

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.08.010

许秀川, 王浩力, 黄庆华, 等. 长江经济带水资源承载力与产业结构转型升级的非线性因果 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(8): 111-127.

长江经济带水资源承载力与 产业结构转型升级的非线性因果

许秀川, 王浩力, 黄庆华, 蒋涵月

西南大学 经济管理学院, 重庆 400715

摘要: 推动水资源承载力和产业结构转型升级相互促进、协调发展是促进长江经济带可持续发展的重要途径。利用多空间收敛交叉映射对长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级的非线性因果关系进行实证分析, 研究发现, 产业结构转型升级与长江经济带水资源承载力存在难以脱钩的相互影响关系: 推动三大产业占比在数量上的转化能够提升长江经济带水资源承载力, 水资源承载力的提升也可以推动产业占比在数量上进一步转化; 提升各产业部门的劳动生产效率能够提升水资源承载力, 水资源承载力的约束作用能够迫使产业结构趋于合理化; 长江经济带上游地区的产业结构高度化对于水资源承载力具有较强的驱动作用, 水资源承载力的约束机制迫使中下游地区进一步推动产业结构合理化。根据分析提出如下政策建议: 一是强化源头保护与水资源管理; 二是集中规划和建设化工产业园区, 保护长江经济带优质耕地; 三是挖掘“地水关系”, 建设好黄金水岸。

关键词: 水资源承载力; 产业结构转型升级; 双向因果;

收敛交叉映射

中图分类号: F323.213

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)08-0111-17

Nonlinear Causality of Water Resources Carrying Capacity and Industrial Structure Transformation and Upgrading in the Yangtze River Economic Belt

XU Xiuchuan, WANG Haoli, HUANG Qinghua, JIANG Hanyue

School of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Promoting the mutual promotion and coordinated development of water resources carrying capacity and industrial structure transformation and upgrading is an important way to promote the sustainable

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(23BGL202); 重庆市社科规划重庆英才计划“包干制”项目(2022YC062); 重庆市社科规划追加重大项目(2024ZDZJ60); 重庆市社科规划重点项目(2024NDZD04)。

作者简介: 许秀川, 博士, 副教授, 主要从事农业产业发展、城市化与城乡差异研究。

通信作者: 黄庆华, 教授, 博士研究生导师。

development of the Yangtze River Economic Belt. This paper empirically analyzes the nonlinear causal relationship between the water resources carrying capacity and the industrial structure transformation and upgrading of the Yangtze River Economic Belt by using multi-spatial convergence and cross-mapping, and finds that there is a difficult decoupling mutual influence relationship between the transformation and upgrading of the industrial structure with the water resources carrying capacity of the Yangtze River Economic Belt. Promoting the quantitative transformation of the proportion of the three industries can improve the carrying capacity of water resources in the Yangtze River Economic Belt, and the improvement of the carrying capacity of water resources can also promote the further transformation of the proportion of the three industries in terms of quantity. At the same time, enhancing the labor efficiency across various industries can boost the carrying capacity of water resources. Moreover, the constraints imposed by the carrying capacity of water resources can compel the change of industrial structure to become more rational. The industrial structure of the upper reaches of the Yangtze River Economic Belt has a strong driving effect on the carrying capacity of water resources, and the constraint mechanism of the carrying capacity of water resources forces the middle and lower reaches of the regions to further promote the rationalization of the industrial structure. Drawing from the aforementioned analysis, this paper proposes the following policy recommendations: firstly, strengthen the source protection and water resources management. The second is to centralize the planning and construction of chemical industrial parks to protect high-quality cultivated land in the Yangtze River Economic Belt. The third is to explore the “relationship between land and water” and build a golden waterfront.

Key words: water resources carrying capacity; industrial structure transformation and upgrading; two-way causality; convergent cross mapping

水环境是社会经济体系得以存在和发展的重要基础之一,水资源承载力对地区社会经济发展具有很强的约束和推动作用。随着人口数量的持续增长和城镇化步伐的加快,中国水资源的需求日益增长,水资源短缺问题也日益凸显。当前中国水资源安全保障和社会经济发展的主要矛盾已经从单纯的水资源供应短缺转变为对水资源的过度开发利用,并制约着各地区经济和社会发展。长江经济带作为我国重要的生态功能区,拥有全国 1/3 的水资源和 3/5 的水能资源储备,具有重要的水源涵养、水土保持和生物多样性维护等功能,是我国重要的战略水源地。加快产业结构转型升级,促进新旧动能接续转换,是推动新质生产力形成的重要途径,也是实现长江经济带水资源生态保护的重要手段。系统分析长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级之间相互影响、相互驱动的因果关系,厘清水资源承载力支撑和约束社会经济发展的内在机制,对制定和完善长江经济带水资源生态保护和管理的策略,推动长江经济带高质量发展至关重要。

1 文献综述与理论分析

1.1 文献综述

水资源承载力这一概念由环境承载力衍生而来,属于自然资源承载力的一个分支^[1]。1977 年,文献[2]提出经济的持续健康发展需要全球性的资源分配制度,为水资源承载力与社会经济发展之间相互作用关系的研究奠定了基础。1992 年,文献[3]将承载力的概念引入水资源领域,引发了关于资源环境承载力研究的热潮。许多学者开始深入讨论水资源承载力问题,其研究主要集中于两个领域:一是水资源承载力的定义、评价对象、指标体系构建等概念性问题;二是运用各种模型和计量方法量化水资源承载能力^[4-5]。尽管已有研究在水资源承载力定义的表述上存在差异,但所表达的基本观点和思路是一致的,都着重强调了水资源对社会经济和生态环境的支撑能力,即水资源承载力系统应由以下 3 个主要部分构成:水资源子系统、社会经济子系统和生态环境子系统,其中社会经济子系统和生态环境子系统包括了广泛生物群体对水资源的

生存需求^[6-7]。水资源承载力研究的核心应是生命体对水资源的需求和其承担用水、污染的压力,即水资源对社会经济发展、人类和其他动植物生存的支撑能力。

推动长江经济带实现高质量发展的关键,在于加速产业结构的优化与升级,实现新旧发展动能的顺利转换。在这一过程中,产业结构的转型不仅仅是行业之间的转换,更重要的是经济增长模式的根本转变,即从粗放型增长模式转向集约型增长模式。一般来说,产业结构转型升级应包含两个方面的内容^[8]:一是产业结构的高度化,主要体现在产业转移量的增长和产业质量的飞跃,涉及到产业间比例的优化以及各产业部门劳动生产率的提升^[9];二是产业结构的合理化,表现为一个不断进步的动态过程,体现了不同产业间协作的紧密程度及其相互联系的深化,这一过程不仅反映了资源的利用效率,还反映了投入要素结构与产出结构相互匹配的程度^[10]。

当前,水资源承载力与产业结构转型升级之间的关系越来越受到学者们的广泛关注。关于水资源承载力与产业结构转型升级的研究主要集中于以下几点内容:一是产业升级对水资源承载力的驱动作用。诸多研究发现产业结构转型升级会提升区域水资源承载力^[11-12]。首先,社会经济发展、居民生活习惯改善能够促进水资源承载力的提升^[13-14]。其次,产业结构转型升级能够促进水资源的集约利用,当农业用水量和工业用水量达到顶峰时,迫使用水量的增长趋近于零,使单位 GDP 产出的用水量大幅下降,提升区域水资源承载力。二是水资源承载力对产业升级的约束和倒逼作用。水资源短缺会迫使产业结构进行优化调整,其倒逼机制的实现主要取决于推动企业、居民和农户用水观念和行为的改变。首先,水资源承载力的约束能够优化农业种植结构和水资源分配,为缺水地区和水污染地区的农业规划和水资源利用提供科学依据。其次,水资源被过度地开发利用,其承载能力下降,迫使水资源密集型产业逐步向水资源节约型产业转移,提高用水效率,既有助于改善产业结构均衡性,也有利于促进产业结构服务化,城市居民和农户的消费生产行为也更加注重水资源的高效利用,从而带动整个产业结构的调整^[15]。三是水资源承载力与产业升级的耦合协调与相互作用关系。越来越多的研究发现,产业结构转型升级和水资源利用之间存在某种内在影响机制,双向影响、密不可分,在研究中不仅考虑了单向影响,还考虑了两者的匹配度^[16]、关联性^[17]、演进过程^[18]等双向关系与优化因素,并阐明了产业间水资源配置的合理性。

近年来对水资源承载力与产业结构转型升级的研究已开始由单向影响向双向影响互进转变,旨在探讨水资源约束和产业结构演进之间的相互影响与制约关系。但是目前针对某一流域或经济圈的水资源承载力与产业结构转型升级关系的研究还较少,更加缺乏利用非线性模型去识别两者间非线性因果关系的研究。而非线性与动态性在水资源承载力和产业结构转型等复杂系统中普遍存在^[19]。

本研究先从理论上论证了二者之间非线性因果关系的存在,然后结合长江经济带 10 年的面板数据对上述因果关系进行了实证检验。主要贡献在于:一是研究视角层面,对水资源承载力与产业结构转型升级的研究从以往的单向影响向双向影响互进转变,为长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级协调发展、相互促进提供了理论依据。二是研究内容方面,证明了长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级之间非线性因果关系的存在,厘清了水资源承载力支撑和约束产业结构转型升级,产业结构转型升级驱动水资源承载力变化的内在机制,为制定和调整长江经济带产业结构政策提供了有益参考。三是研究方法方面,采用多空间收敛交叉映射、时间滞后收敛交叉映射等方法检验长江经济带水资源承载力与产业结构转型升级的非线性因果关系,对变量因果关系的分析更加准确,结果更具信服力。

1.2 理论分析

1.2.1 产业结构转型升级对水资源承载力的影响

产业结构转型升级对水资源承载力的驱动作用在不同的产业发展阶段各不相同,已有研究发现,低层次产业结构向高层次产业结构演进的过程将会对水资源承载力产生影响^[20](图 1)。一是工业化阶段前期,这一阶段,农业在三大产业中占比最高,此时农业、工业、生活用水量都较少,产业结构转型升级对于水资源承载力的影响较小。二是工业化阶段,这一阶段,产业结构占比开始沿着第一、第二、第三产业的顺序逐步转移,此时农业、工业、生活用水量大幅增加,水污染和环境破坏现象也不断增多,产业结构发展给水资源

源承载力带来了较大的负面影响,使得水资源环境的承载压力增大。三是工业化阶段后期,这一阶段,第三产业、信息化产业、智能化产业占据主导地位,由产业结构转型升级带来的技术进步和劳动生产效率提高对水资源承载力产生积极影响,农业和工业开始不断提高水资源综合利用效率,实现由更少的水资源投入产出更多的经济效益。因此在工业化阶段和工业化阶段后期推动产业结构加速转型升级被认为是保护和节约水资源的重要手段之一。

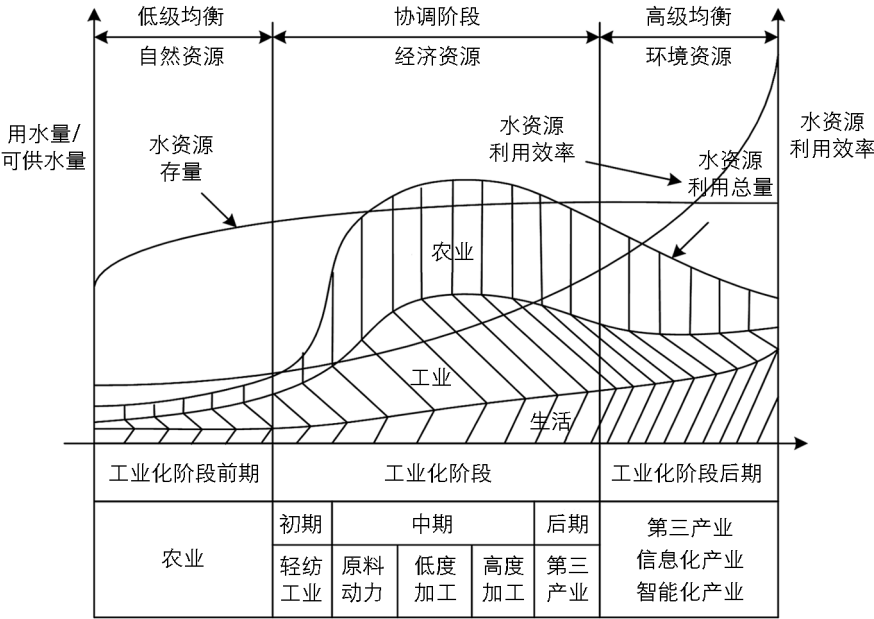


图 1 产业结构转型升级对水资源承载力的影响

1.2.2 水资源承载力对产业结构转型升级的倒逼作用

在产业结构与区域空间结构演进过程中,水资源承载力的作用和影响不可忽视。可供人类社会使用的淡水资源是一种有限资源,其承载人类活动的能力是受到约束的,而人类的社会经济活动对于水资源的需求则是无限的。不同区域的水资源禀赋和水资源开发利用能力的约束对产业结构调整形成了压力,并提出了优化升级的方向^[21]。在社会经济系统中水资源承载力对产业结构演进形成倒逼机制的实现主要取决于企业、居民和农户观念、行为的改变。可以通过阶梯用水价格、耗水总量限制等措施改变产业结构和水资源供给结构^[22]。进入工业化阶段后,水资源被过度地开发利用,其承载能力下降,迫使水资源密集型产业逐步向水资源节约型产业转型,另外城市居民和农户的消费、生产行为也更加注重水资源的高效利用,从而带动整个产业结构调整(图 2)。

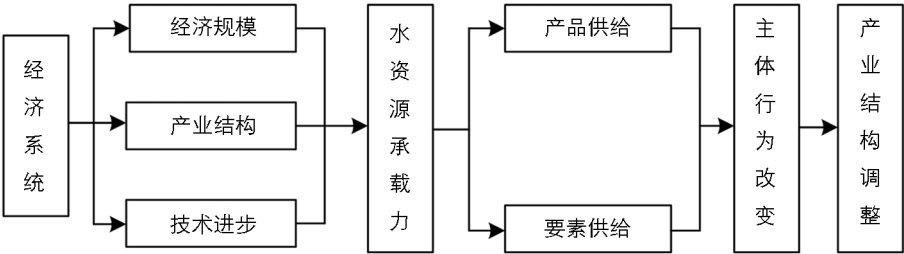


图 2 水资源承载力对产业结构转型升级的倒逼作用

1.2.3 水资源承载力与产业结构转型升级的相互作用

水资源承载力与产业结构转型升级的相互作用呈现出以下特点:一是两者之间存在复杂的非线性互动关系。由于水资源系统是一个十分复杂的不确定性系统,广泛存在着随机性、模糊性、灰色性和未确知性,水资源承载力和产业结构转型升级的相互作用在时间、空间上往往呈现出复杂的非线性关系,对于两者之间的双向驱动作用需要更加理性和深入地看待^[16]。二是两者之间的相互促进、协调发展作用。产业结构转

[illegible]

其次, 衡量产业结构高度化的质(*ais2*)。采用文献[8, 23]的方法, 将各产业对区域总产出的贡献比例

与各产业劳动生产率进行乘积加权，具体的计算公式为：

$$ais2_{i,t} = \sum_{m=1}^3 y_{i,m,t} \times lp_{i,m,t} \qquad m = 1、2、3$$

(2)

式中： $y_{i,m,t}$ 的定义同(1)式， $lp_{i,m,t}$ 表示*i* 地区第*m* 产业在*t* 时期的劳动生产率，计算公式为：

$$lp_{i,m,t} = \frac{Y_{i,m,t}}{L_{i,m,t}}$$

(3)

式中： $Y_{i,m,t}$ 表示*i* 地区第*m* 产业*t* 时期的增加值， $L_{i,m,t}$ 表示*i* 地区第*m* 产业*t* 时期的就业人数。在(2)式中产值占比 $y_{i,m,t}$ 没有量纲，为消除劳动生产率 $lp_{i,m,t}$ 的量纲，运用均值化方法对劳动生产率 $lp_{i,m,t}$ 进行处理，使计算得出的产业结构高度化的质(*ais2*)不存在量纲问题。

2) 产业结构合理化。

通过泰尔指数评估长江经济带各地级市、直辖市产业结构的合理性^[9-10]。泰尔指数的优势在于不仅能够衡量不同产业产值和就业之间的结构性差异，还能反映各产业在经济体系中的重要程度。产业结构合理化指数(*theil*)计算公式为：

$$theil_{i,t} = \sum_{m=1}^3 y_{i,m,t} \ln \frac{y_{i,m,t}}{l_{i,m,t}} \qquad m = 1、2、3$$

(4)

式中： $y_{i,m,t}$ 的定义同(1)式， $l_{i,m,t}$ 表示*i* 地区第*m* 产业在*t* 时期从业人数占总就业人数的比例。泰尔指数反映了三大产业的产值结构和人员就业结构。若 $theil_{i,t} = 0$ ，表明产业结构发展较为均衡；若 $theil_{i,t} \neq 0$ ，表明产业结构失衡，产业结构组成不合理。

2.2.2 熵权 Topsis 法

为了客观确定长江经济带水资源承载力的指标权重，按照可操作、可监测、可度量的原则尽可能地搜集长江经济带 106 个地级市、2 个直辖市的水资源数据和相关的社会经济发展数据，并采用熵权 Topsis 法计算其 2012—2021 年的水资源承载力综合评价值。

综合来看，关于水资源承载能力的评价测度，目前未能形成一个普遍接受的定义和完整的理论体系。基于此，本研究在对不同观点进行归纳总结的基础上尽可能地纳入与长江经济带水资源相关的指标，根据文献[3]提出的水资源承载力的相关概念，从水资源系统、社会经济系统、生态环境系统 3 个层面对长江经济带水资源承载力进行测度^[24]，并结合文献[17]等提出的指标体系，计算得到长江经济带每个地级市、直辖市在每一年的水资源承载力得分。得分越高，表明该地区的水资源承载能力越强，水资源的可利用程度也越接近理想状况^[17]。具体构建的指标体系见表 1。

表 1 长江经济带水资源承载力综合评价指标体系

目标层	准则层	一级指标	二级指标	指标属性
水资源承载力	水资源系统	水资源存量	年均降水量/mm	正
			年均地表水资源量/亿 m ³	正
			年均地下水资源量/亿 m ³	正
		水资源供给量	年均地表水源供水量/亿 m ³	正
			年均地下水源供水量/亿 m ³	正
			年均其他水源供水量/亿 m ³	正
		发展用水量	年均总用水量/亿 m ³	负
			年均居民生活用水量/亿 m ³	负
			年均工业用水量/亿 m ³	负
	生态环境系统	人均生态环境用水量/亿 m ³	年均农业用水量/亿 m ³	负
			年均人工生态环境用水量/亿 m ³	负
			年均生态环境用水量/亿 m ³	负

续表 1

目标层	准则层	一级指标	二级指标	指标属性
社会经济系统	社会发展	城镇化率/%		正
		第三产业比例/%		正
	经济发展	地区人均年生产总值/万元		正
		人口发展	人口密度/(万人·km ⁻²)	负
	利用效率	年均耕地灌溉用水量/(m ³ ·hm ⁻²)		负
		城镇人均生活用水量/(m ³ ·d ⁻¹)		负
		年均万元工业增加值用水量/亿 m ³		负
		年均万元 GDP 用水量/亿 m ³		负
		绿化治理	绿化覆盖面积/hm ²	正
		绿地面积/hm ²		正
生态环境系统	绿化治理	公园绿地面积/hm ²		正
		年均污水排放量/亿 m ³		负
		年均污水处理厂数量/个		正
		年均污水处理厂处理能力/亿 m ³		正

2.2.3 多空间收敛交叉映射算法

1) CCM 算法的基本思想。收敛交叉映射(CCM) 算法基于 Takens 嵌入定理，该定理指出，一个动力系统的吸引子流形可以从该系统的单一观测变量 X 中重构出来^[25]。这个重构的吸引子流形 M_X 与真实流形 M 是衍射的(具有一对一的映射)，如果两个变量 X 和 Y 属于同一个动力学系统，那么吸引子流形 M_X 和 M_Y 是同位的，在流形 M_X 上邻近的时间点也将在 M_Y 上邻近，因此，变量 Y 的当前状态可以根据 M_X 来预测。收敛交叉映射不是对称的，如果 X 单向地迫使 Y ，那么变量 Y 将包含关于 X 的信息，反之则不一定，因此， X 的状态可以从 M_Y 中预测出来，但 Y 不一定能从 M_X 中预测出来。

与常规的 Granger 线性因果检验方法不同，非线性动力学认为作为响应过程的 Y 蕴含了触发过程 X 的全部信息，通过观察响应过程 Y ，可以有效地捕捉到 X 是否对 Y 产生影响。对于时间序列变量 X 和 Y ，如果 X 是触发变量， Y 是响应变量，CCM 算法通过分析 Y 的过去状态来恢复 X 的当前状态，据此确定 X 是否是 Y 的原因。具体来说，通过单纯性投影法重建出时间序列 X 和 Y 各自的滞后坐标流形(影子流形) M_X 和 M_Y ，通过对影子流形相关系数的计算来检验影子流形 M_Y 上的点是否能够准确反映影子流形 M_X 上的点，即 X 的信息能否通过 Y 恢复，如果能，就可以认为 X 是 Y 的原因^[26]。

2) CCM 算法的核心算法。CCM 算法的核心算法先假设 n 维空间上有 d 维($d \leq n$) 随时间变化的流形 M ， $\{x\}$ 是流形 M 投影于一维空间产生的序列， $\{y\}$ 是流形 M 投影于另一个一维空间产生的相同长度的序列。对于两个长度为 L 的时间序列 $\{x[t]\}$ 和 $\{y[t]\}$ ，设重构流形的维度为 E ，采样间隔为 τ ，那么在 t 时刻重构流形的坐标分别为：

$$x(t) = \langle x[t], x[t - \tau], \cdots, x[t - (E - 1)\tau] \rangle$$

(5)

$$y(t) = \langle y[t], y[t - \tau], \cdots, y[t - (E - 1)\tau] \rangle$$

(6)

由(5)式和(6)式得到重构相空间流形 $M_x = \{x(t)\}$ 和 $M_y = \{y(t)\}$ ，根据 Takens 嵌入定理^[25]，流形 M_x 、 M_y 和 M 是微分同胚的。从流形 M_y 找到距离 $y(t)$ 最近的 $E + 1$ 个点，其对应序列 $\{x[t]\}$ 上的点 $x(t_i)$ 。定义 $\hat{x}[t] \mid M_y$ 为 M_y 的预测值，利用点 $x(t_i)$ 和以下交叉映射(7)－(9)式可以计算得到该预测值：

$$\hat{x}[t] \mid M_y = \sum w_i x(t_i) \qquad i = 1、2、\cdots、E + 1$$

(7)

$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_j} \qquad j = 1、2、\cdots、E + 1$$

(8)

$$m_i = e^{\frac{-d(y(t), y(t_i))}{d(y(t), y(t_1))}} \quad (9)$$

式中: $d(y(t), y(t_i))$ 代表流形上 $y(t)$ 和 $y(t_i)$ 之间的欧氏距离。

接下来计算 $\hat{x}[t] | M_y$ 和序列 $\{x[t]\}$ 的相关系数 r , 其计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^L (x[t] - \overline{x[t]}) (\hat{x}[i] | M_y - \overline{\hat{x}[i] | M_y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (\hat{x}[i] | M_y - \overline{\hat{x}[i] | M_y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^L (x[t] - \overline{x[t]})^2}} \quad (10)$$

式中: $\overline{\hat{x}[i] | M_y}$ 为流形 $\hat{x}[t] | M_y$ 的平均值, $\overline{x[t]}$ 为序列 $\{x[t]\}$ 的平均值。随着输入数据序列长度 L 的增加, $\hat{x}[t] | M_y$ 与序列 $\{x[t]\}$ 的相关系数 r 不断增大, 逐渐收敛于某一个值, 即相关系数 r 收敛于一个大于 0 的值, 那么就可以认为存在从 x 到 y 的因果关系^[19]。

3) 多空间 CMM 算法。文献[19]提出的 CCM 算法对时间序列的长度具有一定要求, 序列越长, 估计的效果就越好。一般情况下, 当时间序列长度大于 30 时 CCM 算法的效果较为不错。但现实中存在很多较短的时间序列, 文献[26]提出将 CCM 算法与露珠回归 (Dewdrop Regression) 法相结合, 把多个较短的时间序列拼接成一个较长的时间序列, 然后应用 CCM 算法, 采用自助法对拼接的顺序进行随机置换, 以此获得稳健的 CCM 算法估计值^[27-28]。通过模拟数据和现实数据的对比, 新的多空间 CCM 算法对时间序列长度仅为 5 的数据仍然具备很好的因果关系检验效果, 且当数据存在一定的噪音和观测误差时, 该方法仍然有效^[26]。因此, 本研究采用多空间 CCM 算法检验长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级之间的因果关系, 并将迭代次数设定为 1 000 次以保证结果的可靠性。

3 实证结果及分析

3.1 水资源承载力与产业结构转型升级的数据特征

水资源承载力和产业结构转型升级都存在非线性特征, 并且构成了弱耦合的非线性系统。一方面, 产业结构转型升级对经济增长、全要素生产率的影响呈现出明显的非线性特征, 并且和能源效率变动也具有非线性动态关系^[29]; 另一方面, 由于受到降水和地表径流的影响, 水资源承载力的变化也表现出明显的非线性特征^[30], 两者组成的系统也不例外^[31-32]。分别用产业结构高度化的量、产业结构高度化的质、产业结构合理化指数 3 个指标来表示产业结构转型升级的状况。图 4 表示的是产业结构高度化的量、产业结构高度化的质、产业结构合理化指数与水资源承载力之间的相关系数。可以看出变量之间的相关系数呈现出波动的不稳定变化, 因此水资源承载力与产业结构转型升级的非线性特征得到了证明。

关于变量数值变化和水资源承载力与产业结构转型升级的弱耦合特征分析见图 5 和图 6。借鉴文献[26]的方法将长江经济带 106 个地级市、2 个直辖市 10 年的数据进行拼接, 总共得到 1 080 个样本。将产业结构高度化的量、产业结构高度化的质、产业结构合理化指数与水资源承载力的时间序列折线图两两组合。对产业结构高度化的量平减了 1 个单位, 对产业结构高度化的质和产业结构合理化指数平减了 2 个单位以保证变量在同一个区间。图 5 中横坐标为拼接的时间序列数据库长度, 纵坐标为计算的变量值, 可以看出 3 个变量的时间序列组合之间并未显示出特别紧密的耦合性。

通过计算变量间的相关系数可以更加明确其弱耦合特征。图 6 中 3 幅图的横坐标分别为产业结构高度化的量、产业结构高度化的质、产业结构合理化指数, 纵坐标为水资源承载力。可以看出 3 幅图的相关系数集中在 -0.3 与 0.3 的弱相关区间, 且线性回归的拟合优度 R^2 较小, 表明变量间存在明显的弱耦合特征, 采用线性模型分析变量间的因果关系是不合适的^[33]。综上, 长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级表现出了明显的非线性、弱耦合数据特征, 两者构成了弱耦合的非线性系统。

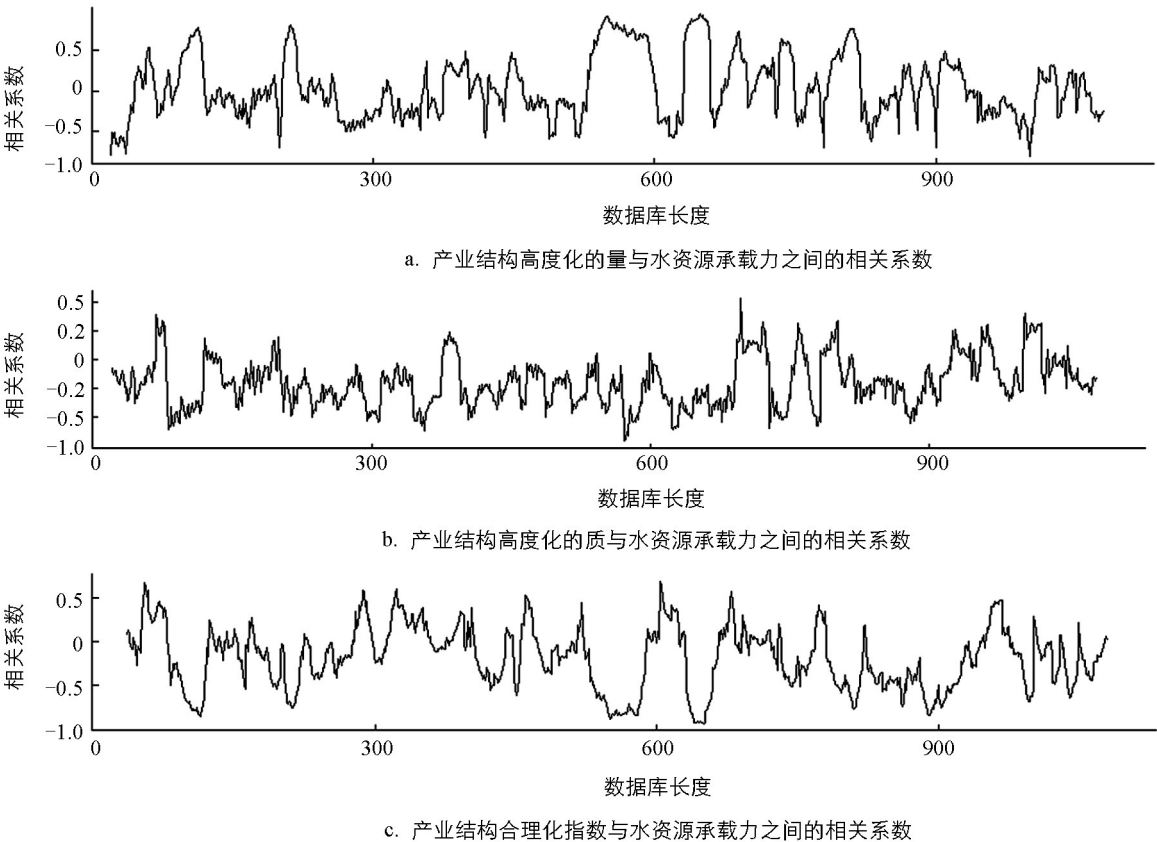


图 4 产业结构转型升级和水资源承载力的非线性特征

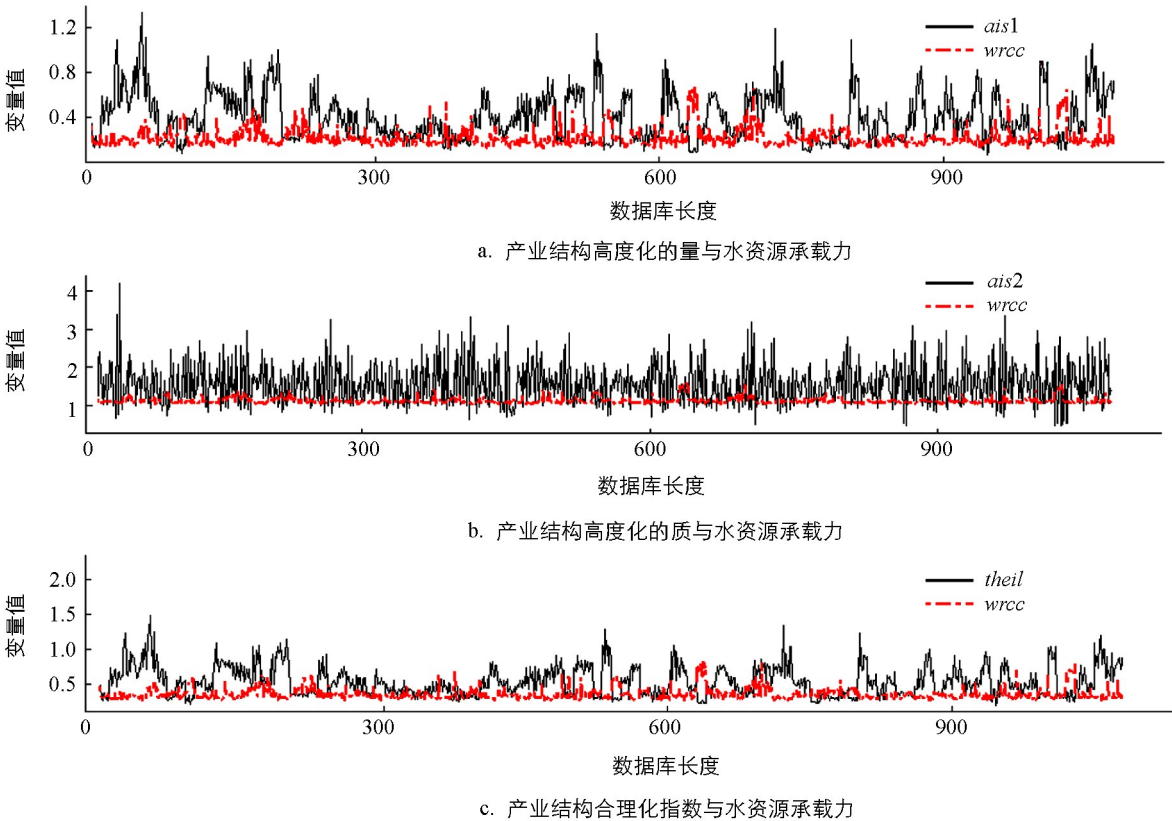


图 5 变量数值变化

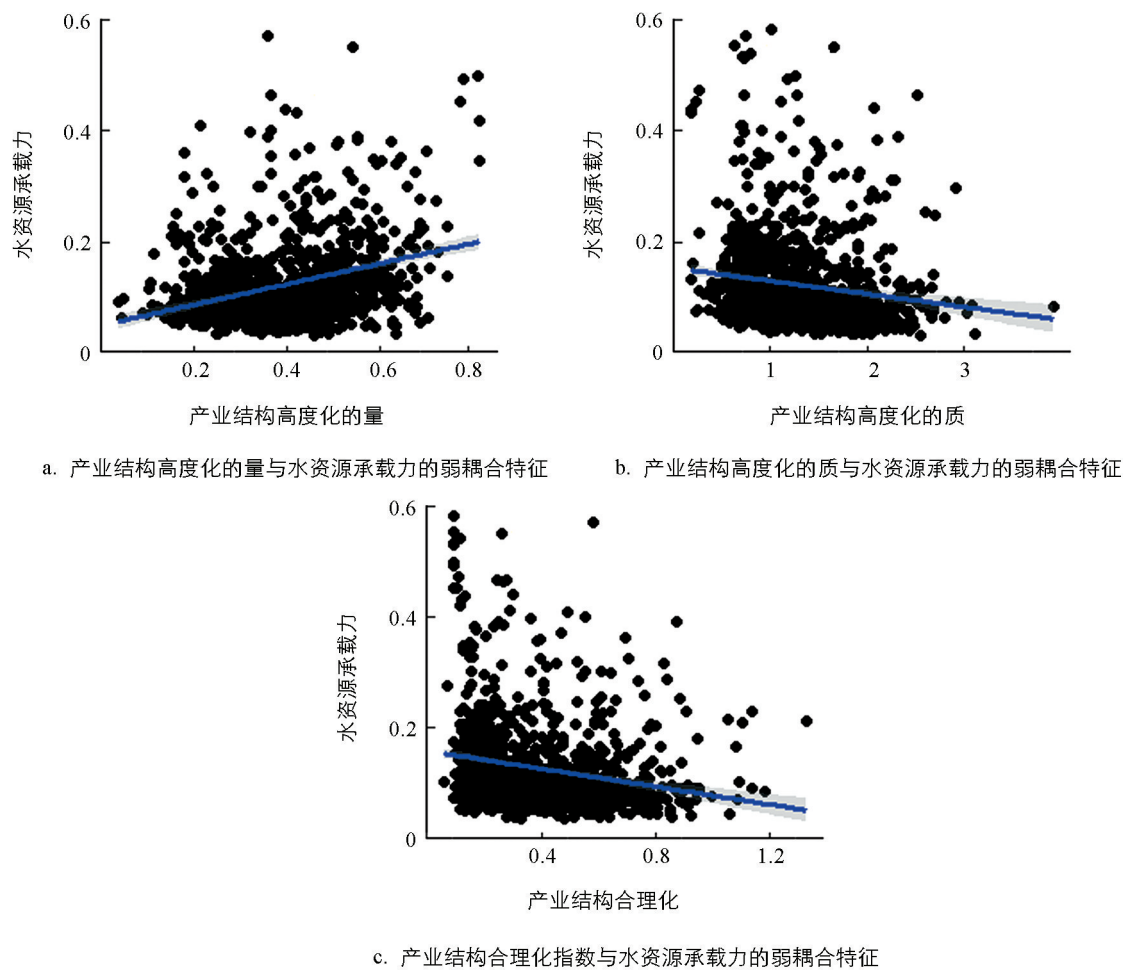


图 6 产业结构转型升级和水资源承载力的弱耦合特征

3.2 水资源承载力与产业结构转型升级的非线性因果关系检验

数据特征是方法选择的先决条件，上文的分析表明传统因果推断技术不再适用检验长江经济带水资源承载力与产业结构转型升级间的因果关系^[21]。因此本研究采用多空间 CCM 算法对水资源承载力和产业结构转型升级之间的因果关系进行识别，具体应包含 4 个步骤：

3.2.1 确定时间滞后期 τ 和最佳嵌入维度 E

在进行分析时，需要确定最佳的嵌入维度 E 和时间滞后期 τ 。确定嵌入维度时，应关注不同维度下单个变量的预测能力，即预测值与实际值之间的相关性，该能力在最佳嵌入维度下达到峰值^[21]。本研究采用的多空间 CCM 算法处理的是多个较短时间序列的组合数据，为了避免时间滞后跨越不同短序列，影子流形的值必须小于任一短序列的观测点数^[26]。鉴于本研究的时间序列数据由 10 个观测点构成，需确保所选的嵌入维度 $E \leq 10$ 。图 7 中 3 幅图的横坐标为变量嵌入维度，纵坐标为预测能力，预测能力最大值处对应的嵌入维度横坐标即为最优嵌入维度。

3.2.2 检验非线性特性和随机噪声

进行变量的非线性特性和随机噪声检验，能够确定多空间 CCM 算法在分析非线性时间序列因果关系时的适用性。虽然已有大量文献和实证研究证实了水资源承载力与产业结构转型升级的非线性特性，但在多空间 CCM 算法框架下对各个变量进行非线性检验仍是一个关键步骤。根据文献[26]的研究，非线性系统中的变量会随着时间的推移而出现不规则的波动。文献[27]指出，如果变量具有非线性特性，那么在较短的时间尺度上，通过映射得出的预测结果将比长时间尺度的预测更加精确，即随着预测时间间隔的延长，预测值与实际值之间的相关性会呈现下降趋势。本研究利用单纯性投影技术对水资源承载力和产业结构转型升级的非线性特性和随机噪声进行了检验，检验结果详见表 2 和表 3。由表 2 可知：水资源承载力、

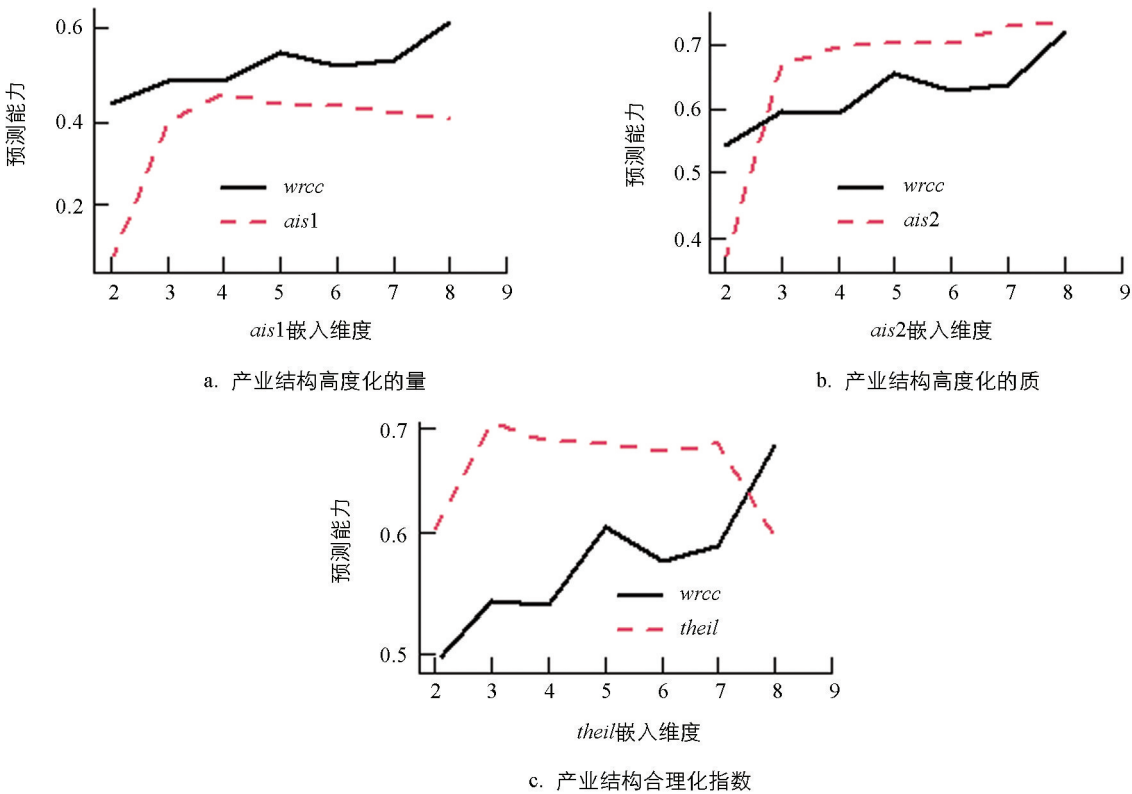


图 7 确定最佳嵌入维度

产业结构高度化的量、产业结构合理化指数的预测能力大体上随着预测步长的增加而减小；产业结构高度化的质在 15 个步长内虽未出现预测能力的明显减弱现象，但是当预测步长到达 70 个时，预测能力也开始出现下降。由表 3 可知，4 个变量的预测能力回归系数均小于 0，其中水资源承载力、产业结构合理化指数的预测能力回归系数有统计学意义，表明水资源承载力和产业结构转型升级的预测精度基本上随着预测步长的增加而下降。上述结果表明，随着预测步长的增加，水资源承载力与产业结构转型升级不是完全随机的非线性系统，可以使用多空间 CCM 算法进行因果检验^[26]。

表 2 预测能力与预测步长

预测步长	预测能力			
	水资源承载力	产业结构高度化的量	产业结构高度化的质	产业结构合理化指数
1	0.565	0.747	0.514	0.740
2	0.517	0.611	0.623	0.558
3	0.410	0.561	0.719	0.445
4	0.360	0.542	0.991	0.378
5	0.306	0.475	0.989	0.295
6	0.338	0.421	0.988	0.124
7	0.478	0.233	0.473	0.077
8	0.983	0.348	0.985	0.125
9	0.212	0.327	0.984	0.229
10	0.980	0.300	0.984	0.156
11	0.981	0.318	0.984	0.196
12	0.594	0.272	0.662	0.040
13	0.523	0.258	0.601	−0.004
14	0.415	0.217	0.703	0.031
15	0.346	0.338	0.983	−0.002

注：因篇幅限制，表 2 只展示 15 个步长的预测能力。

表 3 预测步长与预测值回归拟合指标

变量	预测能力回归系数	观测值出现的概率/%	95%置信区间
水资源承载力	-0.023***	0.000	(-0.282, 0.385)
产业结构高度化的量	-0.003	83.500	(-0.261, 0.365)
产业结构高度化的质	-0.009	35.400	(-0.306, 0.354)
产业结构合理化指数	-0.039***	0.000	(-0.075, 0.040)

注：*、**、*** 分别表示在 $p=0.1$ 、 $p=0.05$ 、 $p=0.01$ 水平有统计学意义。

3.2.3 识别变量间的因果关系

运用多空间 CCM 算法，需要观察变量的预测能力是否会随着时间序列长度 L 的增加而逐渐收敛于峰值。在时间序列长度 L 最大时，其对应的预测能力可衡量水资源承载力和产业结构转型升级之间交互关系的强度^[34]。图 8 报告了产业结构转型升级和水资源承载力之间的因果检验结果。可以看出，产业结构高度化的量与水资源承载力之间的 CCM 相关系数都随着序列长度的增加呈现收敛态势，表明产业结构高度化的量与水资源承载力之间存在双向因果关系。但产业结构高度化的质与水资源承载力只存在 $ais2$ 影响 $wrcc$ 的单向因果关系。同时，产业结构合理化指数和水资源承载力只存在 $wrcc$ 影响 $theil$ 的单向因果关系。

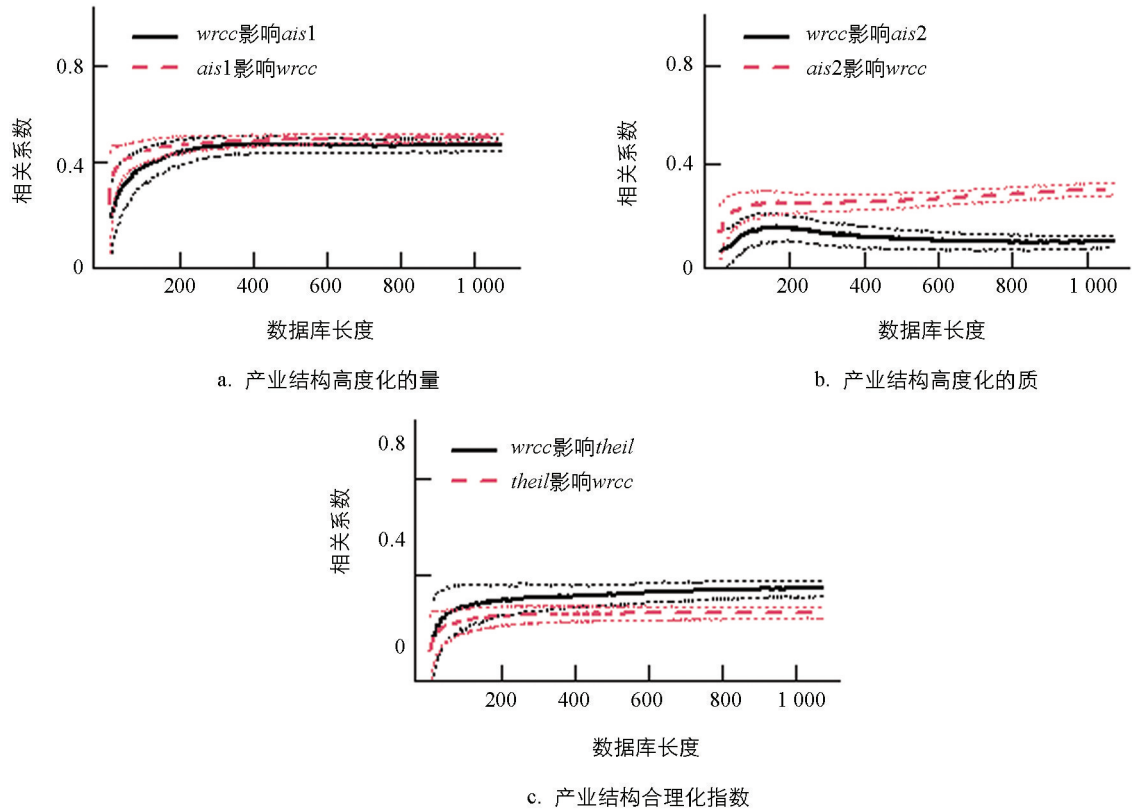


图 8 多空间 CCM 算法因果检验结果

为进一步检验水资源承载力与产业结构转型升级之间的因果关系，需要对相关系数进行检验，其检验结果见表 4，具体表现为：

1) $ais1$ 影响 $wrcc$ 的相关系数为 0.514， $wrcc$ 影响 $ais1$ 的相关系数为 0.481，两者都在 $p=0.01$ 水平有统计学意义，进一步说明产业结构高度化的量与水资源承载力之间双向因果关系的存在。具体来说，产业结构高度化的量的变化代表了三大产业间比例关系的演进过程，这一演进过程不断改变水资源在各个生产部门之间的分配和流动模式，有效减少水资源浪费、改善用水结构、提升用水效率能够增强

水资源承载的支撑能力。同时, 水资源承载力的约束机制也是推动产业结构高度化的量的提升的基本条件。一方面, 水资源承载力为产业正常生产和转型升级提供了保障; 另一方面, 产业发展的任何时期都对水资源有量的需求, 当水资源存量的短缺制约产业发展时, 高耗水产业无法生存, 水资源承载力就会倒逼产业结构做出调整。

2) *ais2* 影响 *wrcc* 的相关系数为 0.320, 反过来 *wrcc* 影响 *ais2* 的相关系数为 0.067, 小于 *ais2* 影响 *wrcc* 的相关系数, 且无统计学意义。这说明产业结构高度化的质和水资源承载力之间只存在单向因果关系。具体来说, 一方面, 产业结构高度化的质反映的是产业部门占比关系的演进和劳动生产效率提升的过程, 技术升级和产业链延伸不断对传统产业进行改造, 推动劳动生产效率较高的部门占比持续扩大, 实现用更少的水资源产出更多经济效益和维持社会运转; 另一方面, 水资源承载力对长江经济带产业结构高度化的质的驱动作用并不明显, 即水资源承载力约束的倒逼机制很难在短时间内推动高劳动生产率部门的占比扩大。在没有法律规制进行规范和经济利益驱使的情况下, 水资源短缺很难迫使企业主动放弃粗放型水资源利用生产模式, 很难推进用水效率的提高。

3) *theil* 影响 *wrcc* 的相关系数为 0.272, *wrcc* 影响 *theil* 的相关系数为 0.349, 后者在 $p=0.01$ 水平有统计学意义。这说明产业结构合理化指数和水资源承载力之间只存在单向因果关系, 即水资源承载力变化是驱动产业结构合理化的原因。具体来说, 水资源承载力的约束机制将驱动长江经济带三大产业的产值结构及人员就业结构的变化, 促进产业技术结构变动, 优化产业内部水资源的组合方式和转换关系, 迫使产业之间不断加强协调能力和提高关联水平, 推动产业结构合理化。但是产业结构合理化对于提升水资源承载力的作用较为有限, 即产业产值与就业比例是否均衡很难在短时间实际作用于水资源的开发利用和保护。即使产业产值的合理分配有利于水资源利用效率的提升, 但是同产业直接减少用水和节水技术进步这些方面对水资源承载力的作用相比, 其作用较为有限。

表 4 相关系数及显著性检验

因果方向	系数	因果方向	系数
<i>ais1</i> 影响 <i>wrcc</i>	0.514***	<i>wrcc</i> 影响 <i>ais1</i>	0.481***
<i>ais2</i> 影响 <i>wrcc</i>	0.320***	<i>wrcc</i> 影响 <i>ais2</i>	0.067
<i>theil</i> 影响 <i>wrcc</i>	0.272	<i>wrcc</i> 影响 <i>theil</i>	0.349*

注: 迭代次数为 1 000 次, *, **, *** 分别表示在 $p=0.1$ 、 $p=0.05$ 、 $p=0.01$ 水平有统计学意义。

3.2.4 检验基于时间滞后 CCM 算法的稳健性

尽管通过多空间 CCM 算法对水资源承载力与产业结构转型升级之间的相互因果关系进行了检验, 但多空间 CCM 算法存在强单向驱动造成的“同步”现象, 使得多空间 CCM 算法无法准确识别双向因果关系。文献[27]曾观察到异常强烈的单向因果关系会导致一种“同步”现象, 此时响应变量 *Y* 的状态由驱动变量 *X* 的状态控制, 整个系统“坍塌”到受驱动变量 *X* 控制, 尽管 *Y* 对 *X* 没有因果影响, 但仍可以通过 *Y* 的信息得到 *X* 的信息, 在两个方向上都出现交叉收敛现象^[35]。因此, 采用文献[36]提出的扩展 CCM 算法, 通过设置不同时间延迟, 根据最佳预测能力确定驱动变量是否对响应变量存在时间延迟, 借此增强对驱动变量与响应变量之间直接因果和间接因果关系识别的可靠性。

图 9 中 3 幅图的横坐标都为收敛交叉映射的滞后阶数, 纵坐标为预测能力。可以看出: 产业结构高度化的量和水资源承载力均在 *ais1* 影响 *wrcc* 和 *wrcc* 影响 *ais1* 的方向上检测到负的时间滞后; 产业结构高度化的质和水资源承载力只在 *ais2* 影响 *wrcc* 的方向上检测到负的时间滞后; 产业结构合理化指数和水资源承载力只在 *theil* 影响 *wrcc* 的方向上检测到负的时间滞后。这表明基于时间滞后 CCM 算法的稳健性检验同多空间 CCM 算法因果关系检验结果保持一致, 本文的研究结论是基本可靠的。

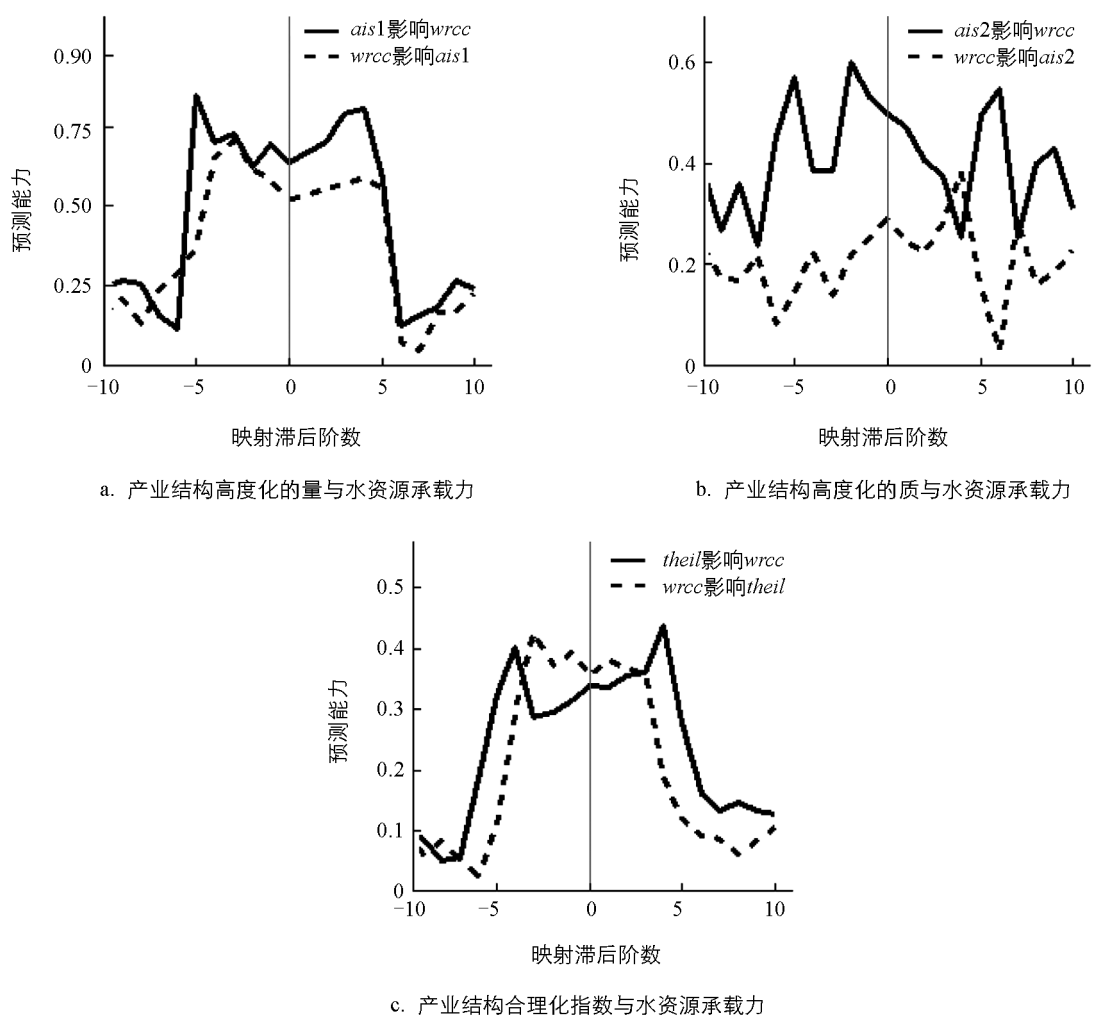


图 9 扩展 CCM 算法因果检验结果

4 异质性分析

水资源承载能力具有时间和空间属性，时空层面的差异会导致产业结构转型升级和水资源承载力的相互影响发生变化，探究产业结构转型升级和水资源承载力的双向因果关系需要在不同时间、空间层面上进行^[37]。将长江经济带分为上游、中游、下游 3 个区域，分别考察产业结构转型升级和水资源承载力在上游、中游、下游 3 个不同的区域是否存在因果关系^[38]。

从表 5 可以看出产业结构转型升级和水资源承载力的相互影响程度在上游、中游、下游各不相同。在上游区域，产业结构高度化的量、产业结构高度化的质分别和水资源承载力存在 *ais1* 影响 *wrcc* 和 *ais2* 影响 *wrcc* 方向上的因果关系，产业结构合理化指数和水资源承载力则存在 *wrcc* 影响 *theil* 方向上的因果关系；在中游区域，只存在产业结构合理化指数和水资源承载力之间的双向因果关系；在下游区域，产业结构高度化的质、产业结构合理化指数分别和水资源承载力存在 *wrcc* 影响 *ais1* 和 *wrcc* 影响 *ais2* 方向上的因果关系。

具体来看，上游区域的产业结构高度化对于水资源承载力具有较强的驱动力，究其原因可能是由于上游区域的产业结构发展水平较为滞后且水资源生态环境较好。根据边际效用递减原理，在产业发展水平滞后时推动产业结构高度化，提升三大产业的用水效率可以很大程度地提升上游的水资源承载力。同时上游区域水资源承载力约束机制能够倒逼上游区域改善原先的产业结构，推动产业结构合理化。从中游区域来看，并未检验出中游区域产业结构高度化和水资源承载力的因果关系，究其原因可能是中游区域的产业结

构发展水平高于上游区域,但中游区域环境污染问题较上游区域更为突出,其产业结构和空间布局不尽合理,通过产业结构高度化推动水资源承载力水平提升的作用较小,反而是水资源承载力约束机制迫使中游区域需要改善产业结构比例,推进产业结构合理化。从下游区域来看,水资源承载力约束能够驱动下游区域产业结构高度化和产业结构合理化,究其原因可能是下游区域的产业结构高度化水平已经较高,根据边际效用递减原理,较高的产业结构高度化水平对于水资源承载力的驱动作用已经较小,但是下游区域的水污染和水质性缺水问题较上游区域更为严重,造成下游区域水资源承载能力持续下降,水资源承载力约束机制迫使下游区域需要进一步推动产业结构合理化。

表 5 水资源承载力与产业结构转型升级间相关系数及显著性检验

区域	因果方向	系数	因果方向	系数
上游	$ais1$ 影响 $wrcc$	0.659**	$wrcc$ 影响 $ais1$	0.602
	$ais2$ 影响 $wrcc$	0.321**	$wrcc$ 影响 $ais2$	0.092
	$theil$ 影响 $wrcc$	0.495	$wrcc$ 影响 $theil$	0.617***
中游	$ais1$ 影响 $wrcc$	0.494	$wrcc$ 影响 $ais1$	0.514
	$ais2$ 影响 $wrcc$	0.209	$wrcc$ 影响 $ais2$	0.349
	$theil$ 影响 $wrcc$	0.262***	$wrcc$ 影响 $theil$	0.453**
下游	$ais1$ 影响 $wrcc$	0.466	$wrcc$ 影响 $ais1$	0.457**
	$ais2$ 影响 $wrcc$	-0.022	$wrcc$ 影响 $ais2$	-0.001
	$theil$ 影响 $wrcc$	0.177	$wrcc$ 影响 $theil$	0.513***

注:迭代次数为 1 000 次,*、**、*** 分别表示在 $p=0.1$ 、 $p=0.05$ 、 $p=0.01$ 水平有统计学意义。

5 结论与政策启示

5.1 研究结论

本研究系统分析了长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级之间的非线性因果关系,厘清了水资源承载力支撑和约束经济社会发展的内在机制,对于制定和完善长江经济带水资源生态保护和管 理策略,推动长江经济带高质量发展至关重要。基于此,本研究采用多空间收敛交叉映射算法识别长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级之间的非线性因果关系,研究结果表明:

- 1) 产业结构转型升级与长江经济带水资源承载力存在难以脱钩的相互影响关系。首先,推动三大产业结构占比由“二一三”向“二三一”,再向“三二一”的演变能够提升水资源承载力,水资源承载力的提升也可以反过来推动三大产业占比在数量上进一步转化。其次,提升各产业部门的劳动生产效率能够提升水资源承载力,水资源承载力的约束机制能够迫使产业结构趋于合理化。
- 2) 产业结构转型升级和水资源承载力的相互影响在长江经济带上游、中游、下游区域各不相同。上游区域的产业结构高度化对于水资源承载力具有较强的驱动力。水资源承载力的约束机制迫使中、下游区域需要进一步推动产业结构合理化。
- 3) 长江经济带水资源承载力和产业结构转型升级之间存在明显的双向因果关系,但是水资源承载力和产业结构高度化的质、产业结构高度化的量和产业结构合理化指数之间的交互影响各不相同,并且在不同流域、不同发展阶段其交互影响也各不相同。调整长江经济带产业结构政策,制定和完善长江经济带水资源生态保护和管 理策略更应该因地制宜,精准施策。

5.2 政策启示

- 1) 强化源头保护与水资源管理。首先,优先加强水源地的保护和上游区域的水源涵养工作。对上游沿岸的开发活动和滨江污染产业布局进行限制,大力发展旅游、康养、度假等生产性服务产业,开展清水入

江和清洁流域项目,以提升水质。其次,强化中游区域水资源调控,对中游区域的干流和支流进行水量调配,明确河、湖保护的界限,加强水库群的统一管理和调度,合理调整江、湖间的相互关系,确保中游区域的水安全。再次,强化下游区域水环境保护与生态优化,注重下游区域水环境的保护与改善,强化生态导向的国土开发,优化开发模式,促进产业升级。总之应高度重视调整全流域河、湖水系结构,有效提升全流域水环境质量,减少中、下游区域河流、湖泊富营养化现象。

2) 集中规划和建设化工产业园区,保护长江经济带优质耕地。首先,制定严格的土地污染排放控制政策并列出明晰的产业发展禁止清单,把园区的生态建设和企业生产过程的清洁化作为治理工作的重点,从而促进工业发展模式从资源消耗型、分散型、低附加值型向生态友好型、集聚型、高附加值型转变。其次,采取严格的基本农田划定和保护措施,运用行政、法律、经济和技术等多元化手段,加强监管,确保基本农田在质量、数量和生态方面的全面保护。再次,应与生态保护相结合,积极推动长江经济带农业产业结构的优化调整,以增强耕地保护的内在动力和可持续性。

3) 挖掘“地水关系”,建设黄金水岸。首先,进一步限制各地政府压低工业用地价格、扩大工业产业用地投放规模的行为。防止各地相互恶性竞争,造成大量港口重复建设、产业结构雷同的状况,进一步优化资源配置,提高长江经济带整体的水资源生态环境水平。其次,在产业发展方面,聚集创新创业,以江河兴城,根据上、中、下游区域的水资源承载力特征,打造适合区域自身发展要求的集文化、休闲、商业、生态等功能价值于一体的黄金水岸。

参考文献:

- [1] 左其亭,张培娟,马军霞. 水资源承载力计算模型及关键问题 [J]. 水利水电技术, 2004, 35(2): 5-8, 11, 94.
- [2] MESAROVIC M, PESTEL E, MIHRAM G A. Mankind at the Turning Point [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1977, 7(1): 73-74.
- [3] 施雅风,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] 刘玘玘. 基于熵权 TOPSIS-耦合协调度-灰色关联度的长江经济带水资源承载力综合评价 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5): 532-541.
- [5] 鲁学仁. 华北暨胶东地区水资源研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [6] 刘燕华,葛全胜,张雪芹. 关于中国全球环境变化人文因素研究发展方向的思考 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 889-895.
- [7] FANG L B, CAI J D. Reliability Assessment of Microgrid Using Sequential Monte Carlo Simulation [J]. 电子科技学刊, 2011, 9(1): 31-34.
- [8] 袁航,朱承亮. 国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗 [J]. 中国工业经济, 2018(8): 60-77.
- [9] 干春晖,郑若谷,余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响 [J]. 经济研究, 2011, 46(5): 4-16, 31.
- [10] 钞小静,任保平. 中国经济增长质量的时序变化与地区差异分析 [J]. 经济研究, 2011, 46(4): 26-40.
- [11] 王文彬,王延荣,许冉. 水资源约束下黄河流域产业结构变迁规律及其影响因素 [J]. 工业技术经济, 2020, 39(6): 138-145.
- [12] 章恒全,陈诗情,张陈俊,等. 长江经济带水资源利用效率与产业结构的耦合协调评价与分析 [J]. 水利经济, 2022, 40(5): 1-7.
- [13] 赵蕊. 水资源短缺对区域产业结构优化影响: 以榆林市为例 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 333-335.
- [14] 范英英,刘永,郭怀成,等. 北京市水资源政策对水资源承载力的影响研究 [J]. 资源科学, 2005, 27(5): 113-119.
- [15] 赵娟,史文兵,穆兴民. 基于 DEMATEL 方法的水资源承载力影响因素分析 [J]. 生态经济, 2015, 31(9): 166-169.
- [16] 张丽娜,徐洁,庞庆华,等. 水资源与产业结构高级化的适配度时空差异及动态演变 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(8): 2113-2124.
- [17] 何伟,陈素雪,仇沪毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1208-1219.
- [18] 蒋桂芹,赵勇,于福亮. 水资源与产业结构演进互动关系 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 139-142, 182.

[19] SUGIHARA G, MAY R, YE H, et al. Detecting Causality in Complex Ecosystems [J]. Science, 2012, 338(6106): 496-500.

[20] 王海英, 董锁成, 尤飞. 黄河沿岸地带水资源约束下的产业结构优化与调整研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(2): 82-86.

[21] 苏伟洲, 王成章, 杜念霜. 水资源与产业结构关系及产业结构调整倒逼机制研究 [J]. 科技进步与对策, 2015, 32(6): 80-84.

[22] 宋先松. 黑河流域水资源约束下的产业结构调整研究——以张掖市为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 81-84.

[23] 刘伟, 张辉, 黄泽华. 中国产业结构高度与工业化进程和地区差异的考察 [J]. 经济学动态, 2008(11): 4-8.

[24] 魏文侠, 程言君, 王洁, 等. 造纸工业资源环境承载力评价指标体系探析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(S1): 338-340.

[25] TAKENS F. Detecting Strange Attractors in Turbulence [C] // Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981: 366-381.

[26] CLARK T, YE H, ISBELL F, et al. Spatial Convergent Cross Mapping to Detect Causal Relationships from Short Time Series [J]. Ecology, 2015, 96(5): 1174-1181.

[27] SUGIHARA G, MAY R M. Nonlinear Forecasting as A Way of Distinguishing Chaos from Measurement Error in Time Series [J]. Nature, 1990, 344(6268): 734-741.

[28] YE H, BEAMISH R J, GLASER S M, et al. Equation-Free Mechanistic Ecosystem Forecasting Using Empirical Dynamic Modeling [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(13): E1569-E1576.

[29] YE H, DEYLE E R, GILARRANZ L J, et al. Distinguishing Time-Delayed Causal Interactions Using Convergent Cross Mapping [J]. Scientific Reports, 2015(5): 14750.

[30] 刘志彪, 凌永辉. 结构转换、全要素生产率与高质量发展 [J]. 管理世界, 2020, 36(7): 15-29.

[31] 徐志, 马静, 王浩, 等. 长江口影响水资源承载力关键指标与临界条件 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(5): 364-372.

[32] 李令跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系 [J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 307-313.

[33] KANTZ H, SCHREIBER T. Nonlinear Time Series Analysis [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2003.

[34] 刘华军, 雷名雨. 交通拥堵与雾霾污染的因果关系——基于收敛交叉映射技术的经验研究 [J]. 统计研究, 2019, 36(10): 43-57.

[35] VAN NES E H, SCHEFFER M, BROVKIN V, et al. Causal Feedbacks in Climate Change [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 445-448.

[36] GAO B B, YANG J Y, CHEN Z Y, et al. Causal Inference from Cross-Sectional Earth System Data with Geographical Convergent Cross Mapping [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5875.

[37] 胡江峰, 黄庆华. 中国农业低碳转型及驱动因素: 基于空间面板模型的实证检验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 134-153.

[38] 许秀川, 吴朋雁. 磷化工产业绿色发展背景下地方政府和企业的演化博弈——贵州省“以渣定产”政策经验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 152-163.

责任编辑 廖坤
崔玉洁

