

基于多尺度投入-产出表的中国对外贸易产业结构调整多目标优化

姚黎明¹, 徐忠雯²

(1. 四川大学商学院, 成都 610064; 2. 南京大学环境学院, 南京 210023)

摘要: 出口贸易引发的资源流失风险是当今研究的热点. 本文动态地分析了出口贸易引起的资源流出变动及其影响因素, 并对 2018—2022 年中国地区出口贸易进行优化调整. 首先, 本文利用行业间投入-产出表和资源消耗数据计算中国各行业的直接和完全资源消耗系数; 其次, 利用结构分解模型挖掘出口导向的隐含资源流出量变动的主要原因; 随即, 将 45 个行业进行聚类分析, 探讨未来各行业的节约资源潜力和调整路径; 最后基于情景分析和多目标优化理论, 从出口贸易结构, 贸易额和技术发展视角对中国未来出口贸易进行模拟分析. 实证分析结果表明: (1) 直接消耗强度, 技术进步, 出口总量和出口结构等 4 个影响因素中, 出口额对资源流失风险的贡献率最大. 直接能源消耗强度有助于降低因出口导致的能源流出, 而完全消耗水资源强度的降低大大减少了资源流失风险, 符合现实; (2) 以 2017 年为基准年, 利用多目标优化模型求解 2018—2022 年出口结构和出口量, 结果表明优化结果有利于降低资源流出量. 通过调整未来各行业资源消耗强度, 优化结果发现技术提升带来的资源节约优势逐渐增强, 本文认为, 为技术改善的资金(人员)投入的边际产出呈现逐渐增强效应.

关键词: 多尺度投入-产出分析; 隐含资源; 结构分解法; 出口结构; 多目标优化

中图分类号: X22 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.057001

China's foreign trade industrial structure adjustment based on multi-scale input-output table and multi-objective optimization method

YAO Li-Ming¹, XU Zhong-Wen²

(1. Business School, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The risk of resource loss caused by exports is a hot topic nowadays. This paper focuses on resource flow, analyzes contribution rates of influencing factors to changes in resource flow dynamically, and then offers optimized export restructure strategies during the period from 2018 to 2022. In the analytic framework, firstly, the economic input-output table and energy-water consumption data are used to calculate the direct and complete consumption coefficients of water and energy; Secondly, to provide a reference for scenario definition and future export restructure, the authors use the structural decomposition analysis model to identify the main reasons for the variation of the resources flow. Besides, the authors use clustering analysis to identify sectoral water and energy consumption disparity and the potential for resource-saving. At last, this paper uses a bi-objective optimization model to optimize the export

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (71771157); 四川省社会科学基金 (201726); 生态环境部基金 (2020QT017-K2020A003)

作者简介: 姚黎明(1984—), 男, 四川资阳人, 博士, 研究员, 研究方向为资源优化配置. E-mail: lmyao@scu.edu.cn

通讯作者: 徐忠雯. E-mail: xuzhongwen1996@163.com

structure. The empirical analysis indicates that the volume of exports is found as the primary contributor to resource flow; direct energy consumption intensity helps to reduce energy outflow caused by export, while the reduction of total water consumption intensity greatly reduces the risk of resource loss, which is consistent with the reality. Cluster analysis offers the improving directions, and the optimization result shows that faced with the extension of export, reducing the energy-water coefficient helps to achieve resources conservation. Besides, this paper argues that the marginal output derived from technological improvement shows a gradually increasing effect.

Keywords: Multiscale input-output analysis; Embodied resources; Structural decomposition method; Output structure; Multi-objective optimization

1 引言

在地球 45.67 亿年的演变过程中,绿水青山和金山银山为生物生存创造了良好的条件。绿水青山映射成生态环境系统,金山银山则表示矿产资源系统。为了践行“绿水青山就是金山银山”的理念,应当把保护环境节约资源作为基本国策,协调经济发展和水、能源利用,构建环境友好型,资源节约型国家。

不可否认在贸易全球化的背景下,中国工业出口贸易占据了 42.3% 的 GDP。数据显示,中国工业部门的资源消耗占据全国资源消耗量的 70%^[1],这也间接导致了国内资源流失问题。全球商品贸易,一方面增加了生产国的经济收入,保证了消费国的食品安全,使得人们不再依赖于本地的生产商品;另一方面对生产国产生了社会-环境和资源多方面的负面效应。例如,虚拟水的流转降低了生产国的可用水量,增加了可替代水源的使用量,导致超采地下水的现象,同时,工业生产过程中商品生产使用的能源降低了能源可持续性利用的目标,亦加大了生产国的生态保护压力。因此,出口贸易的迅速增长与有限的资源量之间的矛盾日益突出。因此,在推动全球贸易进程的同时,需要充分考虑中国资源禀赋情况,优化资源利用,调整出口贸易结构和规模。

随着技术进步和工业化进程的推进,不同产品生产工序和流程中水-能消耗是不同的,因此它们的节约资源潜力也是不同的。在以往的文献中,部分学者利用单位产值的水-能消耗量度量各个工业部门的资源使用效率,然而却忽视了这个部门生产过程中对其他产品部门物品或服务的间接消耗,不利于识别不同部门生产过程中资源节约潜力。因此,明晰各部门之间的纽带关系具有研究意义。精准量化部门间纽带作用的水-能消耗,能

够为制定合理的贸易结构和规模提供科学的参考信息。

近年来,水(能源)足迹方面的研究有了进展。主要的分析框架分为两种,一种是自下而上研究框架;一种是自上而下研究框架。生命周期评价,作为一种自下而上的分析方法,主要是针对产品生产过程中能源使用,物料投入,环境排放等具体事项来进行评价的。然而,它需要通过实地调查或者二手统计资料获取分析数据,数据核算的不完整和系统的有边界性等缺陷将影响评价结果^[2]。另外,多尺度投入产出法是一种自上而下的评价方法,被广泛地用于不同尺度宏观经济体之间生产和消费的关系。Wiedmann 等^[3]学者基于投入产出模型分析了全球范围内的贸易对环境的影响。投入产出法考虑了各部门之间资源共享,相互促进的关系,为系统地分析各部门之间原材料,初级加工品的交易路径提供了一种实用的经济分析方法。总之,投入产出法优势包括两点:(1)能够体现资源在各行业之间的流动,体现行业间资源消耗的乘数效应;(2)考虑了中间投入后可以准确评估各行业的完全消耗系数。

在现有的研究论文中,研究内容主要在统计分析层面^[4]。魏怡然等^[5]以节约北京市水资源及提高水资源利用效率为目的,通过对比 2007 年和 2012 年数据,分析北京市虚拟水调入调出情况,并提出相关的管理和规划建议。刘梅等^[6]从产品消费和商品贸易角度分析和河北省 11 个行政区虚拟水足迹的时空差异,对如何建立本地区的虚拟水转移战略具有启示作用。曹涛等^[7]计算京津冀地区投入产出表和生产用水量,分析跨地区的部门间水资源使用和虚拟水贸易战略。尹显萍等^[8]运用投入产出法,从贸易规模与贸易结构两方面分析了 2002—2008 年对外贸易对我国能源消费的影响。但是,很少有文献从资源优化配置角度进

行研究. 科学的优化方案和干预措施有利于权衡经济和生态之间的利益关系. Li 等^[9]认为对外贸易结构和规模对资源消耗系数和资源利用效率有不同的影响. Yu 等^[10]发现调整资源结构能够减少达到节约能源, 减少废气排放的目的. 沈利生^[11]对 2002—2005 年中国进出口贸易数据分析, 认为针对性地改变对外贸易产品的结构, 有助于释放巨大的节能潜力, 并列举现有的能够减少水资源-能源流出的政府干预措施包括减少出口总量, 调整出口结构, 降低水-能消耗系数. 基于此, 本文将利用多尺度投入产出法, 分析不同年份的水-能完全消耗系数, 探讨中国各行业部门水-能节约潜力, 优化中国出口结构.

综上所述, 对外贸易在我国经济中占有很大的比重, 并且呈现扩大的趋势. 由于出口商品本身包含有水资源和能源的消耗, 如果不加节制的出口贸易可能会引起能源耗尽, 生产地区的土壤, 水资源等污染, 加剧地方和地区的资源使用压力. 相反地, 合理的出口量和出口结构将促进各部门, 各地区之间的商品流通, 促进经济增长的同时不损害社会, 生态等其他系统. 本文的研究对于现

有研究领域具有如下贡献: (1) 利用行业商品流动数据以及隐含资源, 分析了我国对外贸易资源流出量动态变化, 有利于识别不同产品部门的资源消耗强度和资源节约潜力; (2) 同时考虑产业间水-能流动, 进而利用结构分解法识别资源流失的驱动因素, 为决策者制定对外贸易调整政策提供理论指导; (3) 基于不同的调整视角, 利用多目标模型优化未来出口结构和出口量.

2 研究方法

2.1 问题描述

本文旨在回答以下 3 个问题: (1) 探究中国各行业完全消耗资源系数随时间变化趋势及各行业节约资源潜力; (2) 识别资源流失的动态影响因素, 设计调整政策; (3) 基于水资源和能源及其复合指标, 优化 2018—2022 年出口贸易结构, 同时探究其他因素对出口贸易的影响. 基于此, 本文开展以下工作: 量化水-能消耗强度; 动态分析水-能消耗的影响因素, 并结合经济学理论和情景分析思想, 指导出口贸易结构调整, 达到降低资源流失风险的目的 (如图 1 所示).

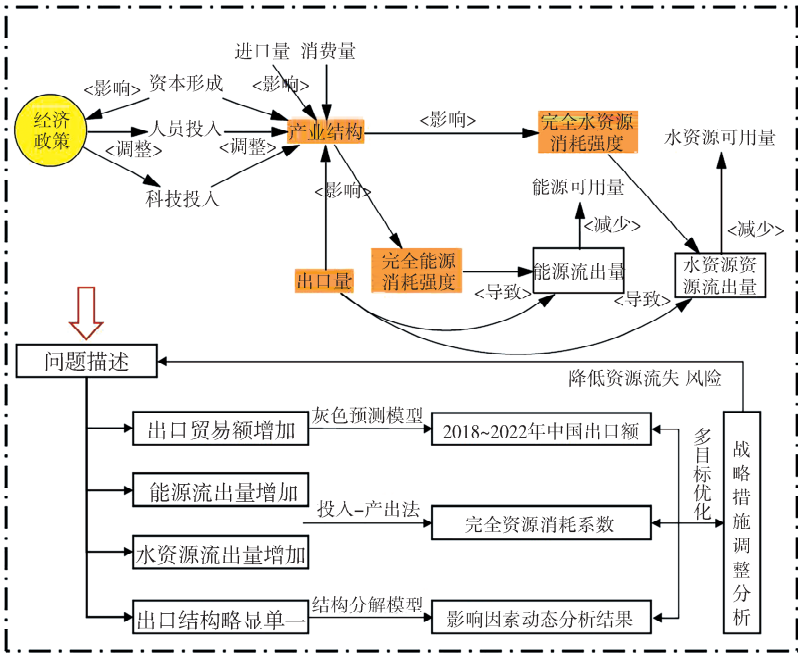


图 1 论文研究框架
Fig. 1 The framework of this research

2.2 水-能消耗计算模型

Shao 等^[12]利用投入产出法分析进口和本地生产产品的贸易量, 并计算出了流转在商品贸易中的虚拟水转移情况. 不同于一般范式的经济系

统的投入产出表, 为了计算每种生产产品的虚拟水含量, 本文将各个行业用水量和能源消耗量加入到原始的投入产出表中, 如表 1 所示.

表 1 多尺度投入产出表
Tab. 1 Multi-scale input-output table

投入		产出				进口/万元	总产出/万元	
		中间使用		最终使用				
		部门 1	…	部门 i	本地消费/万元			出口/万元
中间投入	部门 1	$z_{1,1}$		$z_{1,i}$	y_1	e_1	m_1	x_1
	…	…		…	…	…	…	…
	部门 i	$z_{i,1}$		$z_{i,i}$	y_i	e_i	m_i	x_i
增加值	劳动者报酬							
	生产税净额							
	固定资产折旧							
	营业盈余							
水资源系统	实际用水量/万立方米	VW_1	…		VW_i	VW^L	VW^E	VW^M
能源系统	万吨标准煤/吨	C_1	…		C_i	C^L	C^E	C^M
总投入/万元		x_1	…		x_i			

$z_{1,i}$ 表示中间使用过程中部门 1 的产品被视为部门 i 的原材料,经中间加工产生的价值属于部门 i . y_1 表示产品 1 被本地消费产生的价值. e_1 表示部门 1 生产的产品用于出口并产生的价值. x_1 表示部门 1 生产所产生的所有价值. VW 是 $VW^L, VW^E, VW^M, VW_1, \dots, VW_i$ 的集合, VW_1 和表示部门 1 在生产过程中实际耗水量. VW^L 和 VW^E 表示产品用于本地消费和出口的所蕴含的虚拟水含量. VW^M 表示进口产品调入的虚拟水量. C_1 表示部门 1 实际能耗量(折算为标准煤). C^L 和 C^E 表示产品用于本地消费、出口的所蕴含的能源. C^M 表示因进口而对本地减少的能源消耗量.

不同部门各自及其不同部门之间的隐含资源. 其一般公式如下.

$$G_i(VW,C) + \sum_{j=1}^I (z_{i,j} \times \alpha_i(VW,C)) + m_i \times \beta_i(VW,C) = \{y_i + e_i + \sum_{j=1}^I z_{i,j}\} \times \alpha_i(VW,C)$$

(1)

其中, $\alpha_i(VW,C)$ 表示部门 i 万元价值产品的虚拟水或者能源含量(完全消耗系数); β_i 表示进口部门 i 万元价值产品的隐含资源. 在计算行业产品流动中隐含资源量时,扣除进口中间投入,防止对完全用水量的高估. 根据传统单一区域投入产出表知,

$$x_i = \sum_{j=1}^I z_{i,j} + y_i + e_i, i = 1, 2, \dots, I.$$

$$\Delta G = f(\Delta X^{-1}G) + f(\Delta((I-A)^{-1} - I)) + f(\Delta E) + f(\Delta ES)$$

(3)

当考虑了水资源(能源)系统之后, I 个方程式的矩阵形式如下.

$$G + Z \times \alpha(VW,C) + M \times \beta(VW,C) = X \times \alpha(VW,C)$$

(2)

其中, $G = [G_i(VW,C)]_{1 \times I}$; $\alpha(VW,C) = [\alpha_i(VW,C)]_{1 \times I}$; $\beta(VW,C) = [\beta_i(VW,C)]_{1 \times I}$; $Z = [z_{ij}]_{I \times I}$; $X = [x_i]_{1 \times I}$, $M = [m_i]_{1 \times I}$.

$\alpha_i(VW,C)$ 的计算公式如下: $\alpha(VW,C) = (G + M) \times X^{-1} \times (1 - A)^{-1}$. 这里的 $(1 - A)^{-1}$ 被称作里昂惕夫逆矩阵, $G X^{-1}((1 - A)^{-1} - I)$ 表示完全需求系数; $G X^{-1}$ 表示直接用水消耗系数(能源消耗系数).

2.3 影响因素分析方法

隐含资源消耗量是完全消耗系数和流通量的乘积. 根据截面数据计算不同年份的隐含资源消耗量,并利用结构分解法识别其影响因素. 结构分解分析可以用来识别一个经济体中的主要转变,这种转变是基于一系列关键因素的静态变化^[13]. 如表 2 所示,将中国出口体现的隐含资源消耗量变化分解为直接消耗强度,中间使用,出口总量和出口结构等 4 个因素,并运用两级分解平均法对 2012—2017 年行业 4 个组成部分进行分解. 以下标 t_0 和 t_1 分别表示基期和计算期. 有关结构分解模型的更多细节,请参见文献[14].

$$f(\Delta X^{-1}G) = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta X^{-1}G \times ((I-A)^{-1} - I) \times \sum E \times ES_{(t_1)} + \Delta X^{-1}G ((I-A)^{-1} - I) \sum E \times ES_{(t_0)}}{\Delta X^{-1}G ((I-A)^{-1} - I) \sum E \times ES_{(t_0)}} \right] \tag{4}$$

$$f(\Delta((I-A)^{-1} - I)) = \frac{1}{2} \left[\frac{(X^{-1}G)_{(t_0)} \Delta((I-A)^{-1} - I) \times (\sum E \times ES)_{(t_1)} + (X^{-1}G)_{(t_1)} \Delta((I-A)^{-1} - I) \times (\sum E \times ES)_{(t_0)}}{(X^{-1}G)_{(t_1)} \Delta((I-A)^{-1} - I) \times (\sum E \times ES)_{(t_0)}} \right] \tag{5}$$

$$f(\Delta \sum E) = \frac{1}{2} \left[\frac{(X^{-1}G((I-A)^{-1} - I))_{(t_0)} \Delta \sum E (ES)_{(t_1)} + (X^{-1}G((I-A)^{-1} - I))_{(t_1)} \Delta \sum E (ES)_{(t_0)}}{(X^{-1}G((I-A)^{-1} - I))_{(t_1)} \Delta \sum E (ES)_{(t_0)}} \right] \tag{6}$$

$$f(\Delta ES) = \frac{1}{2} \left[(X^{-1}G((I-A)^{-1} - I) \sum E)_{(t_0)} \Delta ES + (X^{-1}G((I-A)^{-1} - I) \sum E)_{(t_1)} \Delta ES \right] \tag{7}$$

表 2 隐含资源流出变化的原因

Tab. 2 Causes of changes in resources outflow

影响因素	符号	量化表征	计算结果/%
直接消耗强度	$\Delta X^{-1}G$	$f(\Delta X^{-1}G)$	$f(\Delta X^{-1}G)/\Delta G$
生产技术	$\Delta((I-A)^{-1} - I)$	$f(\Delta((I-A)^{-1} - I))$	$f(\Delta((I-A)^{-1} - I))/\Delta G$
出口总量	$\Delta \sum E$	$f(\Delta \sum E)$	$f(\Delta \sum E)/\Delta G$
出口结构	ΔES	$f(\Delta ES)$	$f(\Delta ES)/\Delta G$

2.4 多目标优化模型

本文将建立多目标模型, 优化调整各行业出口结构. 目标函数包括水资源和能源使用最小化. 约束条件是满足出口额约束.

我们依据初始出口结构确定 h_i 和 Δh_i 为决策变量, $h_i + \Delta h_i$ 反映优化后出口结构. G 表示规划年的拟达到的出口总额, G_0 表示基准年出口总额, $\alpha_i(VW)$ 和 $\alpha_i(C)$ 分别表示规划年的完全资源消耗系数. h_i 由基准年出口结构决定, Δh_i 是考虑了出口量变化, 出口结构需调整量. 这样一来, 优化模型既考虑了现有的出口结构, 也降低了资源流出. 对于这个多目标模型的求解方法, 本文利用处理多目标优化模型的快速非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 求解.

$$\begin{aligned} \min f^{Wt} &= \sum_{i \in I} \alpha_i(VW)(h_i + \Delta h_i) \\ \min f^C &= \sum_{i \in I} \alpha_i(C)(h_i + \Delta h_i) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{i \in I} (h_i + \Delta h_i) = G \\ h_i = \frac{h_{i0}}{\sum_{i \in I} h_{i0}} G_0, \forall i \\ h_i \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{8}$$

3 案例分析

3.1 数据来源与数据处理

本文主要研究中国大陆地区, 一共 31 个省级

行政区. 本文用到的数据包括《全国投入产出表》, 分行业资源(水资源, 能源)消耗量, 和其他社会-经济-人口相关的数据. 全国投入产出表来自中国统计局, 分行业资源水资源消耗量来自于《中国经济普查年鉴》, 2008(能源卷)-分行业水消费量. 由于数据收集问题, 没有获得具体研究年份的水资源消耗量, 只是计算了已有数据行业平均耗水占比, 并利用《水资源公报》-全国水环境情况中当前年份的数据计算当前年份各行业的水资源消耗量. 分行业资源能源消耗量来自于《中国统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》. 《全国投入产出表》的记录的是行业产品情况, 本文依据中国行业生产种类, 将部分合并生产包括 45 个行业 (如表 3 所示).

3.2 资源消耗动态分析

资源消耗动态分析如表 4 和表 5. 表 4 和表 5 中, 变化率由 2017 年数值减去 2012 年数值, 除以 2012 年数值所得.

表 4 展示了 2012 年和 2017 年各行业水资源完全消耗系数. 变化率体现了近年来各行业单位产值水资源减少的情况. 纵观变化率, 结果发现所有行业的单位产值资源消耗量是减少的. 结合附录中各行业的水资源直接消耗系数, 结果发现存在部分行业, 例如石油和天然气开采业, 黑色金属矿采选业, 开采辅助活动、其他采矿业, 纺织业, 化学纤维制造业, 汽车制造业, 金属制品、机械和设备修理业, 水的生产和供应业, 8 个行业的单位产值水资源消耗较 2012 年增加了.

表 5 展示了 2012 年和 2017 年各行业能源完全消耗系数. 纵观直接消耗系数, 绝大部分行业的单位产值资源消耗量是逐年减少的, 但也存在部分行业的单位产值能源消耗呈现上升趋势, 例如石油和天然气开采业, 黑色金属矿采选业, 农副食品加工业, 纺织业, 家具制造业, 文教、工美、体育和娱乐用品制造业, 石油加工、炼焦和核燃料加工业, 化学原料和化学制品制造业, 化学纤维制造业, 黑色金属冶炼和压延加工业, 有色金属

冶炼和压延加工业, 金属制品、机械和设备修理业. 当去除了中间消费中进口产品带来的隐含资源量时, 结果发现: 所有行业的完全消耗系数全部降低了. 本文认为出现这样结果的原因包括: (1) 科技创新和技术进步使得生产加工过程中对自然资源的需求量减少了; (2) 由于全球贸易的普及化, 中国增加了对原材料和半成品的进口, 从而减少了国内因半成品生产的水资源消耗.

表 3 行业名称与编号(中国)
Tab. 3 Sectors in China

行业编号	行业名称	行业编号	行业名称
1	农, 林, 牧, 渔业	24	橡胶和塑料制品业
2	煤炭开采和洗选业	25	非金属矿物制品业
3	石油和天然气开采业	26	黑色金属冶炼和压延加工业
4	黑色金属矿采选业	27	有色金属冶炼和压延加工业
5	有色金属矿采选业	28	金属制品业
6	非金属矿采选业	29	通用设备制造业
7	开采辅助活动, 其他采矿业	30	专用设备制造业
8	农副食品加工业	31	汽车制造业
9	食品制造业	32	铁路, 船舶, 航空航天和其他运输设备制造业
10	酒, 饮料和精制茶制造业	33	电气机械和器材制造业
11	烟草制品业	34	计算机, 通信和其他电子设备制造业
12	纺织业	35	仪器仪表制造业
13	纺织服装, 服饰业	36	其他制造业
14	皮革, 毛皮, 羽毛及其制品和制鞋业	37	废弃资源综合利用业
15	木材加工和木, 竹, 藤, 棕, 草制品业	38	金属制品, 机械和设备修理业
16	家具制造业	39	电力, 热力生产和供应业
17	造纸和纸制品业	40	燃气生产和供应业
18	印刷和记录媒介复制业	41	水的生产和供应业
19	文教, 工美, 体育和娱乐用品制造业	42	建筑业
20	石油加工, 炼焦和核燃料加工业	43	交通运输, 仓储和邮政业
21	化学原料和化学制品制造业	44	批发, 零售业和住宿, 餐饮业
22	医药制造业	45	其他行业, 生活消费
23	化学纤维制造业		

通过比较 2012 年和 2017 年不同工业部门单位产值最终产品的资源消耗系数, 可以观察到不同行业的趋势信息. 接着, 利用统计学中聚类分析的方法, 将具有不同变化特征的中国各行业部门归为不同的类别, 可用于管理建议, 如技术投资等方面的研究. 为了使结果更加直观, 聚类结果将以正数的形式展现, 即数字越大表示单位产值资源消耗系数变动越大. 图 2 可知, 同一大类的变化程度大致相同, 类 1 包括黑色金属矿采选业;

类 2 包括石油和天然气的开采业, 有色金属矿采选业; 类 3 则包含剩余的 42 个行业. 结果显示, 从水资源使用和能源使用 2 个角度来看, 大部分行业的整体资源使用效率有待提高, 因此, 可按类别分阶段减少不同行业的水资源, 能源消耗系数, 具体表现在, 先通过技术和管理手段挖掘类别 3 的水-能消耗减少办法, 将进一步将经验方法总结实施到类别 2, 进而实现整体行业单位产值水-能消耗最小化.

表 4 行业水资源完全消耗系数分析 (万立方米/万元)

Tab. 4 Analysis of total industrial water consumption coefficient ($10^4\text{ m}^3/10^4\text{ RMB}$)

行业 编号	2012	2017	变化率	行业 编号	2012	2017	变化率
1	0.085	0.066	-0.223	24	0.079	0.062	-0.224
2	0.086	0.067	-0.221	25	0.079	0.061	-0.226
3	0.080	0.060	-0.248	26	0.079	0.061	-0.225
4	0.082	0.059	-0.280	27	0.078	0.061	-0.224
5	0.079	0.059	-0.253	28	0.078	0.061	-0.224
6	0.079	0.061	-0.226	29	0.078	0.061	-0.223
7	0.082	0.063	-0.230	30	0.079	0.061	-0.221
8	0.087	0.066	-0.247	31	0.078	0.061	-0.224
9	0.078	0.061	-0.225	32	0.078	0.061	-0.221
10	0.078	0.061	-0.224	33	0.079	0.061	-0.223
11	0.079	0.061	-0.224	34	0.078	0.061	-0.224
12	0.079	0.061	-0.227	35	0.080	0.063	-0.219
13	0.078	0.061	-0.224	36	0.079	0.061	-0.225
14	0.078	0.061	-0.225	37	0.079	0.062	-0.213
15	0.079	0.061	-0.225	38	0.081	0.063	-0.231
16	0.078	0.061	-0.224	39	0.085	0.065	-0.234
17	0.079	0.061	-0.226	40	0.079	0.061	-0.222
18	0.079	0.062	-0.226	41	0.079	0.061	-0.227
19	0.078	0.061	-0.223	42	0.078	0.061	-0.225
20	0.081	0.062	-0.235	43	0.079	0.062	-0.223
21	0.082	0.064	-0.218	44	0.079	0.061	-0.224
22	0.080	0.062	-0.227	45	0.079	0.061	-0.226
23	0.079	0.062	-0.223				

表 5 行业完全能源消耗系数分析 (吨/万元)

Tab. 5 Analysis of total industrial energy consumption coefficient ($\text{t}/10^4\text{ RMB}$)

行业 编号	2012	2017	变化率	行业 编号	2012	2017	变化率
1	43.193	8.740	-0.798	24	43.310	8.783	-0.797
2	43.775	9.340	-0.787	25	43.417	8.868	-0.796
3	45.469	7.177	-0.842	26	43.543	8.968	-0.794
4	48.038	6.284	-0.869	27	43.368	8.989	-0.793
5	44.365	6.890	-0.845	28	43.253	8.744	-0.798
6	44.252	9.658	-0.782	29	43.261	8.779	-0.797
7	44.563	9.730	-0.782	30	43.285	8.727	-0.798
8	43.183	8.714	-0.798	31	43.192	8.727	-0.798
9	43.147	8.681	-0.799	32	43.181	8.719	-0.798
10	43.218	8.751	-0.798	33	43.193	8.733	-0.798
11	43.257	8.786	-0.797	34	43.160	8.714	-0.798
12	43.278	8.761	-0.798	35	43.334	8.854	-0.796
13	43.176	8.721	-0.798	36	43.373	8.812	-0.797
14	43.149	8.685	-0.799	37	43.855	10.521	-0.760
15	43.231	8.755	-0.797	38	43.644	8.907	-0.796
16	43.136	8.677	-0.799	39	43.585	9.054	-0.792
17	43.343	8.855	-0.796	40	43.345	8.857	-0.796
18	43.547	9.086	-0.791	41	43.327	8.786	-0.797
19	43.181	8.713	-0.798	42	43.128	8.664	-0.799
20	43.604	9.093	-0.791	43	43.336	8.834	-0.796
21	43.481	9.056	-0.792	44	43.232	8.766	-0.797
22	43.301	8.832	-0.796	45	43.228	8.752	-0.798
23	43.367	8.997	-0.793				

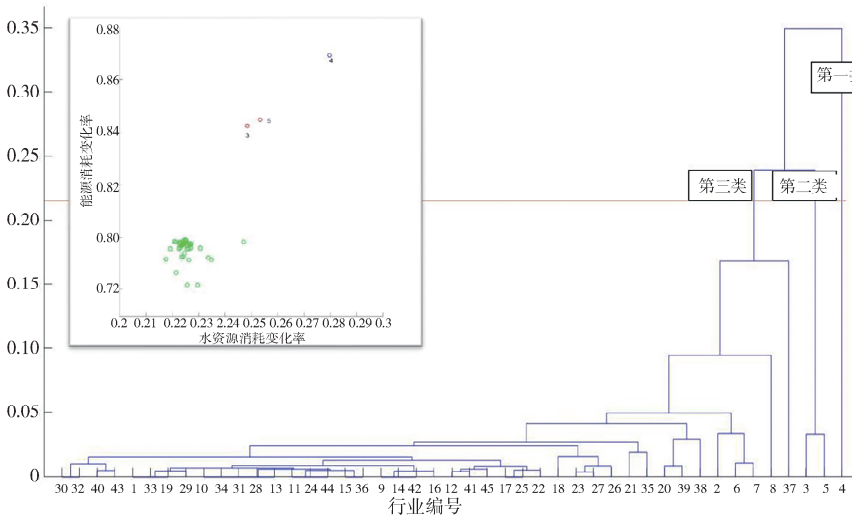


图 2 系统聚类划分结果

Fig. 2 Results of systematic clustering

3.3 资源节约潜力分析

图 3 展示 2017 年中国出口的水-能消耗和流
出量. 图 3a 表明不同的行业对能源流出的贡献率
是不同的, 例如电气机械和器材制造业的能源流
出相对最多, 计算机、通信和其他电子设备制造业

紧跟其后; 除了部分行业不存在能源流出外, 批
发、零售业和住宿、餐饮业, 其他行业、生活消费,
黑色金属矿采选业的能源流出相对最少. 结果表
明, 电机, 输配电及控制设备, 电线、电缆、光缆及
电工器材, 电池, 家用器具, 其他电气机械和器

材, 计算机, 通信设备, 广播电视设备和雷达及配套设备, 视听设备, 电子元器件和其他电子设备等对外出口量较高; 相比较而言, 批发, 零售, 餐饮等主要是本国人民的生活消费, 对外流出的能源量很少. 结合完全消耗系数, 不难发现在单位产值能源消耗减少的情况下, 批发, 零售, 餐饮等行业依然呈现正向增长, 并且增加幅度明显. 本文认为, 这一现象表明具有中国特色的产品, 从食物到高科技产品逐渐被广大进口国接受. 并且我国的交通、仓储行业的发展也带动了对外贸易进展速度.

图 3b 可以看出, 计算机、通信和其他电子设备制造业的水资源流出量最多, 远大于其他产业. 结果发现, 随着科技的进步, 中国逐渐从农业出口国转向科技出口国. 农业每年灌溉用水占了全国可用水量的 70%, 确实是水消耗最大的产业, 但结果显示农、林、牧、渔业的出口隐含水资源流出量远小于很多部门. 本文分析原因如下: 农产品, 林产品, 畜牧产品和渔产品等主要用途包括: (1) 满足本国人民的直接需求; (2) 作为农副食品, 酒精饮料等产品的原材料, 满足自身发展需求的同时被用于对外贸易. 2012 至 2017 年, 发展中国家的全球价值链地位和占比提升迅速, 中国

开展对外出口量逐步提升, 对于中国这样的对外贸易大国, 如何调整进出口产品结构和地区结构, 增强外贸可持续发展能力, 促进外贸与能源, 资源和环境协调发展, 是十分重要的. 因此, 本文认为, 针对中国作为外贸大国, 探究资源流出量影响因素, 充分挖掘水-能消耗减少的潜在路径, 权衡资源与经济发展的关系, 优化贸易出口结构, 具体现实意义.

图 4 展示了 2012 和 2017 年全年的产品出口额和引起的能源, 水资源流出量. 研究表明, 中国的对外贸易在逐年扩大 (2017 年出口额较 2012 年增长了 19.89%, 271 809 711 万元). 随着科技的进步和资源高效利用意识的提升, 资源流出风险逐年降低, 较 2012 年相比, 流出的能源量减少了 437 亿吨. 与此同时, 水资源的流出量相较于 2012 年减少了 2899 亿立方米. 结果显示对外贸易量的增加并不会对我国资源流出带来显著明显的增加. 为了进一步探究资源流出风险的影响因素, 本文利用结构分解法对资源流出量进行了影响因素分析. 在精准描述资源消耗量和流出量后, 能够针对性提出节约资源的政策建议, 破解经济发展和资源冲突.

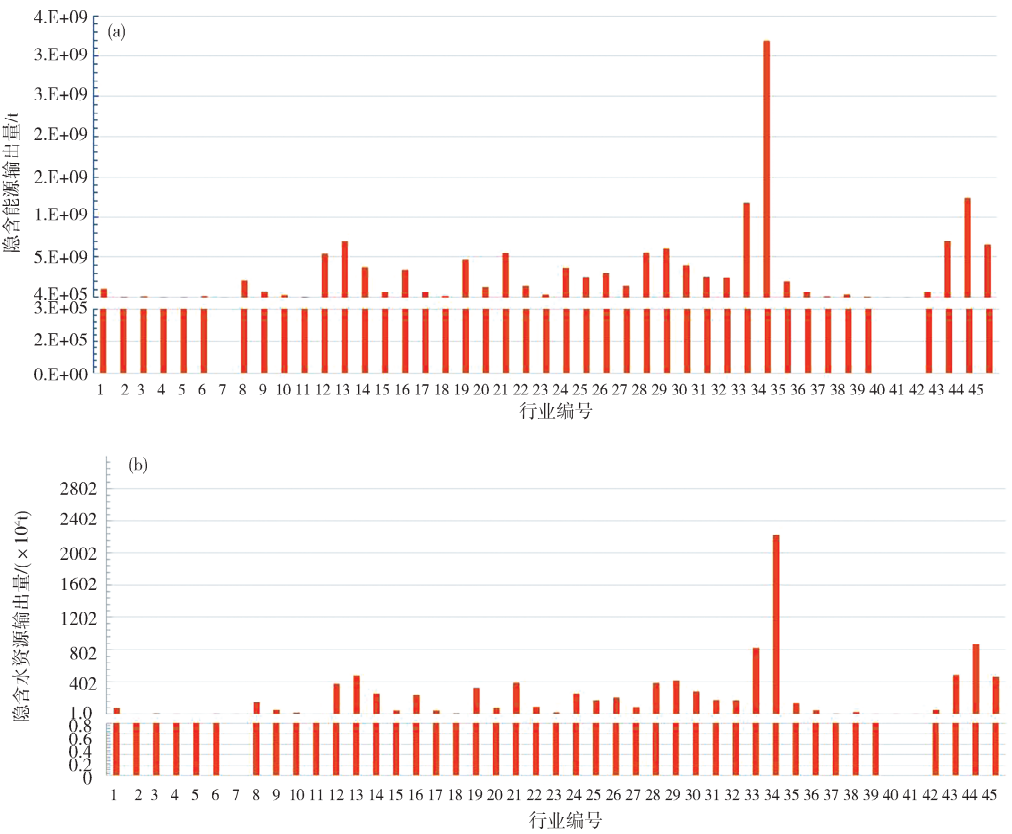


图 3 分行业出口产品水-能流出量
Fig. 3 Outflow of embodied water and energy

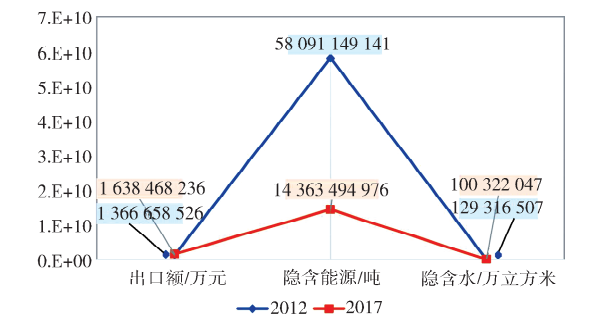


图 4 行业出口产品出口量和隐含资源总量(2012 和 2017 年)

Fig. 4 Total outflow of embodied water and energy of exports(2012 and 2017)

表 6 显示的分解结果是基于 2012 和 2017 年的数据,结果表明,中国能源消耗效率的提升能够减少出口带来的能源流出,这一作用效果的作用为 29%。完全消耗能源对于减少能源露出的贡献率是 34%,这说明技术提升有利于节约现有能源。出口总量对能源流出的风险是最大的,其贡献率达到了 143%,是对外贸易出口资源流出量增加的主要原因。其次,近年来出口结构的变化也增加了能源流出的风险,其贡献率为 20%。

同理,提升的水资源使用效率一定程度地减少了虚拟水流出,这一作用效果的作用为 84%。近年来,由于全球变暖和极端气候的影响,包括我国在内的多个国家出现了水短缺现象,因此国家出台了多种措施来提高水资源的使用效率,具体措施包括节水灌溉,使用高科技方式取代传统工业的冷凝装置。完全消耗水资源的贡献率是 12%,这说明中国生产技术变化在减少虚拟水流出风险的工作中起到了不可忽视的作用。这说明中国政府改变了发展方式,从农业出口大国逐渐向高科技行业进军,并在水资源效率提升方面做出了巨大贡献^[15]。出口总量对水-能流出的风险是最大的,其贡献率达到了 168%,是对外贸易出口资源流出量增加的主要原因。其次,近年来出口结构的变化也增加了资源流出的风险,其贡献率为 27%。

结果表明,出口商品中仍存在高物耗,高能耗产品,资源高效利用的行业不占主要比重等问题。本文认为,对外贸易结构调整应成为我国关注的,是降低资源流出风险的有效途径。中国外贸出口的主要任务是尽快实现出口产品结构的战略性调整,发展高附加值的高新技术产品出口,从外贸大国向外贸绿色强国转变。

表 6 资源流出量增加的因素分解结果			
Tab. 6 Decomposition results of resource outflow			
影响因素	计算结果/%	影响因素	计算结果/%
直接消耗能源强度	-84	直接消耗水资源强度	-29
完全消耗能源强度	-12	完全消耗水资源强度	-34
出口总量	168	出口总量	143
出口结构	27	出口结构	20

3.4 对外贸易战略措施调整分析

(1) 出口结构调整潜在路径分析. 近年来,中国出口商品贸易额逐渐增大,出口占比较大的商品是计算机,通讯和其他电子产品,电气机械和器材制造品。进口占比较大的除了技术密集型科技产品,还包括自然资源导向型产品,如石油,天然气。出口商品结构优化升级路径设计应该与当地的经济发展情况,政府发展规划和资源禀赋有关。利用分类分析的方法按照各行业商品完全水-能消耗强度对其分类。图 5 显示 A, B, C, D 四个部分,分别表示高水耗-高能耗,低水耗-高能耗,低水耗-低能耗和高水耗-低能耗四个类别。C 类别起到了标杆作用,是所有行业中水资源和能源完全消耗系数最低的类别。因此,处于 C 类别的行业可在地球承载力约束下增加生产和出口量。相对而言,B 类别中行业能源消耗偏大;D 类别中行业水资源消耗偏大;A 类别的行业同时存在水资源和能源消耗系数大这一问题。不难看出,中国出口商品占比较大的商品具有高水耗-高能耗的特点。因此,出口商品结构优化升级是必要的。考虑到不同类别的行业降低水-能流失的潜力不同,需要投入的技术,资金和人员支持也是不同的。优化路径大体可以分为三种,即 B→C, A→B→C, A→D→C。充分考虑地区规划期和规划目标差异,中国各省级行政区可通过协调运作差异化调整出口结构,引导当地差异化的生产和对外贸易模式,从而整体优化中国资源使用情况^[16-18]。湖北省的出口贸易长期以来一直以一般贸易为主导,科技力量不足,但随着湖北省获得的外商直接投资数额的增加,调整出口结构,转向高新技术产业和第三产业,有利于发挥行业竞争优势^[19]。对于广州而言,电子设备,电子机械和造纸和纸制品业是出口量最大的部分,水资源,能源消耗强度也较高,因此是资源管理中的重点关注部门^[20]。

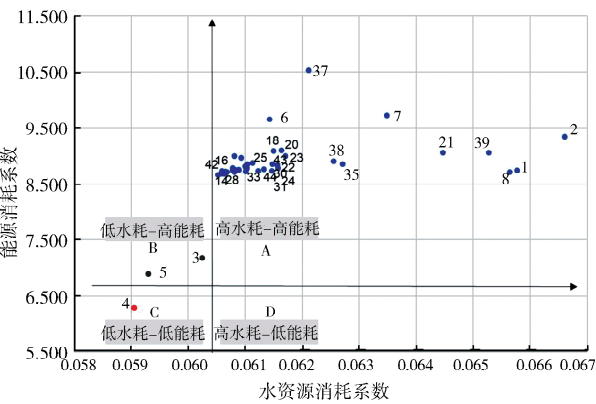


图 5 水-能完全消耗系数象限分析
Fig. 5 Quadrant analysis of water(energy) total consumption coefficient

(2) 出口量调整战略. 随着全球人口的增加, 人均可使用的自然资源逐渐减少, 为保证地球的承载力, 进行出口贸易的政策干预已经迫在眉睫^[21]. 结合上一节出口贸易变化的影响因素, 了解到出口总额和完全水资源消耗强度是影响最大的两个因素. 由近年来商品出口结构可知, 呈现

相似的商品出口额占比, 因此本文将基于 2017 年出口结构, 分别研究出口量的变动和完全水资源消耗强度变动对资源流出的影响, 基于此对未来出口贸易进行规划. 首先, 本文利用灰色预测模型预测 2018—2022 年中国行业出口贸易额, 然后基于情景分析法, 设置了不同的出口贸易发展情景, 输出不同行业的出口贸易额, 进而对资源流出的影响.

利用灰色预测模型预测 2018—2022 年中国出口额, 平均相对残差为 0.036 664, 平均级比偏差为 0.059 945, 残差和级比偏差检验的结果表明: 该灰色预测模型对原数据的拟合程度可以接受, 符合精度要求. 如果只考虑保持出口结构不变的情况下, 中国各行业在 2018—2020 年的出口量如图 6 所示, 预计 2018—2022 年水资源流出量为 9 860, 10 272, 10 529, 10 894, 11 287 万立方米; 能源流出量为 141, 147, 151, 156, 162 万吨. 图 7 展示了各行业水资源(能源)流出量随着出口总量变化而变化的趋势.

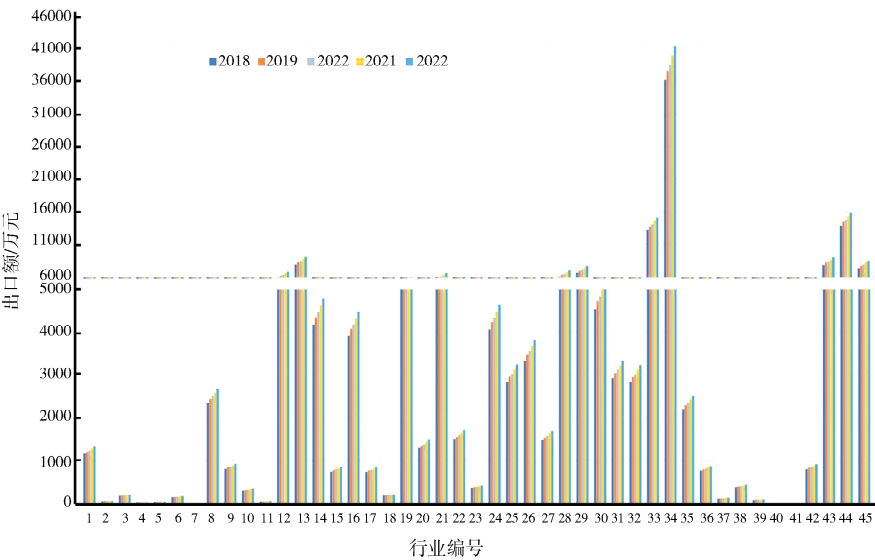


图 6 2018—2022 中国出口贸易量
Fig. 6 Optimized industrial export volume from 2018 to 2022

在本文中, 利用多目标优化模型, 得到的结果既考虑了日益增长的出口量, 也考虑了资源节约的潜力. 优化后, 2018—2022 年水资源流出量为 9680, 10 100, 10 413, 10 770, 11 154 万立方米; 能源流出量为 121, 127, 135, 139, 142 万吨. 多目标优化模型有利于减少资源流出, 说明控制水资源、能源能够缓解中国因经济发展引发的用能和用水压力, 为调整现有的出口结构提供理论参考.

(3) 资源消耗强度调整战略. 此外, 保持出口

结构, 考虑完全资源消耗系数对资源节约和资源流出风险的影响. 如果能通过引进先进技术与管理经验改变资源消耗强度, 改变资源结构, 将大幅度降低中国出口规模增大而导致的资源流失. 图 8 表明完全消耗水资源强度的变动能够有效地减少水资源流出, 且随着强度的逐渐降低, 技术优势逐渐增加, 也就是资金(管理人员)的投入存在边际效用递增的趋势, 因此提高中国各行业的资源利用效率有利于推动出口贸易^[22].

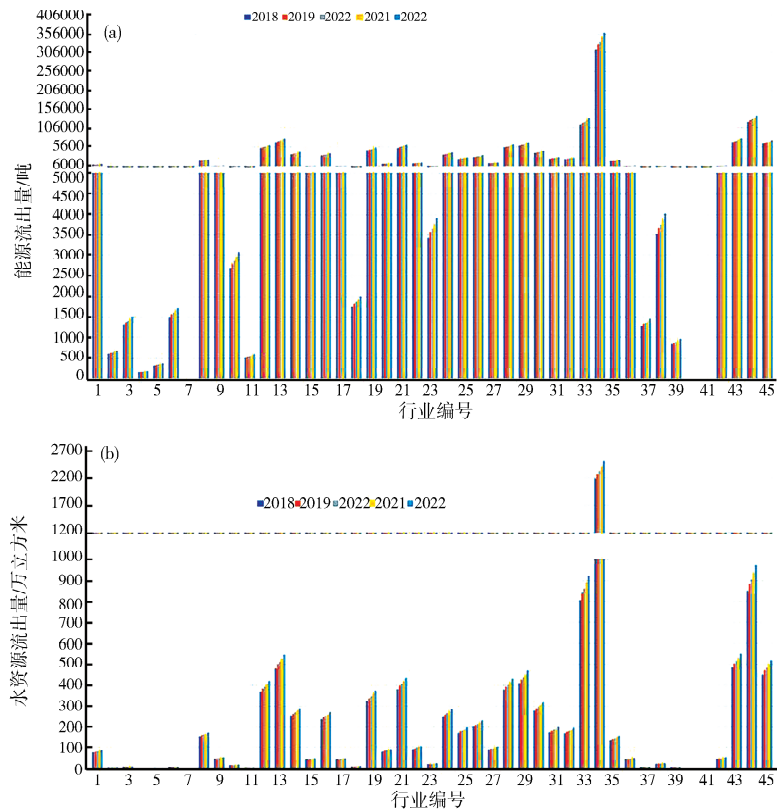


图 7 2018—2022 中国出口贸易引发的资源流出量
Fig. 7 Optimized resource outflow caused by industrial exports from 2018 to 2022

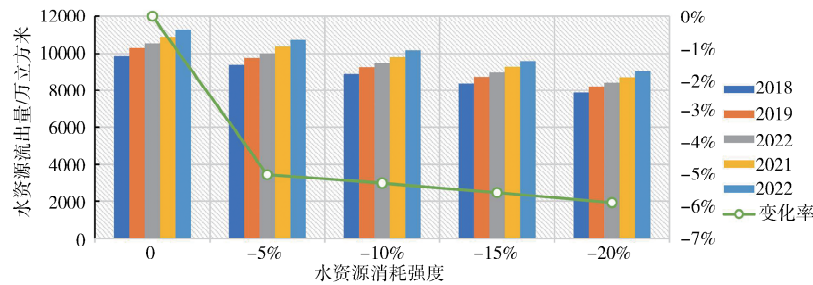


图 8 完全水资源消耗强度变化引发的资源流出量
Fig. 8 Resource outflow caused by changing the total water resource consumption intensity

4 结 论

2012—2017 年,我国出口贸易结构出现了一些新的特征和问题. 出口商品量明显增加,初级产品主要是以食物为主的零售批发品,工业主要是电子配件,也就是说出口商品类别相对集中,需要进一步优化中国出口贸易环境,结合资源禀赋和经济发展规划,改善出口商品结构. 为解决上述问题,基于中国行业投入-产出表和各行业资源利用量等数据,首先计算出口商品的完全资源消耗系数,然后依据结构分解的思想分析动态影响因素,以期设计良好的对外出口环境. 主要结论如下: (1) 2012—2017 年,中国行业能源和水资

源的完全消耗系数呈现降低趋势,为对外出口贸易提供了良好的技术支持,有利于开展各省份产品生产的科技创新,发挥行业竞争优势; (2) 通过结构分解了解到出口贸易额是导致我国资源流失的最大原因,紧接其后的是出口结构和完全消耗水资源系数,因此均衡经济发展和水和能源双向调控,科学的管理中国出口贸易额,控制出口贸易结构,降低完全水资源消耗系数是未来主要政策干预方向; (3) 从调整出口结构,出口量和完全资源消耗系数三个角度,分别模拟中国未来出口贸易情况和资源流出量. 表明从技术层面降低资源消耗系数对防止资源的流出意义重大,且具有边际效用递增的特点.

由于中国投入-产出表的制作周期是 5 年, 制作范围是全中国, 各省份行业对外贸易数据有限, 本文计算的是中国层面行业的完全消耗系数. 进一步可收集数据, 建立各省份多年行业间投入-产出表, 建立经济收益最大化, 生态破坏最小化, 资源利用效率最大化的多目标优化模型, 分析各省份某一规划年各行业生产、消费、存储和进出口结构.

参考文献:

- [1] Yang H, Zehnder A. "Virtual Water": an unfolding concept in integrated water resources management [J]. *Water Resour Res*, 2007, 41: 1.
- [2] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. *自然资源学报*, 2015, 20: 1232.
- [3] Wiedmann T, Lenzen M, Turner K, *et al.* Examining the global environmental impact of regional consumption activities——Part 2: Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade [J]. *Ecol Econ*, 2007, 61: 15.
- [4] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论方法与西北 4 省(区)虚拟水实证研究[J]. *地球科学进展*, 2004 (4): 577.
- [5] 魏怡然, 邵玲, 张宝刚, 等. 北京市虚拟水消费与贸易[J]. *自然资源学报*, 2019, 34: 1962.
- [6] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J]. *自然资源学报*, 2012, 27: 1022.
- [7] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算[J]. *生态学报*, 2018, 38: 788.
- [8] 尹显萍, 王生. 能源消费、节能潜力与中国对外贸易[J]. *经济管理*, 2011, 23: 9.
- [9] Li K, Lin B. The nonlinear impacts of industrial structure on China's energy intensity [J]. *Energy*, 2014, 69: 258.
- [10] Yu S, Zheng S, Zhang X, *et al.* Realizing China's goals on energy saving and pollution reduction: Industrial structure multi-objective optimization approach [J]. *Energy Policy*, 2018, 122: 300.
- [11] 沈利生. 我国对外贸易结构变化不利于节能降耗[J]. *管理世界*, 2007, 10: 51.
- [12] Shao L, Guan D, Wu Z, *et al.* Multi-scale input-output analysis of consumption-based water resources: method and application [J]. *J Clean Prod* 2017, 164: 338.
- [13] Hoekstra R, Van Den Bergh J C. Structural decomposition analysis of physical flows in the economy [J]. *Environ Resour Econ*, 2002, 23: 357.
- [14] Vicent A, Rosa D. Comparison of energy intensities in European Union countries. Results of a structural decomposition analysis [J]. *Energy Policy*, 2004, 32: 177.
- [15] Tian X, Sarkis J, Geng Y, *et al.* Evolution of China's water footprint and virtual water trade: a global trade assessment [J]. *Environ Int*, 2018, 121: 178.
- [16] 李旸, 陈少炜. 金砖国家碳排放、能源贸易对经济发展的影响分析[J]. *四川大学学报: 哲学社会科学版*, 2017(2): 98.
- [17] 沈国兵, 徐源喆. 疫情全球蔓延对我国进出口和全球产业链的冲击及应对举措[J]. *四川大学学报: 哲学社会科学版*, 2020(4): 75.
- [18] 张丽娟. 全球化新阶段与贸易政策新挑战[J]. *四川大学学报: 哲学社会科学版*, 2019(3): 73.
- [19] 彭红枫, 刘海莹, 肖祖沔. 基于全球价值链的中国出口国内增加值需求理论测度及特征研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40: 1557.
- [20] 洪思扬, 王红瑞, 程涛. 广东省水与能源利用效率与部门使用特征分析[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 58: 107.
- [21] Zhang C, He G, Zhang Q, *et al.* The evolution of virtual water flows in China's electricity transmission network and its driving forces [J]. *J Clean Prod*, 2020, 242: 118336.
- [22] Sun S K, Yin Y L, Wu P T, *et al.* Geographical evolution of agricultural production in China and its effects on water stress, economy, and the environment: the virtual water perspective [J]. *Water Resour Res*, 2019, 55: 4014.

引用本文格式:

中 文: 姚黎明, 徐忠雯. 基于多尺度投入-产出表的中国对外贸易产业结构调整多目标优化[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2022, 59: 057001.

英 文: Yao L M, Xu W Z. China's foreign trade industrial structure adjustment based on multi-scale input-output table and multi-objective optimization method [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2022, 59: 057001.