

区域粮食虚拟水流动经济社会影响效应分析

佟佳骏^{1,2} 孙世坤^{1,2} 马佳乐^{1,2} 阴亚丽^{1,2} 王玉宝^{1,2} 沈欣³ 许纪元³

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要: 虚拟水流动是水资源在空间上再分配的一种重要表现形式,作为虚拟水的载体,粮食贸易运输过程中伴随着虚拟水的流动。中国人口和资源与粮食生产呈现明显的空间错位,虚拟水流动格局、水土资源分布、经济社会发展情况的空间匹配度较差。在现阶段虚拟水-实体水耦合分析探究粮食虚拟水流动资源环境效应的基础上,增添其对经济社会的影响效应分析,可以进一步优化资源调配,促进区域可持续发展。本研究以中国大陆31省份为研究区,以省级行政区划为研究单元,分析了1997—2021年间粮食虚拟水流动的时空演变格局;通过空间聚类分析以及虚拟水-经济社会化数据耦合分析明确了粮食虚拟水调运的空间聚类情况,解析了主要输入和输出省份粮食虚拟水的调运量与经济社会发展的相关关系;选取9个主要经济社会影响因子,将灰色关联度和集对分析方法结合探讨了经济社会影响因子对粮食虚拟水流动影响效应的空间差异。结果表明:粮食虚拟水流动总体呈现从“缺水”的北方流向“富水”的东南区域,从经济欠发达地区流向经济发达地区的趋势,且经济社会系统在一定程度上影响了粮食虚拟水的流动。根据经济社会因子对不同省份粮食虚拟水流动的影响效应,将各省份粮食虚拟水流动的经济社会关联类型划分为产业关联型、社会关联型和资源关联型。综上,促进区域间协调发展与产业结构优化将是解决我国粮食虚拟水流动伴生的自然环境与经济社会负反馈效应的重要解决途径。

关键词: 粮食虚拟水流动; 区域社会经济差异; 灰色关联度分析; 集对分析; 影响效应分析

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0345-12

OSID:



Analysis of Socio-economic Driving Effect of Regional Grain Virtual Water Flow

TONG Jiajun^{1,2} SUN Shikun^{1,2} MA Jiale^{1,2} YIN Yali^{1,2} WANG Yubao^{1,2} SHEN Xin³ XU Jiyuan³

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: Virtual water flow is an important manifestation of spatial redistribution of water resources. As a carrier of virtual water, grain trade and transportation involve virtual water flow. China's population and resources show obvious spatial dislocation with food production, and the spatial matching degree of virtual water flow pattern, distribution of land and water resources, and economic and social development is poor. Based on exploring the resource and environment effect of virtual water flow in the current stage, adding the impact effect analysis on economy and society can further optimize resource allocation and promote regional sustainable development. The spatiotemporal evolution pattern of virtual water flow in 31 provinces of China from 1997 to 2021 was analyzed. Spacetime clustering analysis and coupled analysis of virtual water-economic and social data clarified the existence of significant spatial clustering of grain virtual water transportation. The amount of virtual water transportation in the main input and output

收稿日期: 2023-11-05 修回日期: 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979230, 52122903)、博士后创新人才支持计划项目(BX20220255)和博士后科学基金面上项目(2022M712605)

作者简介: 佟佳骏(1998—),男,硕士生,主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: jjtong@nwafu.edu.cn

通信作者: 阴亚丽(1992—),女,博士后,主要从事农业水土资源利用与保护研究, E-mail: yaliyin@nwafu.edu.cn

provinces of food virtual water showed a significant positive correlation with the economic and social development level. Based on this background, totally nine major economic and social impact factors were selected and their spatial differences in influencing food virtual water flow were explored. The types of impact effect on food virtual water flow in 31 provinces of China were classified into industrial correlation type, social correlation type, and resource correlation type. Relevant regulatory strategies were proposed according to the economic development level, natural resource endowment, and industrial structure development of each province to weaken or even avoid the negative impact of virtual water flow on the regional economic and social development and natural environment. The results showed that the overall virtual water flow presented a trend of flowing from “deficient” northern regions to “rich” southern regions, and from economic backward areas to economic developed areas. The economic and social system to some extent influenced the virtual water flow. According to the impact effect of economic and social factors on food virtual water flow in different provinces, the industrial, social, and resource correlation types of food virtual water flow in each province were classified into industrial correlation type, social correlation type, and resource correlation type. In summary, promoting regional coordinated development and optimizing industrial structure would be an important solution to address the negative feedback effects of food virtual water flow in China caused by environmental and economic factors.

Key words: grain virtual water flow; regional socio-economic differences; grey correlation analysis; set pair analysis; influence effect analysis

0 引言

英国学者 ALLAN^[1]于 2003 年首次提出了虚拟水的概念,指在生产产品和服务所需要的水资源数量,即凝结在产品和服务中的水资源量。自虚拟水概念提出以来,国内外学者开展了大量研究。HOEKSTRA^[2]最先提出粮食作物虚拟水调运的核算方法,计算粮食作物虚拟水调运量的关键是计算虚拟水含量的理论。随后的研究进一步提出了产品加权计算价值因子的方法和区域投入产出模型法等计算粮食、动物及其产品的虚拟水核算方法,进一步完善了虚拟水调运计算理论^[3-4]。虚拟水基本理论、计量方法和评价体系在国内外迅速发展,逐步建立了一套全新的经济社会水资源管理理论体系,成为研究水资源与经济社会发展相关性的重要方法^[5]。ZHANG 等^[6]从农产品虚拟水流动的新视角来理解一带一路,考虑了 2001—2015 年的农产品贸易,研究结果表明,中国与一带一路周边国家存在虚拟水的“贸易顺差”。HOEKSTRA 等^[7]研究了 1995—1999 年 100 多个国家和地区的食品和动物产品贸易中涉及的虚拟水流量,发现 13% 的全球农业水以虚拟水资源的形式在国家和地区之间流动。LIU 等^[8]认为在小范围和局部范围内实施虚拟水调运政策可能有助于缓解水资源短缺和改善地方水资源管理。虚拟水概念的提出对全球贸易政策等产生了重大影响,促使人们改进水资源政策和水资源管理方式,极大地提高了水资源利用率^[9]。

改革开放以来,我国东南沿海地区经济快速发展并逐步转型,我国粮食生产重心逐渐由江浙一带

向经济欠发达且水资源禀赋较差的中西部和北方省份转移,并在 20 世纪末完成了由“南粮北运”到“北粮南运”的转变^[10]。伴随着粮食的区域间贸易,蕴含在其中的粮食虚拟水也完成了其在空间上的再分配过程^[11]。研究表明我国粮食虚拟水流动模式呈现从北方(严重缺水)流向南方(水资源丰富)的模式^[12]。通过 2007 年和 2030 年中国各省粮食虚拟水流动关系图,分析粮食虚拟水流动模式变化后虚拟水输出地区的实体水-虚拟水对水资源压力的影响,发现东北地区和黄淮海地区是我国农业虚拟水的主要输出区域,虚拟水流动改变了水资源的原始分布,对输入和输出区域的水资源都有显著影响^[13]。当前许多研究对国内粮食虚拟水流动进行了量化,并对其影响效应进行了评估^[14-15],主要聚焦在粮食虚拟水流动区域水资源与环境的耦合分析与评价。在生产侧通过粮食生产布局与种植结构优化调整等方面实现粮食虚拟水流动调控的理论日趋完善,但粮食虚拟水与经济社会系统的耦合关系还有待于进一步探明。中国的人口分布与粮食生产呈现明显的空间错位,虚拟水流动格局与水资源分布不匹配,区域间粮食虚拟水流动缓解了粮食输入区的水资源压力,促进了输入区的经济社会发展,同时也增加了粮食虚拟水输出区的水资源和生态压力,在一定程度上制约了输出区的经济社会发展^[16]。粮食虚拟水流动对于国家粮食安全与绿色发展至关重要,理解区域粮食虚拟水流动对环境、资源和社会发展的影响是可持续性的关键因素^[17]。为此,必须明确中国粮食虚拟水流动模式,深入研究区域主要经济社会发展因子对粮食虚拟水影响效应的空

间分布特征,分析区域虚拟水流动机制,以期为优化产业结构、确定虚拟水战略、合理调控水资源空间分配提供科学合理的建议^[18]。

目前常用的影响效应分析方法有主成分分析法^[19-20]、相关分析法^[21]、灰色关联度分析法等^[22-23]。主成分分析作为一种线性方法,对于非线性数据的处理效果不佳,且对于异常值过于敏感,而粮食虚拟水与经济社会数据可能受政策调控的影响,在特殊年份存在异常数据;相关分析受到样本大小和样本选择的影响较大,研究样本为中国大陆 31 省份 25 年的数据,作为相关分析的样本还存在一定的局限性;灰色关联度分析可以很好地克服以上两种方法的缺点,但在因子间差异比较上还存在一定缺陷。本文引入可以将确定的数学计算与不确定性系统分析有机结合的集对分析法,基于集对分析“同、异、反”基本理论将粮食虚拟水与经济社会影响因子间关联度放大,进一步识别影响粮食虚拟水流动的主要经济社会要素。以中国大陆 31 省份 1997—2021 年数据为例,通过聚类分析明确中国粮食虚拟水流动模式,采用灰色关联度和集对分析结合的方法量化主要经济影响因子与粮食虚拟水流动之间的关联程度,分析区域虚拟水流动机制,识别不同区域粮食虚拟水流动的主要经济社会影响要素,为国家经济产业结构调整、农业和生态水安全保障、水资源调控模式优化等提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

以中国大陆 31 省份为研究区域,探究中国区域社会经济发展对粮食虚拟水流动的影响效应。中国南北方地区粮食产量总体上稳步增长,但南方各省份增速明显低于北方,自 2004 年起北方粮食总产量超过南方,并逐步拉开南北方粮食产量差距(图 1,图中 2 条直线指示 2004 年南北方粮食产量)。自改革开放以来,由于政策导向与区位优势,中国东南部沿海地区经济蓬勃发展,伴随着经济社会的高速发展,该区域产业结构也有了明显调整,第一产业急剧收缩,第二产业、第三产业产值在地区 GDP 中所占比例逐渐提升,并在特定时期先后成为该地区的支柱产业^[24],人口也随之迅速增加,水资源丰富的广东、浙江、福建、上海等地逐步成为主要的粮食输入区。而经济发展相对滞后的中西部地区和水资源稀缺的华北平原、黄淮海地区、东北平原地区成为粮食主要输出区,其中黑龙江、吉林、内蒙古、河南长期持续输出大量粮食,逐渐形成了“北粮南运”的粮食调运格局,随之

也形成了粮食虚拟水的“北水南调”局面。

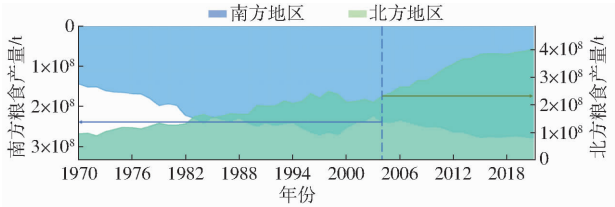


图 1 1970—2021 年中国南北方地区粮食产量

Fig. 1 Grain yield in northern and southern China during 1970—2021

1.2 数据来源

本文的粮食是谷物、豆类和薯类的统称。粮食生产水足迹数据参照 SUN 等^[25]量化计算的中国粮食生产水足迹数据,包括蓝水和绿水足迹。国民生产总值(GDP)、地方财政收入、粮食产量、总人口、农村人均经营耕地面积、人均水资源量、煤炭消耗量、第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值等数据参照《中国统计年鉴 2021》^[26]。

2 研究方法

收集中国大陆 31 省份 1997—2021 年粮食产量数据以及各类社会经济类数据,通过社会公平法分配粮食调运量,结合粮食生产水足迹计算省际间粮食虚拟水调运量。通过灰色关联度分析方法^[27]对粮食虚拟水调运量与各类社会经济数据之间的相关程度进行总体评价,确定各经济影响因子与粮食虚拟水调运量的相关性,但关联程度存在差异,利用集对分析法^[28]中“同、异、反”的基本理论,放大各影响因子关联程度之间存在的差异,对粮食虚拟水经济社会影响因子关联度进行计算分析,再将二者计算情况互为对照,结合地学相关知识^[29],最终明确粮食虚拟水经济社会影响因子影响效应的区域分布特征,研究总体框架见图 2。

2.1 区域粮食虚拟水调运量计算

区域间虚拟水的调运主要是由于粮食的供需失衡引起的。1997—2021 年间中国粮食自给率多维持在 95% 以上,因此未考虑粮食进出口对区域虚拟水流动的影响^[30-31]。本研究假设年际间不存在粮食储量变化,按照社会公平法向所有居民平均分配,以粮食人均占有量作为消费量,假设粮食调运到各省级行政区域的机会相等。基于以上假设和分析,人均粮食占有量高于全国平均值的省份则认为其粮食满足本区域消费后仍有盈余,盈余部分向其他区域调运,即为输出区;而人均粮食占有量低于全国平均值的省份则认为区域粮食产量无法满足人口实际消费需求,需要输入粮食使其达到全国人均实际消费量,即为输入区。

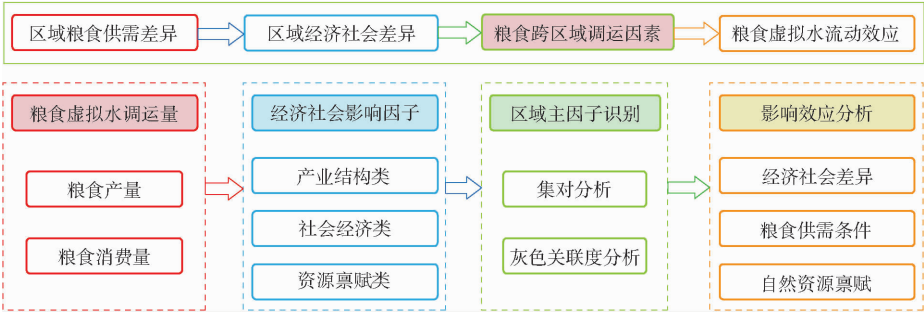


图2 研究总体框架图

Fig.2 Overall framework of study

省际间粮食贸易量计算公式为

$$M'_l = G_l - P_l \frac{M_N}{P_N} \tag{1}$$

式中 M'_l ——区域 l 粮食贸易量,t,正值表示 l 省为粮食输出区,负值表示 l 省为粮食输入区,等于 0 表示该区域无粮食贸易
 G_l ——区域 l 粮食产量,t
 P_l ——区域 l 人口数量,万人
 M_N ——粮食总产量,t
 P_N ——总人口,万人

根据输出区和输入区粮食贸易量和粮食生产水足迹可以计算出区域间的虚拟水流动量,即

$$V_l = \begin{cases} \frac{M'_l L_l^G}{10} & (M'_l > 0) \\ \frac{M'_l L_o^G}{10} & (M'_l < 0) \end{cases} \tag{2}$$

式中 V_l 为 l 省级行政区虚拟水流动量; V_l 为正值时, L_l^G 为 l 省级行政区的粮食生产水足迹(m^3/kg); V_l 为负值时, L_o^G 作为输出的那部分粮食生产水足迹,取决于各粮食输出区省份的粮食生产水足迹。

2.2 基于热点分析的粮食虚拟水流动热点区域识别

通过优化的热点分析法采用 Getis – Ord 局部统计识别具有统计学显著性的“热点”和“冷点”的空间聚类情景,对中国大陆 31 省份粮食虚拟水调运量进行空间聚类分析,探究粮食虚拟水流动的重点地区及其空间分布。

Getis – Ord 局部统计计算方法为

$$G_{i'} = \frac{\sum_{j'=1}^{n_1} w_{i',j'} x_{j'} - \bar{X} \sum_{j'=1}^{n_1} w_{i',j'}}{S \sqrt{\frac{n_1 \sum_{j'=1}^{n_1} w_{i',j'}^2 - \left(\sum_{j'=1}^{n_1} w_{i',j'}\right)^2}{n_1 - 1}}} \tag{3}$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j'=1}^{n_1} x_{j'}^2}{n_1} - \bar{X}^2} \tag{4}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j'=1}^{n_1} x_{j'}}{n_1} \tag{5}$$

式中 $x_{j'}$ ——要素 j' 的属性值
 $w_{i',j'}$ ——要素 i' 和 j' 之间的空间权重
 n_1 ——要素总数
 $G_{i'}$ ——统计热点分析的 Z 得分,热点分析中 Z 得分越高的区域高值聚类效应越显著, Z 得分越低的区域低值聚类效应越显著

2.3 主要粮食虚拟水流动经济社会影响因子选取

结合各区域产业结构、经济状况、人口等具体情况,通过对可能影响粮食虚拟水调运量的经济社会影响因子进行分析,根据科学性、代表性、可操作性和动态性原则,从产业结构调整、经济社会发展与自然资源禀赋 3 方面选择可能影响区域粮食虚拟水调运量的经济社会影响因子共 9 个^[32]。

第一、二、三产业增量可以有效表示区域农业、工业和服务业的发展情况,以及产业结构发展趋势和发展方向,通常作为区域经济的可持续发展政策和计划的参考^[33]。不同区域的主导产业不同使得经济社会发展方向存在显著差异,粮食的生产能力与粮食虚拟水流动模式也呈现空间分异性^[34]。选择第一、二、三产业增量作为区域产业结构发展的指标,可以有效探究区域产业结构发展方向对粮食虚拟水流动的影响效应。王玉宝等^[35]研究认为,地方财政收入直接决定了区域教育、医疗、交通等基础设施发展水平,间接促进了区域人口增长,加快了区域资源消耗。粮食作为生活的必需品,粮食虚拟水的流动也受到地方财政收入的驱动,因此选择地方财政收入作为区域经济发展水平的直观指标。中国是以煤为主的能源生产消费结构,长期以来,煤炭在我国一次性能源生产和消费中均占 70% 左右。近年来多元化的能源结构逐渐构建,但在相当长的时期内煤炭在一次能源生产和消费中的主体地位相对稳定,中国能源仍将主要依靠煤炭^[36]。总人口数量是

最基本的生产力,张建武等^[37]研究表明中国的人口与国民生产总值(Gross domestic product, GDP)的空间分布保持高度的协同性。选择煤炭消耗量和总人口数作为区域工业生产及城镇化水平以及社会繁荣程度的评估指标,可以合理地衡量区域经济社会发展水平^[38]。耕地是农业发展的基础,水是农业生产的基本要素,中国用世界 10% 的耕地和 6% 的淡水资源,生产的粮食满足了世界 20% 人口的粮食需求^[39-40]。有限的耕地和水资源是制约中国粮食生产的主要因素,选择人均水资源量和人均耕地面积作为区域农业生产潜力和资源丰富度指标,可以准确评估区域可供农业生产的自然资源禀赋条件^[41]。粮食作为粮食虚拟水的载体,区域的粮食产量及其中蕴藏的虚拟水量是粮食虚拟水流动的根本驱动力,选择粮食产量作为粮食虚拟水调运的总体控制因子,可以直观地表示区域粮食虚拟水的调运潜力。

2.4 基于灰色关联度分析的影响因子识别模型

灰色关联度分析法是一种常用的相关关系分析方法,常用于样本量少、数据缺失的模糊系统,通过建立灰色模型系统,来明确系统的内在联系,确定系统的运行规律,其基本思想在于利用序列的近似程度判定序列的关联程度^[42]。本文依据灰色关联度分析理论方法对粮食虚拟水影响因子的影响效应进行识别分析,将粮食虚拟水调运量时间序列作为一个集合,将各个经济社会影响因子数据量时间序列作为另一个集合,分组进行分析,计算其联系度系数。

记 n 年的粮食虚拟水调运量序列为集合 X_0 ,即 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \cdots, X_0(n)\}$ (6)

与 X_0 同理, m 个影响因子数据量序列分别为集合 $X_1, X_2, \cdots, X_m$ 。

原始数据进行无量纲化处理为

$$X'_i(j) = \frac{X_i(j) - \bar{X}_i}{S_i}$$
 (7)

其中

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_i(j)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_i(j) - \bar{X}_i)^2}$$

式中 $X_i(j)$ ——第 i 个影响因子第 j 年的值
 $X'_i(j)$ ——第 i 个影响因子第 j 年无量纲化值
 $\bar{X}_i$ ——第 i 个影响因子序列内平均值
 S_i ——第 i 个影响因子的标准差

计算联系度系数:

定义 $\Delta_{0i}(k)$ 为序列 $X_i(j)$ 与 $X_0(j)$ 在 $j = k$ 处差值的绝对值,则

$$\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$$
 (8)

$$\Delta_{0imin} = \min(\Delta_{0i}(k))$$
 (9)

$$\Delta_{0imax} = \max(\Delta_{0i}(k))$$
 (10)

定义 Δ_{lmax} 、 Δ_{lmin} 分别为 Δ_{0imax} 、 Δ_{0imin} 的最大值和最小值,则

$$\Delta_{lmax} = \max(\Delta_{0imax})$$
 (11)

$$\Delta_{lmin} = \min(\Delta_{0imin})$$
 (12)

序列 $X_0(j)$ 与 $X_i(j)$ 在 $j = k$ 处的关联度系数为

$$\delta_{0i}(k) = \frac{\Delta_{lmin} + \theta \Delta_{lmax}}{\Delta_{0i}(k) + \theta \Delta_{lmax}}$$
 (13)

式中 θ ——关联度参数,取 0.5

计算序列总体关联度系数为

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta_{0i}(k)$$
 (14)

关联度系数越大则表示二者之间的关联程度越大,该影响因子对粮食虚拟水的影响效应越强。

2.5 基于集对分析的影响效应分析模型

集对分析是一种对不同集合中的确定性与不确定性以及其相互作用进行分析的方法^[43]。这种分析方法从同一、差异不确定、对立的角度出发,以联系数 $a + bi + cj$ 来表示变量间的不确定性与相关性关系。集对分析的特点在于将一个不确定性语言确定性的问题划归到一个同异反的系统中作为一个既确定又不确定的系统问题进行分析处理^[44]。根据实际问题,将集合 A 、 B 组成集对 $H = (A, B)$,在实际问题背景 W 下,对集合 A 、 B 和集对 H 展开分析。本文依据集对分析理论方法对粮食虚拟水影响因子影响效应进行识别分析,将粮食虚拟水调运量时间序列作为一个集合,将各个经济社会影响因子数据量时间序列分别作为另一个集合,将其分别结对,计算其联系度系数。

记 n 年的粮食虚拟水调运量序列为集合 Y ,即

$$Y = \{y(1), y(2), \cdots, y(n)\}$$
 (15)

与 Y 同理, m 个影响因子数据量序列分别为集合 $X_1, X_2, \cdots, X_m$ 。

Y 与 X_i 组成集对 $H = (Y, X_i)$,其中 $i = 1, 2, \cdots, m$ 。

原始数据进行无量纲化处理,即

$$X'_i(j) = \frac{X_i(j)}{\max(X_i(j))}$$
 (16)

计算时间序列逐年变化值,计算式为

$$\Delta X_{ij} = X'_i(j+1) - X'_i(j)$$
 (17)

将逐年变化值划分为 4 个等级,等级划分应保证 $i \times j$ 个值均匀地分布在 4 个等级分组中,将 4 个等级记为 I、II、III、IV。

将 Y 与 X_i 等级分别进行对照,处于同一等级区间的统计总数记为 S_1 ;相差一个等级区间的如 I 与

Ⅱ、Ⅱ与Ⅲ、Ⅲ与Ⅳ,统计总数记为 F_1 ;相差两个等级区间的如Ⅰ与Ⅲ、Ⅱ与Ⅳ,统计总数记为 F_2 ;相差3个等级区间的如Ⅰ与Ⅳ,统计总数记为 E 。影响因子 X_i 与粮食虚拟水调运量 Y 之间的联系度系数即为

$$\mu_{YX_i} = \frac{S_1}{N} + \frac{F_1}{N}I_1 + \frac{F_2}{N}I_2 + \frac{E}{N}J$$

(18)

其中 $N = S_1 + F_1 + F_2 + E$

式中 I_1 ——等级差系数1

I_2 ——等级差系数2

J ——对立系数,通常取-1

N ——2个集合特征数总数

I_1 、 I_2 取值应视具体情况而调整,取值区间为 $[-1, 1]$,本文依据均分原则,取 $I_1 = 0.5$, $I_2 = -0.5$ 。联系度系数越大则代表二者之间的关联度越大,该影响因子对粮食虚拟水的影响效应越强。

2.6 灰色关联度-集对分析联合的影响效应分析

将灰色关联度分析的关联度系数 γ_i 与集对分析的联系度 μ_{YX_i} 按照等权重归一化结合的方法处理,计算得到灰色关联度-集对分析联合的关联度系数 ω_i ,计算公式为

$$\omega_i = \alpha\gamma_i + (1 - \alpha)\mu_{YX_i}$$

(19)

式中 α ——分析方法权重,取0.5

3 结果与分析

3.1 区域间粮食虚拟水流动时空分布格局

根据社会公平法和粮食虚拟水调运量权重确定了省际间虚拟水流动路径,结合优化的Getis-Ord热点分析法实现了虚拟水流动重点地区的空间聚类分析,明确了1997—2021年区域间粮食虚拟水流动时空分布格局。通过聚类分析发现中国粮食虚拟水调运呈现明显的聚类现象,分别以黑龙江、吉林、内蒙古和河南为代表的北方粮食虚拟水空间聚类“热点”输出区,以广东、福建、浙江、广西、海南和江西为代表的南方粮食虚拟水空间聚类“冷点”输入区(图3)。利用中国大陆31省份GDP数据与粮食虚拟水调运量数据进行相关性分析,空间聚类效应明显的输出区和输入区省份如黑龙江、吉林、内蒙古、广东、浙江、福建等,决定系数 R^2 普遍在0.8以上,粮食虚拟水调运量与GDP值具有显著的相关关系(图3)。

伴随着区域间粮食调运量的增加粮食虚拟水调运量也呈现持续增加的趋势,由于粮食生产水足迹呈现逐年减小的趋势,使得区域间粮食虚拟水调运量增长速率略低于粮食调运量增长速率,2021年区域间粮食虚拟水流动量接近1997年的2.7倍,由

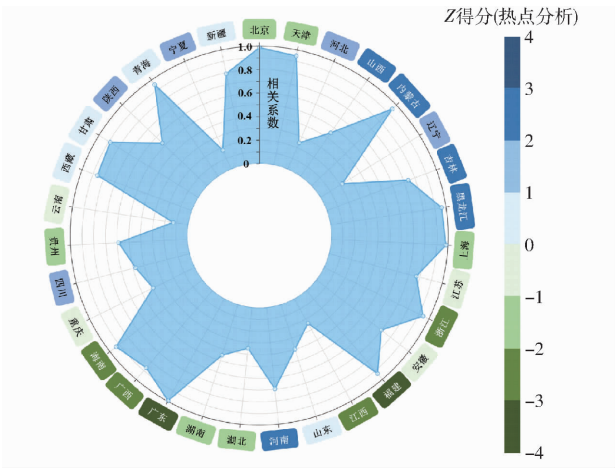


图3 各省份虚拟水调运空间聚类情况及省际间虚拟水调运量与GDP相关性

Fig.3 Spatial clustering of virtual water transfer in each province and correlation between provincial virtual water transfer and GDP

1997年的 $7.300 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加至2021年的 $1.962 \times 10^{11} \text{ m}^3$,呈现持续增加的趋势。虚拟水输出省份数量呈现波动减少的趋势,基本稳定维持在12个左右,输出省份逐渐向北方区域聚集,基本形成了以黑龙江、吉林、内蒙古、河南、安徽和山东为代表的虚拟水输出中心,和以广东、浙江、上海、北京为中心的虚拟水输入中心(图4),这与FU等^[45]的研究结果一致。自“北粮南运”格局形成后,北方向南方输入的虚拟水也呈现明显的增加趋势(图5)。区域间虚拟水调运是经济社会发展水平、产业结构、自然资源禀赋和社会发展需求等多重影响因素共同作用的结果。其中,区域间经济社会发展水平差异和产业结构的调整是重要影响因素。

3.2 粮食虚拟水流动经济社会要素影响效应

为了探明经济社会因子对中国粮食虚拟水的影响效应,本研究基于1997—2021年中国大陆省际粮

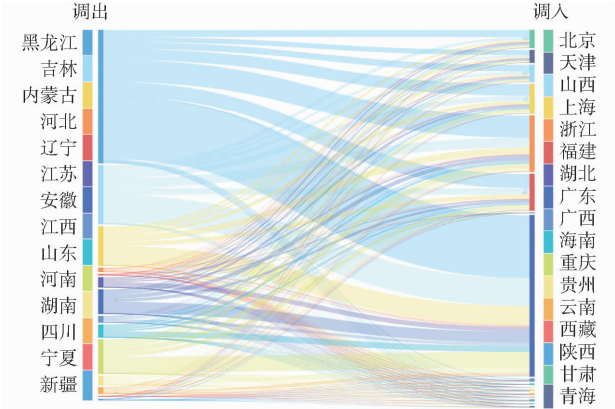


图4 1997—2021年中国省际间年均粮食虚拟水流向概况

Fig.4 General overview of virtual water flow between provinces in China from 1997 to 2021

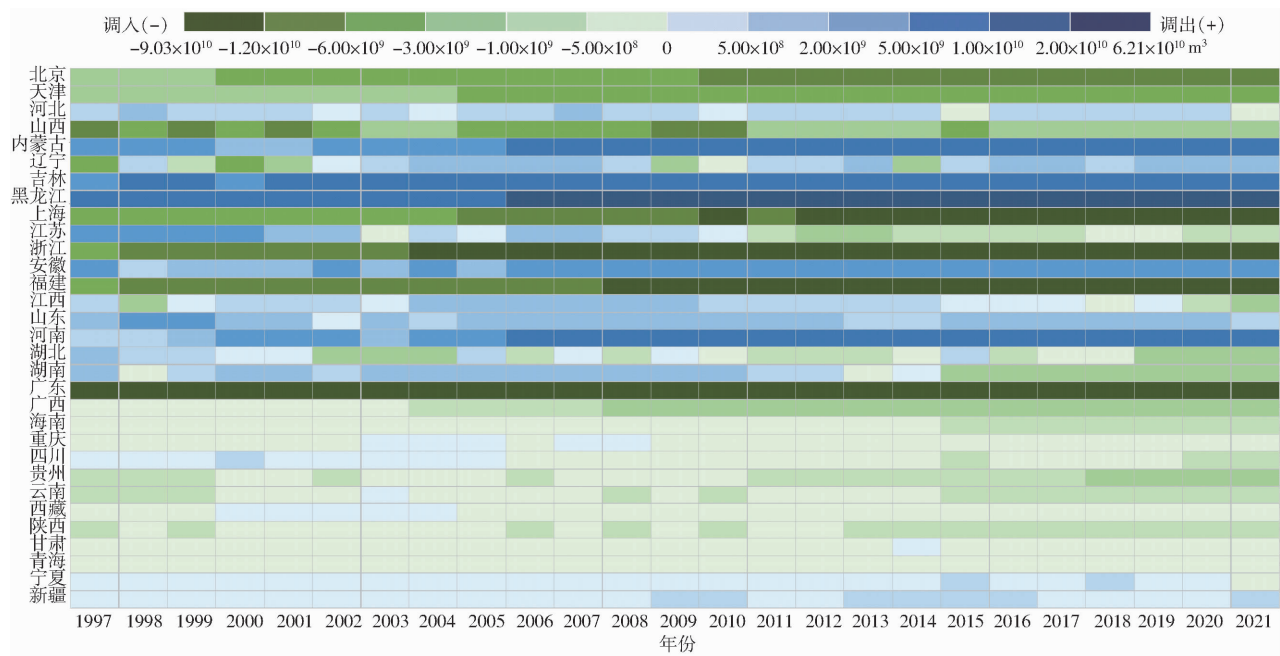


图 5 1997—2021 年中国大陆各省份粮食虚拟水调运量

Fig. 5 Virtual grain water transfer volume between provinces in China from 1997 to 2021

食虚拟水调运量数据,结合各省经济社会数据,采用灰色关联度分析和集对分析模型量化粮食虚拟水流动的经济社会影响效应,在此基础上分析了中国粮食虚拟水流动经济与社会要素关联度的空间分布与区域间差异特征。结果表明,各影响因子对区域粮食虚拟水流动均具有较强的影响效应,且影响因子对各省份粮食虚拟水流动的作用效果存在明显的空间差异。

基于灰色关联度分析的影响因子识别模型步骤,计算得到了各经济影响因子与粮食虚拟水调运量之间的关联度系数 γ_{ij} ($i=1,2,\cdots,9; j=1,2,\cdots,n$),基于集对分析的影响因子影响效应分析模型步骤,计算得到各经济社会影响因子与粮食虚拟水调运量之间的关联度系数 μ_{yx_i} ($i=1,2,\cdots,9$),基于灰色关联度-集对分析联合的影响效应分析方法计算得到联合关联度系数 ω_i ,结果如图 6 所示,各经济影响因子与粮食虚拟水调运量之间存在显著的相关关系,基于集对分析“同、异、反”基本理论将关联程度差异合理放大处理,可以明显看出不同区域间不同影响因子之间的差异情况,联系度系数越大,则代表该因子影响效应在本区域作用越明显。

由图 6 可知,不同省份之间由于经济社会条件、自然资源禀赋和产业结构差异使得省份在粮食虚拟水的供应与需求存在较大的差异;粮食产量对大部分省份的粮食虚拟水流动有明显的影响效应;经济社会发展、人口增长、粮食生产对水资源的需求使得粮食虚拟水的主要输入区、输出区以及平衡区的水资源量对粮食虚拟水普遍具有明显的影响效应。

3.3 基于影响效应的粮食虚拟水流动特征区域划分

根据中国大陆 31 省份的粮食虚拟水调运主要影响因子联系度占比分布情况,结合区域粮食虚拟水调运情况、自然经济条件、地理位置等基本情况,对中国大陆 31 省份省际间和省份内部因子影响效应特征进行分析,结合各省份之间影响因子的作用效果空间差异(图 6)以及省份内部影响因子贡献占比情况(图 7,图中纵轴省份的背景颜色与横轴相同颜色的影响效应类型相对应,表示省份的粮食虚拟水经济社会影响效应类型),根据各省份粮食虚拟水流动影响效应特点,将中国大陆 31 省份划分为 3 类粮食虚拟水流动影响类型单元,分别为产业关联型、社会关联型和资源关联型(图 7)。

浙江、广东、上海、福建、北京等粮食虚拟水调运空间聚类的“冷点”输入区,黑龙江、吉林和内蒙古等粮食虚拟水调运空间聚类的“热点”输出区,均对产业结构类影响因子呈现显著的敏感性,同时重庆、海南、青海和西藏等粮食产量不高、经济社会发展对于粮食产量依赖不强的粮食虚拟水小规模动态平衡区域,也对产业结构类因子响应较为敏感。主要是由于浙江、广东、上海、福建、北京等重点粮食虚拟水输入区经济发达,产业结构完善并且升级调整超前^[46],使得区域粮食虚拟水流动主要受到产业结构类因子影响,区域经济状况和人口数量决定了区域粮食虚拟水的需求量,总体控制因子粮食产量对重点粮食虚拟水输入区的影响非常弱,表明这些省份的粮食生产与本区域经济社会发展水平严重不匹配,必须大量输入粮食虚拟水以满足区域经济社会

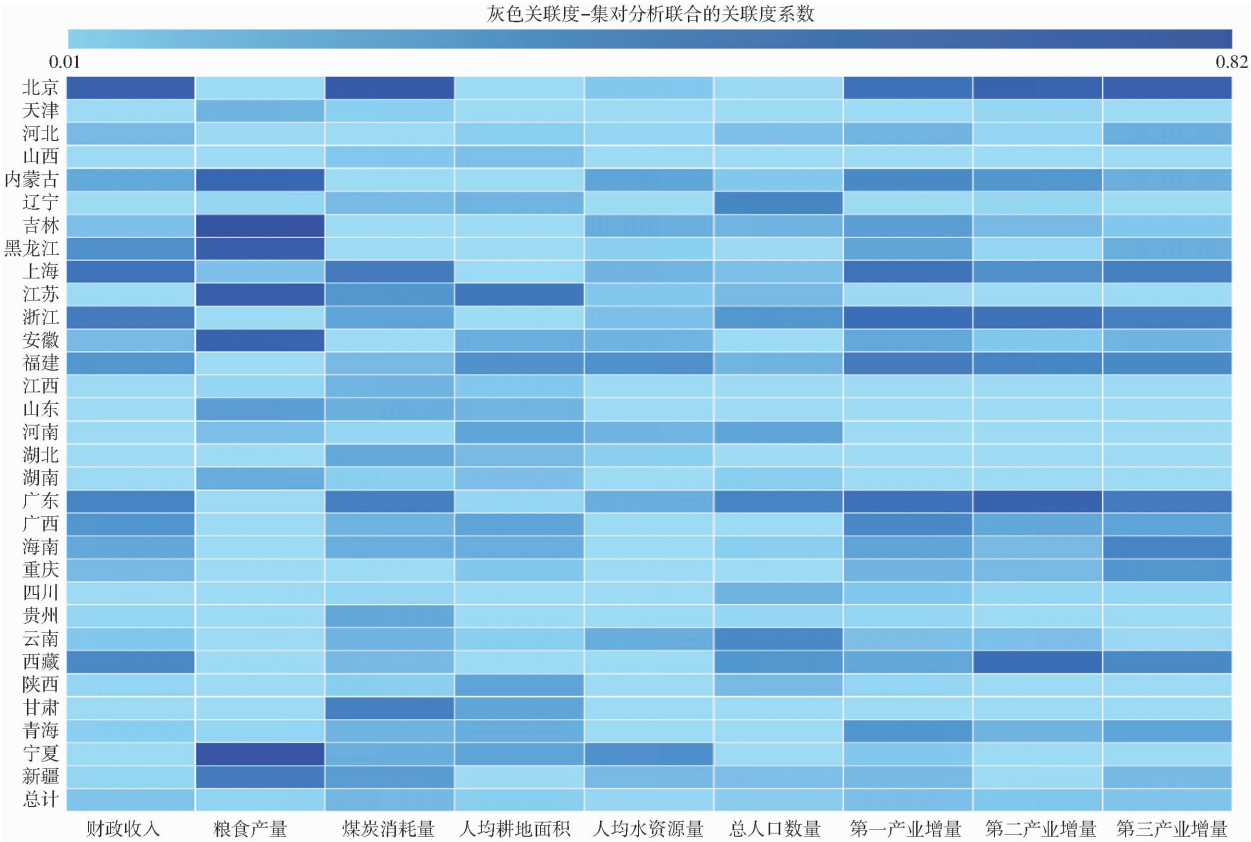


图 6 各省份经济社会因子的影响效应(灰色关联度-集对分析)

Fig. 6 Influence effects of economic and social factors in different provinces (grey relation – set air analysis)

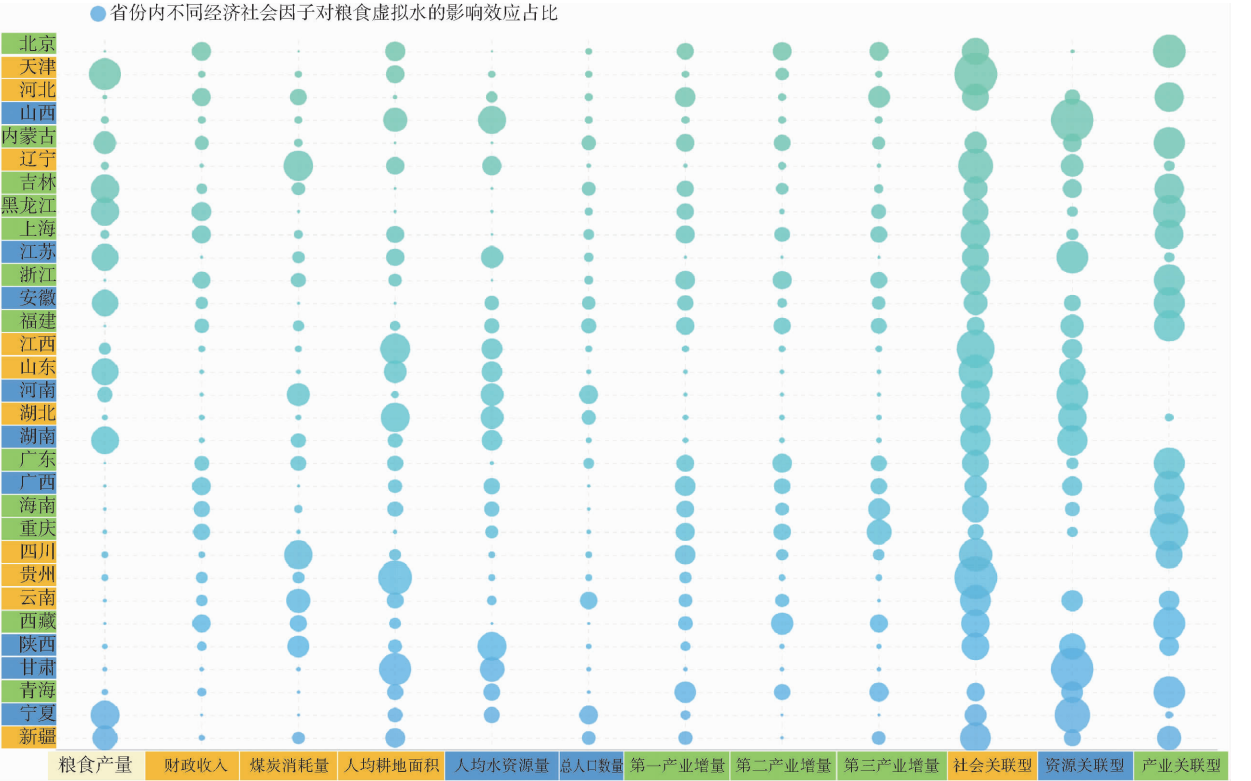


图 7 省份影响效应类型划分及经济社会因子影响效应省际间分布

Fig. 7 Type division of provincial influence effects and inter-provincial distribution of economic and social factors impact effects

发展需求并支撑产业结构的不断进步;黑龙江、吉林和内蒙古等虚拟水流动空间聚类的“热点”输出区

经济欠发达,产业结构单一,伴随着向全国各省份逐年大量输出粮食,粮食虚拟水也大量流出,使得

粮食产量以及第一产业增量作为主要经济社会因子影响区域粮食虚拟水的持续输出;重庆、海南、青海和西藏等人口相对稳定的省份,粮食虚拟水的流动量长期维持在较低水平,区域产业结构小规模调整即改变了粮食虚拟水的供应和需求平衡,使得产业结构类因子对粮食虚拟水的影响效应较为明显。

河北、辽宁、四川等省份产业结构逐步转型,经济收入对于粮食贸易依赖逐渐降低,粮食产量的逐年收缩使得虚拟水输出量逐年减少(图5),同时煤炭消耗量作为区域工业发展水平的衡量指标,其增加会刺激区域对于粮食需求量的增长,使得这些省份煤炭消耗量对粮食虚拟水的影响较为明显;天津作为长期的粮食虚拟水输入区,由于省份粮食产量低,人口数量相对较多,粮食需求增长以及供应不足使得区域粮食虚拟水的输入主要受人口数量的影响,低粮食产量和高粮食消费量促使粮食虚拟水不断输入;山东、新疆、江西、湖北、贵州和云南等省份环境条件具有一定粮食生产潜力,但是相较于虚拟水输出区省份的人均粮食产量还存在一定差距,粮食在供应本区域的同时山东、新疆、江西和湖北保持小规模粮食虚拟水输出,贵州和云南则是保持动态的调运平衡,而区域人口的长期流动使得区域的粮食需求量发生明显变化,进而对于区域粮食虚拟水的调运产生较大影响。

宁夏、陕西、山西、河南和甘肃等省份聚集于北方干旱半干旱地区,经济发展水平有限,产业结构固化,粮食生产水平受限于自然资源禀赋^[47],耕地资源匮乏,导致人均耕地面积因子对区域粮食虚拟水影响效应较强,水资源的空间分布不均匀导致宁夏、陕西、山西水资源匮乏,人口过于密集导致河南人均水资源紧缺,使得人均水资源量对粮食虚拟水作用效果较强;安徽、江苏、广西和湖南等南方省份,具有适宜粮食生产的气候条件以及较为丰富的水资源条件,但是人口与耕地资源数量的不匹配导致区域人均耕地面积较少,粮食产量支撑本区域的粮食需求相对困难,从而使得这些省份粮食虚拟水调运受到人均耕地面积的影响较为明显。

3.4 经济社会因素对粮食虚拟水流动的影响效应与调控措施

从全国整体上看各种类型的经济社会因子对粮食虚拟水流动的作用效果由大到小依次为社会关联型、产业关联型、资源关联型,但是不同地区、不同因子的作用情况因地而异。区域间粮食虚拟水的流动增加了虚拟水输入区的生态环境压力与自然资源压力,阻碍了区域产业结构优化调整进程,进而影响经

济社会发展。伴随着粮食虚拟水供应输入区生态环境与自然资源压力的逐步缓解、产业结构的不断优化调整,长此以往势必会造成粮食虚拟水输入区与输出区之间经济社会、生态环境和自然资源的差异,并且二者之间的差距会逐步加大。基于区域粮食虚拟水主要经济社会影响效应特征有针对性地提出区域粮食虚拟水调控措施,可以有效地保障区域内部粮食、资源和生态环境的安全,推动区域间经济社会协调发展。

粮食虚拟水流动呈现产业关联型的浙江、广东、上海、福建、北京等省份经济发达,产业结构多元化,耕地面积急剧收缩,人口迁入量和增长量普遍偏高,需要大量的粮食虚拟水输入来维持地区的经济社会发展^[35],应在本区域产业不断优化调整的过程中辐射带动其他地区产业结构优化升级,尤其是粮食虚拟水输出区,可以有效分担本地区人口、社会和资源压力,缩小区域经济社会差异,抵消粮食虚拟水流动对于输出区的负反馈效应^[48];重庆、海南、青海、西藏、广西、河北等省份由于区位限制,粮食产量普遍偏低,人口增长不多,这些区域只需少量的虚拟水调运就可以支撑该地区的经济产业发展^[49],新兴的产业结构调整虽然很有限但足够促进区域的经济社会发展^[50],这些地区由于农业生产条件有限,不宜扩大粮食生产,应在保护本区域自然资源和生态环境的情况下寻找合适的产业优化升级方向,发展适宜本区域基础条件的产业。

内蒙古、黑龙江和吉林等省份,耕地面积广阔且长期维持稳定,人均耕地面积较大,粮食产量长期处于全国前列,长期的粮食贸易输出收益是本区域财政收入的重要组成部分;江苏、安徽、四川和辽宁等省份,作为传统的粮食输出区,产业结构在近年来不断进行调整^[51],社会经济发展逐渐摆脱粮食贸易的较高的影响,粮食产量在逐年下降的趋势下依然维持一定的规模,对本地区经济发展有一定的影响;云南、湖南和新疆等省份由于自然环境、气候条件、地形条件等因素导致人均粮食产量有限,粮食生产在供应本区域的前提下输出量有限,但粮食贸易输出对于区域经济发展具有一定的贡献。粮食虚拟水的输出支撑了区域经济社会发展,但也带来了人口增长缓慢、经济社会发展迟滞的负反馈,同时给区域带来了自然资源和生态环境的压力,长此以往输出区与输入区之间的经济社会差距逐渐拉大。粮食虚拟水输出区应在保障国家全局粮食安全的前提下积极推广节水农业技术,如节水灌溉、水肥一体化等,有效提高农业用水效率^[52];同时还应积极探索区域适水发展产业模式^[53],使区域经济社会发展不过度依

赖粮食输出,逐步缩小输出区与输入区之间的经济社会发展差距。

宁夏、陕西、山西、河南和甘肃等省份几乎全部处于中西部地区,经济欠发达,产业结构单一,农业生产、经济社会发展和产业结构调整等都受到经济水平、水资源禀赋以及耕地资源面积的限制^[54],从而使这些区域粮食虚拟水主要呈现资源禀赋驱动型。通过比较实际和虚拟种植结构下的生产水足迹可以发现,改变作物种植结构,会带来不同的水资源利用情况^[55]。在资源影响较为显著的区域,可以通过优化作物种植结构,来达到降低生产水足迹,提高农业用水效率,在有限的资源环境条件下开发区域农业生产潜力,有助于从全局角度缓解虚拟水调运带来的不利影响^[56]。

3.5 研究局限性与未来展望

本研究围绕经济社会发展与粮食安全保障展开,具有一定的创新和借鉴意义。理论上,本研究可以为区域粮食生产与调运、经济社会发展和自然资源综合调控的耦合分析领域,在研究思路和研究方法上提供参考;在实践上,本研究可以为区域经济社会发展和粮食生产过程中,实施相关措施、制定相关政策、优化资源配置提供参考。但本研究仍存在一定局限性。首先,由于没有中国大陆省际粮食贸易量和贸易方向相关数据,本研究采用社会公平法基于各省人口和地理距离计算省际粮食运输量和运输方向,因此省际粮食虚拟水流动量存在一定误差^[57-58]。另外本研究在社会水文学相关研究的基础上,从社会水文学角度定性解析了区域粮食虚拟水流动对经济社会的影响效应,有待于进一步通过定量计算数据阐述相关的影响效应^[59-60]。

基于本研究的局限性,后续研究应综合考虑目前中国省际粮食虚拟水流动的研究现状,考察各研究使用的方法,进一步准确计算省际粮食调运量,从而更好地量化省际间粮食虚拟水流动量^[61-62]。同

时,在定性研究的基础上,参考相关文献,定量分析区域粮食虚拟水流动的经济社会影响效应^[63-64]。

4 结论

(1)1997—2021 年,中国大陆粮食虚拟水流动量稳步提升,虚拟水输出区呈现向北方区域聚集的趋势,输出省份数量逐步减少,并稳定在 12 个左右。除自然资源禀赋外,经济社会因素也对区域间粮食虚拟水的流动产生影响,并且影响效果存在空间差异。伴随粮食虚拟水流动,区域经济社会状况、自然环境状况也将受到反馈调节。在全国范围内,经济社会因素对粮食虚拟水的影响效应由大到小依次为:社会关联型、产业关联型、资源关联型,粮食虚拟水主要输出区的经济发展水平明显低于主要输入区,长此以往将进一步拉大区域间经济发展水平差距。

(2)粮食虚拟水稳定输出的省份,社会发展类因子直接影响粮食虚拟水流动,产业结构固化、地方财政收入对粮食贸易存在不同程度的依赖,导致经济发展缓慢和人口流失等。而处在转型期的粮食虚拟水输出减少的省份,如江苏、安徽、四川等则在摆脱依赖粮食贸易维持地方财政收入的同时经济增速明显提升。因此粮食虚拟水稳定输出省份在保障国家粮食安全的前提下应积极谋求产业转型,改善现阶段经济发展缓慢的状况。

(3)北方干旱半干旱区粮食虚拟水流动呈现资源禀赋影响型,粮食产量以及调运量同时受耕地和水资源的限制,长此以往会使本就脆弱的生态环境进一步恶化。但是处在相似区位的重庆、青海等省份则呈现产业结构影响型,中西部省份应积极探索适合当地发展的模式,在不牺牲自然环境的前提下谋求经济转型发展。根据现阶段各省份经济社会发展水平进行产业结构优化,促进区域间协调发展将是解决中国粮食虚拟水流动经济社会影响效应负反馈的重要途径。

参 考 文 献

[1] ALLAN J A. Virtual water—the water, food, and trade nexus useful concept or misleading metaphor? [J]. Water International, 2003, 28(1): 4–11.

[2] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade[C]//Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, 2002.

[3] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A, SAVENIJIE H. Water saving through international trade of agricultural products[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2006, 10: 455–468.

[4] ZHANG Y, ZHANG J, TANG G, et al. Virtual water flows in the international trade of agricultural products of China[J]. Sci. Total Environ., 2016, 557: 1–11.

[5] 安婷莉,韩昕雪琦,高学睿,等.虚拟水理论发展及应用前景综述[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 44–61.

AN Tingli, HAN Xinxueqi, GAO Xuerui, et al. A review of the development and application prospect of virtual water theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 44–61. (in Chiese)

[6] ZHANG Y, ZHANG J H, TIAN Q, et al. Virtual water trade of agricultural products: a new perspective to explore the belt and road[J]. Sci. Total Environ., 2018, 622: 988–996.

[7] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J].

- Global Environmental Change, 2005, 15(1):45–56.
- [8] LIU J, MOONEY H, HULL V, et al. Systems integration for global sustainability[J]. Science, 2015, 347: 1258832.
- [9] LUAN X B, YIN Y L, WU P T, et al. An improved method for calculating the regional crop water footprint based on a hydrological process analysis[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(10):5111–5123.
- [10] SUN S K, LU Y J, GAO H, et al. Impacts of food wastage on water resources and environment in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185:732–739.
- [11] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(6):1427–1437.
- [12] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: a study for China (1978–2008) [J]. Water Research, 2016, 94:73–85.
- [13] ZHAO X, LIU J, LIU Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 2015, 112(4):1031–1035.
- [14] 马静, 汪党献, HOEKSTRA A Y, 等. 虚拟水贸易在我国粮食安全中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(1):102–107.
MA Jing, WANG Dangxian, HOEKSTRA A Y, et al. Application of the virtual water trade to China's grain security[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):102–107. (in Chinese)
- [15] 康银红, 贺树, 王嘉驰, 等. 四川省能源和粮食生产用水竞争及与经济关系研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3):300–310.
KANG Yinhong, HE Shuai, WANG Jiachi, et al. Water competition and economic relationship between energy and food production in Sichuan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3):300–310. (in Chinese)
- [16] 吴普特, 赵西宁, 操信春, 等. 中国“农业北水南调虚拟工程”现状及思考[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):1–6.
WU Pute, ZHAO Xining, CAO Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese “agricultural North-to-South water diversion virtual engineering” [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6):1–6. (in Chinese)
- [17] DALIN C, RODRIGUEZ-ITURBE I. Environmental impacts of food trade via resource use and greenhouse gas emissions[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(3):035012.
- [18] 田贵良, 李舒文, 陈松峰, 等. 新发展格局下虚拟水流动对区域粮食安全的影响[J]. 水利经济, 2023, 41(2):11–17.
TIAN Guiliang, LI Shuwen, CHEN Songfeng, et al. The impact of virtual water flow on regional food security under the new development pattern[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(2):11–17. (in Chinese)
- [19] 张栋, 张洪江, 马岚, 等. 基于层次-灰色关联分析的河流自然性评价——以潮河为例[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3):95–102.
ZHANG Dong, ZHANG Hongjiang, MA Lan, et al. Assessment of river naturalness based on grey relational analysis and analytic hierarchy process: a case study of Chaohe River[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3):95–102. (in Chinese)
- [20] 范月, 李薇, 王振龙, 等. 基于水文气象要素的淮北平原夏玉米蒸散灰色模型研究[J]. 水文, 2020, 40(3):65–70, 87.
FAN Yue, LI Wei, WANG Zhenlong, et al. Study on grey model of summer maize evapotranspiration based on hydrometeorological elements in Huaibei Plain[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(3):65–70, 87. (in Chinese)
- [21] 于钊, 尚曼廷, 姚梅, 等. 水足迹与主成分分析法耦合的新疆水资源承载力评价[J]. 水文, 2021, 41(1):49–54, 34.
YU Po, SHANG Manting, YAO Mei, et al. Water resources carrying capacity evaluation based on water footprint and principal component analysis in Xinjiang[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(1):49–54, 34. (in Chinese)
- [22] 袁伟, 楼章华, 田娟. 富阳市水资源承载力综合评价[J]. 水利学报, 2008, 39(1):103–108.
YUAN Wei, LOU Zhanghua, TIAN Juan. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Fuyang City[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1):103–108. (in Chinese)
- [23] 庄宇, 张敏, 郭鹏. 西部地区经济发展与水质环境的相关分析[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(4):50–51, 80, 118.
ZHUANG Yu, ZHANG Min, GUO Peng. Relativity analysis between economic development and water environment quality in the western region of China[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(4):50–51, 80, 118. (in Chinese)
- [24] WANG Y B, WU P T, ZHAO X N, et al. Virtual water flows of grain within China and its impact on water resource and grain security in 2010[J]. Ecological Engineering, 2014, 69:255–264.
- [25] 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 Resources Research, 2019, 55(5):4014–4029.
- [26] 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022:4–5.
- [27] 吕翠美, 吴泽宁, 胡彩虹. 用水结构变化主要驱动力因子灰色关联度分析[J]. 节水灌溉, 2008(2):39–41, 45.
LÜ Cuimei, WU Zening, HU Caihong. Grey relational degree analysis on the major driving forces of water use structure[J]. Water Saving Irrigation, 2008(2):39–41, 45. (in Chinese)
- [28] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索, 1994(1):67–72.
ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application[J]. Discovery of Nature, 1994(1):67–72. (in Chinese)
- [29] 闫宝伟, 潘增, 薛野, 等. 论水文计算中的相关性分析方法[J]. 水利学报, 2017, 48(9):1039–1046.
YAN Baowei, PAN Zeng, XUE Ye, et al. Modeling dependence and correlation in hydrological calculation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9):1039–1046. (in Chinese)
- [30] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. The water footprints of Morocco and the Netherlands: global water use as a result of

- domestic consumption of agricultural commodities[J]. *Ecological Economics*, 2007, 64(1):143–151.
- [31] DALIN C, QIU H, HANASAKI N, et al. Balancing water resource conservation and food security in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(15):4588–4593.
- [32] SONG J F, YIN Y L, XU H, et al. Drivers of domestic grain virtual water flow: a study for China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239:106175.
- [33] JING C, SU B, ZHAI J, et al. Gridded value-added of primary, secondary and tertiary industries in China under Shared Socioeconomic Pathways[J]. *Scientific Data*, 2022, 9:309.
- [34] 吴普特. 实体水-虚拟水统筹管理保障国家粮食安全[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(7):1–6.
WU Pute. Integrative management of physical water and virtual water to ensure national food security[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(7):1–6. (in Chinese)
- [35] 王玉宝, 吴普特, 孙世坤, 等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10):208–215.
WANG Yubao, WU Pute, SUN Shikun, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10):208–215. (in Chinese)
- [36] 王俊松, 贺灿飞. 技术进步、结构变动与中国能源利用效率[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(2):157–161.
WANG Junsong, HE Canfei. Technological development structural change and Chinese energy consumption efficiency[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2009, 19(2):157–161. (in Chinese)
- [37] 张建武, 高聪, 赵菁. 中国人口、经济、产业重心空间分布演变轨迹——基于1978—2019年省级数据的分析[J]. *中国人口科学*, 2021(1):64–78, 127.
ZHANG Jianwu, GAO Cong, ZHAO Jing. Research on the changing spatial gravity of China's population, economy, and industry center: based on the provincial data from 1978 to 2019[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2021(1):64–78, 127. (in Chinese)
- [38] TAN Junlan, WANG Rong. Research on evaluation and influencing factors of regional ecological efficiency from the perspective of carbon neutrality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294:113030.
- [39] DALIN C, HANASAKI N, QIU H, et al. Water resources transfers through Chinese interprovincial and foreign food trade[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 2014, 111:9774–9779.
- [40] 李自强, 李晓云, 王金霞. 粮食生产与水资源空间错配缘由: 基于比较优势理论探究[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(9):12–29.
LI Ziqiang, LI Xiaoyun, WANG Jinxia. Causes of spatial mismatch between grain production and water resources: based on the theory of comparative advantage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(9):12–29. (in Chinese)
- [41] 刘正佳, 钟会民, 李裕瑞, 等. 近20年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6):1413–1425.
LIU Zhengjia, ZHONG Huimin, LI Yurui, et al. Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6):1413–1425. (in Chinese)
- [42] 陈长坤, 孙凤琳. 基于熵权-灰色关联度分析的暴雨洪涝灾情评估方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(6):1067–1073.
CHEN Changkun, SUN Fenglin. Flood damage assessments based on entropy weight–grey relational analyses[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(6):1067–1073. (in Chinese)
- [43] 王文圣, 李跃清, 金菊良. 基于集对原理的水文相关分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(2):1–5.
WANG Wensheng, LI Yueqing, JIN Juliang. Relation analysis of hydrological variables based on set pair principle[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(2):1–5. (in Chinese)
- [44] 沈时兴, 金菊良, 宋松柏, 等. 水文水资源集对分析的理论基础探讨[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(12):1481–1488.
SHEN Shixing, JIN Juliang, SONG Songbai, et al. Theoretical foundation of set pair analysis for hydrological and water resource system[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2013, 36(12):1481–1488. (in Chinese)
- [45] FU Y, ZHAO J, WANG C, et al. The virtual water flow of crops between intraregional and interregional in mainland China[J]. *Agric. Water Manag.*, 2018, 208:204–213.
- [46] YIN Y L, LUAN X B, SUN S K, et al. Environmental impact of grain virtual water flows in China: from 1997 to 2014[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256:107–127.
- [47] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444:498–507.
- [48] 周晋军, 王浩, 刘家宏, 等. 城市耗水的“自然-社会”二元属性及季节性特征研究——以北京市为例[J]. *水利学报*, 2020, 51(11):1325–1334.
ZHOU Jinjun, WANG Hao, LIU Jiahong, et al. “Nature–Social” dual attribute and seasonal characteristics of urban water dissipation: a case study of Beijing[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(11):1325–1334. (in Chinese)
- [49] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(9):1115–1124.
SUN Shikun, WANG Yubao, LIU Jing, et al. Quantification and evaluation of water footprint of major grain crops in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(9):1115–1124. (in Chinese)

B-S P. , 2010 , 60 : 450 – 459.

[36] CUI J T, SHAO G C, KEABETSWE L, et al. Gas exchange traits, growth and yield attributes in winter wheat under waterlogging stress during anthesis[J]. *Int. J. Agric. Biol.* , 2020 , 24 : 179 – 187.

[37] SHAO G C, LAN J J, YU S E, et al. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages[J]. *Photosynthetica*, 2013 , 51 : 429 – 437.

[38] 顾南, 张建云, 刘翠善, 等. 地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021 , 48(4) : 15 – 24.

GU Nan, ZHANG Jianyun, LIU Cuishan, et al. An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021 , 48(4) : 15 – 24. (in Chinese)

[39] 景卫华, 罗纨, 温季, 等. 农田控制排水与补充灌溉对作物产量和排水量影响的模拟分析[J]. *水利学报*, 2009 , 40(9) : 1140 – 1146.

JING Weihua, LUO Wan, WEN Ji, et al. Analysis on the effect of controlled drainage and supplemental irrigation on crop yield and drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009 , 40(9) : 1140 – 1146. (in Chinese)

[40] 罗纨, 王嘉诚, 贾忠华, 等. 稻麦轮作高标准农田控制排水对排水与氮素输出削减效果模拟[J]. *农业机械学报*, 2024 , 55(4) : 272 – 279,311.

LUO Wan, WANG Jiacheng, JIA Zhonghua, et al. Simulation of effect of controlled drainage on reducing drainage and nitrogen output from high standard farmland in rice and wheat rotation area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024 , 55(4) : 272 – 279,311. (in Chinese)

(上接第 356 页)

[50] SUN S K, WANG Y B, ENGEL B A, et al. Effects of virtual water flow on regional water resources stress: a case study of grain in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016 , 550:871 – 879.

[51] WANG Y B, WU P T, ENGEL B A, et al. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014 , 497 – 498: 1 – 9.

[52] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. *水利学报*, 2019, 50(1) : 88 – 96.

GAO Zhanyi. Technical achievement and prospection in irrigation scheme development and management in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1) : 88 – 96. (in Chinese)

[53] 王玉宝, 吴楠, 张富尧, 等. 基于三维水足迹模型的农业用水可持续性评估[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1) : 287 – 295.

WANG Yubao, WU Nan, ZHANG Fuyao, et al. Assessment of agricultural water sustainability based on 3D water footprint model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023 , 54(1) : 287 – 295. (in Chinese)

[54] WANG Y B, WU P T, ENGEL B A, et al. Comparison of volumetric and stress-weighted water footprint of grain products in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 324 – 333.

[55] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 等. 黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析[J]. *水利学报*, 2020, 51(9) : 1059 – 1069.

ZHUO La, LI Meng, WU Pute, et al. Assessment of crop related physical – virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9) : 1059 – 1069. (in Chinese)

[56] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. *水利学报*, 2020, 51(10) : 1189 – 1198.

CAO Xinchun, CUI Simeng, WU Mengyang, et al. Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(10) : 1189 – 1198. (in Chinese)

[57] WU S, BEN P, CHEN D, et al. Virtual land, water, and carbon flow in the inter-province trade of staple crops in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling* , 2018, 136: 179 – 186.

[58] HALL J W. Socio-hydrology in perspective—circa 2018[J]. *Water Resour. Res.* , 2019 , 55(3) : 1776 – 1777.

[59] TANG Y H, LUAN X B, SUN J X, et al. Impact assessment of climate change and human activities on GHG emissions and agricultural water use[J]. *Agr. Forest Meteorol.* , 2021, 296: 108218.

[60] XU Z, CHEN X, LIU J, et al. Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO₂ nexus across metacoupled systems [J]. *Nat. Commun.* , 2020 , 11(1) : 5837.

[61] DANG Q, LIN X, KONAR M. Agricultural virtual water flows within the United States[J]. *Water Resour. Res.* , 2015 , 51 (2) : 973 – 986.

[62] D’ODORICO P, CHIARELLI D D, ROSA L, et al. The global value of water in agriculture[J]. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 2020, 117(36) : 21985 – 21993.

[63] SIVAPALAN M, BLÖSCHL G. Time scale interactions and the coevolution of humans and water[J]. *Water Resour. Res.* , 2015, 51(9) : 6988 – 7022.

[64] WU X D, GUO J L, LI C H, et al. Global socio-hydrology: an overview of virtual water use by the world economy from source of exploitation to sink of final consumption[J]. *J. Hydrol.* , 2019 , 573: 794 – 810.