华南农业大学学报(社会科学版)
2023年第5期 JOURNAL OF SOUTH CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY
(第22卷) (SOCIAL SCIENCE EDITION)

# 水资源非农化与粮食生产脆弱性

李长松,周玉玺

(山东农业大学 经济管理学院,山东 泰安 271018)

**摘 要:** 在测度粮食生产脆弱性的基础上,利用2006—2021年中国省级面板数据实证检验了水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响及其门槛效应。结果表明:水资源非农化会加剧粮食生产脆弱性,但呈现边际效应递减的非线性特征;从功能区与南北方异质性来看,水资源非农化会加剧非主产区和南方地区粮食生产脆弱性,而对主产区和北方地区的影响不显著;水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在单一门槛效应,跨过门槛值后,水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响显著降低。因此,在因地制宜提高农业用水效率及保障能力的同时,应不断夯实粮食生产基础,通过生产技术革新和制度优化等方式,增强粮食生产韧性,弥补农业用水转移引致的生产损失。

**关键词:** 水资源;非农化;粮食生产;脆弱性;门槛效应

**中图分类号:** F323.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0202(2023)05-0025-13

## 一、引言

水资源非农化是指农业用水结构和方向发生转变,农业用水向非农用水转换,这是在既定资源禀赋下为满足工业和生活用水需求、提高用水社会经济收益的结果,也是经济社会发展的必然趋势。近年来,中国水资源非农化增长速度加快,非农用水比例由2000年的31.18%增长到2021年的38.44%①,大量农业用水持续向非农用途转移,也引发了政府和学界对其驱动机制、时空格局、适度性及潜在影响的广泛关注。事实上,水资源非农化与产业用水不均衡、收益不对称、水资源利用效率低等问题密切相关[1]1542,农业用水总量大、比较收益低,农业用水向非农产业转移具有天然条件和经济动力。现阶段,受经济发展水平、产业结构、水资源禀赋等因素影响[2]66-69,水资源非农化的空间非均衡性显著,整体呈"东南沿海向西北内陆递减""南方高,北方低"的态势[1]1545-1547。从经济学角度来看,水资源非农化是非水要素投入替代农业"节余水"的过程,其具有节水效应、资源配置效应以及疏解效应,适度、合理地水资源非农化不仅能够缓解水资源结构性缺水压力,提高水资源利用效率和社会经济效益[3],也能够促进区域经济发展,推动农业生产性投资和技术供给,夯实粮食生产基础。然而,适度非农化是以非水要素对灌溉水的最大替代能力为约束[4]108,过度非农化会造成灌溉用水短缺,诱致粮食产出降低、种粮成本升高、粮农收益萎缩[5-6],导致耕地"非粮化"[7]98,甚至造成生态环境破坏[8],加剧粮食生产易损性,制约生产前沿面拓展。

总体来看,已有研究厘清了水资源非农化的形成机制[2]65、适度性标准[4]108及时空分布格局[1]1544-1547,测度了粮食生产脆弱性及其时空分布演变特征[9-10],系统分析了水资源非农化的社会经济效应及对粮食生产的潜在影响[11-12],提出了应对农业用水短缺诱致粮食生产风险的多维调控政策[13]。但是,现有研究缺少关于水资源非农化对粮食生产脆弱性影响的实践证据及异质性

**收稿日期:** 2023-05-24 **DOI:** 10.7671/j.issn.1672-0202.2023.05.003

**基金项目:** 国家社会科学基金项目(21BJY130)

**作者简介:** 李长松(1995—),男,山东烟台人,山东农业大学经济管理学院博士研究生,主要研究方向为农业资源与环境管理。E-mail:lcssdauwin@163.com

① 数据来源于国家统计局。

检验,难以明晰现阶段水资源非农化对粮食生产的影响状态。基于此,本文利用2006—2021年25个省份的面板数据,构建了粮食生产脆弱性评价指标体系,探究水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响及区域异质性。相较于已有研究,本文可能存在以下边际贡献:第一,基于脆弱性研究视角,从暴露性、敏感性和适应性3个维度构建了粮食生产脆弱性评价指标体系,采用熵权法测度省域粮食生产脆弱性指数,较为准确地反映了粮食生产的易损性特征;第二,使用空间计量模型、门槛模型实证分析了水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响及区域差异,以便有针对性地实施差异化治理,为增强粮食可持续生产能力的目标提供政策参考;第三,从地理距离和种植结构的角度切入,构建了"种植结构-地理距离"嵌套矩阵,更好地反映了省域间粮食生产的空间关系。

## 二、理论分析及研究假说

### (一)粮食生产脆弱性的内涵

脆弱性源于拉丁文"vulnerare",意为"可能受伤",其概念在自然灾害研究领域被率先提出[14]。作为一种新的理论和研究范式,脆弱性研究在生态学、社会学、经济学、地理学、可持续科学等领域得以广泛应用和拓展[15]。然而,因研究视角差异,学界对脆弱性概念的界定尚未统一。目前比较有代表性的定义主要为:联合国国际减灾战略(UNSDR)认为脆弱性是由自然、社会、经济和环境因素及过程共同影响决定的系统对各种胁迫的易损性[16];Adger[17]认为脆弱性是系统暴露于环境和社会变化中,因适应能力缺乏而对外界影响造成损失的敏感状态;李鹤[18]认为脆弱性是由于系统对扰动的敏感性以及适应能力缺乏而使系统结构和功能易发生改变的属性。综上所述,脆弱性可以理解为暴露在外界扰动影响下系统由于内部结构的敏感性和适应能力不足,使系统易于受损并向不可持续方向演变的一种状态。

粮食生产脆弱性是由"粮食生产"和"脆弱性"融合而来。粮食生产受到资源、生态、社会等多重因素影响,具有自然再生产和经济再生产的双重属性,是典型的人地耦合系统[9]149,具有脆弱性这一系统属性[19]。在粮食生产过程中,其生产的外部环境、要素供给受自然和社会的扰动更为深入和频繁,粮食生产系统各要素间的作用关系更为敏感,应对外界扰动和冲击的适应能力尚不完备,由此使得系统内部结构和功能发生扭曲,粮食可持续生产能力衰减,从而表现为粮食生产系统的脆弱性。据此,粮食生产脆弱性可以理解为粮食生产系统在水资源、土地、劳动力等生产要素变化和气候、环境、政策等外部环境的扰动下,系统自身所具有的敏感性和适应能力相互影响而表现出粮食生产受到损失和伤害后的恢复能力,包含暴露性、敏感性和适应性3个要素。其中,暴露性反映的是系统遭受到环境、资源和社会等各种因素冲击和压力的程度,其决定了冲击和干扰对系统的潜在损失;敏感性反映了系统对外界冲击和干扰易于感受的性质,是系统稳定性的重要体现;适应性是由资源要素配置能力、农技水平、基础设施等多维因素决定的,反映粮食生产系统能够处理、应对外界冲击,减少系统损失以及从损失中恢复的能力,其决定了系统的实际损失。

### (二)水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响机理

水资源非农化是城镇化和工业进程中的必然现象,其主要目标是为了优化水资源配置,满足日益增长的非农用水需求,提高用水社会经济收益。粮食生产属于资源密集型产业,高度依赖灌溉,而灌溉农业的可持续性受到水资源禀赋和水资源非农转移的约束。在缺少外部补偿和资源有效替代的情况下,水资源非农化对农业用水形成"挤占效应",导致粮食生产系统的暴露性水平提高,给粮食生产带来冲击和潜在损失。另外,由柯布-道格拉斯生产函数可知,粮食生产是水、土地、劳动力等多要素的组合函数,水资源与其他生产要素存在替代效应和互补效应[20]84,灌溉水短缺会阻碍生产要素优化配置[21],引致粮食生产系统的暴露性水平升高,损失灌溉在降低生产风险、提升作物品质、减少病害等方面的潜在效益[22],制约粮食生产前沿面外移。

伴随着农业用水的大量转移,灌溉水压力增加,影响了粮食单产和生产成本,引致粮食生产系

统的敏感性上升，稳定性下降。具体来讲，灌溉水压力会导致灌溉规模和灌溉质量下降[20]86，粮食用水可及性和保障能力衰减，产能下降；灌溉水减少会引致灌溉、田间管理等成本提高，导致粮食收益出现不同程度的萎缩。农户是经济理性和生存理性的利益主体，以家庭生计盈利和风险规避为决策导向，在种粮收益萎缩、比较收益低下等因素的驱动下，调整种植结构，从事“非粮化”生产是其必然选择，这给粮食生产能力带来严峻挑战，进一步加剧粮食生产系统的敏感性。

根据诱致性技术变迁理论，灌溉水减少所引致的生产要素相对价格变化会诱致农业技术变革，推动节水技术采纳、机械推广等资本密集型技术进步，实现相对廉价和充裕要素对灌溉水的替代[23]，进而实现农户利益最大化目标，粮食生产系统的适应性也随之提升。随着水资源管理制度和利用技术供给的不断完善，非水要素对灌溉水的替代能力显著增强，有效弥补了水资源非农化背景下灌溉水压力诱致的粮食生产潜在损失，弱化了其对粮食生产易损性的影响[24]，水资源非农化对粮食生产易损性影响的边际效应逐渐降低。

假说 1：水资源非农化会加剧粮食生产脆弱性，但呈现边际效应递减的非线性特征。

**（三）水资源非农化对粮食生产脆弱性影响的异质性**

不同粮食功能区在自然、社会、经济、技术和政策方面上存在显著差异①。粮食主产区承担着中国近八成的粮食产量②，在生产压力和主产区政策的推动下，水资源非农化速度、规模受到严格管控，农田水利和节水灌溉设施较为完善，农业用水可得量、可及性的保障水平较高。另外，粮食主产区耕地多集中连片，生产积聚性高，通过节水灌溉设施和先进技术替代灌溉水的难度小、替代弹性大，能够有效改变水资源时空分布的非均衡状态，改善粮食生产外部环境，提高粮食产出率和抗风险能力[25]。而相较于主产区，非主产区对水资源非农化和耕地“非粮化”的管控约束力度小，在缺少区域比较优势的情况下，粮农收益难以保障，用水短缺会引致种粮收益萎缩，诱致耕地“非粮化”。另外，非主产区耕地细碎化严重，粮食生产空间分散性高、“集聚效应”弱，节水技术变迁和灌溉水替代相对困难，灌溉节水的规模化和集约化程度低，对粮食生产效率提升的边际效应小。

假说 2：水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在功能区异质性。

南北方在自然环境、产业结构、种植结构、作物特性、种植农艺等方面差异明显③。相较于北方地区，南方地区降水丰富，工业化和城镇化水平高，水资源非农化程度较高，水污染问题突出，对农业用水的“挤出效应”更加明显，灌溉水压力较大[26]。与此同时，南方经济的快速发展可能引致粮食生产的“懈怠效应”，使粮食生产受重视程度下降，农田水利等粮食生产性投资减少，进而造成粮食生产效率损失[27]。另外，相较于水稻，小麦、玉米灌溉需水量小，机械化难度低，节水灌溉设施等要素对灌溉水替代难度较小、替代效应较大，能够有效降低小麦、玉米物化成本，增加产出，提升生产效率，而其对水稻生产效率提升的边际效应相对较小。

假说 3：水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在南北方异质性。

## 三、模型构建、变量选取与数据来源

**（一）模型构建**

1. 空间计量模型构建

考虑到自然和经济指标间存在空间相关关系，本文构建空间面板计量模型，考察水资源非农

① 粮食主产区包括河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川；非粮食主产区包括山西、浙江、福建、广东、广西、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、宁夏、新疆。

② 数据来源于国家统计局。

③ 南方地区包括江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、贵州、云南；北方地区包括河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、陕西、甘肃、宁夏、新疆。

化对粮食生产脆弱性的影响,模型设置如下:

$$VFP_{it}=\beta_0+\lambda W\cdot VFP_{it}+\beta_1\cdot NAWR_{it}+\beta_n X_{it}+\delta_1 W\cdot NAWR_{it}+\delta_n WX_{it}+\eta_i+\varphi_i+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,$i$ 表示省份,$t$ 表示年份,VFP 表示粮食生产脆弱性,NAWR 表示水资源非农化程度,$X$ 表示控制变量,$\lambda$ 表示空间滞后回归系数,$W$ 表示"种植结构-地理距离"空间权重矩阵,$\delta_1$ 表示邻近区域水资源非农化对粮食生产脆弱性影响的估计系数,$\eta_i$ 表示个体固定效应,$\varphi_i$ 表示时间固定效应,$\varepsilon$ 表示随机误差项。当 $\delta_1=0$ 时,模型(1)退化为空间滞后模型(SLM);当 $\delta_1+\lambda\beta_1=0$ 时,模型(1)退化为空间误差模型(SEM)。

2."种植结构-地理距离"矩阵

空间权重矩阵能够反映空间单元之间相互影响和关联程度,选择恰当合理的空间权重矩阵对于空间计量模型估计结果的准确性意义重大。考虑到邻近省份粮食生产之间既存在生产环境的空间相似性,也存在农业种植结构的差异性,常用的地理邻接、地理距离等权重矩阵难以准确反映省域粮食生产条件和种植结构之间的关系。因此,本文从地理距离和种植结构的角度构建"种植结构-地理距离"嵌套矩阵,以此反映省域粮食生产间的相互影响和关联关系,矩阵设置如下:

$$W_{stru-geo}=\begin{cases}\dfrac{1}{d_{ij}^2\cdot|Q_i-Q_j|}, & i\neq j\\ 0, & i=j\end{cases} \quad (2)$$

其中,$d_{ij}$ 代表区域 $i$ 和区域 $j$ 之间的距离,$Q_i$、$Q_j$ 分别代表区域 $i$ 和区域 $j$ 水稻播种面积占谷物播种面积的比重。

3.门槛回归模型构建

水资源非农化可能对粮食生产脆弱性存在非线性影响。为进一步检验二者之间的非线性关系,确定非线性关系的门槛值,本文采用面板门槛模型[28],以水资源非农化作为核心解释变量及门槛变量,设定单一门槛模型:

$$VFP_{it}=\alpha+\beta_1 NAWR_{it}(NAWR\leqslant\gamma)+\beta_2 NAWR_{it}(NAWR>\gamma)+\beta_3 X_{it}+\varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中,$\gamma$ 表示门槛值,如果单一门槛值显著则需要进行双重门槛检验,设定双重门槛模型为:

$$VFP_{it}=\alpha+\beta_1 NAWR_{it}(NAWR\leqslant\gamma_1)+\beta_2 NAWR_{it}(\gamma_1<NAWR\leqslant\gamma_2)+\beta_3 NAWR_{it}(NAWR>\gamma_2)+\beta_4 X_{it}+\varepsilon_{it} \quad (4)$$

### (二)变量说明

1.被解释变量:粮食生产脆弱性(VFP)

粮食生产脆弱性不同于传统以粮食产量衡量的粮食生产能力,其着重反映粮食生产系统向不可持续方向演变的状态。本文参考姚成胜等的研究[10]1723,基于脆弱性分析框架,从暴露性、敏感性和适应性3个维度选取13项指标构建了粮食生产脆弱性评价指标体系(见表1)。其中,暴露性是资源、环境等要素对系统的扰动和冲击程度,主要由劳动力、水资源、耕地等生产要素变动和灾害损失等指标反映;敏感性是系统结构的内在状态,使用产业发展、种植结构、生产能力、生产要素价格等指标反映;适应性是系统应对外界冲击和扰动的能力,使用机械化肥农药投入强度、资金政策支持力度、农田水利设施建设等指标反映。

**表1 粮食生产脆弱性的综合评价指标体系**

| 系统层 | 指标名称 | 具体表示 | 单位 | 指标属性 |
|---|---|---|---|---|
| 暴露性 | 单位耕地面积劳动力 | 农村第一产业就业人口/耕地面积 | 人/公顷 | 负向 |
| | 单位粮食播种面积用水量 | 粮食用水量/粮食播种面积 | 立方米/公顷 | 正向 |
| | 农作物成灾率 | 水旱灾害损失面积/粮食播种面积 | % | 正向 |
| | 人均粮食播种面积 | 粮食播种面积/农村第一产业就业人口 | 公顷/人 | 负向 |
| 敏感性 | 农业生产资料价格指数 | 以2005年为基期的农业生产资料价格变动 | % | 正向 |
| | 非农业产值比例 | 二、三产业产值/总产值 | % | 正向 |

**续表 1**

| 系统层 | 指标名称 | 具体表示 | 单位 | 指标属性 |
|---|---|---|---|---|
| 适应性 | 人均粮食产量 | 粮食产量/人口数 | 公斤/人 | 负向 |
| | 粮食作物播种面积占比 | 粮食作物播种面积/总播种面积 | % | 负向 |
| | 单位粮食播种面积机械总动力 | 粮食作物机械总动力/粮食播种面积 | 千瓦/公顷 | 负向 |
| | 单位粮食播种面积化肥施用量 | 粮食作物化肥施用量/粮食播种面积 | 公斤/公顷 | 负向 |
| | 单位粮食播种面积农药施用量 | 粮食作物农药施用量/粮食播种面积 | 公斤/公顷 | 负向 |
| | 人均财政支农支出 | 农林水支出/农村人口数 | 元/人 | 负向 |
| | 有效灌溉率 | 有效灌溉面积/耕地面积 | % | 负向 |

在测度粮食生产脆弱性指数时，利用熵权法确定指标权重，具体操作步骤如下：

①无量纲化：为消除各指标量纲和数量级差异，实现数值越大代表粮食生产脆弱性程度越高，本文对正向指标数据进行了正向标准化处理，对负向指标进行负向标准化处理，得到各指标的标准化数据 $X'_{ij}$；

②熵权法确定指标权重：$e_j = -k\sum_{i=1}^{m}[(y_{ij}/\sum_{i=1}^{m}y_{ij})\cdot\ln(y_{ij}/\sum_{i=1}^{m}y_{ij})]$，$k = 1/\ln m$，$w_j = (1-e_j)/\sum_{j}(1-e_j)$，其中 $w_j$ 为第 $j$ 项指标权重，$e_j$ 为第 $j$ 项指标的信息熵，$m$ 为评价年数，$k$ 为波尔茨曼常量；

③计算粮食生产脆弱性指数：$S = \sum w_j X'_{ij}$。

2. 核心解释变量及门槛变量：水资源非农化（NAWR）

水资源非农化是指水资源的配置和利用方向发生改变，是反映水资源利用结构与效益优化的重要尺度。由于当前中国水资源非农化的相关统计指标尚不健全，本文参考胡美娟等人[1]1544的研究，以非农用水与农业用水比值来表征水资源非农化程度。

3. 其他变量

粮食生产脆弱性不仅受到自然资源禀赋的制约，也受到社会、经济和生产方式的多方面影响。借鉴相关研究[29-31]，选择如下控制变量：①降水量（Preci），以区域年降水量的对数来衡量。区域降水量越多，农业水资源的年际补充能力越强，粮食生产条件更为优越。②城镇化（Urban），以城镇人口占总人口的比重来衡量。城镇化发展一方面导致劳动力、耕地、水资源等农业生产要素向城镇转移，对粮食生产形成资源约束，另一方面也促进了农业科技进步，推动了农业规模化、集约化转型，提高粮食生产效率。③人力资本（LQ），以农村人均人力资本存量的对数来衡量。农村人力资本水平越高，劳动力的知识水平、信息采集利用能力、农业技术应用能力显著提升，能够有效提高粮食生产效率。与此同时，人力资本积累也会促进劳动力非农化转移，强化劳动力短缺对粮食生产的约束。④非农收入占比（SNFI），采用工资性收入占农民人均纯收入的比重来量化。非农收入提高会弱化农户对生产性投资的资金约束，使农户通过农业机械和服务购买等方式提高粮食生产效率。但非农收入提高也会使农户对农业生产的依赖性减弱，进而产生“懈怠效应”，影响粮食生产。⑤农业服务业水平（LAS），以农业服务业产值的对数来衡量。农业服务业会通过制度变迁、生产要素替代、专业劳动分工等途径来提高粮食生产效率。

**（三）数据来源与描述性统计**

本文指标数据来自于 2006—2022 年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国人力资源报告 2022》，2021 年农村人均人力资本及个别年份缺失数据采用线性插值法补齐。为减少数据量纲干扰，对降水量、人力资本及农业服务业水平等绝对值变量及数量级较大的变量取自然对数处理。另外，考虑到研究内容为粮食生产脆弱性，因此剔除了粮食产量极小的北京、天津、上海、海南、青海、西藏 6 个省（市、自治区），最终研究单元为 25 个。

为保障评价结果科学准确，本文使用权重系数法（A = 粮食作物播种面积/农作物播种面积；

B=农业产值/农林牧渔业产值×A),从广义农业要素中剥离出粮食生产要素。粮食生产劳动力投入用系数B调整,粮食生产的水、化肥、农药和机械要素用系数A调整。所有变量的描述性统计结果详见表2。

**表2 描述性统计结果**

| 变量 | 观测值 | 均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 粮食生产脆弱性(VFP) | 400 | 0.4192 | 0.0667 | 0.2965 | 0.7308 |
| 水资源非农化(NAWR) | 400 | 0.6965 | 0.4926 | 0.0506 | 3.4853 |
| 降水量(Preci) | 400 | 6.6929 | 0.6505 | 4.9537 | 7.8254 |
| 人力资本(LQ) | 400 | 4.5458 | 0.4237 | 3.4622 | 5.5072 |
| 城镇化(Urban) | 400 | 53.2036 | 10.3485 | 27.4600 | 74.6300 |
| 非农收入占比(SNFI) | 400 | 37.9233 | 11.1492 | 9.2818 | 64.5407 |
| 农业服务业水平(LAS) | 400 | 4.6633 | 0.9645 | 1.4225 | 6.7761 |

## 四、实证结果与分析

### (一)数据特征分析

1.粮食生产脆弱性变化趋势

通过对粮食生产脆弱性指数的整理,得到2006—2021年粮食生产脆弱性变化趋势图。由图1可知,2006—2021年中国粮食生产脆弱性指数在0.39~0.45之间波动,整体呈现波浪式下降的演化趋势,由2006年的0.4294变化到2021年的0.4082,降幅4.94%。依据粮食生产脆弱性指数变化趋势,可分为3个发展阶段:①2006—2008年为"快速增长阶段",粮食生产脆弱性指数上升了3.33%。该阶段粮食生产模式尚处于"高投入、高产出、低效率、高污染"状态,粮食产量提高是以资源要素过量投入和环境污染为代价,粮食生产脆弱性快速上升。②2009—2012年为"持续下降阶段",粮食生产脆弱性指数下降了6.71%。《关于2009年促进农业稳定发展农民持续增收的若干意见》指出,要通过加快推进农业科技创新、高标准农田建设、水利基础设施建设、农业机械化等多种方式逐渐夯实现代农业物质支撑和服务体系,粮食生产脆弱性逐渐降低。③2013—2021年为"波动稳定阶段",粮食生产脆弱性指数基本保持不变。随着农业基础设施的不断完善和现代农业科技要素的应用推广,粮食生产外部环境持续优化,生产效率快速提升,粮食生产脆弱性始终在较低水平波动。

从粮食主产区与非主产区来看,粮食生产脆弱性呈波浪式下降趋势,其中主产区粮食生产脆弱性指数在0.37~0.43之间波动,研究期内下降了4.29%,非主产区在0.41~0.50之间波动,下降了5.55%;从南方和北方地区来看,粮食生产脆弱性的区域差异逐渐缩小,其中南方地区粮食生产脆弱性指数在0.38~0.45之间波动,研究期内下降了3.98%,北方地区在0.40~0.49之间波动,下降了5.91%。

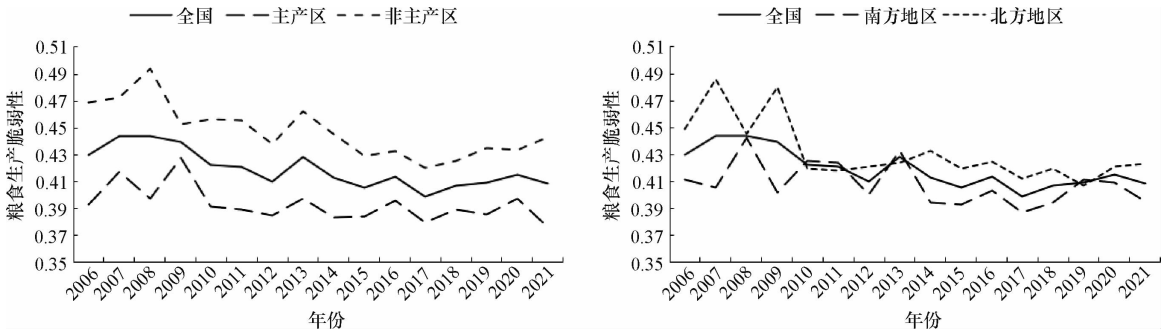



**图1 2006—2021年粮食生产脆弱性变化趋势**

2. 水资源非农化变化趋势

通过对水资源非农化数据整理,得到 2006—2021 年水资源非农化的趋势图。由图 2 所示,2006—2021 年中国水资源非农化程度在 0. 65 ~ 0. 75 范围内波动,整体呈现小幅波动态势,由 2006 年的 0. 6688 变化到 2021 年的 0. 6849,上升了 2. 41%。依据水资源非农化程度的变化趋势,可分为两个发展阶段:①2006—2010 年为“快速增长阶段”,水资源非农化程度增长了 11. 95%。“十二五”之前,水资源管理制度不健全,伴随着城镇化和工业化的快速推进,非农用水需求旺盛,在比较收益的驱动下农业用水大量向非农产业转移,水资源非农化程度快速提升。②2011—2021 年为“缓慢下降阶段”,水资源非农化程度下降了 8. 61%。“十二五”规划和 2011 年中央一号文件明确提出要实行最严格的水资源管理制度,加强用水总量控制与定额管理,推动产业转型升级,推进农业、工业和生活用水节水增效,水资源非农化态势一定程度上趋弱。

从主产区与非主产区来看,区域差异呈先增大后缩小的演化趋势,其中非主产区水资源非农化程度在 0. 66 ~ 0. 88 之间波动,研究期内下降了 12. 22%,主产区在 0. 57 ~ 0. 69 之间波动,上升了 18. 87%;从南方和北方地区来看,区域差异逐渐缩小,其中南方地区水资源非农化程度在 0. 81 ~ 1. 10 之间波动,研究期内下降了 11. 31%,北方地区在 0. 38 ~ 0. 53 之间波动,上升了 35. 97%。

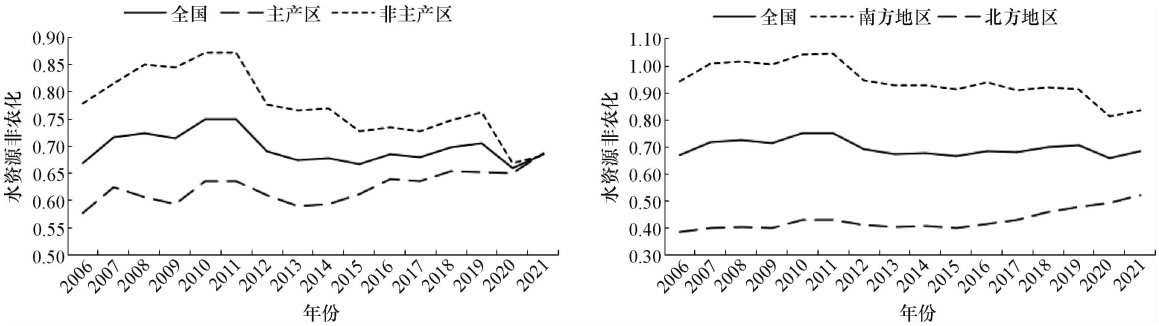



**图 2　2006—2021 年水资源非农化的变化趋势**

## (二)基准回归

1. 空间自相关性检验

为研究水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响是否具有空间效应,利用全局莫兰指数对粮食生产脆弱性的空间相关性进行检验,结果见表 3。可以看出各省粮食生产脆弱性在“种植结构 - 地理距离”矩阵下的 Moran’I 均为正值,且呈现出不同程度的显著性,基本说明粮食生产脆弱性存在空间自相关性,选择空间计量模型进行实证分析具有合理性。

**表 3　全局空间自相关检验结果**

| 年份 | Moran′s I | 年份 | Moran′s I |
|---|---|---|---|
| 2006 | 0. 017** | 2014 | 0. 004* |
| 2007 | 0. 030*** | 2015 | 0. 003* |
| 2008 | 0. 007* | 2016 | 0. 010** |
| 2009 | 0. 045*** | 2017 | 0. 010** |
| 2010 | 0. 039*** | 2018 | 0. 001* |
| 2011 | 0. 037*** | 2019 | 0. 010* |
| 2012 | 0. 003* | 2020 | 0. 006* |
| 2013 | 0. 024** | 2021 | 0. 007* |

注:*、**、*** 分别代表在 1%、5%、10% 的显著性水平。下同。

2. 基准回归结果分析

回归结果显示, LM-error、Robust LM-error 的统计量均通过了 1% 的显著性检验,LM-lag 、Robust LM-lag 的统计量未通过显著性检验,Hausman 检验通过了 1% 的显著性检验,且双向固定效应的 Log-likelihood 值最大,因此选择双向固定效应的空间误差模型进行实证探究。另外,考虑到水资源非农化可能对粮食生产脆弱性具有非线性影响,故将水资源非农化的二次项($NAWR^2$)加入回归方程中,回归结果如表 4 所示。

**表4 水资源非农化对粮食生产脆弱性影响的基准回归结果**

| 变量 | (1) VFP | (2) VFP | (3) VFP | (4) VFP | (5) VFP | (6) VFP |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NAWR | 0.0622**(0.0263) | 0.0666**(0.0261) | 0.0617**(0.0264) | 0.0500*(0.0275) | 0.0526*(0.0274) | 0.0494*(0.0273) |
| $NAWR^2$ | -0.0137**(0.0059) | -0.0146**(0.0058) | -0.0133**(0.0059) | -0.0114*(0.0061) | -0.0108*(0.0060) | -0.0104*(0.0059) |
| Preci | | -0.0320***(0.0120) | -0.0321***(0.0120) | -0.0311***(0.0120) | -0.0329***(0.0119) | -0.0328***(0.0118) |
| Urban | | | 0.0012(0.0011) | 0.0027*(0.0015) | 0.0029**(0.0014) | 0.0031**(0.0014) |
| LQ | | | | -0.0516(0.0352) | -0.0634*(0.0354) | -0.0624*(0.0352) |
| SNFI | | | | | -0.0010**(0.0004) | -0.0010**(0.0004) |
| LAS | | | | | | -0.0153**(0.0071) |
| λ | 0.5499***(0.0759) | 0.5084***(0.0801) | 0.3653***(0.0872) | 0.3817***(0.0877) | 0.4003***(0.0840) | 0.4172***(0.0822) |
| sigma2_e | 0.0009***(0.0001) | 0.0008***(0.0001) | 0.0008***(0.0001) | 0.0009***(0.0001) | 0.0009***(0.0001) | 0.0008***(0.0001) |
| *N* | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Log-likelihood | 837.3393 | 840.8616 | 841.5261 | 842.5966 | 845.0172 | 847.3508 |

**注:**括号内数值为标准误。下同。

模型(1)在没有加入控制变量的情况下,水资源非农化的系数显著为正,其二次项系数显著为负。在逐步加入控制变量之后,模型的 Log-likelihood 值逐渐增大,模型设定更加合理。如模型(6)所示,水资源非农化(NAWR)的系数显著为正,二次项($NAWR^2$)的系数显著为负,且均通过了10%的显著性检验,说明水资源非农化对粮食生产脆弱性具有显著的正向影响且呈现边际效应递减的非线性特征,验证了假说1。

在控制变量中,降水量(Preci)对粮食生产脆弱性具有显著负向影响。降水作为补充区域水资源最主要、最直接的方式,能够直接满足作物生长用水需求,改善粮食生产的外部环境,缓解粮食灌溉用水压力。城镇化(Urban)对粮食生产脆弱性具有显著正向影响。原因可能是城镇化发展对粮食生产要素的"挤占效应"大于推动生产技术革新的"技术创新效应"和集约化规模化生产的"规模效应"。人力资本(LQ)对粮食生产脆弱性具有显著负向影响。人力资本水平是劳动力供给质量的重要体现,其具有明显的"外部性"特征,人力资本水平提高会通过先进农机设备和农业技术采纳等方式促进粮食生产技术效率进步,提高粮食生产效率。非农收入占比(SNFI)对粮食生产脆弱性具有显著负向作用。尽管非农就业引起的劳动力短缺削弱了粮食生产能力,但非农收入增长会促进农户的机械投资和生产服务购买,有效弥补因劳动力短缺引致的生产效率损失。农业服务业水平(LAS)对粮食生产脆弱性具有显著负向影响。一方面农业服务业是生产服务向"市场化"专业分工演化的结果,其能够将专业化的技术、资本和劳动力等要素投入粮食生产过程中,提高粮食竞争力和生产效率;另一方面,农业服务组织与农户在粮食生产中分工协作,能够充分发挥各自比较优势,推动粮食生产全环节效率提升。

3. 稳健性检验

为验证模型估计结果的稳健性,避免因指标测度方法不同对回归结果带来影响,本文进行如下稳健性检验。检验结果如表5所示。

(1)变换核心被解释变量的计算方法。利用主成分分析法来计算粮食生产脆弱性,结果如模型(7)所示,水资源非农化系数为正,通过了10%的显著性检验,二次项系数显著为负,通过了5%的显著性检验,这与基准回归结果相符。

(2)变换核心解释变量的计算方法。参考周玉玺、葛颜祥等[2]69对水资源非农化的量化方法,用"现期非农业用水占比-基期非农业用水占比"来量化,结果如模型(8)所示,水资源非农化的系数显著为正,二次项系数显著为负,验证了基准回归结果的稳健性。

(3)缩尾处理。为消除极端值影响,本文对变量1%~99%之外的数据进行缩尾处理,回归结果如模型(9)所示,缩尾处理后水资源非农化与其二次项的系数正负并未改变,且均通过了10%的显著性检验,验证了基准回归结果的稳健性。

（4）考虑模型内生性的稳健性检验。尽管固定效应模型能够一定程度上缓解因遗漏变量所导致的内生性偏误，但难以完全消除，尤其在水资源非农化与粮食生产脆弱性存在互为因果的情况下。因为粮食生产脆弱性可能反向影响水资源非农化程度，例如粮食灌溉用水效率提高使得粮食生产脆弱性降低，可能使该地区农业需水量减少，诱致政府对农业用水的管控力度减弱，进而加快水资源非农化进程。为此，参考邵帅等[32]的研究，利用 GS2SLS 模型，将水资源非农化滞后一期作为工具变量进行回归，在控制内生性的基础上探究水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响。结果如模型（10）所示，水资源非农化系数为正，二次项系数为负，均通过了 5% 的显著性检验，说明在考虑模型内生性的情况下，基准回归结果是稳健的。

**表 5　稳健性检验结果**

| 变量 | （7）<br>VFP-ZCF | （8）<br>VFP | （9）<br>VFP | （10）<br>VFP |
|---|---|---|---|---|
| NAWR | 0.1375 *（0.0732） | 0.0012 **（0.0005） | 0.0521 *（0.0272） | 0.0596 **（0.0281） |
| $NAWR^2$ | −0.0298 **（0.0143） | −0.0001 ***（0.0000） | −0.0112 *（0.0063） | −0.0126 **（0.0063） |
| 控制变量 | 已控制 | 已控制 | 已控制 | 已控制 |
| λ | 0.2533 *（0.1302） | 0.4152 ***（0.0825） | 0.3950 ***（0.0835） | 0.4838 **（0.1917） |
| sigma2_e | 0.0332 ***（0.0024） | 0.0025 ***（0.0002） | 0.0008 **（0.0001） | 0.5544 ***（0.1275） |
| *N* | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Log-likelihood | 339.2241 | 631.2053 | 846.3822 | 378.2373 |

### （三）异质性分析

1. 粮食功能区异质性

为探究水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响是否在不同功能区存在异质性，本文将 25 个省份按照粮食生产功能区划分为粮食主产区和非主产区，并借助空间误差模型进行实证分析，结果见表 6。在模型（11）中，主产区水资源非农化的系数为正，但未通过显著性检验，表明主产区水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响不显著。在模型（12）中，非主产区水资源非农化的系数为正，通过了 5% 的显著性检验，表明非主产区水资源非农化会加剧粮食生产脆弱性。造成这种现象的可能原因是：一是主产区的粮食生产脆弱性及水资源非农化程度明显低于非主产区，主产区粮食生产脆弱性及水资源非农化程度分别为 0.3929、0.6244，非主产区分别为 0.4477、0.7746；二是主产区粮食生产空间积聚性高，农田水利投资和节水技术供给水平快速提升，非水要素替代灌溉水的难度小、替代弹性大，对主产区粮食生产增效效应更大，这与陈宏伟、穆月英[33]的研究一致；三是相较于非主产区，主产区具有资源、技术、政策优势，气候更为适宜、水资源更为丰沛，技术创新效应和政策效应有效增强了粮食可持续生产能力，一定程度上弱化了水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响。由此可见，水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在显著的功能区异质性，水资源非农化会加剧非主产区的粮食生产脆弱性，而对粮食主产区的粮食生产脆弱性影响不明显，验证了假说 2。

2. 南北方异质性

为探究水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响是否在南北方存在异质性，本文将 25 个省份按照南北地理分界线划分为南方和北方地区，借助空间误差模型进行实证分析，结果见表 6。在模型（13）中，南方地区水资源非农化的系数为正，通过了 1% 的显著性检验，表明南方地区水资源非农化会加剧粮食生产脆弱性；在模型（14）中，北方地区水资源非农化的系数为负，未通过显著性检验，表明北方地区水资源非农化对粮食生产脆弱性影响不明显。造成这种现象的可能原因有：一是北方水资源非农化程度明显低于南方，北方水资源非农化程度仅为 0.4283，南方为 0.9441；二是相较于南方水稻水淹式的灌溉模式，北方以小麦、玉米种植为主，灌溉需水量小、用水效率高；三是相较于水稻，小麦、玉米的机械难度低，节水设施和机械要素投入对小麦、玉米技术效率提升的贡献较大，对灌溉水减少引致粮食损失的弥补能力更强；四是虽然南方降水量较为丰沛，但时空分布

不均匀，水稻种植季节缺水较为严重，对农田水利设施极其依赖，北方水资源总量较小，但其农田水利建设、节水设施的生产性投资力度较大，2021年北方节水灌溉面积占比64.33%，高于南方的42.06%[①]，粮食用水能力更高。由此可见，水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在显著的南北方异质性，水资源非农化会加剧南方地区的粮食生产脆弱性，而对北方地区的粮食生产脆弱性影响不明显，验证了假说3。

**表6 区域异质性检验**

| 变量 | (11)<br>主产区 | (12)<br>非主产区 | (13)<br>南方地区 | (14)<br>北方地区 |
|---|---|---|---|---|
| NAWR | 0.0022(0.0652) | 0.1062**(0.0481) | 0.1118***(0.0324) | −0.1343(0.0838) |
| $NAWR^2$ | 0.0053(0.0443) | −0.0218**(0.0097) | −0.0236*(0.0135) | 0.2397***(0.0724) |
| 控制变量 | 已控制 | 已控制 | 已控制 | 已控制 |
| $\lambda$ | 0.4626***(0.0906) | 0.2969*(0.1644) | 0.4841**(0.2114) | 0.4646***(0.0699) |
| sigma2_e | 0.0008***(0.0001) | 0.0008***(0.0001) | 0.0005***(0.0001) | 0.0008***(0.0001) |
| *N* | 208 | 192 | 208 | 192 |
| Log-likelihood | 448.8465 | 416.4388 | 503.1824 | 405.4654 |

### （四）门槛效应分析

为进一步检验水资源非农化对粮食生产脆弱性影响的门槛效应，确定非线性影响的门槛值，利用面板门槛模型，以水资源非农化作为门槛变量，分别进行单一门槛和双重门槛检验，检验结果如表7所示。水资源非农化作为门槛变量时，单一门槛通过了1%的显著性检验，双重门槛没有通过显著性检验，说明存在门槛效应，且只存在一个门槛，因此选择单门槛模型进行实证分析。

在确认存在门槛效应后，需要对门槛值进行估计，如图3所示。水资源非农化的门槛值为0.1041，95%置信水平的门槛置信区间为[0.0939，0.1042]。

由表8门槛回归结果可知，水资源非农化两个区间的影响系数有差异，当水资源非农化程度低于门槛值时，水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响系数为0.7736，通过了1%的显著性检验；当水资源非农化程度超过门槛值后，水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响系数变为0.0178，通过了10%的显著性检验。这说明，在

**表7 门槛效应检验**

| 门槛个数 | F值 | *P*值 | 10%临界值 | 5%临界值 | 1%临界值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 单一门槛 | 22.88 | 0.0040 | 14.0227 | 15.9464 | 20.9437 |
| 双重门槛 | 5.72 | 0.7460 | 16.8172 | 22.6450 | 33.4410 |

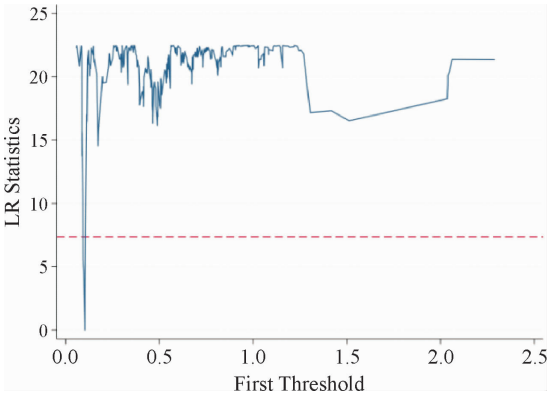



**图3 水资源非农化程度的门槛值分布**

**表8 门槛模型估计结果**

| 变量 | 粮食生产脆弱性(VFP) |
|---|---|
| NAWR(NAWR≤0.1041) | 0.7736***(0.1637) |
| NAWR(NAWR >0.1041) | 0.0178*(0.0104) |
| Preci | −0.0259**(0.0115) |
| Urban | 0.0032**(0.0013) |
| LQ | −0.0786***(0.0292) |
| SNFI | −0.0004(0.0004) |
| LAS | −0.0079(0.0065) |
| _cons | 0.8271***(0.0945) |
| *N* | 400 |
| $R^2$ | 0.4536 |

① 数据来源于国家统计局。

水资源非农化发展的不同阶段，其对粮食生产脆弱性的影响差异显著。

## 五、结论与政策建议

### （一）研究结论

本文利用 2006—2021 年中国 25 个省份的面板数据，基于脆弱性分析视角构建了暴露性、敏感性、适应性 3 个维度 13 个指标的粮食生产脆弱性评价指标体系，测度了粮食生产脆弱性指数，利用空间自相关检验、空间误差模型、面板门槛模型揭示了水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响，得出以下结论：（1）研究期内中国粮食生产脆弱性呈“波浪式下降”趋势，降幅为 4.94%，水资源非农化呈小幅波动趋势，涨幅为 2.41%；（2）粮食生产脆弱性存在空间聚集特征，水资源非农化会加剧粮食生产脆弱性，且呈现边际效应递减的非线性特征；（3）水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在功能区异质性，对非主产区的影响显著，而对主产区作用不显著；（4）水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在南北方异质性，对南方地区影响显著，而对北方地区作用不显著；（5）水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响存在单一门槛效应，在水资源非农化程度低于门槛值时，其对粮食生产脆弱性的影响较大，当跨过门槛值时，影响的边际效应明显降低。

### （二）政策建议

研究表明，除新疆、宁夏之外，其他省份均跨过了门槛值，水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响程度明显减弱，但影响状态并未改变。这是由于水资源与其他生产要素间存在较强的互补关系和较弱的替代关系，要素替代能力存在边界且用水效率提升缓慢，单纯依靠要素替代难以有效弥补灌溉水减少所引致的粮食生产损失。缓解水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响，需要集合水资源管理、优化生产条件、制度技术革新等手段，增强粮食可持续生产能力。基于此，提出以下政策建议：

第一，全方位夯实粮食生产基础，增强粮食生产韧性。通过高标准农田建设、保护性耕作、农业新基建等方式，确保土地产出能力稳定、可持续；研发推广良种、农机和绿色高效技术，增强农业科技与田间生产的适配性，提高粮食生产技术效率；破除土地流转交易壁垒，降低流转成本，提高粮食生产节水灌溉服务的覆盖率。

第二，强化水资源刚性约束，保障粮食用水安全。以区域水资源禀赋为基础，贯彻“四水四定”原则，优化粮食生产空间布局，严格管控水资源非农化强度，保障粮食用水总量安全；综合考量气候、降水、种植结构、作物需水量等要素，通过蓄、引、调等多种措施，优化调整水资源的时空分布格局，增强粮食用水保障能力。

第三，深入挖掘农业节水潜力，提高粮食用水效率。通过灌区节水改造、因地制宜推广节水技术、农业水价改革等方式，增强粮食用水能力；依据农业水资源供求关系、现行水价等要素，因地制宜确定交易参考水价，激发农户内在节水动力，合理引导农业“余水”有序转移，促进水资源优化配置和集约节约利用。

第四，实施水资源差异化管理，提高水粮匹配程度。主产区粮食生产积聚性高，需要加快精准化技术、数字技术的应用推广，挖掘粮食节水潜力；非主产区耕地细碎化、用水保障能力弱，应推进土地宜机化改造，采用设施补贴等方式鼓励地块相邻农户组成灌溉小组，推广小型节水设施；南方水资源非农化程度高、水质性工程性缺水问题突出，需要强化工业和农业污染治理力度，通过管护制度变迁和工程建设，推动小型农田水利发展；北方资源型缺水问题突出，要积极推广高效节水技术和旱地增产技术。

**参考文献：**

[1]胡美娟，李在军，丁正山，等. 中国水资源“农转非”时空异质性及形成机制[J]. 地理研究，2019(6)：1542－1554.

[2]周玉玺,葛颜祥,周霞. 我国水资源"农转非"驱动因素的时空尺度效应[J]. 自然资源学报, 2015(1): 65-77.
[3]王喜峰,沈大军,李玮. 水资源利用与经济增长脱钩机制、模型及应用研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019(11): 139-147.
[4]胡继连,仇相玮. 水资源"农转非"监控管理研究[J]. 山东社会科学, 2016(10): 107-112.
[5]YAN T,WANG J,HUANG J. Urbanization, agricultural water use, and regional and national crop production in China[J]. Ecological Modelling, 2015(12): 226-235.
[6]杨鑫,穆月英. 中国粮食生产与水资源的时空匹配格局[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2019(4): 91-100.
[7]田蓬鹏,朱玉春. 灌溉供给对耕地"非粮化"的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2023(2): 97-109.
[8]FENG H,YANG M,ZENG P, et al. Transprovincial water quality impacts and the environmental inequity of grey water footprint transfer in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022(186): 106537.
[9]姚成胜,殷伟,黄琳,等. 中国粮食生产与消费能力脆弱性的时空格局及耦合协调性演变[J]. 经济地理, 2019(12): 147-156.
[10]姚成胜,殷伟,李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析[J]. 自然资源学报, 2019(8): 1720-1734.
[11]何可,宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全:内涵、挑战与政策取向[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021(3): 45-57.
[12]CHEN L,CHANG J,WANG Y, et al. Disclosing the future food security risk of China based on crop production and water scarcity under diverse socioeconomic and climate scenarios[J]. Science of the Total Environment, 2021(790): 148110.
[13]崔宁波,董晋. 主产区粮食生产安全:地位、挑战与保障路径[J]. 农业经济问题, 2021(7): 130-144.
[14]袁倩文,陈佳,韩文维,等. 黄土高原人口变化对县域经济系统脆弱性的影响研究[J]. 地理科学, 2022(11): 2006-2018.
[15]王成,何焱洲. 重庆市乡村生产空间系统脆弱性时空分异与差异化调控[J]. 地理学报, 2020(8): 1680-1698.
[16]UNISDR. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives[M]. Geneva: United Nations Publications, 2004:7.
[17]ADGER W N. Vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006(3):268-281.
[18]李鹤,张平宇,程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008(2): 18-25.
[19]田亚平,向清成,王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系[J]. 地理研究, 2013(1): 55-63.
[20]栾健,韩一军. 农田灌溉设施的全要素生产率增长效应[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020(3): 84-93.
[21]ZHUANG Y,ZHANG L,LI S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China[J]. Agricultural Water Management, 2019(5): 374-382.
[22]ZOU X,LI Y,CREMADES R, et al. Cost-effectiveness analysis of water-saving irrigation technologies based on climate change response: a case study of China[J]. Agricultural Water Management, 2013(11): 9-20.
[23]郑旭媛,徐志刚. 资源禀赋约束、要素替代与诱致性技术变迁——以中国粮食生产的机械化为例[J]. 经济学(季刊), 2017(1): 45-66.
[24]李明辉,周林,周玉玺. 水资源对粮食生产的阻尼效应研究——基于山东2001—2016年数据的计量检验[J]. 干旱区资源与环境, 2019(7):16-23.
[25]蔡保忠,曾福生. 中国农业基础设施投资的粮食增产效应分析——基于省级面板数据的实证分析[J]. 农业技术经济, 2017(7): 31-40.
[26]李长松,周霞,周玉玺. 黄河下游水土匹配系数与粮食生产协调发展测度及影响因素[J]. 经济地理, 2022(10): 177-185.
[27]张长征,李嘉雯,孙杰. 农田水利基础设施投资缺口对粮食生产效率损失的影响[J]. 资源科学, 2022(1): 169-180.

[28]谢呈阳,王明辉. 交通基础设施对工业活动空间分布的影响研究[J]. 管理世界, 2020(12): 52 - 64.
[29]张丽,李容. 农机作业服务是否影响粮食全要素生产率——基于农业分工的调节效应[J]. 农业技术经济, 2021(9): 50 - 67.
[30]李明文,王振华,张广胜. 农业服务业促进粮食高质量发展了吗——基于 272 个地级市面板数据的门槛回归分析[J]. 农业技术经济, 2020(7):4 - 16.
[31]李俊鹏,冯中朝,吴清华. 粮食生产技术效率增长路径识别:直接影响与溢出效应[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(1): 22 - 30.
[32]邵帅,李欣,曹建华. 中国的城市化推进与雾霾治理[J]. 经济研究, 2019(2):148 - 165.
[33]陈宏伟,穆月英. 节水灌溉设施的粮食生产增效机制[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2021(4): 76 - 89.

# Impact of Non-Agriculturization of Water Resources on Vulnerability of Grain Production

LI Chang-song, ZHOU Yu-xi
(*School of Economics and Management*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*)

**Abstract**: On the basis of measuring the vulnerability of grain production, this paper empirically tested the impact of the non-agriculturization of water resources on the vulnerability of grain production and its threshold effect using the panel data of Chinese provincial level from 2006 to 2021. The results show that: (1) the non-agriculturization can exacerbate the vulnerability and presents a non-linear feature of diminishing marginal effect; (2) From the perspective of functional areas and north-south heterogeneity, the non-agriculturization in non-main grain production areas can exacerbate the vulnerability of grain production, while the impact in the main production areas is not significant; the non-agriculturization in the southern region can exacerbate the vulnerability, while the impact in the northern region is not significant; (3) the non-agriculturization has a single threshold effect on the vulnerability, and the effect decreases significantly after exceeding the threshold. Therefore, we should improve the agricultural water efficiency and support capacity by adjusting measures according to the local conditions. It is also necessary to continuously consolidate the foundation of grain production and enhance the resilience of grain production through technology innovation and institutional optimization, and make up for the production loss caused by the transfer of agricultural water use.

**Key Words**: water resources; non-agriculturization; grain production; vulnerability; threshold effect