bar{X}} \quad (2)$$

其中,  $e$  为部门单位总产出所需要消耗的能源列向量(能源消耗强度),  $e = (e_1, e_2, \dots, e_{17})^T$ , 其中  $e_i$  表示产业部门  $i$  的单位总产出所需要消耗的能源, 即为能源消耗系数。

### 2.1.3. 二氧化碳排放目标

我国承诺将在 2030 年碳排放量将达到峰值, 2060 年实现碳中和。所以, 本模型中, 设定目标年二氧化碳排放的最优值与 2020 年实际值最小, 具体表示为:

$$\min \phi(x) = \frac{\alpha^T X_t}{\alpha^T \bar{X}} \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  为产业结构部门单位总产出所产生的二氧化碳列向量,  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{17})$ , 其元素  $\alpha_i$  表示目标年部门  $i$  单位总产出所需要排放出的二氧化碳量。

## 2.2. 约束条件

### 2.2.1. 投入产出平衡约束条件

$$(I - A)X_t \geq Y_1 + Y_2 + Y_3 \quad (4)$$

其中,  $Y_1, Y_2, Y_3$  分别表示目标年中最终消费列向量、资本形成列向量和净出口列向量, 这三者共同组成了最终使用部分[18]。

### 2.2.2. 消费需求约束条件

$$(1 - s)E^T(I - A)X_t \geq E^TY_1 \quad (5)$$

其中,  $s$  表示国内储蓄率,  $Y_1$  表示目标年中最终消费列向量。

### 2.2.3. 资本形成约束条件

$$(s + s_f)E^T(I - A)X_t \geq E^TY_2 \quad (6)$$

其中,  $s_f$  表示外国储蓄(外国资本流入)占国内生产总值的比重,  $Y_2$  表示目标年中资本形成列向量。

### 2.2.4. 净出口约束条件

$$s_f E^T(I - A)X_t \geq -E^TY_3 \quad (7)$$

其中,  $s_f$  表示外国储蓄(外国资本流入)占国内生产总值的比重,  $Y_3$  表示目标年中净出口列向量, 该式表示了产业结构的优化结果必须使进出口贸易的总量达到平衡的状态。

### 2.2.5. 非负约束条件

$$X_t \geq 0 \quad (8)$$

各行业的增加值应该是非负的。

上述约束条件可以让我们更好的理解供给与需求之间的基本约束关系, 在这个基础上, 我们不仅要考虑在经济系统中的基本变量之间的约束条件, 同时我们还应该在这个模型中设定其他的约束条件, 具体为经济增长约束、能源消耗约束与二氧化碳排放约束。

### 2.2.6. 经济增长约束条件

$$E^T(I - A)X_t \geq (1 + \varphi_t)E^T(I - A)X_{t-1} \quad (9)$$

其中,  $\varphi_t$  是第  $t$  年的年均增长率。

### 2.2.7. 能源消耗强度约束条件

$$EI_t \leq (1 - \sigma_t)EI_{t-1} \quad (10)$$

$$EI_t = e^t E^T X_t / E^T (I - A) X_t \tag{11}$$

其中,  $EI_t$  为第  $t$  年的能源强度,  $\sigma_t$  为第  $t$  年能源强度的年均增长率[19]。

### 2.2.8. 二氧化碳排放约束条件

$$C_t \leq (1 + \theta_t) C_{t-1} \tag{12}$$

$$\theta_t \leq 0, \text{ if } t \geq \bar{t}$$

其中,  $C_t$  为第  $t$  年的二氧化碳排放,  $\bar{t}$  为二氧化碳达到峰值的年份,  $\theta_t$  为第  $t$  年二氧化碳排放的年均增长率[17]。

### 2.2.9. 产业扩张约束条件

为了保持经济体系的稳定, 除了投入产出平衡约束以外, 还应该考虑行业的生产能力, 产业结构不能在一段时间内自由调整, 因此对行业增加值的上限和下限进行约束。

$$(1 + v_1) X_{t-1} \geq X_t \geq (1 + v_2) X_{t-1} \tag{13}$$

$v_1 > 1 > v_2$ ,  $v_1$  和  $v_2$  分别是每个部门产出年均增长率的上限和下限。

## 3. 模型求解

在本文的这个模型中, 我们主要是运用评价函数法对我们所建立的优化模型进行求解, 为了与其他两个目标相对应起来, 首先, 将 GDP 最大化问题转化成最小化形式, 具体的格式如下所示:

$$\min f(x) = \frac{E^T (I - A) \bar{X}}{E^T (I - A) X_t} \tag{14}$$

接着, 根据评价函数法, 我们需要为已经确定好的目标函数选定合适的权数, 为  $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3)$ , 并且我们应该保证这些权数的和为 1, 即为:

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_i = 1, \varepsilon_i \geq 0 \tag{15}$$

则我们构造的评价目标函数为:

$$u(f) = \varepsilon_1 f(x) + \varepsilon_2 g(x) + \varepsilon_3 \phi(x) \tag{16}$$

所以, 我们最终可以化为一个目标函数, 即为

$$\min(\varepsilon_1 f(x) + \varepsilon_2 g(x) + \varepsilon_3 \phi(x)) \tag{17}$$

$$s.t. \left\{ \begin{array}{l} (1-s)E^T(I-A)X_t \geq E^TY_1 \\ (s+s_f)E^T(I-A)X_t \geq E^TY_2 \\ s_f E^T(I-A)X_t \geq -E^TY_3 \\ (I-A)X_t \geq Y_1 + Y_2 + Y_3 \\ E^T(I-A)X_t \geq (1+\phi_t)E^T(I-A)X_{t-1} \\ E^T X_t / E^T (I - A) X_t \leq (1 - \sigma_t) E^T X_{t-1} / E^T (I - A) X_{t-1} \\ C_t \leq (1 + \theta_t) C_{t-1}, \theta_t \leq 0, \text{ if } t \geq \bar{t} \\ (1 + v_1) X_{t-1} \geq X_t \geq (1 + v_2) X_{t-1} \\ X_t \geq 0 \end{array} \right. \tag{18}$$

## 4. 模型求解

### 4.1. 模拟方案设计

将三个目标通过不同权重化为一个目标, 首先在经济 - 环境 - 能源政策的约束情况下, 建立三个极端情景, 分别为经济最大化情景、能源节约情景、二氧化碳排放约束情景, 然后设置三个目标等权重的情景以及在无碳达峰时间约束情景下的粗放情景[20], 为能探究在不同政策方向下产业结构优化的结果以及 GDP、能源和二氧化碳排放的情况, 我们为这个模型设定了五种模拟方案[19], 如下所示:

(1) 方案一(经济最大化情景): 只追求经济的发展, 忽略能源消费以及二氧化碳排放的控制, 因此, 在本模型中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  的值分别为 1、0、0。

(2) 方案二(能源节约情景): 以节约能源为目标, 考虑政策在主要约束能源消耗情况下的产业结构, 所以对在这个模拟方案中出现  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , 给他们赋予的值分别为 0、1、0。

(3) 方案三(二氧化碳排放约束情景): 以二氧化碳排放约束为目标, 因此设定在这个模型中的权重  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  分别为 0、0、1。

(4) 方案四(均衡发展情景): 认为经济增长、能源消耗和二氧化碳控制排在产业结构优化过程中同样重要, 三者缺一不可, 因此这三个目标拥有相等的权数[16],  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  的值都为 1/3、1/3、1/3。

(5) 方案五(粗放情景)。在该情景下, 我们在上述约束条件中去掉对二氧化碳排放的约束条件, 模拟中国在不对环境进行任何保护, 只追求经济增长的情况下, 经济与环境的变化以及产业结构的变化,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  的值都为 1、0、0。

### 4.2. 数据说明

#### 4.2.1. 数据来源

文章选用 2020 年竞争型投入产出表, 2020 年各种能源消费量来自《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》, 由于数据的可获得性, 其中 2020 年金融业和房地产、租赁和商务服务业的能源消耗系数是根据 WIOD2016 数据进行趋势外推估算的, 2020 年的 GDP 以及其他数据、来源于国家统计局、世界银行、CEIC 数据库和 CEADs 数据库。

#### 4.2.2. 产业部门的划分以及参数的确定

在投入产出表中, 我国的经济活动被分成了 17 个部门, 划分的部门代码和名称见表 1:

Table 1. 17 major industrial structure departments

表 1. 17 大产业结构部门

	新部门	原始部门
S1	农林牧渔业	农、林、牧、渔部门
S2	采矿业	煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采、黑色金属矿采业、有色金属矿采业、非金属矿采业、其他采矿业、开采辅助活动
S3	食品、饮料制造及烟草制品业	农副食品加工业、食品制造业、酒、饮料和精制茶制造业、烟草制品业
S4	纺织、服装及皮革产品制造业	纺织业、纺织服装、服饰业、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业、
S5	炼焦、燃气及石油加工业	石油加工、炼焦和核燃料加工业
S6	化学工业	化学原料和化学制品制造业、医药制造业、化学纤维制造业、橡胶和塑料制品业
S7	非金属矿物制品业	非金属矿物制品业部门



续表

S8	金属产品制造业	金属产品制造业部门、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业
S9	机械设备制造业	通用设备制造业、专用设备制造业、汽车制造业、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业、电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业、仪器仪表制造业
S10	其他制造业	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业、家具制造业、造纸和纸制品业、印刷和记录媒介复制业、文教、工美、体育和娱乐用品制造业、其他制造业、废弃资源综合利用、金属制品、机械设备和修理业
S11	电力、热力及水的生产和供应业	电力、热力生产和供应业、燃气生产和供应业、水的生产和供应业
S12	建筑业	建筑业部门
S13	批发零售贸易、住宿和餐饮业	批发、零售业和住宿、餐饮业
S14	交通运输、仓储和邮政业	交通运输、仓储和邮政业
S15	金融业	金融业部门
S16	房地产业、租赁和商务服务业	房地产业、租赁和商务服务业部门
S17	其他服务业	信息传输、计算机服务和软件业部门、科学研究、技术服务和地质勘查业、水利、环境和公共设施管理业、居民服务和其他服务业、教育、卫生、社会保障和社会福利业、文化、体育和娱乐业、公共管理和社会组织、国际组织。

注：行业部门的归类根据中国统计局中的《国民经济行业分类》整理得出。

考虑国家对 GDP、能源强度以及二氧化碳排放的约束，在设置参数时，根据 CEIC 数据库、世界银行、十四五规划和已有文献[21] [22]具体的参数设定如表 2 和表 3 所示：

**Table 2.** Set exogenous parameters  
**表 2.** 设定的外生参数

参数	含义	参数值
s	国内储蓄率	0.453
sf	外国储蓄占 GDP 的比重	0.017
v1	部门产出增长率的上限	1.15
v2	部门产出增长率的下限	0.85

**Table 3.** Growth rate parameter setting  
**表 3.** 增长率参数的设定

	$\varphi$	$\sigma$	$\theta$
2021~2025	5%	-3.4%	-3.89%
2026~2030	4%	-3%	-4.5%
2030~2035	3%	-2.7%	-5%

#### 4.2.3. 二氧化碳排放量的计算

在二氧化碳排放量的计算中，在现有文献的基础上，通过选用化石能源的消耗量来计算二氧化碳的排放量。能源消耗量主要包括八大类化石能源，其中主要包括煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力，其中电力发电过程中的碳排放已经计算过了，所以不重复计算。由 2020 年统计年鉴可知，

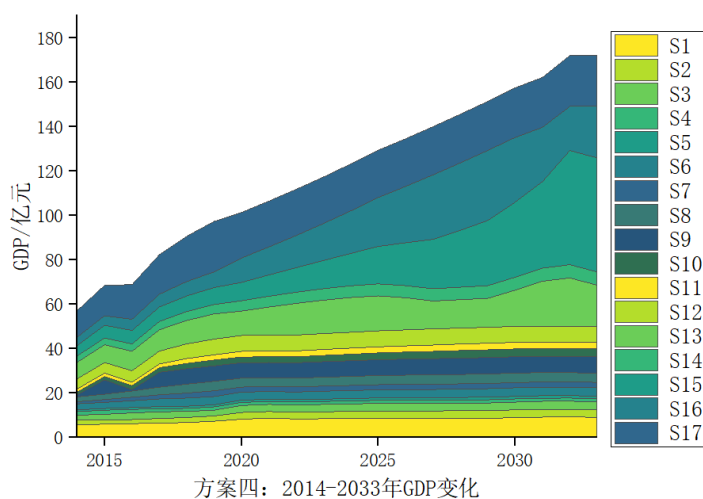
能源消耗量的统计主要分为 48 个部门, 为了能够与投入产出表中的数据相对应, 根据表 4 中的信息将这 48 个部门归为 17 个部门。CO<sub>2</sub> 排放系数如下表, 表示每种能源在利用过程中, 单位能源所需要产生的二氧化碳量。

$$C = \sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^8 E_{ij} \times LCV_{ij} \times CC_{ij} \times COR_{ij} \times \frac{44}{12}$$

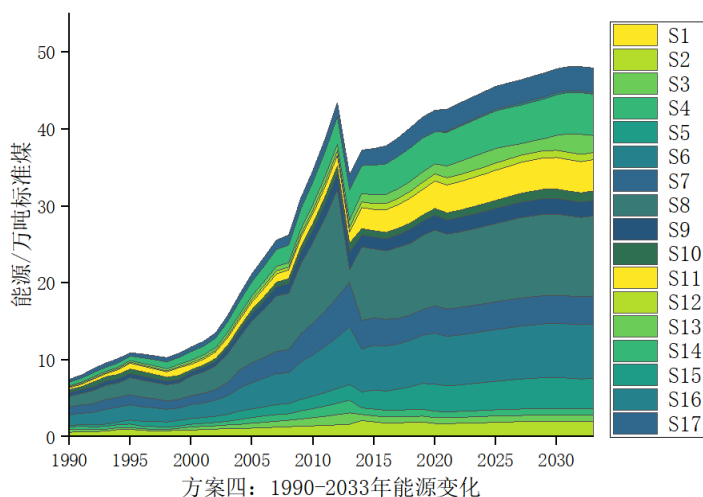
$E_{ij}$  表示行业  $i$  的第  $j$  种能源的消耗量,  $LCV_{ij}$  表示行业  $i$  的第  $j$  种能源平均低位发热量,  $CC_{ij}$  表示行业  $i$  的第  $j$  种能源单位热值含碳量,  $COR_{ij}$  表示行业  $i$  的第  $j$  种能源碳氧化率。

## 5. 结果分析

基于优化模型的结果, 在均衡情景下, 行业 GDP、能源消费以及二氧化碳排放的模拟结果。



**Figure 1.** Changes in GDP under balanced development  
**图 1.** 均衡发展下 GDP 的变化



**Figure 2.** Changes in energy consumption under balanced development  
**图 2.** 均衡发展下能源消费的变化

在均衡情景下, 如图 1 所示, GDP 是在逐年上涨的, 在能源消费和二氧化碳排放的约束条件下, 产



业结构得到了优化, 其中金融业、房地产租赁和商务服务业的变化较大, 金融业出现大幅增长, 批发零售贸易、住宿和餐饮业在 2030 年出现峰值后下降, 可见该行业具有较大的经济效益。

经济发展与环境保护结合起来的情况下, 能源消费在 2030 达到峰值, 从图 2 中可以看到能源消费在 2010 年达到一个峰值后下降, 由于, 其中占比较大的为炼焦、燃气及石油加工业, 化学工业, 非金属矿物制品业, 金属制品业, 电力、热力及水的生产和供应业、批发零售贸易、住宿和餐饮业以及交通运输、仓储和邮政业, 以上的部门能源消耗占比较大, 在均衡发展情景下, 其中批发零售贸易、住宿和餐饮业的趋势是先增加后减少的, 可见该部门在节约能源消费具有较大潜力。对于上述高能耗产业要控制规模, 提高产业发展的技术水平, 从而提高能源使用效率, 减少经济发展对能源消费的依赖。

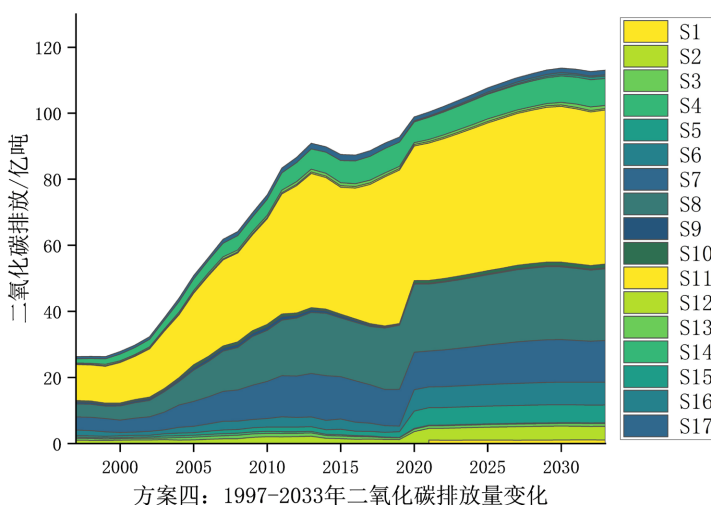


Figure 3. Changes in carbon dioxide emission under balanced development  
图 3. 均衡发展下二氧化碳排放的变化

在图 3 中, 二氧化碳排放处于波动上升, 在 2030 年出现峰值后下降, 其中电力、热力及水的生产和供应业的二氧化碳排放占比最大, 是由于在发电、制热的过程中主要依靠煤炭等能源, 该能源单位标准煤的碳排放较大, 所以要提高能源使用效率, 利用清洁能源或非化石能源进行发电, 可以利用太阳能进行加热或储存电能。在达峰时间约束下, 除了控制电力、热力及水的生产和供应业外, 还应减少交通运输、仓储和邮政业的规模, 促进金融业、房地产、租赁和商务服务业和其他服务业这种高经济效益低排放行业的发展。

基于优化模型, 表 4 给出了在五种方案下 2020 年的实际值和 2030 年的模拟结果。

Table 4. Comparison of multi-objective optimization results for industrial structure  
表 4. 产业结构多目标优化结果比较

	总产出(亿元)	GDP (亿元)	能源消耗量(万吨标准煤)	二氧化碳排放量(万吨)
2020 年	2699027.81	1014159.80	433930.00	998221.50
经济最大化情景	3748593.41	1606521.11	500856.69	1136386.98
能源节约情景	3705280.08	1574779.16	488791.23	1136833.55
二氧化碳排放约束情景	3695104.31	1574779.09	491666.16	1130442.77
均衡发展情景	3705280.08	1574779.16	488791.23	1136833.55
粗放情景	7717838.55	3330949.94	1038165.49	2224209.13

经济最大化情景中, 2030 优化后的最优 GDP 为 1606521.11 亿元, 比均衡情景多了 3 万亿元, 能源消耗量和二氧化碳分别为 500856.69 万吨标准煤和 1136386.98 万吨。虽然经济得到了增长, 但是能源消耗和二氧化碳排放较 2020 年增加了近 7 亿吨标准煤, 均衡情景下, 能源消费和二氧化碳低于经济最大化情景, 以较小的经济成本换取了环境效益, 且经济发展没有得到显著的抑制, 能源节约和二氧化碳排放约束的两个情景也与均衡情景相似, 可见适当的经济成本可以换来环境的改善和能源消费的降低。在粗放情景下, GDP 飞速提升, 达到 3330949.94 亿元, 能源消费为 1038165.49 万吨标准煤, 二氧化碳排放为 2224209.13, 以较大的环境代价, 达到经济效益, 会带来不可逆的影响。

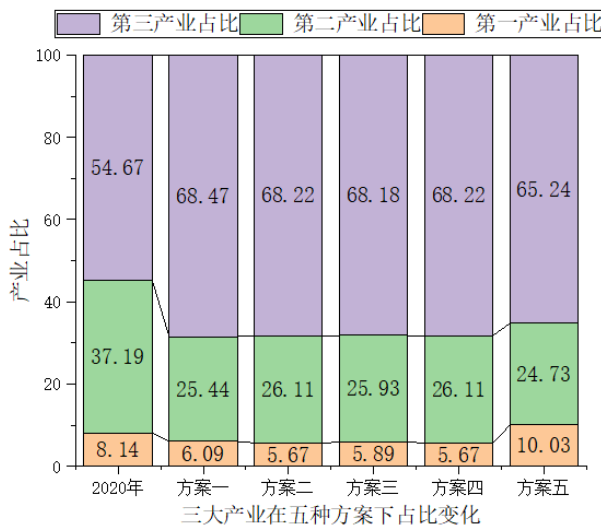


Figure 4. Changes in the proportion of the three major industries by 2030  
图 4. 2030 年三大产业占比变化

在经济最大化情景中, 如图 4 所示, 我国三大产业的比重为: 6.09%:25.44%:68.74%, 与 2020 年三大产业相比, 第一产业比重下降 1.62%, 第二产业比重显著下降, 第三产业比重显著上升, 即便是在粗放情景下, 第三产业也出现大幅增长, 第二产业大幅下降, 说明了第三产业是拉动经济增长的主要行业。在三种情景下, 第三产业比重都有所上升, 说明了产业结构调整能在不影响经济增长的基础上, 达到节能减排的效果, 可见第三产业是拉动经济发展和减排的核心产业。

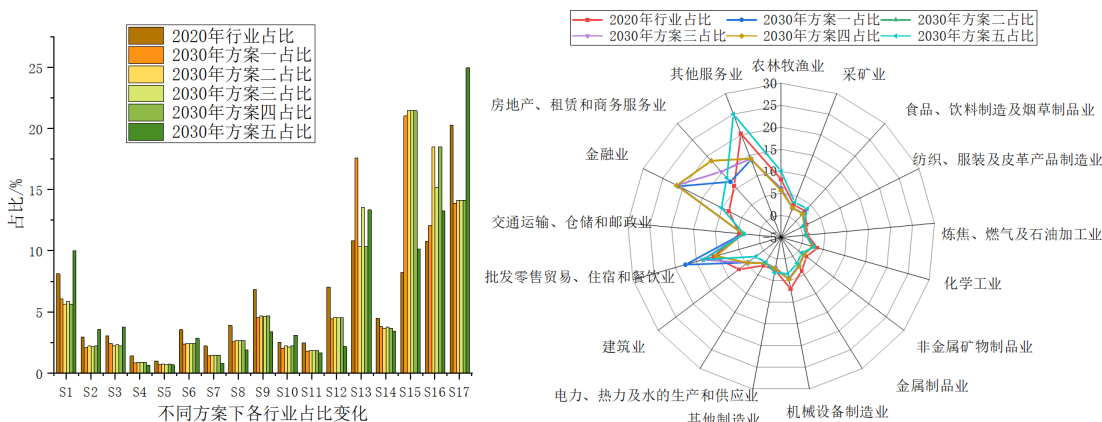


Figure 5. The proportion of added value to GDP in different industries under different scenarios  
图 5. 不同方案下各行业增加值与 GDP 的比重

从图 5 中可以看到, 批发零售业和交通运输业在能源节约和均衡情景下占比是下降的, 在二氧化碳排放和经济最大化以及粗放情景下占比是上升的, 该行业作为第三产业, 能源消费和二氧化碳排放量占比不小, 所以第三产业并不全是清洁产业。

在经济最大化情景、能源节约情景、二氧化碳排放约束、均衡发展情景以及粗放情景中, 金融业和房地产、租赁和商务服务业显著增加, 应该着重发展这种高经济效益低能源消耗行业。

其中纺织、服装及皮革产品制造业、炼焦、燃气及石油加工业、化学工业、非金属矿物制品、金属制品业、机械设备制造业、电力、热力及水的生产和供应业、建筑业比重在上几种情景下占比都是下降的, 这些行业属于高能耗产业, 无论在经济效益还是环境效益上竞争力不高, 其中农林牧渔业、采矿业、食品、饮料制造及烟草制品业、其他制造业和其他服务业的在粗放情景下占比是上升的, 这些行业具有经济效益, 在产业结构升级的同时, 应该促进行业内部升级, 提高行业活力, 防止产业空心化。

## 6. 结论

基于投入产出模型的优化模型, 来评价产业结构对我国经济发展、能源消耗和二氧化碳排放的影响。根据结果, 可以得出几个结论:

(1) 粗放情景相较于均衡情景, 以较大的环境代价, 达到经济效益, 会带来不可逆的影响。在能源节约情景和二氧化碳排放约束情景中, 能源消耗总量以及二氧化碳排放总量都有所降低, 但国内生产总值相较于经济最大化情景没有显著抑制经济的发展, 通过合理的产业结构调整, 能源消耗量以及二氧化碳排放量可以降低且不会限制经济的发展。因此, 同时实现经济发展与节能减排并非不可能。

(2) 在均衡发展情景中, 第一产业比重略有下降, 第二产业比重下降最为明显, 第三产业比重为 68.22% 接近百分之七十, 可以通过提高国民经济中第三产业比重、降低第二产业比重来实现经济增长。

(3) 综合考虑经济增长、能源消耗和二氧化碳排放的目标, 在三大产业基础上, 细分行业后, 应该着重发展批发零售贸易、住宿和餐饮业、金融业和房地产、租赁和商务服务业, 其中纺织、服装及皮革产品制造业、炼焦、燃气及石油加工业、化学工业、非金属矿物制品业、金属制品业、机械设备制造业、电力、热力及水的生产和供应业、建筑业比重在以上几种情景下占比都是下降的, 这些行业属于高能耗产业, 无论在经济效益还是环境效益上竞争力不高, 应该激发制造业企业活力, 调节人才的行业流向, 提高制造业内部活力, 促进实体经济的稳定发展, 在产业结构的升级同时促进双碳目标实现。

## 基金项目

本研究得到了国家社会科学基金重大项目 17ZDA092 的资助; 江苏省 2020 年度“高校素质教育与数字化课程建设”专项, 资助号: 2020JDKT032。

## 参考文献

- [1] Liu, Z., Jiang, P., Wang, J. and Zhang, L.F. (2022) Ensemble System for Short Term Carbon Dioxide Emissions Forecasting Based on Multi-Objective Tangent Search Algorithm. *Journal of Environmental Management*, **302**, Article ID: 113951. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113951>
- [2] 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.
- [3] 马诗萍, 刘倩倩, 张文忠. 空间视角下的能源-经济-环境关系研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(8): 1530-1541.
- [4] 崔北庆. 节能减排约束下产业结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [5] 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.
- [6] 原毅军, 董琨. 节能减排约束下的中国产业结构优化问题研究[J]. *工业技术经济*, 2008(8): 53-55.

- [7] 何平, 陈丹丹, 贾喜越. 产业结构优化研究[J]. 统计研究, 2014, 31(7): 31-37.
- [8] Zhou, X., Zhang, J. and Li, J. (2013) Industrial Structural Transformation and Carbon Dioxide Emissions in China. *Energy Policy*, **57**, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.017>
- [9] Tian, X., Chang, M., Shi, F. and Tanikawa, H. (2014) How Does Industrial Structure Change Impact Carbon Dioxide Emissions? A Comparative Analysis Focusing on Nine Provincial Regions in China. *Environmental Science & Policy*, **37**, 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.10.001>
- [10] Kang, Y.Q., Zhao, T. and Wu, P. (2016) Impacts of Energy-Related CO<sub>2</sub> Emissions in China: A Spatial Panel Data Technique. *Natural Hazards*, **81**, 405-421. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2087-x>
- [11] Mi, Z.F., Pan, S.Y., Yu, H. and Wei, Y.M. (2015) Potential Impacts of Industrial Structure on Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emission: A Case Study of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, **103**, 455-462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.011>
- [12] 宋涛, 董冠鹏, 唐志鹏, 陈明星, 胡志丁, 梁宜. 能源-环境-就业三重约束下的京津冀产业结构优化[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2184-2196.
- [13] de Carvalho, A.L., Antunes, C.H., Freire, F. and Henriques, C.O. (2015) A Hybrid Input-Output Multi-Objective Model to Assess Economic-Energy-Environment Trade-Offs in Brazil. *Energy*, **82**, 769-785. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.089>
- [14] Jia, X., Zhang, Y., Tan, R.R., et al. (2022) Multi-Objective Energy Planning for China's Dual Carbon Goals. *Sustainable Production and Consumption*, **34**, 552-564. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.009>
- [15] Fu, Z., Zhang, Y., He, S., et al. (2022) Multi-Objective Programming for Economy-Energy-Environment System and Policy Mix with Dual Constraints of Carbon Emission and Water Consumption Based on Multi-Scenario Analysis. *Energy Reports*, **8**, 7884-7891. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.022>
- [16] Wu, D., Zhou, D., Zhu, Q. and Wu, L.P. (2023) Industrial Structure Optimization under the Rigid Constraint of Carbon Peak in 2030: A Perspective from Industrial Sectors. *Environmental Impact Assessment Review*, **101**, Article ID: 107140. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107140>
- [17] Mi, Z., Wei, Y.M., Wang, B., et al. (2017) Socioeconomic Impact Assessment of China's CO<sub>2</sub> Emissions Peak Prior to 2030. *Journal of Cleaner Production*, **142**, 2227-2236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.055>
- [18] 张红霞, 夏明. 对投入产出模型性质的理论思考[J]. 经济理论与经济管理, 2022, 42(5): 78-94.
- [19] Zhang, Y., Fu, Z., Xie, Y., et al. (2021) Multi-Objective Programming for Energy System Based on the Decomposition of Carbon Emission Driving Forces: A Case Study of Guangdong, China. *Journal of Cleaner Production*, **309**, Article ID: 127410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127410>
- [20] 蔡京京. 基于ARDL和多目标规划模型的中国二氧化碳减排路径研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [21] 方琦, 钱立华, 鲁政委. 我国实现碳达峰与碳中和的碳排放量测算[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 51-56.
- [22] 中国社会科学院宏观经济研究中心课题组, 李雪松, 陆旸, 汪红驹, 冯明, 娄峰, 张彬斌, 李双双. 未来 15 年中国经济增长潜力与“十四五”时期经济社会发展主要目标及指标研究[J]. 中国工业经济, 2020(4): 5-22.