

粮食生产与水资源空间错配缘由:基于比较优势理论探究

李自强¹ 李晓云^{1*} 王金霞²

(1. 华中农业大学 经济管理学院, 武汉 430070;

2. 北京大学 现代农学院/中国农业政策研究中心, 北京 100871)

摘要 为探究我国粮食生产与水资源空间分布错配原因,构建测算指标体系综合评价各地区水资源承载力,测算农业用水压力评估地区粮食生产与水资源空间分布的错配程度;基于比较优势理论视角利用面板数据进行实证检验,探究粮食生产与水资源空间分布错配产生的可能原因。结果表明:1)从测算结果看,我国31省2003—2018年的粮食生产与水资源空间分布存在错配,以东北区、黄淮海区、华南区和西北区错配较为严重。2)从基准模型回归结果看,土地优势、劳动优势、资本优势对区域农业用水压力的正向推动作用超过水资源优势对区域农业用水压力的负向作用,使得粮食生产综合比较优势加大了区域农业用水压力,在类似的市场与政策环境下粮食生产与水资源空间分布错配的内在原因正是上述累加作用的结果;采用分位数回归检验结果稳健性,发现在农业用水压力极大和极小区域粮食生产比较优势对农业用水压力的加剧作用并不明显,其余分位点处均显著。3)从调节效应模型结果看,农业用水效率在粮食生产比较优势对农业用水压力的影响中具有负向调节作用,分样本回归发现农业用水压力较高区域农业用水效率调节作用更大,表明较高的农业用水效率能够有效缓解区域粮食生产比较优势对粮食生产与水资源空间分布错配的影响,且在农业用水压力较高的区域缓解作用更加明显。因此,优化粮食生产与水资源空间匹配程度,加大粮食生产布局中水资源要素约束权重,分区域提升粮食生产用水效率,有利于保障粮食安全与水资源的可持续利用。

关键词 粮食生产; 比较优势理论; 农业用水压力; 农业用水效率; 水资源承载力

中图分类号 F326.11

文章编号 1007-4333(2022)09-0012-18

文献标志码 A

Causes of spatial mismatch between grain production and water resources: Based on the theory of comparative advantage

LI Ziqiang¹, LI Xiaoyun^{1*}, WANG Jinxia²

(1. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. School of Advanced Agricultural Sciences/China Center For Agricultural Policy, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract To explore the causes of spatial mismatch between grain production and water resources in China, a measurement index system was constructed to comprehensively evaluate the carrying capacity of water resources in each region and measure the degree of spatial mismatch between grain production and water resources in the evaluation area of agricultural water pressure. Additionally, from the perspective of comparative advantage theory, a panel data was used to conduct empirical tests and explore the possible causes of the spatial mismatch between grain production and water resources. The results show that: 1) According to the calculation results, the spatial distribution of grain production between water resources in 31 provinces of China from 2003 to 2018 is mismatched, and the spatial distribution mismatch between grain production and water resources in north East China, Huang-Huai-Hai region, South China and Northwest China is more serious. 2) According to the regression results of the benchmark model, the positive

收稿日期: 2021-12-29

基金项目: 教育部哲学社会科学重大攻关项目(20JZD015); 国家自然科学基金项目(71673102); “十四五”国家重点研发计划(2021YFD1600505)

第一作者: 李自强, 博士研究生, E-mail: liziqiang@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者: 李晓云, 教授, 主要从事粮食安全、资源环境经济与政策研究, E-mail: lixiaoyun@mail.hzau.edu.cn

effect of land advantage, labor advantage and capital advantage on regional agricultural water pressure exceeds the negative effect of water resource advantage on regional agricultural water pressure, which makes the comprehensive comparative advantage of grain production increase the regional agricultural water pressure. Under the similar market and policy environment, the internal cause of the spatial distribution mismatch between grain production and water resources is the result of the above accumulative effects. Quantile regression is adopted to test the results. It is found that the intensification effect of grain production comparative advantage on agricultural water pressure is not obvious in the regions with the maximum or minimum agricultural water pressure, but is significant in the other sub-loci. 3) According to the results of the moderating effect model, agricultural water efficiency has a negative moderating effect on the impact of comparative advantage of grain production on agricultural water pressure. Sample regression shows that agricultural water efficiency has a greater regulating effect in areas with higher agricultural water pressure, indicating that higher agricultural water efficiency can effectively mitigate the impact of regional comparative advantage of grain production on the spatial distribution mismatch between grain production and water resources, and the mitigating effect is more obvious in areas with higher agricultural water pressure. Therefore, based on the research results, this study puts forward three suggestions, e. g. optimizing the spatial distribution mismatch degree of grain production and water resources, increasing the constraint weight of water resources factors in grain production layout, and improving water efficiency of grain production by region, to ensure grain security and sustainable use of water resources.

Keywords grain production; comparative advantage theory; agricultural water pressure; agricultural water efficiency; water resources carrying capacity

保障水资源可持续利用是实现粮食安全的重要前提。我国人均水资源占有量仅为世界人均水平的 $1/4$ ^[1],农业生产是我国水资源的主要用途,而粮食生产用水在农业用水总量中一直占较高比例,水资源短缺严重制约着我国粮食的可持续生产^[2]。另一方面,粮食生产与水资源空间分布错配导致部分地区农业用水压力日益增大^[3]。究竟导致粮食生产与水资源分布错配的原因是什么?这一问题长久以来备受政府和学术界的关注。

选取合适的视角深入探究粮食生产与水资源分布错配的根源至关重要。粮食生产与水资源空间分布错配根源,主要源于水资源的空间分布和大规模粮食作物种植的区域布局。其中,水资源的空间分布主要受气候和水文等因素影响,成为社会经济活动,包括粮食生产的硬约束,但气候和水文条件在短期内变动均较小。因此,大规模粮食作物种植的区域布局决定了我国粮食生产与水资源空间分布的错配程度。而影响大规模粮食作物种植区域布局的因素繁多,不仅有土地要素、劳动力要素、资本要素和水资源要素等粮食种植要素禀赋的内部推动因素^[4-7],还有诸如价格和政策等诱导粮食生产的外部拉动因素^[8]。但由于粮食价格和政策因素对我国多数地区的影响较为相似,而各地区之间的要素禀赋则表现出明显的区域特征和属性差异,从而产生区域间粮食生产比较优势的异质性。因而,本研究

拟选取由区域间要素禀赋异质性所致的粮食生产比较优势差异视角,深入探究粮食生产与水资源空间分布错配产生的原因。

1 文献综述

1.1 粮食生产与水资源压力的相关研究

本研究粮食定义采用国家统计局制定的《统计用产品分类目录》,包含谷物、豆类和薯类。水资源定义则采用国家统计局对水资源总量的定义,即地表水资源量与地下水资源量之和扣除两者重复量之后的值。水资源压力是指在特定的自然环境和社会环境中,人类自身以及社会经济活动对水资源的利用产生超出水环境容量的影响和冲击,从而对水量或水质产生的压力程度^[9]。已有研究将水资源压力进行分解,分别从水资源数量压力、质量压力^[10]、生态环境压力、经济压力^[11]、技术压力^[12]和人口压力^[13]等角度进行研究,但多数研究的焦点仍主要集中在对水资源的数量和质量研究 2 方面。水资源压力指数的测算方法主要有以下 4 类:单一指标法^[9,14]、供需比值法^[15]、严格比例法^[16]和综合评价法^[17],其中,综合评价法是指从多个角度、运用多种指标对水资源压力进行刻画的一类方法,主要包括水贫穷指数法^[17]、水资源压力指数法^[16,18-19]以及水资源承载力综合评价等^[20-22]。上述 4 类测量方法中,综合评价法是测量水资源压力指数最为常用的

评价方法,以水资源压力指数法和水资源承载力评价法为主。已有的水资源压力指数测算方法,缺乏对不同地区间禀赋差异的权重赋值,从而降低了测算结果的精确性。

此外,已有研究还从种植业作物的种类^[23]、种植结构调整、种植作物布局^[19]等角度分析对区域水资源压力的影响,也从作物生长的水足迹角度阐释区域水资源压力指数的变化^[24]。支彦玲等^[2]从共生视角,评估我国区域“水—能源—粮食”的系统适配性,发现我国部分地区水资源、能源和粮食生产的适配性水平较低。孙侦等^[25]计算出我国潜在耕地资源与水资源的基尼系数达到0.712,耕地资源和水资源的时空分布错位严重,从而出现粮食从缺水省份不断向丰水省份调度的现象^[26]。目前,我国13个粮食主产区中有12个省份对水资源的需求量日益加剧^[27],在河北、山东、河南等几个资源大省中具有恶化趋势,水资源分布和粮食生产的耦合度呈现波动下降趋势^[28]。基于此,杨鑫等^[29]利用水资源指数法发现粮食生产与水资源分布的空间错配导致区域水资源压力日益增大,以黄淮海和东北地区尤为凸显。已有文献多停留在现象描述阶段,缺乏对错配产生根源的深入探究,相应的实证研究也较为鲜见。本研究基于比较优势理论视角,拟采用熵权TOPSIS法对粮食生产比较优势和农业用水压力进行测算,并通过面板数据回归实证检验粮食生产比较优势与农业用水压力之间的关系,以期更为准确地测算出不同区域的粮食生产比较优势和农业用水压力,探寻粮食生产与水资源空间分布错配的根源。

1.2 粮食生产比较优势的相关研究

农业生产对自然禀赋具有较高的依赖性,各国农业要素禀赋的差异性对农产品生产比较优势具有较大影响。粮食生产比较优势被描述为国家或地区之间由于土地要素、水资源要素、劳动力要素和资本要素等禀赋的不同,导致在粮食生产和贸易时机会成本的差异^[30]。已有研究主要从要素投入和产出、生产成本和收益^[31]、面积和单产^[32]、种植模式和区域布局^[33]、农业生态系统生产力^[34]等角度,对影响粮食生产比较优势的因素进行探究。此外,从粮食生产比较优势的测算方法看,主要有显示性比较优势指数、国际市场占有率、产品技术复杂度、国内资源成本法、农业生产经济指标研究法和综合比较优势指数法等。广泛运用于研究区域粮食生产比较优

势的测度方法是由规模优势、效益优势和效率优势构成的综合比较优势指数法^[35-37]。然而,现有研究关于粮食生产比较优势的测算通常仅考虑规模优势、效率优势和效益优势等显性比较优势,忽略了传统比较优势理论涉及的诸如土地、劳动力、资本和水资源等要素资源禀赋指标。

2 研究假设与理论框架

2.1 粮食生产比较优势影响农业用水压力的理论分析

影响农业用水的因素主要来源于农作物的种植以及农产品的生产过程,其中粮食的种植过程是水资源在农业部门的主要用途,也是导致区域农业用水压力增长的重要原因^[1]。而影响粮食种植的因素以土地要素、劳动力要素、资本要素、水资源要素为主。首先,土地是影响粮食种植的最根本因素,我国耕地面积的变化与粮食播种面积的波动趋势近乎一致^[38],规模化种植与粮食增产更是息息相关^[4],耕地质量的提升也有助于粮食产量的提升^[39]。其次,农业劳动力也是影响粮食生产的一个重要因素,农业劳动力的数量与粮食播种面积在空间上具有明显的耦合特征^[5],而且农业劳动力的人力资本(如受教育程度)、老龄化、女性化对粮食的生产效率均具有重要影响^[40]。再者,资本要素投入对粮食种植的影响也日渐凸显,尤其是农业机械的投入^[6],劳动的机械替代率能够有效促进粮食增产^[41];此外,农业基础设施的建设水平^[42]、农村固定资产投资^[43]和农业技术进步^[44]也可以有效增强粮食生产能力。最后,水资源要素本应对粮食生产具有较强的约束作用,但水资源的公共资源属性致使其机会成本常被市场主体所忽视,从而导致市场对水资源的配置效率低下^[8]。

对于农户个体而言,土地要素、劳动力要素和资本要素具有较高的机会成本,而水资源要素作为一种公共资源具有竞用性和非排他性,加之水权交易规则和水价形成机制尚未完善,水资源要素使用的机会成本较低^[21]。意味着,当地区除水资源以外的其他资源禀赋较为丰裕(即粮食生产综合比较优势较高时),农户个体生产粮食的总成本低于市场价格,市场便通过价格机制不断诱导这些地区的农户以超过农业用水负荷的强度生产粮食,导致地区水资源要素日益匮乏。直到由水资源要素使用成本上升导致粮食生产总成本提高至与市场价格持平或高

于市场价格时,农户个体才可能停止生产粮食。可见,水资源要素对粮食生产的约束作用较为微弱。因此,相较于水资源要素,土地要素、劳动力要素、资本要素具有较高的机会成本,是影响农户个体粮食生产决策的主导因素,在这 3 种要素禀赋较高的区域,由于粮食生产综合比较优势的存在,农户个体在市场机制的诱导下自发地种植更多粮食,对水资源的需求量也不断增长,导致农业用水压力日渐加大^[45]。可见,土地要素、劳动力要素和资本要素优势通过增加粮食播种面积,进而加大农业用水压力的程度可能大于水资源要素优势所带来的影响。据此,提出假设 1:由于水资源优势对农业用水压力的负向作用小于土地、劳动力和资本优势的正向作用,导致粮食生产比较优势对地区农业用水压力具有显著的正向影响。

2.2 农业用水效率对错配的缓解作用的理论分析

具备丰裕资源要素禀赋的区域,即拥有较高的粮食生产比较优势,在市场机制的诱导下将会自发扩大粮食种植面积,增加农业用水,从而加剧区域的农业用水压力。而粮食种植面积又是粮食产量的必要保障,那么在粮食生产与水资源分布错配的现状下,是否有既可以保障粮食产量又能够缓解农业用水压力的方法呢?本研究尝试从农业用水效率角度,阐述保障粮食产量缓解农业用水压力的方法作用,进而论证农业用水效率在粮食生产比较优势影响农业用水压力中的调节作用。农业用水效率是指在农业多要素生产环境中,综合评价农业部门水资源投入所带来的农业部门的 GDP 产出,反映的是在保障农业产出的前提下水资源的节约程度^[26]。由于水资源要素投入对粮食产出存在边际递减效应,在技术水平不变的前提下,随着水资源要素投入的不断增长,每增加一单位的水资源要素投入所导致粮食产量的增加量逐渐减少^[8]。此外,农业用水效率较低的区域为保障粮食产量,就必须投入更多的水资源。于是粮食生产比较优势通过增加粮食产量对农业用水压力的影响就更大。反之,较高的农业用水效率能够降低单位粮食生产所需的水资源量,使得粮食生产比较优势通过扩大粮食生产对区域农业用水压力的影响程度减小。据此,提出假设 2:农业用水效率在粮食生产比较优势对地区农业用水压力的影响中具有负向调节作用。

2.3 理论模型框架

基于比较优势理论,依据假设 1 和假设 2 构建

了本研究的理论模型框架(图 1)。粮食生产对自然禀赋具有较高的依赖性,各国粮食生产要素禀赋即土地要素、水资源要素、劳动力要素和资本要素的差异性对粮食生产比较优势具有较大影响。因此,参照已有研究^[46]将粮食生产比较优势划分为土地优势、劳动力优势、资本优势和水资源优势 4 个子维度,通过逻辑论证得出,粮食生产比较优势会通过扩大粮食种植面积加剧区域农业用水压力。并且,由于水资源优势对农业用水压力的负向作用小于土地、劳动力和资本优势的正向作用,导致粮食生产比较优势对地区农业用水压力具有显著的促进作用。此外,为能在粮食生产与水资源分布错配的现状下,探究保障粮食产量的同时缓解农业用水压力的方法。考虑到较高的农业用水效率能够降低单位粮食生产所需的水资源量,使得粮食生产比较优势通过扩大粮食生产对区域农业用水压力的影响减小,本研究尝试从农业用水效率角度,论证其在粮食生产比较优势影响农业用水压力中的负向调节作用。

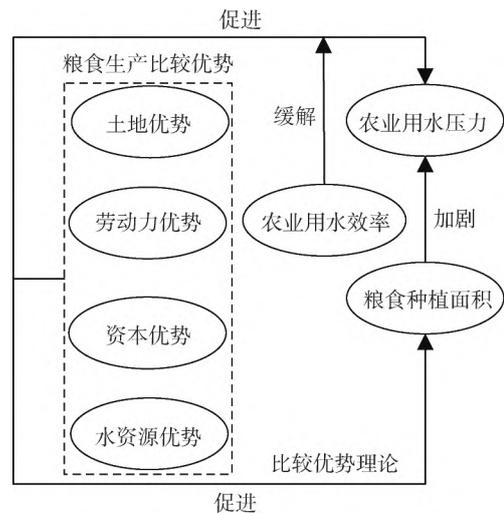


图 1 粮食生产比较优势与农业用水压力理论模型框架

Fig.1 Comparative advantage of grain production and agricultural water pressure theory model frame map

3 变量选取与模型设计

3.1 变量选取

3.1.1 被解释变量

本研究选取农业用水压力作为被解释变量,结合单一指标法与综合评价法进行测算。先参照刘燕慧等^[46]从水资源子系统、经济子系统、社会子系统、

生态子系统选取 23 个指标运用熵权 TOPSIS 法测算出水资源承载力,再结合于法稳^[14]从农业用水可持续视角计算出农业用水压力,能够相对准确地表征农业用水压力变量。原因在于我国各区域的经济、社会和生态等因素差异较大,农业用水量对不同区域造成的压力除了受到水资源禀赋的影响之外,也会受到经济、社会和生态等因素的影响。已有研究仅以水资源禀赋的 40% 来判断农业用水是否可持续,并没有考虑到经济、社会和生态等因素对区域水资源承载力的影响。本研究加入水资源承载力对各区域包括水资源、经济、社会和生态 4 方面因素的差异进行权重赋值,并运用农业用水比例与水资源承载力的比值来表征农业用水压力变量,在一定程度上能够更加真实、准确、合理地反映出各区域农业用水所带来的压力状况。具体测算方法如下:

$$A_{it} = \frac{F_{it}}{T_{it} \times W_{it}} \quad (1)$$

式中: i 表示省级行政区; t 表示年份; A_{it} 表示 t 年 i 区的农业用水压力; F_{it} 表示 t 年 i 区的农业用水量; T_{it} 表示 t 年 i 区的总用水量; W_{it} 表示 t 年 i 区的水资源承载力。水资源承载力作为测算农业用水压力的重要组成部分,参照刘雁慧等^[46]采用熵权 TOPSIS 方法对其进行测算,计算公式参考 Shih 等^[47]。

1) 原始数据预处理。将每一项指标原始数据用矩阵 Y 表示如下:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 23) \quad (2)$$

式中: j 为评价指标的数量; y_{ij} 为第 i 个省级行政区的第 j 个指标值。

2) 熵权法计算权重。

① 计算每一项指标 y_{ij} 的比重 q_{ij} :

$$q_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}} \quad (n = 31) \quad (3)$$

② 计算 23 项评价指标对应的熵值 f_j :

$$f_j = -\beta \sum_{i=1}^n q_{ij} \ln q_{ij} \quad (4)$$

式中, $\beta = 1/\ln(i)$ 。

③ 确定各项指标权重 w_j :

$$w_j = \frac{1 - f_j}{m - \sum_{j=1}^m (1 - f_j)} \quad (m = 23) \quad (5)$$

3) TOPSIS 法计相对贴近度。

① 构建加权规范化决策矩阵 V_{ij} ,将标准化的决策矩阵 X_{ij} 乘以对应的权重 w_j :

$$V_{ij} = w_j X_{ij} \quad (6)$$

② 计算正负理想解集合 V_i^+ 和 V_j^- :

$$V_i^+ = \{\max v_{ij}\} \quad (7)$$

$$V_j^- = \{\min v_{ij}\} \quad (8)$$

式中, v_{ij} 为 i 区 j 指标的理想解值。

③ 计算欧氏距离。以正负理想解为评价基准,计算出各评价对象至正负理想解的欧式距离, d_j^+ 值越大表示距离正理想值越远,即该评价对象越不理想。 d_j^- 值越大表示距离负理想值越远,即该评价对象越理想。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - V_j^+)^2} \quad (9)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - V_j^-)^2} \quad (10)$$

④ 测算各评价对象的相对贴近度 W_i 。 W_i 取值范围为 0~1, W_i 值越大表示距离负理想值越远,且距离正理想值越近,评价对象越理想;反之, W_i 值越小表示评价对象越不理想。

$$W_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (11)$$

3.1.2 解释变量

本研究选取粮食生产比较优势作为解释变量。粮食生产比较优势的常用测算方法是综合比较优势法,从规模优势、效益优势和效率优势三个角度选取显性比较优势指标进行测算,忽略了传统比较优势理论涉及的诸如土地优势、劳动力优势、水资源优势等自然禀赋因素,未从产生粮食生产比较优势的潜在动因角度选取测量指标。本研究参照胡文海等^[48]在综合比较优势法基础上进行改善,从土地优势、劳动力优势、资本优势和资源优势 4 个方面,兼顾显性比较优势和潜在比较优势选取 16 个指标(表 1),具有较强的系统性和科学性。同时,由于粮食生产比较优势亦为多指标维度变量,运用熵权 TOPSIS 对区域粮食生产比较优势进行综合评价,并计算出综合比较优势指数作为粮食生产比较优势变量的代理变量,并同时测算出 4 个子维度的值,指标具体计算方法同式(2)~(11)。

表1 粮食生产比价优势测度指标体系
Table 1 Index system for measuring price comparison advantage of grain production

| 目标层 Target layer | 准则层 Criterion layer | 指标层 Indicator layer | 计算方法 Calculation method | 类别 Category | |
|---|------------------------|------------------------------|---|----------------|----|
| 粮食生产比较优势 Comparative advantage in grain production | 土地优势(B ₁) | 耕地面积(C ₁) | 统计数据 | 正向 | |
| | | 劳均耕地面积(C ₂) | 耕地面积/第一产业从业人员数 | 正向 | |
| | | 粮食播种面积(C ₃) | 统计数据 | 正向 | |
| | | 劳均粮食播种面积(C ₄) | 粮食播种面积/第一产业从业人员数 | 正向 | |
| | 劳动力优势(B ₂) | 农村人力资本(C ₅) | 农村平均受教育年限 | 正向 | |
| | | 农业劳动力占比(C ₆) | (省第一产业从业人数/省常住人口数)/(全国第一产业从业人数/全国常住人口数) | 正向 | |
| | 资本优势(B ₃) | 劳均粮食产量(C ₇) | 粮食产量/第一产业从业人员数 | 正向 | |
| | | 农村交通设施(C ₈) | 公路总里程/省域国土面积 | 正向 | |
| | | 农业电力设施(C ₉) | (电力消费量×第一产业增加值/GDP)/农作物播种面积 | 正向 | |
| | | 粮食专利产出(C ₁₀) | 收集数据 | 正向 | |
| | | 农业机械水平(C ₁₁) | 农业机械总动力/农作物播种面积 | 正向 | |
| | | 农村人均固定资产投资(C ₁₂) | 农户固定资产投资/乡村人口数 | 正向 | |
| | | 水资源优势(B ₄) | 降水密度(C ₁₃) | 降水量/省域国土面积 | 正向 |
| | | | 水资源总量(C ₁₄) | 统计数据 | 正向 |
| | | | 地下水资源量(C ₁₅) | 统计数据 | 正向 |
| | | | 河流面积(C ₁₆) | 统计数据 | 正向 |

3.1.3 调节变量

本研究选取农业用水效率作为粮食生产比较优势对区域农业用水压力影响的调节变量,测算方法参照张玲玲等^[49]选取农业部门总产值作为产出变量,农业机械总动力、农作物播种总面积、农业劳动力人数、化肥投入、农药投入和农业用水量6个指标作为投入变量,利用超效率DEA方法测算出农业用水效率指数,能够有效地表征各区域的农业用水效率。

3.1.4 控制变量

根据已有研究对农业用水压力影响因素的相关研究成果^[10-11,18-19],本研究选取湿地占比(即湿地面积占省域国土面积比例)、粮食净利润(即水稻、小麦和玉米净利润的均值)、自然保护区占比(即自然保护区面积占省域国土面积比例)、农田水利设施(即有效灌溉面积占农作物播种面积比例)、水土流失治理水平(即水土流失治理面积占省域国土面积比

例),共5个变量作为本研究模型的控制变量。

3.2 数据来源

本研究使用的原始数据,无特别说明均来源于2003—2018年我国31个省(除港、澳、台之外的省级行政区)统计资料,共16年496个样本数据。具体如下:GDP、第一产业增加值、省域国土面积和电力消费量数据来自《中国统计年鉴》^[50];耕地面积、粮食播种面积、农作物播种面积、乡村人口数、水土流失治理面积数据来自《中国农村统计年鉴》^[51];农业用水量、水资源总量、河流面积、湿地面积和地表水资源数据来自《中国水利统计年鉴》^[52];粮食产量、农业机械总动力、第一产业从业人员数、农户固定资产投资和有效灌溉面积数据来自《中国农业统计资料》^[53]。此外,粮食专利产出的数据来源于知网数据库自行收集整理。

3.3 模型设计

基于变量选取,设计本研究的实证基准模型为:

$$A_{it} = \sigma + \alpha_1 G_{q,it} + \alpha_2 X_{z,it} + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (12)$$

式中： $G_{q,it}$ 为核心解释变量，表示 t 年 i 区域的粮食生产比较优势， $q=1,2,\dots,5$ 分别表示水资源优势、土地优势、劳动力优势、资本优势和粮食生产比较优势； $X_{z,it}$ 为控制变量，代表影响农业用水压力的其他因素， $z=1,2,\dots,5$ 分别表示湿地占比、粮食净利润、自然保护区占比、农田水利设施和水土流失治理水平5个控制变量； σ 为方程的常数项； α 为各变量对应的系数； μ_i 为各省难以观测的省区效应； ε_{it} 为随机扰动项。

式(12)为本研究的基准模型，用于检验由于水资源优势对农业用水压力的负向作用小于土地、劳动力和资本优势的正向作用，导致粮食生产比较优势对农业用水压力具有显著的正向影响，即假设1。

为在粮食生产与水资源分布错配的现状下，探究既能保障粮食产量又能够缓解农业用水压力的方法，本研究尝试从农业用水效率角度，分析其在粮食生产比较优势影响农业用水压力中的负向调节作用。为此设计层次回归分析模型如下：

$$A_{it} = \sigma + \lambda_1 G_{it} + \lambda_2 M_{it} + \lambda_3 X_{z,it} + \varphi_i + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

$$A_{it} = \sigma + \xi_1 G_{it} + \xi_2 M_{it} + \xi_3 G_{it} \times M_{it} + \xi_4 X_{z,it} + \omega_i + \varepsilon_{it} \quad (14)$$

式中： M_{it} 为调节变量，表示 t 年 i 区域的农业用水效率； λ 和 ξ 表示各方程对应的系数； φ_i 和 ω_i 表示各省难以观测的省区效应。通过式(13)和式(14)以检验假设2。

4 指标测算结果与实证分析

4.1 指标测算结果分析

2003—2018年我国31个省级行政区的水资源承载力、农业用水压力和粮食生产比较优势3个指标的均值和增长率测算结果见表2。

4.1.1 水资源承载力测量结果

2003—2018年我国平均水资源承载力为0.303，且地区间呈现出明显的差异(表2)。总体而言，我国南部地区水资源承载力普遍较高，各行业为满足生产需要，消耗的每单位水资源所产生的压力较小。而北部地区水资源承载力除内蒙古外普遍较低，各行业生产用水所产生的水资源压力承载能力较弱。由各省级行政区水资源承载力增长率可见，2003—2018年我国多数地区水资源承载力出现恶化。一方面是由于当地经济社会的快速发展，工业

服务业、城镇化率、人口密度、人均生活用水以及生态用水的迅速增加，另一方面各地水资源禀赋并无明显变化，导致多数区域水资源承载力的持续下降。而2003—2018年河北省水资源承载力却不降反增6.41%，这与政策干预息息相关。2003—2018年，河北省不仅多次实施“引黄补淀”水利工程、而且开展水土保持监督执法专项行动、施行休耕补贴、实行最严格水资源管理制度实施方案，2016年又印发实施《河北省水资源保护规划(2016—2030年)》。通过一系列的政策干预使得原本水资源承载力较低的河北省，得到了一定程度的改善。

4.1.2 农业用水压力测量结果

2003—2018年我国平均农业用水压力为2.098，东北区与黄淮海区的农业用水压力2003—2018年分别增长了16.59%、18.15%(表2)，这是由于东北区与黄淮海区水资源承载力较低，而粮食种植面积却处于全国最高水平，导致这2个区域农业用水压力增长较快，其中，安徽、辽宁、吉林、山东增长幅度较大。此外，西北区省级行政区由于水资源禀赋稀缺农业用水压力较大，2018年高达3.480，远高于2003—2018年我国平均农业用水压力2.098，其中，宁夏和新疆两省增幅较大。而我国南方地区则相反，如重庆、浙江、广东、福建、西藏、湖北、贵州、湖南和四川等省级行政区2003—2018年平均农业用水压力综合指数均在1.824以下，小于2003—2018年我国平均农业用水压力2.098，一方面是由于上述地区粮食生产规模较小，农业部门对水资源的需求量相对较少，另一方面我国南方地区的水资源承载力普遍较高，使得南方地区的农业用水压力相对北方地区较低。然而，从农业用水压力的增长视角看，南方地区也存在农业用水增长较快的省级行政区，如重庆、四川、海南、江西等省级行政区。这可能是由于近年来这4个省级行政区经济社会发展迅速，水资源承载力快速下降，加之农业发展速度较快用水量较大，从而导致农业用水压力增长速度较快。

4.1.3 粮食生产比较优势测量结果

2003—2018年我国粮食生产比较优势均值为0.347，地区间粮食生产比较优势呈现较大差异(表2)。包括13个粮食主产区以外，还有广东、浙江、新疆3个省级行政区也具有较高粮食生产比较优势，均大于2003—2018年我国粮食生产比较优势平均值0.347。上述16个省级行政区大多具有较

表2 2003—2018年我国31省级行政区水资源承载力、农业用水压力和粮食生产比较优势分布特征
Table 2 Distribution characteristics of water resources carrying capacity, agricultural water pressure and comparative advantage of grain production in 31 provinces in China from 2003 to 2018

| 地区 Area | 水资源承载力 Water carrying capacity | | 农业用水压力 Agricultural water stress | | 粮食生产比较优势 Advantage in grain production | |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---|----------------------|
| | 均值 Mean | 增长率/% Growth rate | 均值 Mean | 增长率/% Growth rate | 均值 Mean | 增长率/% Growth rate |
| | 北京 Beijing | 0.241 | -16.24 | 1.119 | -55.05 | 0.320 |
| 天津 Tianjin | 0.246 | -8.45 | 2.092 | -20.04 | 0.299 | -3.06 |
| 河北 Hebei | 0.277 | 6.41 | 2.672 | -12.35 | 0.361 | 5.12 |
| 山西 Shanxi | 0.279 | -14.15 | 2.164 | 19.97 | 0.334 | 2.69 |
| 内蒙古 Inner Mongolia | 0.324 | -23.61 | 2.401 | 14.94 | 0.418 | 11.11 |
| 辽宁 Liaoning | 0.271 | -26.31 | 2.395 | 30.04 | 0.350 | 0.61 |
| 吉林 Jilin | 0.276 | -14.73 | 2.469 | 21.45 | 0.401 | 6.81 |
| 黑龙江 Heilongjiang | 0.279 | 4.67 | 2.865 | 19.98 | 0.449 | 43.01 |
| 上海 Shanghai | 0.250 | -15.73 | 0.587 | 14.14 | 0.331 | 3.32 |
| 江苏 Jiangsu | 0.285 | -19.37 | 1.823 | 13.42 | 0.435 | 19.08 |
| 浙江 Zhejiang | 0.349 | 0.36 | 1.359 | -12.17 | 0.371 | 26.55 |
| 安徽 Anhui | 0.278 | -32.79 | 2.055 | 46.33 | 0.346 | 4.04 |
| 福建 Fujian | 0.324 | -16.57 | 1.550 | 3.45 | 0.332 | 7.24 |
| 江西 Jiangxi | 0.336 | -17.77 | 1.962 | 23.62 | 0.351 | 12.82 |
| 山东 Shandong | 0.268 | -28.91 | 2.649 | 21.06 | 0.345 | 16.34 |
| 河南 Henan | 0.266 | -34.42 | 2.195 | 35.26 | 0.411 | 5.17 |
| 湖北 Hubei | 0.309 | -19.14 | 1.714 | 13.98 | 0.352 | 31.06 |
| 湖南 Hunan | 0.333 | -15.31 | 1.805 | 10.96 | 0.396 | 6.42 |
| 广东 Guangdong | 0.344 | -5.55 | 1.478 | 5.48 | 0.421 | 17.45 |
| 广西 Guangxi | 0.330 | -14.28 | 2.089 | 10.00 | 0.331 | 20.14 |
| 海南 Hainan | 0.337 | -29.09 | 2.303 | 30.81 | 0.241 | 3.32 |
| 重庆 Chongqing | 0.295 | -29.86 | 1.004 | 60.45 | 0.288 | 34.26 |
| 四川 Sichuan | 0.325 | -22.27 | 1.813 | 33.34 | 0.395 | 15.06 |
| 贵州 Guizhou | 0.301 | 1.49 | 1.761 | 2.75 | 0.325 | 52.13 |
| 云南 Yunnan | 0.346 | -13.29 | 2.027 | 8.21 | 0.332 | 34.94 |
| 西藏 Xizang | 0.534 | -18.10 | 1.675 | 15.64 | 0.320 | 7.09 |
| 陕西 Shaanxi | 0.298 | -25.26 | 2.237 | 24.58 | 0.271 | 25.55 |
| 甘肃 Gansu | 0.273 | -14.09 | 2.912 | 18.82 | 0.301 | 5.63 |
| 青海 Qinghai | 0.302 | -8.23 | 2.465 | 16.22 | 0.254 | 13.54 |
| 宁夏 Ningxia | 0.238 | -33.25 | 3.880 | 40.67 | 0.296 | 3.75 |
| 新疆 Xinjiang | 0.265 | -21.97 | 3.552 | 29.76 | 0.369 | 10.56 |

高的耕地要素、农业劳动力要素、农业资本要素或水资源要素,从而具备较强的粮食生产能力。海南、青海、陕西、重庆、宁夏、甘肃等省级行政区的粮食生产比较优势较低均在 0.301 及以下,小于全国均值 0.347。其中,青海、陕西、宁夏和甘肃由于缺乏耕地资源、农业劳动力资源、农业资本和水资源,从而不具备粮食生产比较优势。海南和重庆水资源较为丰富,但由于耕地要素、农业劳动力要素或者农业资本要素的欠缺,导致粮食生产比较优势较弱。此外,从表 2 粮食生产比较优势增长率可见,2003—2018 年我国粮食生产比较优势上升较快的省级行政区,西南区主要为贵州、云南、重庆;东北区主要为黑龙江;长江中下游区主要为湖北和浙江;华南区主要为广西;黄淮海区为江苏。一方面,可能是由于近年来这

些省级行政区的农业资本投入迅猛增长,农业机械化水平快速提升,农村交通设施、农业电力设施不断完善,大幅提高了这些地区的粮食生产比较优势。另一方面,由于适度规模经营的新型农业经营主体如雨后春笋般涌现,导致单位土地产出效率得到进一步提升。

将 2003—2018 年我国各区域粮食生产比较优势的 4 个子维度相对于全国平均水平的比值进行比较,分别测算出二者的标准化指数,结果见图 2:从土地优势和劳动优势看,黄淮海区和东北区处于相对较高水平;从资本优势来看,黄淮海区、华南区和长江中下游区具有较高的优势;从水资源优势来看,长江中下游区、华南区和西南区具有较高优势。

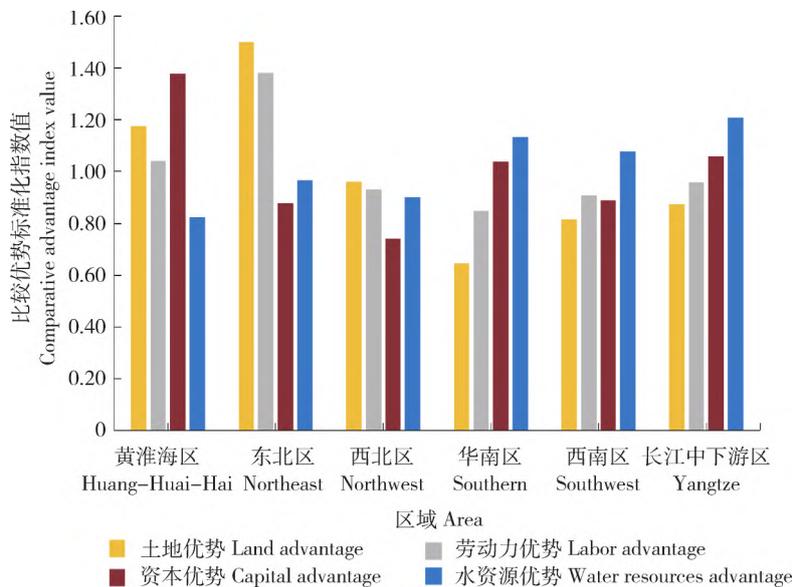


图 2 2003—2018 年我国 31 个省粮食生产比较优势 4 维度分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of the four dimensional index of comparative advantage of grain production in 31 provinces in China from 2003 to 2018

4.1.4 粮食种植面积与水资源承载力

2003—2018 年我国年均粮食播种面积为 35.291 km²。其中最大的粮食种植区域主要集中在黄淮海区和东北区、长江中下游区、西南区等地区,这些区域 2003—2018 年的粮食平均播种面积均在 35.842 km² 以上,大于全国平均水平。将 2003—2018 年我国各地区水资源承载力和食种植面积相对于全国平均水平的比值进行比较,分别测算出二者的标准化指数,结果见图 3:黑龙江、河南、山东、安徽、河北、四川、江苏、内蒙古和吉林水资源承

载力标准化指数明显低于粮食播种面积标准化指数,且黄淮海区和东北区错配较为严重,由此使得这两个地区产生较高的农业用水压力;而西藏、海南、青海、浙江、福建和广东等省级行政区水资源承载力标准化指数明显高于粮食播种面积标准化指数,主要集中于华南区、西北区、西南区、长江中下游区,其中华南区和西北区尤为凸显,由此具有较低的农业用水压力。可以初步看出,多数地区 2003—2018 年水资源承载力标准化指数与粮食播种面积标准化指数存在错配,导致水资源匮乏的错配区域农业用水压力增大。

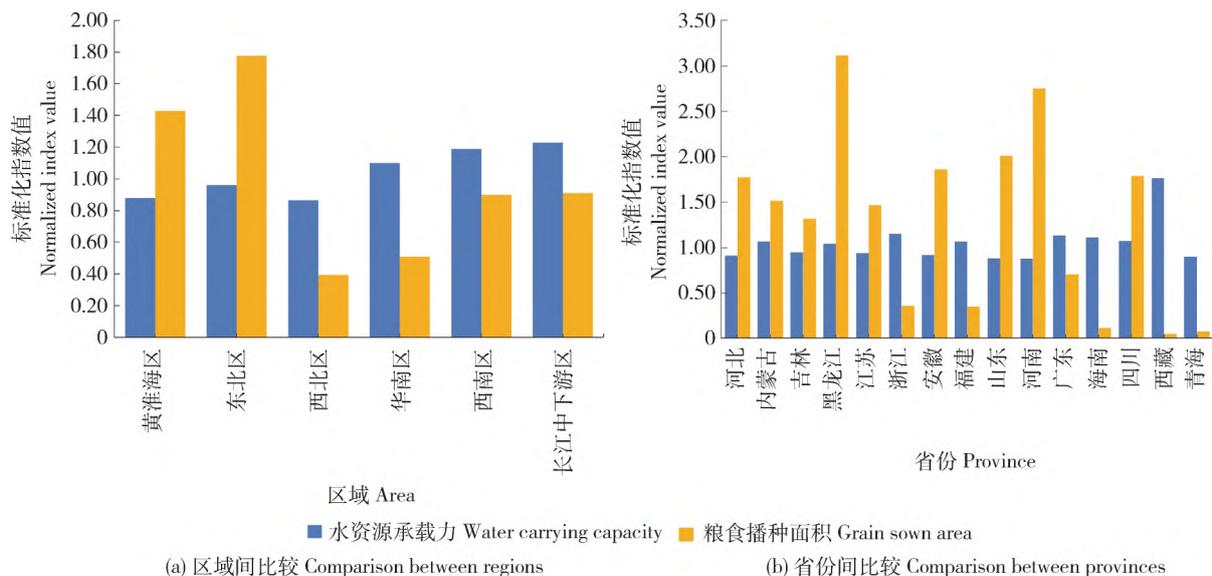


图 3 2003—2018 年我国水资源承载力与粮食播种面积标准化指数

Fig. 3 2003—2018 China water resources carrying capacity and grain sown area standardization index

4.1.5 农业用水压力与粮食生产比较优势

将 2003—2018 年我国各地区农业用水压力和粮食生产比较优势相对于全国平均水平的比值进行比较,分别测算出二者的标准化指数,结果见图 4:除西北区的农业用水压力标准化指数和粮食生产比较优势标准化指数差异较大以外,黄淮海区(山东、河北、江苏、安徽、河南)、东北区(内蒙古、辽宁省、吉林省、黑龙江)、华南区(福建、广西、海南)、长江中下游区(江西、湖北、湖南)和西南区(四川、贵州、云南)

的农业用水压力标准化指数和粮食生产比较优势标准化指数基本匹配。由此,可以初步看出,粮食生产比较优势与农业用水压力之间可能存在一定程度的关联性。据此现象推测,由于水资源、土地、劳动力和资本要素的综合比较优势,可能会推动区域不断扩大粮食生产。但由于土地、劳动力和资本的优势持续增加粮食种植面积,而忽视水资源的可持续利用,可能会导致区域农业用水压力进一步加剧。下文将通过实证方法进一步检验二者之间的联系。

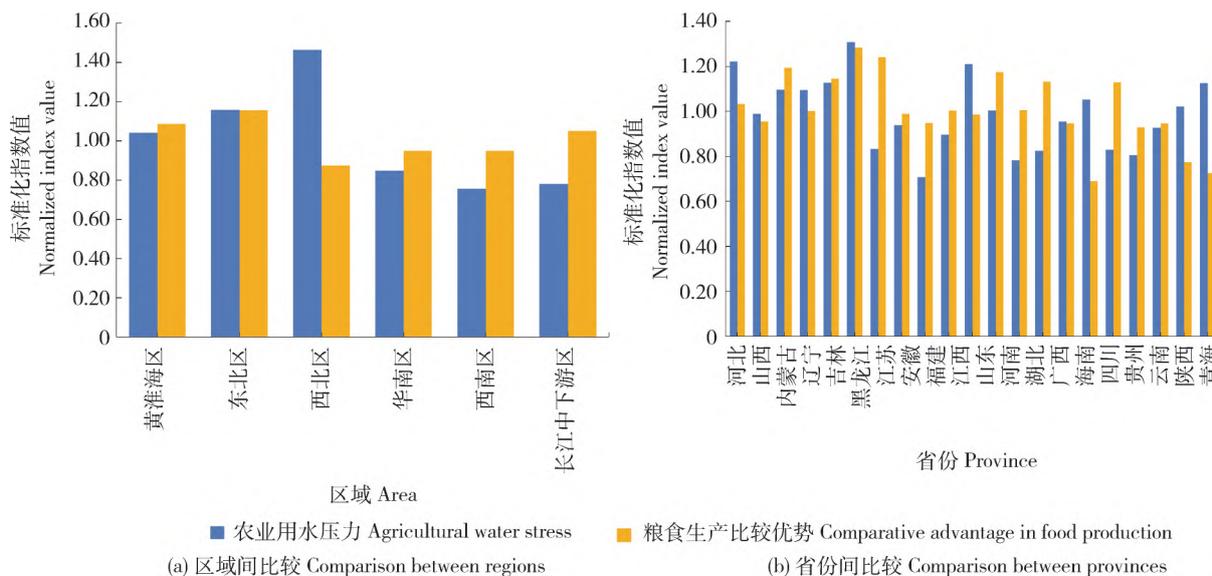


图 4 2003—2018 年我国农业用水压力与粮食生产比较优势标准化指数

Fig. 4 2003—2018 standardized index of China's agricultural water pressure and comparative advantage of grain production

4.2 实证检验

4.2.1 粮食生产比较优势影响农业用水压力的实证结果

为检验粮食生产比较优势与农业用水压力之间的关系机制,运用 Stata 16.0 进行面板数据回归。本研究在固定效应和随机效应实证模型的选择上,采用 Hausman 检验进行判断,检验结果表明选择固定效应更加适合,后续研究主要针对固定效应模

型结果进行分析。此外,本研究还运用方差膨胀因子(VIF)和容差值(tolerance)对每个模型进行多重共线性检验,结果发现各模型方差膨胀因子均小于阈值 10,且容差值均超过临界值 0.1,表明各模型不存在严重的多重共线性。

表 3 示出粮食生产比较优势与农业用水压力的回归系数及显著性,其中模型 1 为控制变量回归结果,模型 2 至模型 5(基于式(12))依次加入粮食生产

表 3 粮食生产比较优势与农业用水压力的回归系数及显著性
Table 3 Regression coefficient and significance of comparative advantage in grain production and agricultural water stress index

| 变量名称 Variable | 模型 1 Model 1 | 模型 2 Model 2 | 模型 3 Model 3 | 模型 4 Model 4 | 模型 5 Model 5 | 模型 6 Model 6 |
|--|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 水资源优势 Water resources advantage | | -0.321** (-2.09) | | | | |
| 土地优势 Land advantage | | | 0.720*** (4.48) | | | |
| 劳动力优势 Labor advantage | | | | 1.423*** (5.94) | | |
| 资本优势 Capital advantage | | | | | 1.273*** (5.79) | |
| 粮食生产比较优势 Comparative advantage | | | | | | 0.611** (2.05) |
| 湿地占比 Wetland occupancy | -0.051 (-0.09) | 0.390 (0.51) | 0.151 (0.23) | -0.437 (-0.58) | -1.124 (-1.52) | -0.368 (-0.64) |
| 粮食净利润 Grain net profit | -0.003 (-1.26) | -0.002 (-1.08) | 0.003 (0.12) | 0.006*** (3.42) | 0.005** (2.60) | -0.001 (-0.26) |
| 自然保护区占比 Proportion of nature reserves | -0.204 (-0.18) | -0.468 (-0.34) | -1.211 (-1.17) | -1.648* (-1.78) | 1.309 (1.42) | -0.284 (-0.32) |
| 农田水利设施 Water conservancy facilities | 0.450 (0.79) | 0.555 (0.87) | 0.528 (1.01) | 0.136 (0.30) | -0.157 (-0.33) | 0.376 (0.69) |
| 水土流失治理水平 Soil erosion control level | -0.168 (-0.28) | 0.004 (0.01) | -0.331 (-0.59) | -0.202 (-0.42) | -0.927 (-1.67) | -0.443 (-0.74) |
| 常数项 Cons | 2.008*** (6.18) | 2.034*** (5.65) | 1.869*** (6.70) | 1.793*** (7.96) | 1.842*** (7.18) | 1.904*** (7.42) |
| 观测值 Observations | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 |

注:***、**、* 分别代表在 1%、5%、10%的水平上显著;括号内的数值为 t 值。表 4、5 同。

Note: ***, ** and * mean effects of a variables at 1%, 5% and 10% levels. The number of parentheses is t value. Tables 4 and 5 are the same as Table 3.

比较优势的4个子维度,可以看出水资源优势、土地优势、劳动力优势和资本优势与区域农业用水压力之间的关系,即水资源优势在5%水平上通过显著性检验且系数为-0.321,土地优势、劳动力优势和资本优势均在1%水平上通过显著性检验,且系数分别为0.720、1.423和1.273,说明水资源优势对农业用水压力具有显著的负向影响,而土地优势、劳动力优势和资本优势对农业用水压力具有显著的正向影响。模型6(基于式(12))加入粮食生产比较优势变量进行回归,发现其对区域农业用水压力的影响在5%水平上显著,且系数为0.611,表明粮食生产综合比较优势会加大区域农业用水压力。根据这6个模型回归结果,可进一步推出粮食生产的土地优势、劳动力优势和资本优势对农业用水压力的正向影响程度超过了水资源优势对农业用水压力的负向影响,因此粮食生产综合比较优势才会显著增大区域农业用水压力,假设1得到验证。

为克服极端值和误差项等干扰对估计结果的影响,更加客观全面地描述粮食生产比较优势对农业用水压力的影响在不同分位点处的差异,以及更为详细地了解不同分位点处粮食生产比较优势与农业用水压力的关系,本研究以0.1,0.2,...,0.9为分位点进行分位数回归,分别对应模型7,模型8,...,模型15,以此检验回归结果的稳健性的同时分析区域间的异质性。表4示出粮食生产比较优势与农业用水压力的分位数回归系数及显著性,可见,粮食生产比较优势对农业用水压力的影响在不同分位点处的系数及显著性都有所差异。其中,在0.1处(模型7)粮食生产比较优势对农业用水压力的影响系数为-0.014不显著,说明在农业用水压力极小的地区,粮食生产比较优势的增加并不会显著加大农业用水压力。例如,浙江(1.359)、广东(1.478)、福建(1.550)和西藏(1.675)等地农业用水压力极低,粮食生产比较优势的提升会增加区域粮食播种面积,从而增加区域农业用水量。但由于水资源丰裕地区较易从新的渠道开采水资源进行补充,从而对这些区域的农业用水压力并不会产生显著的影响。同时,在0.9分位点上(模型15)粮食生产比较优势对农业用水压力的影响系数为0.723不显著,说明在农业用水压力极大的区域,粮食生产比较优势的增加也不会显著加大农业用水压力。例如宁夏(3.880)、新疆(3.552)、甘肃(2.912)和河北(2.672)等地区农业用水压力极大,每增加一单位粮食生产比较优势虽然

能够一定程度上推动粮食播种面积的扩张,但由于这些区域已经处于极高的农业用水压力水平,水资源较为匮乏且开采难度和成本较高,水资源已然成为粮食生产的硬约束条件,使得的农业用水量的增量较小,从而并未对区域的农业用水压力产生显著影响。而在0.2~0.8分位点上(模型8至模型14)粮食生产比较优势对农业用水压力的影响均显著为正。说明在0.2至0.8分位点上,区域的粮食生产比较优势确实会加大农业用水压力,再一次验证了假设1。

4.2.2 农业用水效率对错配缓解作用的实证检验

为能在粮食生产与水资源分布错配的现状下,保障粮食产量的同时缓解农业用水压力,本研究实证检验农业用水效率对错配的缓解作用。表5示出农业用水效率调节机制的回归系数及显著性,其中模型16、模型19和模型22为控制变量回归结果作为参照。模型17(基于式(13))的结果显示,粮食生产比较优势对农业用水压力具有显著的正向影响。模型18(基于式(14))加入农业用水效率与粮食生产比较优势的交互项之后,交互项对农业用水压力的回归系数为-0.311且在10%水平上通过显著性检验,表明农业用水效率在粮食生产比较优势对农业用水压力的影响中起负向调节作用,验证了假设2。由此可见,虽然粮食生产比较优势在市场机制作用下,诱导区域种植更多的粮食从而加大农业用水压力,但是在农业用水效率较高的区域,由于农业水资源配置效率、利用水平或灌溉技术较高,单位粮食播种面积耗水量较低,能够有效降低农业生产用水需求量,从而缓解区域农业用水压力。

此外,本研究根据区域农业用水压力水平的中位数,将我国31省级行政区分为农业用水压力低组和高组2个样本。分别对农业用水效率在2个样本中的调节作用强度进行检验,验证结果稳健性的同时分析区域间的异质性。在农业用水压力低组中(模型20和模型21),农业用水效率与粮食生产比较优势的交互项对农业用水压力的回归系数为-0.207且在1%水平上通过显著性检验(基于式(13)和式(14))。而在农业用水压力高组中(模型23和模型24),农业用水效率与粮食生产比较优势的交互项对农业用水压力的回归系数为-3.551且在1%水平上通过显著性检验(基于式(13)和式(14))。表明相对于农业用水压力较低的区域,在农业用水压力较高的区域内,农业用水效率在粮食

表4 粮食生产比较优势与农业用水压力分位数回归系数及显著性
Table 4 Coefficient and significance of quantile regression of comparative advantage in grain production and agricultural water stress index

| 变量 Variable | 模型7 Model 7 | 模型8 Model 8 | 模型9 Model 9 | 模型10 Model 10 | 模型11 Model 11 | 模型12 Model 12 | 模型13 Model 13 | 模型14 Model 14 | 模型15 Model 15 |
|--|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 粮食生产比较优势 Comparative advantage | -0.014 (-0.02) | 0.847** (2.23) | 0.863** (2.25) | 0.937** (2.60) | 0.722* (1.89) | 0.837** (2.40) | 1.098** (2.96) | 1.033** (2.63) | 0.723 (1.63) |
| 湿地占比 Wetland occupancy | -1.823** (-10.35) | -2.130** (-7.45) | -1.801** (-6.10) | -2.077** (-5.97) | -2.680** (-7.02) | -3.042** (-10.61) | -3.299** (-10.52) | -3.408** (-10.59) | -3.832** (-12.00) |
| 粮食净利润 Grain net profit | -0.003 (-0.89) | -0.003 (-0.10) | -0.003 (-0.91) | -0.001 (-0.17) | -0.002 (-0.51) | -0.006 (-1.38) | -0.006 (-1.33) | -0.007 (-1.49) | -0.010 (-1.43) |
| 自然保护区占比 Proportion of nature reserves | -0.280 (-0.48) | 0.437** (2.00) | 0.469** (3.54) | 0.545** (3.24) | 0.659** (3.61) | 0.665** (3.27) | 0.732** (2.01) | 0.573 (1.20) | 0.510 (0.96) |
| 农田水利设施 Water conservancy facilities | -0.175 (-0.80) | -0.518** (-3.42) | -0.529** (-2.82) | -0.261 (-0.59) | 0.866 (1.40) | 1.483** (3.60) | 1.638** (3.40) | 2.026** (3.66) | 1.741** (3.60) |
| 水土流失治理水平 Soil erosion control level | -1.879** (-4.32) | -1.437** (-3.37) | -1.227** (-2.42) | -0.366 (-0.65) | -0.187 (-0.56) | 0.002 (0.01) | 0.331 (0.88) | 0.246 (0.52) | 0.398 (0.60) |
| 常数项 Cons | 1.982** (8.74) | 1.883** (15.27) | 1.962** (17.45) | 1.836** (10.29) | 1.642** (7.57) | 1.526** (6.94) | 1.479** (5.00) | 1.606** (4.59) | 2.210** (6.88) |
| 观测值 Observations | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 |

表 5 农业用水效率调节机制的回归系数及显著性
Table 5 Regression coefficient and significance of the adjustment mechanism of agricultural water use efficiency

| 变量名称 Variable | 农业用水压力 Agricultural water stress | | | | 低组：农业用水压力 Low group: Agricultural water stress | | | | 高组：农业用水压力 High group: Agricultural water stress | | | |
|--|-------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---|----------------------|--------------------|--------------------|--|--|--|--|
| | 模型 16 Model 16 | 模型 17 Model 17 | 模型 18 Model 18 | 模型 19 Model 19 | 模型 20 Model 20 | 模型 21 Model 21 | 模型 22 Model 22 | 模型 23 Model 23 | 模型 24 Model 24 | | | |
| 粮食生产比较优势 Comparative advantage | | 0.605* (2.03) | 0.586* (1.99) | | 0.089 (0.21) | 0.093 (0.22) | | 1.136** (2.69) | 0.745** (2.42) | | | |
| 农业用水效率 Water Efficiency | | -0.004** (-2.19) | -0.030** (-2.15) | | -0.004** (-2.42) | -0.021*** (-3.82) | | -0.007 (-0.02) | 0.143 (0.51) | | | |
| 交互项 Interactive term | | | -0.311* (-1.96) | | | -0.207*** (-3.77) | | | -3.551* (-1.98) | | | |
| 湿地占比 Wetland occupancy | -0.051 (-0.09) | -0.370 (-0.65) | -0.373 (-0.66) | 0.498 (1.64) | 0.411* (1.98) | 0.384* (1.82) | -0.286 (-0.12) | -1.768 (-0.84) | -1.708 (-0.77) | | | |
| 粮食净利润 Grain net profit | -0.204 (-0.18) | -0.228 (-0.25) | -0.246 (-0.27) | -0.950 (-1.49) | -0.758 (-1.52) | -0.719 (-1.44) | -1.242 (-0.64) | -3.249 (-1.43) | -3.443 (-1.43) | | | |
| 自然保护区占比 Proportion of nature reserves | -0.003 (-1.26) | -0.001 (-0.25) | -0.001 (-0.15) | -0.001 (-0.25) | -0.001 (-0.12) | -0.001 (-0.07) | -0.002 (-0.79) | -0.001 (-0.24) | -0.001 (-0.25) | | | |
| 农田水利设施 Water conservancy facilities | 0.450 (0.79) | 0.381 (0.70) | 0.389 (0.72) | -0.147 (-0.21) | -0.126 (-0.19) | -0.112 (-0.17) | 1.977*** (3.85) | 1.223*** (3.01) | 1.161** (2.69) | | | |
| 水土流失治理水平 Soil erosion control level | -0.168 (-0.28) | -0.448 (-0.74) | -0.443 (-0.74) | 0.277 (0.37) | 0.214 (0.25) | 0.195 (0.23) | -0.772 (-0.59) | -0.459 (-0.37) | -0.412 (-0.33) | | | |
| 常数项 Cons | 2.008*** (6.18) | 2.102*** (6.61) | 2.096*** (6.61) | 1.690*** (4.39) | 1.679*** (4.51) | 1.673*** (4.51) | 2.187*** (6.48) | 2.853*** (8.70) | 2.909*** (7.74) | | | |
| 观测值 Observations | 465 | 465 | 465 | 240 | 240 | 240 | 225 | 225 | 225 | | | |

生产比较优势对农业用水压力的影响中能够发挥更强的负向调节效应。可见,在农业用水压力较高的区域更有必要提升农业用水效率。

5 结论与对策建议

本研究基于比较优势理论,采用熵权 TOPSIS 法对水资源承载力和粮食生产比较优势进行测算,比较区域间粮食播种面积与水资源承载力,以此分析粮食生产与水资源空间分布的错配状况;探寻粮食生产与水资源空间分布错配的逻辑根源,采用面板数据实证检验了粮食生产与水资源空间分布错配的根源。得出以下结论:

1)我国不同区域 2003—2018 年的粮食生产与水资源空间分布存在明显空间错配现象。东北区和黄淮海区水资源承载力标准化指数与粮食播种面积标准化指数之差分别为 -0.815 、 -0.552 ,粮食生产规模大而水资源却较为稀缺;相反地,华南区和西北区水资源承载力标准化指数与粮食播种面积标准化指数之差分别为 0.590 和 0.471 ,粮食生产规模小而水资源却相对充裕。

2)水资源优势能够显著降低区域农业用水压力,土地优势、劳动力优势和资本优势会显著加大区域农业用水压力,而综合比较优势也具有加大区域农业用水压力的作用。即粮食生产比较优势加剧地区农业用水压力的原因,主要是由于土地优势、劳动力优势、资本优势对地区农业用水压力的正向影响超过了水资源优势对地区农业用水压力的负向影响所导致;进一步研究发现,在农业用水压力极小(0.1分位点)和极大(0.9分位点)的区域,粮食生产比较优势对地区农业用水压力的影响作用并不明显,然而在 $0.2\sim 0.8$ 的所有分位点则具有显著的正向影响,说明实证结果较为稳健。

3)从调节效应回归结果看,农业用水效率在粮食生产比较优势对农业用水压力的影响中具有负向调节作用,且分样本回归结果发现相对于农业用水压力较低的区域,在农业用水压力较高的区域内,农业用水效率能够发挥更强的负向调节作用。说明在农业用水效率较高的区域,虽然受到粮食生产比较优势诱导粮食种植面积不断增加,但由于农业用水效率的作用降低了单位粮食种植面积的需水量,使得区域农业用水压力得以缓解。可见,较高的农业用水效率能够有效缓解区域粮食生产比较优势对粮食生产与水资源空间分布错配的影响,且在农业用

水压力较高的区域缓解作用更加明显。

根据上述结论可得到如下政策启示,现阶段我国正面临粮食生产和水资源空间分布错配的窘境,逐步有序动态地调整优化我国粮食作物种植与生产布局以缓解区域农业用水压力,实现水资源可持续利用,是保障粮食可持续生产的重要举措。

1)优化粮食生产与水资源空间匹配程度。根据区域间农业用水压力差异分类并有所侧重地制定粮食补贴政策,调整优化各区域粮食生产与水资源空间分布的匹配程度。通过政策扶持手段对水资源要素丰裕,但土地、劳动力和资本要素较低区域进行有效激励,适当增加土地与水资源条件优越区域的粮食产量。

2)加大粮食生产布局中水资源要素约束权重。在粮食生产比较优势较高且农业用水压力较大的区域,考虑到水资源的可持续利用,政府应完善水权交易市场促成水价形成机制并实施节水激励制度,谨慎适度渐进地提高这些区域的农业用水成本,进一步缓解由市场失灵带来的水资源配置效率低下问题。

3)分区域提升粮食生产用水效率。尤其在农业用水压力水平较高的区域,应加大力度通过优化需水管理策略、推广节水灌溉技术、培育节水粮食品种、推进节水灌溉工程等手段,分区域提高农业用水效率,以此缓解由于粮食种植面积扩张产生的区域农业用水压力。

本研究还存在一定的局限性,一方面,受限于数据的可获取性,仅基于 2003—2018 年的省级面板数据进行测算和实证分析,较难反映我国粮食生产格局形成的历史原因;另一方面,本研究仅从比较优势视角探究粮食生产与水资源错配问题,对政策制度、人口迁移、历史文化等因素的考虑还有所欠缺。后续研究将进一步丰富数据来源,并考虑更多影响因素对该问题进行探究。

参考文献 References

- [1] 樊慧丽,付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长:以长江经济带为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 193-203
Fan H L, Fu W G. Analysis of water and soil resources matching and agricultural economic growth in China from the perspective of water footprint: Taking the Yangtze River economic belt as an example [J]. *Chinese Journal of*

- Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(10): 193-203 (in Chinese)
- [2] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 赵西宁. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826-1835
Cao X C, Wu P T, Wang Y B, Zhao X N. Agriculture water utilization assessment based on water footprint of grain production evaluation in irrigated farmland of China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(11): 1826-1835 (in Chinese)
- [3] 支彦玲, 陈军飞, 王慧敏, 刘钢, 朱外明. 共生视角下中国区域“水-能源-粮食”复合系统适配性评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 129-139
Zhi Y L, Chen J F, Wang H M, Liu G, Zhu W M. Assessment of water-energy-food nexus fitness in China from the perspective of symbiosis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1): 129-139 (in Chinese)
- [4] 刘洛, 徐新良, 刘纪远, 陈曦, 宁佳. 1990—2010年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J]. 地理学报, 2014, 69(12): 1767-1778
Liu L, Xu X L, Liu J Y, Chen X, Ning J. Impact of farmland changes on production potential in China during recent two decades[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1767-1778 (in Chinese)
- [5] 戈大专, 龙花楼, 张英男, 屠爽爽. 中国县域粮食产量与农业劳动力变化的格局及其耦合关系[J]. 地理学报, 2017, 72(6): 1063-1077
Ge D Z, Long H L, Zhang Y N, Tu S S. Pattern and coupling relationship between grain yield and agricultural labor changes at county level in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 1063-1077 (in Chinese)
- [6] 伍骏骞, 方师乐, 李谷成, 徐广彤. 中国农业机械化发展水平对粮食产量的空间溢出效应分析: 基于跨区作业视角[J]. 中国农村经济, 2017(6): 44-57
Wu J Q, Fang S L, Li G C, Xu G T. The spillover effect of agricultural mechanization on grain output in China: From the perspective of cross-regional mechanization service[J]. *Chinese Rural Economy*, 2017(6): 44-57 (in Chinese)
- [7] Wallace J S, Gregory P J. Water resources and their use in food production systems[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(4): 363-375
- [8] Dorward A. Agricultural labour productivity, food prices and sustainable development impacts and indicators [J]. *Food Policy*, 2013, 39(1): 40-50
- [9] Falkenmark M, Widstrand C. Population and water resources: A delicate balance[J]. *Population Bulletin*, 1992, 47(3): 1-36
- [10] 贾学秀, 严岩, 朱春雁, 白雪, 胡梦婷, 吴钢. 区域水资源压力分析评价方法综述[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1783-1791
Jia X X, Yan Y, Zhu C Y, Bai X, Hu M T, Wu G. Approaches for regional water resources stress assessment: A review[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1783-1791 (in Chinese)
- [11] 王慧亮, 申言霞, 李卓成, 王煜. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 12-17
Wang H L, Shen Y X, Li Z C, Wang Y. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6): 12-17 (in Chinese)
- [12] 郑德凤, 王佳媛, 李钰, 姜俊超, 吕乐婷. 基于节水视角的中国水资源压力时空演变及影响因素分析[J]. 地理科学, 2021, 41(1): 157-166
Zheng D F, Wang J Y, Li Y, Jiang J C, Lyu L T. Spatial-temporal variation of water resources stress and its influencing factors based on water-saving in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(1): 157-166 (in Chinese)
- [13] 田欣, 熊翌灵, 刘尚炜, 唐志鹏. 中国省际水资源压力的转移模式[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 75-83
Tian X, Xiong Y L, Liu S W, Tang Z P. Deciphering the pattern for inter-provincial water stress transferring: A case study on China's mainland[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 75-83 (in Chinese)
- [14] 于法稳. 粮食国际贸易对区域水资源可持续利用的影响[J]. 中国农村观察, 2010(4): 54-62, 96
Yu F W. Impact of international trade of grain on sustainable utilization of regional water resource in China[J]. *China Rural Survey*, 2010(4): 54-62, 96 (in Chinese)
- [15] Alessa L, Kliskey A, Lammers R, Arp C, White D, Hinzman L, Busey R. The Arctic water resource vulnerability index: An integrated assessment tool for community resilience and vulnerability with respect to freshwater [J]. *Environmental Management*, 2008, 42(3): 523-541
- [16] Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(11): 4098-4104
- [17] Garriga R G, Foguet A P. Improved method to calculate a water poverty index at local scale [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(11): 1287-1298
- [18] 唐霞, 张志强, 尉永平, 熊永兰, 王勤花. 黑河流域水资源压力定量评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 219-224
Tang X, Zhang Z Q, Wei Y P, Xiong Y L, Wang Q H. Quantitative evaluation of water resources pressure in Heihe River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 219-224 (in Chinese)
- [19] 杜玲, 王猛, 刘曦, 陈卓. 河北平原区农作物种植水资源压力指数评价[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 1-9
Du L, Wang M, Liu X, Chen F. Evaluation of water resources pressure indexes based on crop cultivation in Hebei Plain [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(7): 1-9 (in Chinese)
- [20] 段新光, 栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评

- 价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 119-122
- Duan X G, Luan F F. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on fuzzy comprehensive model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(S1): 119-122 (in Chinese)
- [21] Chen M L, Jin J L, Ning S W, Zhou Y L, Udmale P. Early warning method for regional water resources carrying capacity based on the logical curve and aggregate warning index[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 2206
- [22] 丁超, 胡永江, 王振华, 赵娜, 董文秀, 王黎明. 虚拟水社会循环视域下的水资源承载力评价[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 356-371
- Ding C, Hu Y J, Wang Z H, Zhao N, Dong W X, Wang L M. Assessment of water resources carrying capacity from the perspective of virtual water social cycle [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 356-371 (in Chinese)
- [23] 吴炳方, 闫娜娜, 曾红伟, 蒋礼平, 朱伟伟. 节水灌溉农业的空间认知与建议[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 70-77
- Wu B F, Yan N N, Zeng H W, Jiang L P, Zhu W W. Outlook on water saving agriculture[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 70-77 (in Chinese)
- [24] 余灏哲, 韩美. 基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 474-483
- Yu H Z, Han M. Spatial-temporal analysis of sustainable utilization water resources in Shandong Province based on water footprint[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 474-483 (in Chinese)
- [25] 孙侦, 贾绍凤, 严家宝, 朱文彬, 梁媛. 中国水土资源本底匹配状况研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2057-2066
- Sun Z, Jia S F, Yan J B, Zhu W B, Liang Y. Study on the matching pattern of water and potential arable land resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2057-2066 (in Chinese)
- [26] Deng C X, Zhang G J, Li Z W, Li K. Interprovincial food trade and water resources conservation in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139651
- [27] Huang F, Liu Z, Ridoutt B G, Huang J, Li B G. China's water for food under growing water scarcity [J]. *Food Security*, 2015, 7(5): 933-949
- [28] 孙才志, 阎晓东. 中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 1-8
- Sun C Z, Yan X D. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food Nexus coupling system in China [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 1-8 (in Chinese)
- [29] 杨鑫, 穆月英. 中国粮食生产与水源的时空匹配格局[J]. 华南农业大学学报: 社会科学版, 2019, 18(4): 91-100
- Yang X, Mu Y Y. Spatial-temporal matching patterns of grain production and water resources[J]. *Journal of South China Agricultural University: Social Science Edition*, 2019, 18(4): 91-100 (in Chinese)
- [30] Balassa B. Trade liberalisation and "revealed" comparative advantage[J]. *The Manchester School*, 1965, 33(2): 99-123
- [31] Masters W A, Winter-Nelson A. Measuring the comparative advantage of agricultural activities: Domestic resource costs and the social cost-benefit ratio [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1995, 77(2): 243-250
- [32] 范成方, 史建民. 粮食生产比较效益不断下降吗: 基于粮食与油料、蔬菜、苹果种植成本收益调查数据的比较分析[J]. 农业技术经济, 2013(2): 31-39
- Fan C F, Shi J M. Does the comparative benefit of food production continue to decline: Based on the comparative analysis of the survey data of the cost and benefit of planting food and oilseeds, vegetables, and apples [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2013(2): 31-39 (in Chinese)
- [33] 袁璋, 许越先, 吴凯. 我国中部地区粮食生产地位及可持续发展的初步分析[J]. 农业技术经济, 2006(4): 63-67
- Yuan Z, Xu Y X, Wu K. A preliminary analysis of the status of grain production and sustainable development in central my country[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2006(4): 63-67 (in Chinese)
- [34] El-Sharkawy M A. Global warming: Causes and impacts on agroecosystems productivity and food security with emphasis on cassava comparative advantage in the tropics/subtropics [J]. *Photosynthetica*, 2014, 52(2): 161-178
- [35] Bowen H P. On the theoretical interpretation of indices of trade intensity and revealed comparative advantage [J]. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 1983, 119(3): 464-472
- [36] 张怡. 中国花生生产布局变动解析[J]. 中国农村经济, 2014(11): 73-82, 95
- Zhang Y. Analysis of China's peanut production layout changes[J]. *Chinese Rural Economy*, 2014(11): 73-82, 95 (in Chinese)
- [37] 王媛媛, 刘颖, 高奇正, 刘大鹏. 湖北省水稻种植模式结构和比较优势时空变化[J]. 经济地理, 2017, 37(8): 137-144
- Wang M M, Liu Y, Gao Q Z, Liu D P. The spatial and temporal analysis of the comparative advantage of different rice planting pattern in Hubei Province[J]. *Economic Geography*, 2017, 37(8): 137-144 (in Chinese)
- [38] 聂英. 中国粮食安全的耕地贡献分析[J]. 经济学家, 2015(1): 83-93
- Nie Y. Analysis of cultivated land contribution to China's food security[J]. *Economist*, 2015(1): 83-93 (in Chinese)
- [39] 罗翔, 张路, 朱媛媛. 基于耕地压力指数的中国粮食安全[J]. 中国农村经济, 2016(2): 83-96
- Luo X, Zhang L, Zhu Y Y. China's food security based on the cultivated land pressure index [J]. *Chinese Rural Economy*, 2016(2): 83-96 (in Chinese)
- [40] 高鸣, 宋洪远. 生产率视角下的中国粮食经济增长要素分析[J]. 中国人口科学, 2015(1): 59-69, 127
- Gao M, Song H Y. Factor analysis on China's grain economic

- growth in productivity perspective [J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2015(1): 59-69, 127 (in Chinese)
- [41] 杨福霞, 徐江川, 青平. 中国小麦生产的技术进步诱因: 投资驱动抑或价格诱导[J]. *农业技术经济*, 2018(9): 100-111
Yang F X, Xu J C, Qing P. Investment-driven or price-induced? source of technical progress in China's wheat production [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(9): 100-111 (in Chinese)
- [42] 蔡保忠, 曾福生. 农业基础设施的粮食增产效应评估: 基于农业基础设施的类型比较视角[J]. *农村经济*, 2018(12): 24-30
Cai B Z, Zeng F S. Evaluation on effect of grain yield increase for agricultural infrastructure: Based on the perspective of the type comparison of agricultural infrastructure [J]. *Rural Economy*, 2018(12): 24-30 (in Chinese)
- [43] 陈飞, 范庆泉, 高铁梅. 农业政策、粮食产量与粮食生产调整能力[J]. *经济研究*, 2010, 45(11): 101-114, 140
Chen F, Fan Q Q, Gao T M. Agricultural policies, food production and food production-adjustment ability [J]. *Economic Research Journal*, 2010, 45(11): 101-114, 140 (in Chinese)
- [44] 廖开妍, 杨锦秀, 曾建霞. 农业技术进步、粮食安全与农民收入: 基于中国31个省份的面板数据分析[J]. *农村经济*, 2020(4): 60-67
Liao K Y, Yang J X, Zeng J X. Agricultural technological progress, food security and farmers' income: Based on panel data analysis of 31 provinces in China [J]. *Rural Economy*, 2020(4): 60-67 (in Chinese)
- [45] 李颖明. 粮食主产区农业水资源可持续利用分析[J]. *中国农村经济*, 2007(9): 45-52
Li Y M. Analysis on the sustainable utilization of agricultural water resources in the main grain production areas [J]. *Chinese Rural Economy*, 2007(9): 45-52 (in Chinese)
- [46] 刘雁慧, 李阳兵, 梁鑫源, 冉彩虹. 中国水资源承载力评价及变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1080-1091
Liu Y H, Li Y B, Liang X Y, Ran C H. Study on water resource carrying capacity evaluation and change in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1080-1091 (in Chinese)
- [47] Shih H S, Shyur H J, Lee E S. An extension of TOPSIS for group decision making [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2007, 45(7-8): 801-813
- [48] 胡文海. 中部地区粮食生产比较优势分析与基地建设[J]. *地理科学*, 2015, 35(3): 293-298
Hu W H. Comparative advantage of grain production in central China and the base construction [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(3): 293-298 (in Chinese)
- [49] 张玲玲, 丁雪丽, 沈莹, 王宗志, 王小红. 中国农业用水效率空间异质性及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(4): 817-828
Zhang L L, Ding X L, Shen Y, Wang Z Z, Wang X H. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural water use efficiency in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(4): 817-828 (in Chinese)
- [50] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2003—2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2003—2018
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2003—2018* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2003—2018 (in Chinese)
- [51] 中国国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2003—2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2003—2018
Department of Rural social and Economic Investigation of National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Rural Statistical Yearbook 2003—2018* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2003—2018 (in Chinese)
- [52] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2003—2018 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003—2018
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China Water Conservancy Statistical Yearbook 2003—2018* [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2003—2018 (in Chinese)
- [53] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业统计资料 2003—2018 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003—2018
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. *China Agriculture Statistical Report 2003—2018* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003—2018 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春