

# 中国粮食生产用水效率的影响因素 及空间溢出效应

徐依婷<sup>1,2</sup>,穆月英<sup>1\*</sup>,张哲晰<sup>3</sup>

(1.中国农业大学经济管理学院,北京100083;  
2.中共浙江省委党校浙江发展战略研究院,浙江杭州311121;  
3.农业农村部农村经济研究中心,北京100810)



**摘要** 粮食生产用水效率反映农业生产中水利用和粮食产出的相对变化,关系粮食安全和农业可持续发展。以粮食生产水足迹作为水资源投入指标,采用超效率SBM模型对中国全要素粮食生产用水效率进行科学测度,在此基础上,运用空间杜宾模型对粮食生产用水效率的影响因素和空间溢出效应展开分析。结果表明:①2001—2019年31省份粮食生产水足迹平均增长4.5%,其中玉米、水稻生产水足迹呈上升态势,增幅主要来自中部地区;②区域粮食生产用水效率呈东、西、中逐步降低的分布格局,西南地区与南部沿海较高,西北地区和黄河流域较低,省域水资源利用水平在空间上呈现向“高耗水—低效率”和“低耗水—高效率”水平跃迁的态势;③节水技术、水土匹配度、城镇化水平和化肥价格对粮食生产用水效率具有显著的正向影响,供水结构和产业结构的影响效应则显著为负,这些因素的区域异质性是造成用水效率空间分布差异的主要原因;④粮食生产用水效率可通过技术溢出、要素流动、生产集聚和价格传导产生空间相互关联和溢出。据此,提出深挖用水效率提升潜力,充分发挥区域互馈效应,实现粮食生产用水效率协同提升的政策启示。

**关键词** 农业用水效率;水足迹;溢出效应;超效率SBM模型;空间杜宾模型

**中图分类号**:F323.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-3456(2022)04-0076-14

**DOI编码**:10.13300/j.cnki.hnwkxb.2022.04.007

水是农业生产不可或缺的物质基础,也是制约农业可持续发展的关键因素。随着工业化和城镇化进程加快,农业用水被工业和生活用水大量挤占,与此同时,粮食生产与水资源空间分布的严重不平衡,加剧了区域农业用水紧缺和粮食持续稳产增产之间的矛盾。提高粮食生产用水效率是破解这一矛盾的关键,有利于保障长期粮食安全。据相关资料,若灌区单方水粮食产量和旱作区每毫米降水的亩产均提高0.1千克,则可增加粮食生产能力500亿千克<sup>①</sup>。但是当前粮食生产水资源利用率不高,与世界先进水平差距较大。其中灌溉条件下单方水粮食产量为1.1千克,远低于发达国家2.5~3.0千克的产出水平<sup>①</sup>;雨养条件下的粮食亩产低于发达国家约20%<sup>②</sup>。提高粮食生产用水效率是当前亟待解决的关键问题,为此政府颁布了水资源“三条红线”<sup>③</sup>、《国家节水行动方案》等一系列政策。

收稿日期:2021-05-11

基金项目:国家社会科学基金重大项目“我国粮食生产的水资源时空匹配及优化路径研究”(18ZDA074)。

\*为通讯作者。

① 资料来源于2012年《农业部关于推进节水农业发展的意见》。

② 《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》以确立“三条红线”作为主要目标,一是确立水资源开发利用控制红线,严格实行用水总量控制;二是确立用水效率控制红线,全面推进节水型社会建设;三是确立水功能区限制纳污红线,严格控制入河湖排污总量。

此外,随着跨区域水利工程的开展,区域间用水往来越来越密切,粮食生产水资源利用的空间关联特征不容忽视。在此背景下,探究粮食生产用水效率的影响因素和空间关联效应具有重要的现实意义。

## 一、文献综述

当前,国内外关于农业水资源利用效率的研究日益丰富。农业用水效率的定义从早期的单要素水分生产率向全要素框架延伸<sup>[3-4]</sup>,评价范围从田间、作物向省域、流域乃至全球更大尺度拓展<sup>[5]</sup>。现有关于农业用水效率评价的文献大多聚焦灌溉用水效率,采用宏观农业用水指标或微灌农户调研数据作为粮食生产水资源投入<sup>[6]</sup>,未将降水资源纳入投入产出分析框架。相比之下,水足迹可综合考虑不同气候条件和地理区位下作物对灌溉和降水的利用特征,能更真实地衡量农业生产对水资源的占用情况<sup>[7]</sup>,是量化农业生产用水的有效工具<sup>[8]</sup>。但是目前关于水足迹的研究大多以评价或分析其影响因素为主,鲜有研究将水足迹作为水资源投入指标开展全要素农业用水效率评价。在影响因素上,主要涵盖微观农户个人家庭特征、耕地规模、灌溉行为、技术培训和风险态度<sup>[9-12]</sup>,以及宏观技术进步、水利设施、管理水平、政策制度、种植结构、自然条件和经济社会条件的影响<sup>[13-16]</sup>。

此外,有不少学者围绕农业用水效率的区域差异和空间关联展开探讨。从空间格局来看,农业生产用水效率与区域经济发展和地理区位密切相关<sup>[17]</sup>,整体呈现东高西低、南高北低的分布态势<sup>[18]</sup>,农业用水量较高的地区具有较高的用水效率<sup>[19]</sup>,规模效率呈现出沿海高于内陆的特征<sup>[20]</sup>。从趋同性来看,王昕等的研究表明省际农业用水效率差异未呈现随时间变动而缩小的态势,最终会实现各自的稳态均衡<sup>[21]</sup>;刘华军等发现相邻地区用水效率的交互作用可缩小流域用水效率差距<sup>[22]</sup>;周迪等研究表明工业用水、农业用水和总用水效率均存在空间集聚特征,其中农业用水效率的俱乐部趋同程度最低<sup>[23]</sup>。从溢出效应来看,农业用水效率会受相邻省份的影响<sup>[24]</sup>,其技术落差率、技术无效率和管理无效率均存在空间自相关性<sup>[25]</sup>,技术创新的外部性使得邻近地区技术进步对本地区农业用水效率产生正向空间溢出效应<sup>[26-27]</sup>。亦有研究表明经济发展水平、城镇化和产业结构的溢出效应是造成用水效率变动的主要原因<sup>[28]</sup>。

综上所述,本研究关注如下问题:其一,我国粮食生产用水效率在空间分布上存在何种特征,为什么会产生这种空间差异?其二,区域间粮食生产用水效率是否存在空间溢出,其内在机理为何?围绕以上问题,以水足迹为工具量化2001—2019年中国除港澳台地区外的31省(市、自治区)的粮食生产水资源投入,在此基础上,采用超效率SBM模型对全要素粮食生产用水效率进行测算和评价,然后运用空间面板计量模型进一步分析粮食生产用水效率的影响因素及其空间溢出效应,以期为区域农业可持续发展提供参考。

本研究对既有文献的拓展主要体现在以下两方面:第一,粮食生产的投入和产出关系到粮食生产用水效率的测算,本研究以水足迹为计量工具,兼顾灌溉和降水的水资源投入,测算粮食生产用水效率,用于分析水资源如何影响粮食生产。第二,尽管有不少研究关注空间视角下的农业用水效率,但是从全国层面对农业用水效率空间差异原因展开探讨的尚不多见,本研究从影响因素的空间外溢视角探究中国粮食生产用水效率存在空间差异和关联的内在机制。

## 二、理论框架

粮食生产系统内部,除水资源外,还涉及土地、劳动力等要素的投入,生产系统内部的相对效率测算是从投入产出层面直观反映粮食生产水资源利用水平特征;而生产系统外部的经济、社会、自然环境等因素则是从宏观层面剖析造成地区间粮食生产用水效率差异的深层原因。

### 1. 粮食生产用水效率的影响因素分析

在水资源供需结构方面,以地下水为主要水源的供水结构可通过减少渠系输水损失,提高灌溉效率<sup>[15]</sup>,但也有研究表明选择地表水灌溉的用水效率更高<sup>[10]</sup>;需求侧的用水结构体现了水资源在农业与非农部门之间的配置,可通过减少农业用水倒逼用水效率的提升。在要素匹配方面,水土资源匹配度越低,表明单位耕地面积的农业水资源越稀缺,可能会产生短板效应限制农业生产效率的改善,造成农业用水效率损失<sup>[29]</sup>,但是在单位耕地面积水资源相对稀缺的地区,农业生产者可能具有较强的风险意识和节水认知,可促进水资源的合理配置和节水技术采用,刺激地区农业用水效率提高。在政策制度方面,财政支农强度可通过影响农业技术创新、科研成果转化和农业灌溉基础设施建设,对农业用水效率产生影响。在资源禀赋方面,水资源是农业发展的刚性约束,较高的水资源禀赋有助于满足作物生长需水,同时也可能加剧农业生产者的浪费行为,导致用水效率降低。在生产条件方面,除节水技术外,种植结构和生产资料价格可通过作物需水规律、要素之间的替代或互补效应影响农业用水效率。在农业经济发展方面,产业结构、城镇化率和农产品贸易分别反映了工业化、城镇化进程和农业经济对外开放程度,一方面通过影响水资源、劳动力等生产要素的配置,另一方面通过贸易往来影响新型农业技术和生产管理方式的交流和引进,对农业用水效率产生影响。

### 2. 粮食生产用水效率的溢出机制分析

在影响因素分析的基础上,进一步从外溢性视角沿着技术溢出、要素流动、生产集聚和价格传导4条路径论述粮食生产用水效率的溢出机制。

(1)技术溢出。随着区域一体化进程的加快,地区间联系愈加紧密,农业节水技术在省域间的学习、交流和示范可通过渐进式、等级式和跳跃式三种形式向邻近地区扩散<sup>[30]</sup>,产生技术溢出。随着农业经济开放性程度提高,农产品贸易为技术引进和知识溢出提供渠道支撑,财政支农则为技术溢出提供资金保障和政策支持,共同作用于生产系统,引致粮食生产用水效率的空间关联性。

(2)要素流动。就水资源而言,其本身具有流动性、循环性和分布不均一性特征。一方面,地表水和地下水供给、降水以及农业用水之间处在不断地开采与补给、消耗与恢复的动态平衡之中,因此在有限的水资源储蓄量约束下,若流域上游追求利益最大化过度开发水资源,水平衡打破后形成的负外部性可能会对下游省份农业用水效率产生影响<sup>[31]</sup>;另一方面,省内水资源供给无法满足其用水需求时,基于水利设施的跨省、跨流域水资源流动可改善水土要素匹配,对省域农业水资源利用产生空间外溢性。此外,劳动力要素也具有灵活的流动性特征,农村劳动力转移是家庭劳动力要素的重新配置,不仅可通过促进机械化和规模化生产推动规模化农场、家庭农场等新型经营主体的兴起,重视对农业技术的采用和对资源的集约利用,从而提高粮食生产效率和水资源利用率,而且劳动力的跨区域流动还可能对邻近地区粮食生产用水效率产生溢出效应<sup>[32]</sup>。

(3)生产集聚。农业生产过程对水资源、耕地和劳动力具有高度依赖性,基于要素资源禀赋的比较优势形成了农业生产的区域分工,促使农业产业在优势区域形成空间集聚。缺乏水资源比较优势的省份可能倾向于节水型的种植结构和产业结构,有利于提高其用水效率。由于同一集聚区内省份之间的种植结构调整和产业结构调整通常具有空间连片性和规模性特征,因而其对粮食生产用水效率的影响可能也存在空间关联性。

(4)价格传导。因价格的相对变化,水资源与其他农业生产要素之间可能产生替代或互补效应。化肥施用量与粮食产量高度相关,同时随着水肥一体化技术的推广,肥料与水资源之间表现为互补的要素关系,因此考察化肥价格传导对粮食生产用水效率的外溢作用。具体而言,由于价格的联动性,本地区化肥价格上涨可能增加对邻近地区的化肥需求从而带动邻近地区化肥价格上涨。考虑到化肥施用效果对水资源利用具有依赖性,邻近地区粮食种植户为减少化肥使用量的同时能够维持原



有粮食产量,将会积极提高对水资源的利用效率<sup>[33]</sup>。

由此,将粮食生产用水效率的影响因素和溢出机制的理论框架整理为图1。

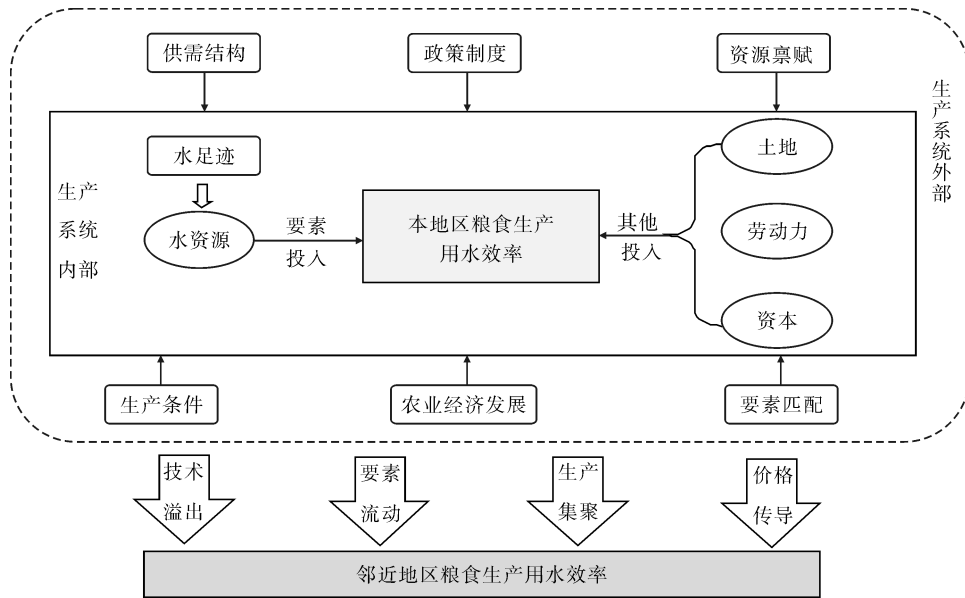


图1 粮食生产用水效率的影响因素及溢出机制

### 三、研究方法数据来源

#### 1. 研究方法

(1)水足迹测算方法。与非农产业在水利用上的最大不同在于,除了利用地表和地下水资源,农业生产还高度依赖于自然气候条件。为便于量化生产所需的水资源数量,荷兰学者Hoekstra开发了水足迹工具<sup>[34]</sup>,相较宏观实体水指标,以水足迹测算农业用水量具有以下三点优势:第一,除了考虑实际灌溉的水资源投入外,水足迹可以将作物生长中对降水的利用考虑在内,更真实的体现粮食生产对水资源的需求状况;第二,通过综合考虑温度、湿度、光照等气象条件和地理条件,可体现作物在不同地域生长条件下的需水差异;第三,通过纳入作物生长期特点反映粮食生产的季节性特征,呈现不同种类粮食作物对水资源的利用差异。

在测算方法上,产业部门维度的水足迹核算一般采用多区域投入产出分析法<sup>[35]</sup>;考察水资源污染及其环境影响可采用引入水资源压力指数的生命周期评价法<sup>[36]</sup>;不同空间尺度下的生产和消费活动水足迹以基于虚拟水的测算方法更为常见<sup>[37]</sup>,其中,在联合国粮农组织(FAO)修正的标准彭曼公式基础上开发的CROPWAT软件,对于作物层面的生产水足迹核算的应用最为广泛<sup>[38-39]</sup>。综上所述,本研究采用CROPWAT软件测算粮食作物生产水足迹。相关计算公式如下:

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} \quad (1)$$

$$WF_{green} = 10 \times ET_{green} \times A \quad (2)$$

$$WF_{blue} = 10 \times ET_{blue} \times A \quad (3)$$

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \quad (4)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad (5)$$

$$P_e = \begin{cases} P \times (125 - 0.6 \times P) / 125, & P \leq 250/3 \\ 125/3 + 0.1 \times P, & P > 250/3 \end{cases} \quad (6)$$

其中,WF表示粮食作物生产水足迹(单位:立方米), $WF_{green}$ 和 $WF_{blue}$ 分别表示粮食作物生产的绿水足迹和蓝水足迹; $ET_{green}$ 和 $ET_{blue}$ 分别表示作物生长绿水和蓝水的蒸散量;A表示作物播种面积; $P_e$ 表示作物生育期有效降水量;绿水蒸散量取作物蒸散量( $ET_c$ )与有效降水量中的较小值;蓝水蒸散量等于作物蒸散量与有效降水量之差,当 $P_e > ET_c$ 时, $ET_{blue} = 0$ 。有效降水量可根据美国农业部土

壤保持局的方法,由实际降水量( $P$ )计算得到。 $ET_c$ 的计算方法如下:

$$ET_c = \sum_{d=1}^{lsp} (K_c \times ET_0) \quad (7)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, $ET_c$ 由生育期内作物系数( $K_c$ )与参考作物蒸散量( $ET_0$ )相乘后累加所得。 $K_c$ 反映了粮食作物本身的生物特性对作物需水量的影响; $ET_0$ 由标准彭曼公式计算所得。其中, $R_n$ 、 $G$ 、 $\gamma$ 、 $T$ 、 $U_2$ 、 $e_a$ 、 $e_d$ 分别代表净辐射量、土壤热通量、湿度、平均气温、风速、饱和以及实际水汽压等气象参数, $\Delta$ 表示饱和水汽压与温度曲线的斜率。

(2)超效率SBM模型。借鉴Hu等<sup>[40]</sup>提出的“目标减水量”(WRT)概念,将全要素用水效率定义为给定产出和其他投入水平下,技术上可行的水资源投入量与实际使用量之比。粮食生产用水效率(WE)可表示为: $WE = 1 - WRT/AWI$ 。其中,WRT由水资源投入径向调整和松弛量两部分组成,AWI为实际水资源投入。考虑到水资源投入冗余的可能性,采用基于松弛变量的超效率SBM模型测算粮食生产用水效率,模型如下所示:

$$\theta^* = \min \theta = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 + \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{rk}} \quad (9)$$

$$s.t. \begin{cases} \theta x_k = \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^-, & i = 1, 2, \dots, m \\ y_k = \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+, & r = 1, 2, \dots, s \\ s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0, \lambda_j \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n (j \neq k) \end{cases}$$

上式中, $\theta$ 为各决策单元的生产效率。 $n$ 表示决策单元数量,每个决策单元有 $m$ 种投入和 $s$ 种产出, $x_k$ 和 $y_k$ 表示投入、产出向量, $s_i^-$ 和 $s_r^+$ 表示投入、产出松弛量, $\lambda_j$ 表示非负权重。结合生产效率、水资源投入松弛量和实际用水量,可得到粮食生产用水效率。

(3)水土资源匹配度测算。采用单位耕地面积的广义农业水资源量反映全国农业水土资源匹配度<sup>[41]</sup>,其计算公式如下:

$$water\_land_i = (BW_i + GW_i) / Land_i \quad (10)$$

其中, $BW_i$ 表示农业蓝水可用水量,其值等于地区蓝水资源总量与农业用水占比的乘积; $GW_i$ 表示农业绿水可用水量,可参考Cao等<sup>[42]</sup>的方法将其表示为耕地面积与年降水量(毫米)的乘积; $Land_i$ 为耕地面积。

(4)空间计量模型。空间杜宾模型(spatial durbin model, SDM)可以同时涵盖被解释变量和解释变量的空间滞后项,更具一般性。因此,优先考虑具有一般形式的SDM模型:

$$y = \rho W y + X \beta + W X \theta + \epsilon \quad (11)$$

式(11)中, $y$ 表示各省粮食生产用水效率的向量; $X$ 表示各解释变量的向量; $W$ 表示空间权重矩阵,采用空间地理距离矩阵,并且以邻接权重矩阵作为稳健性检验; $\rho$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 分别为估计参数, $\epsilon$ 为随机误差向量。在模型的选择上,若LM检验结果显示拒绝“ $\theta = 0$ ”或“ $\rho\beta + \theta = 0$ ”假设之一,则选择构建与之相对的SAR或SEM空间模型。若两个假设均被拒绝,则表明SDM模型更为适用。

## 2. 数据来源及变量说明

采用2001—2019年除港澳台地区外的31省(市、自治区,下同)的面板数据展开研究。考虑到小麦、玉米、水稻的播种面积在粮食总播种面积中的占比达到80%以上,选择三大主粮具有一定代表性,将作物单位水足迹含量与其播种面积相乘汇总得到三大主粮生产水足迹。计算单位水足迹含量时,将作物生长期分为生长初期、快速发育期、中期和成熟期四个阶段,结合农业部种植业管理司的

分旬农时信息确定各细分作物的省域种植分布以及生育期各阶段时长。值得说明的是,作物系数 $K_c$ 反映了作物蒸腾、土壤蒸发的综合效应,是计算作物需水量不可缺少的参数<sup>[43]</sup>,刘钰等<sup>[44]</sup>、李彩霞等<sup>[45]</sup>的研究均发现分段单值平均法和双值法计算的作物系数与实验测算结果相近,表明在缺乏实测数据的情况下可以基于FAO推荐参数确定作物系数。考虑到数据可获性,参考FAO指导手册<sup>①</sup>获取粮食作物不同生长阶段的作物系数、根系深度、作物高度的参数值。

用水效率测算以及影响因素分析涉及的相关变量的定义及说明见表1。需要说明的是,采用玉米播种面积占比作为种植结构的代理变量,相对耐旱的玉米播种面积占比的增加表明种植结构可能具有向节水型作物转变的倾向;农产品进出口量体现了地区农业经济对外开放程度,农产品贸易可通过农业技术溢出或是市场竞争对生产端用水效率产生影响;产业结构反映了不同产业部门之间的关联,可由第一产业增加值占比表示,产业结构变动包含着资本要素在不同产业之间的流动;城镇化率用人口城镇化水平来衡量,人口的城乡迁移可在一定程度上体现农村劳动力的流动。以上涉及价格因素的相关数据,均以2001年为基期进行平减,剔除了价格变动。

表1 变量定义及说明

变量用途	变量名称	变量解释	数据来源及说明
粮食生产 用水效率测算	<b>产出变量</b>		
	粮食产出	粮食产值/亿元	《中国农村统计年鉴》(2002—2020年)
	<b>投入变量</b>		
	土地投入	粮食播种面积/千公顷	投入产出数据均来自《中国农村统计年鉴》(2002—2020年),利用权重系数法,将各投入指标转化为以粮食作为统一口径
	机械投入	农用机械总动力/万千瓦	
	农药投入	农药使用量/万吨	
	化肥投入	农用化肥折纯量/万吨	
	劳动力投入	粮食生产从业人员/万人	
	水资源投入	粮食生产水足迹/亿立方米	CROPWAT软件测算整理得到
	<b>被解释变量</b>		
粮食生产用水效率	超效率SBM模型测算得到		
<b>解释变量</b>			
空间计量回归	水土资源匹配度	单位耕地面积的广义农业水资源量/毫米	耕地面积来自《中国农村统计年鉴》(2002—2020年);地下水和地表水供水量、农业用水量、用水总量均来自国家统计局网站(2004—2019年)和各省水利厅网站、水资源公报以及分省统计年鉴(2001—2003年)
	用水结构	农业用水量/用水总量/%	同上
	供水结构	地下水资源供水量/供水总量/%	
	水资源开发指数	用水总量/水资源总量	同上
	种植结构	玉米播种面积/粮食总播种面积/%	《中国农村统计年鉴》(2002—2020年)
	化肥价格	化肥价格指数	同上
	节水灌溉技术	包括喷灌、微灌、管道输水、渠道防渗和其他节水灌溉面积/千公顷	《中国农村统计年鉴》(2015—2020年);EPS数据平台
	降水量	年降水量/毫米	水资源公报
	农业经济开放性	农产品进出口量/万吨	国家统计局网站
	财政支农	农林水事务支出/亿元	同上
产业结构	第一产业增加值占比/%	同上	
城镇化率	城镇人口占总人口比重/%	同上	

① 资料来源联合国粮农组织网站。<http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>.

## 四、粮食生产用水效率评价

### 1. 粮食生产水足迹测算结果

结合国家统计局和相关文献资料,可将中国划分为东中西三大区域<sup>①</sup>,测算得到各地区小麦、玉米、水稻生产水足迹含量(表2)。

表2 2001—2019年分地区粮食生产水足迹

亿立方米

地区	小麦		玉米		水稻		粮食		变化率/%
	2001年	2019年	2001年	2019年	2001年	2019年	2001年	2019年	
全国	53.9	51.6	37.8	64.3	65.9	67.1	190.3	198.9	4.5
东部地区	74.1	71.7	32.6	45.7	49.5	39.0	163	140.6	-13.7
北京	5.4	0.6	4.6	1.5	—	—	11.9	2.3	-80.6
天津	7.2	6.8	5.6	8.2	0.7	3.4	17.2	19.2	11.4
河北	185.1	149.2	109.6	120.6	6.6	4.6	382.7	305.6	-20.1
辽宁	3.9	0.1	90.2	135.0	39.6	34.5	193.9	185.8	-4.2
上海	1.4	0.5	0.2	0.1	9.2	6.8	12	7.5	-37.6
江苏	92.6	132.3	14.6	19.2	134.9	147.4	284.9	319.4	12.1
浙江	4.8	3.7	1.7	2.9	67.8	36.3	95.3	53.4	-44.0
福建	—	—	1.2	1.0	71.9	35.4	103.2	47.6	-53.9
山东	292.6	280.2	125.3	164.1	14.3	8.3	496.7	472.4	-4.9
广东	—	—	4.9	3.9	129.6	97.8	165.2	114.8	-30.5
海南	—	—	0.6	—	20.5	15.6	29.6	18.5	-37.5
中部地区	65.9	71.3	57.3	104.1	113.7	141.5	305.2	356.2	16.7
山西	52.8	35.0	34.8	71.0	—	—	151.5	146.5	-3.3
吉林	2.3	0.1	151	216.7	54.2	59.1	260.2	307.6	18.2
黑龙江	17.6	1.8	121.8	285.0	119.2	251.0	535.5	791.4	47.8
安徽	106.3	141.6	22.5	44.4	116.1	131.8	317.8	354.1	11.4
江西	1.4	0.6	0.5	1.7	150.2	185.4	173.4	201.9	16.4
河南	315.2	351.5	93.6	160.9	29	41.9	520.7	587.6	12.8
湖北	27.7	38.6	21.1	34.5	122	122.0	219.6	223.0	1.6
湖南	3.9	0.9	13.3	19.0	205.4	199.4	262.6	237.4	-9.6
西部地区	29.8	20.8	29.1	53.3	45.5	40.4	136	147.5	8.5
内蒙古	30.3	32.8	90.7	254.0	6.1	13.5	262.6	458.3	74.5
广西	—	—	20.9	26.9	121.2	97.3	172.8	148.7	-14.0
重庆	9.7	0.5	19.5	19.6	45.7	43.8	121.4	114.7	-5.5
四川	35.3	14.6	34.5	59.4	112.1	103.6	254.5	257.8	1.3
贵州	15.1	3.7	25.5	19.0	39.6	36.7	125.6	120.7	-3.9
云南	32.1	16.3	37.3	56.6	60.3	50.1	195.5	173.5	-11.3
西藏	2.2	1.1	0.2	0.2	—	—	8.9	6.4	-27.9
陕西	63.4	45.7	38	45.5	9.7	7.3	152	131.4	-13.5
甘肃	56.5	38.0	30.5	60.5	—	—	146.4	146.9	0.3
青海	6.6	4.5	0.1	0.9	—	—	13.2	12.3	-6.7
宁夏	19.2	6.2	10.9	19.4	6.8	5.5	55.3	44.3	-19.9
新疆	57.5	66.0	41.1	77.7	8.5	5.3	123.5	155.2	25.7

注:①粮食生产水足迹=三大主粮生产水足迹之和/(三大主粮播种面积之和/粮食总播种面积);②“—”表示该省份不属于对应粮食作物产区;③小麦和水稻生产水足迹分别通过冬、春小麦和早、中、晚稻的单位水足迹与对应作物播种面积加权计算所得。

① 东部包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南;中部包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南;西部包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。资料来源:www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201701/t20170120\_1455967.html.

2001—2019年全国平均粮食生产水足迹从190.3亿立方米攀升至198.9亿立方米,增幅为4.5%。对增量进行分解可以发现,水足迹增长的主要来源为中部地区,除湖南和山西外其他中部省份粮食生产水资源投入量均有上升,其中黑龙江省用水增幅达到47.8%。西部大部分省份粮食生产水足迹下降,但内蒙古以74.5%的增幅拉动西部地区整体水足迹上涨8.5%。相比之下,东部地区2019年粮食生产水足迹相比2001年下降了13.7%,其水资源利用呈现由农业部门向非农部门转移的态势。从作物层面看,研究期间水稻生产水足迹略有增加且长期居于首位,玉米生产水足迹扩张将近一倍,小麦略有下降。可见玉米虽为相对耐旱型作物,其播种面积的大幅增加仍会对地区粮食生产用水造成较大压力。

## 2. 粮食生产用水效率测算及评价

基于MATLAB软件,以粮食生产水足迹作为水资源投入,采用超效率SBM模型对粮食生产用水效率进行测算和评价。分别按照传统三大区域和考虑农业生产活动相似性划分的六大区域<sup>①</sup>,将2001—2019年全国及分区域粮食生产用水效率整理如图2~3所示。

从图2来看,研究期间全国粮食生产用水效率呈现先降后升再平稳波动的特征,区域间粮食生产用水效率呈现东、西、中部逐级降低的分布格局。从时期变化来看,2001—2003年全国粮食生产用水效率持续下跌,2003—2005年期间逐渐回升,随后用水效率在0.8上下小幅平稳波动。从地区比较来看,东部粮食生产用水效率高于全国平均水平且排名位居三大地区之首,其用水效率波动幅度较大;西部粮食生产用水效率排名长期居于中位,波动最为平缓;中部地区粮食生产用水效率最低,随时间呈现波动下降趋势,年均降幅为0.49%,是导致全国粮食生产用水效率提升缓慢的主要原因。图3描绘了六大区域2001—2019年粮食生产用水效率的演变特征,从历年平均值来看,西南地区粮食生产用水效率最高,其次是南部沿海、长江流域和东北地区,这些区域粮食生产用水效率高于全国平均水平;西北地区和黄河流域则位居倒数,低于全国平均水平。分区域来看,六大区域粮食生产用水效率的演变趋势各有不同。具体而言,样本期内南部沿海地区平均增长幅度最大(3.1%),在六大区域中的排名由2003年的第六持续攀升至2019年的第一;西南地区以年均增长0.01%的稳定态势排名长期位列前二;长江流域整体处于下跌态势,年均跌幅1.27%;东北地区呈M形变动特征,在六大区域中的排名由前三上升至第一后又跌落至全国平均水平之下;黄河流域粮食生产用水效率长期低迷;西北地区长期排名末尾,但近两年呈上升态势。

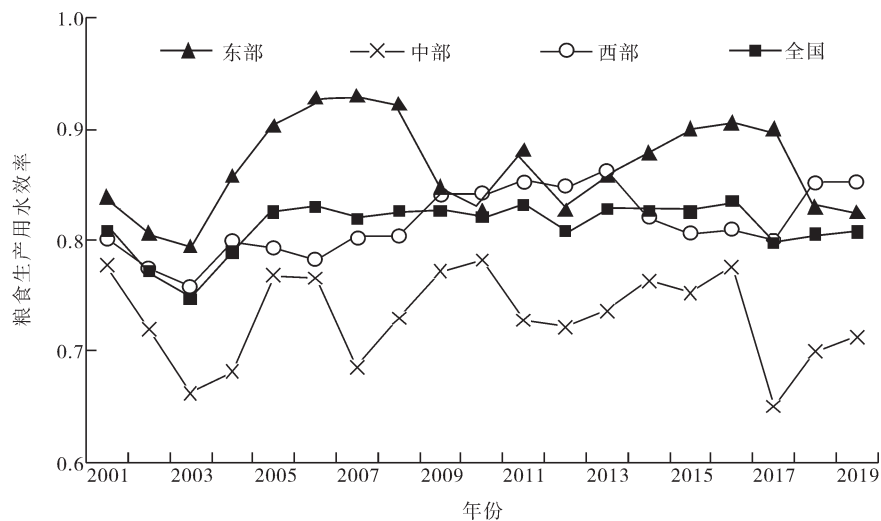


图2 全国及东中西部粮食生产用水效率变化

① 参考已有研究,将31省份划分为六大区域,其中,东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江;黄河流域包括北京、天津、河北、山西、山东、河南、陕西;长江流域包括上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南;南部沿海包括福建、广东、广西、海南;西南地区包括四川、重庆、贵州、云南;西北地区包括内蒙古、青海、西藏、甘肃、宁夏、新疆。



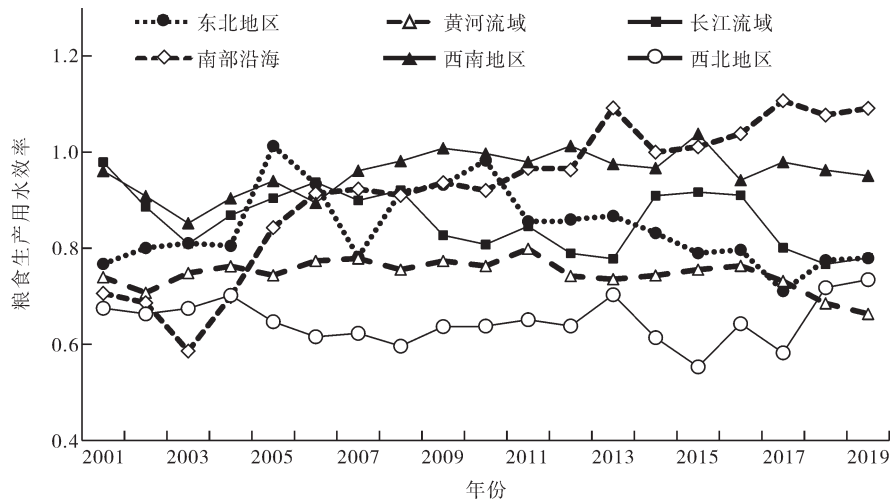


图3 全国六大区域粮食生产用水效率变化

细化到省域层面,以历年粮食生产用水量均值和用水效率均值为分界线,构建2001年和2019年粮食生产用水量与用水效率象限图(图4),将各省份按象限进行划分评价粮食生产水资源利用的省域特征。图4中,纵坐标为粮食生产用水量,横坐标为粮食生产用水效率,从省域来看,2001—2019年期间粮食生产用水呈现向二、四象限跃迁的态势,表明粮食生产水资源利用在空间上趋于两极分化。具体表现为:第一象限代表高耗水—高效率地区,始终包括吉林、江苏、四川和河南,这一区域粮食生产虽然具有较高的水资源利用效率,但是长期高耗水带来的水资源压力加剧,需要引起必要的重视。第二象限代表高耗水—低效率地区,包括河北、山东、内蒙古、安徽、湖北、辽宁以及后来加入的湖南和江西等粮食主产区,如何在保障粮食有效供给的前提下兼顾节水提效,是该区域当前农业发展面临的主要矛盾之一。第三象限表示低耗水—低效率地区,长期包含青海、山西和甘肃,该地区水资源利用方式相对粗放;海南、重庆、宁夏、福建、西藏则向用水效率提高的发展方向跃迁。第四象限表示低耗水—高效率地区,该区域省份最多且跃迁最为明显,长期包括北京、浙江、广东等东部经济发达省份。

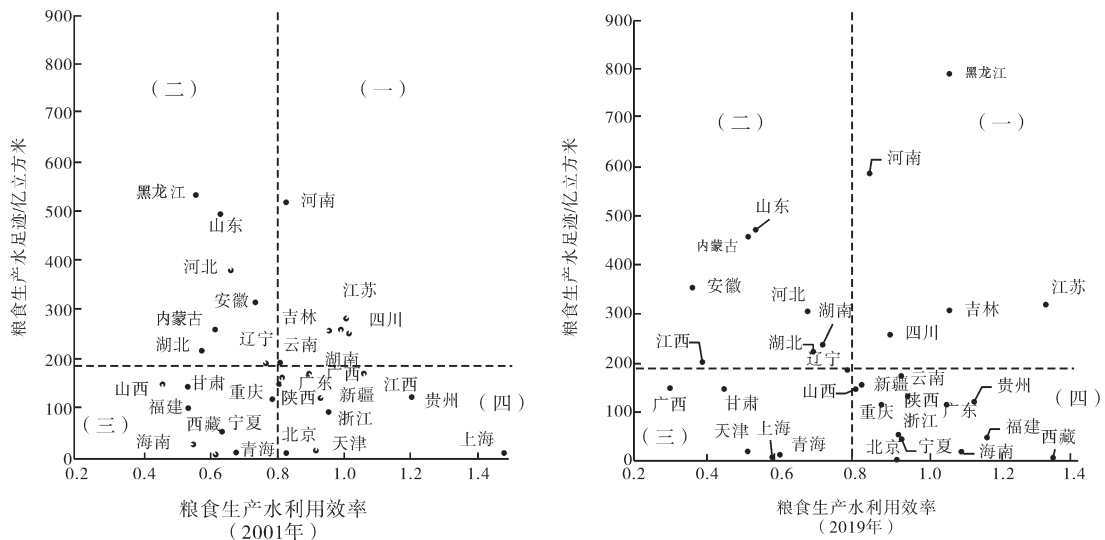


图4 2001年和2019年粮食生产用水量与用水效率评价

### 五、粮食生产用水效率影响因素的空间分析

基于上文对用水效率的测算和评价,进一步从影响因素及其溢出效应视角考察造成区域粮食生

产用水效率差异和空间关联的深层原因。首先利用GeoDa1.14软件测算得到2001年和2019年粮食生产用水效率的Moran's I,分别为0.135和0.201,通过10%和5%水平上的显著性检验,表明粮食生产用水效率在省域层面存在空间集聚特征。在初步判断空间相关性存在的基础上,对空间计量模型的选择展开检验,利用MATLAB软件得到SAR和SEM模型的LM检验结果如表3所示,地理距离权重和地理邻接权重下的稳健LM检验统计量均能通过显著性检验,表明空间计量模型比普通面板模型更适用,同时存在被解释变量和误差项的空间滞后项,需要采用SDM模型进行回归。

表3 LM检验结果

	LM-lag 检验	稳健LM-lag 检验	LM-error 检验	稳健LM-error 检验
地理距离权重矩阵	1.3531	5.545**	4.222**	8.412***
地理邻接权重矩阵	0.245	0.019	0.040	0.004

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%和10%水平上显著;下同。

采用偏微分回归方法,将各因素的影响效应分解为直接效应、间接效应和总效应,如表4所示,Wald和LR检验结果均在1%水平上显著,表明“SDM模型可退化为SAR或SEM模型”的原假设被

表4 两种权重下SDM模型空间效应分解

变量	SDM-距离权重			SDM-邻接权重		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
水土资源匹配度	0.196*** (3.059)	0.402* (1.855)	0.598*** (2.762)	0.155** (2.533)	0.247 (1.614)	0.402** (2.474)
用水结构	0.001 (0.267)	0.008 (1.472)	0.009 (1.551)	0.001 (0.527)	0.003 (0.799)	0.004 (0.964)
供水结构	-0.005* (-1.955)	-0.008 (-1.264)	-0.012** (-2.051)	-0.005* (-1.962)	-0.001 (-0.279)	-0.006 (-1.249)
水资源开发指数	0.069 (1.601)	0.079* (1.938)	0.149** (2.147)	0.052 (1.240)	0.055 (0.550)	0.107 (0.997)
种植结构	-0.002 (-0.771)	0.005 (0.884)	0.003 (0.628)	-0.000 (-0.019)	-0.001 (-0.138)	-0.001 (-0.169)
化肥价格	0.248** (2.471)	0.419 (1.310)	0.667** (2.119)	0.235** (2.418)	0.456** (2.062)	0.691*** (3.121)
节水灌溉技术	0.048* (1.726)	0.027 (0.251)	0.075 (0.624)	0.033* (1.782)	0.026 (0.276)	0.059 (0.528)
降水量	-0.002 (-0.089)	-0.247 (-1.156)	-0.249 (-0.927)	0.001 (0.053)	-0.093 (-1.668)	-0.091 (-1.486)
农业经济开放性	0.001 (0.377)	0.001 (0.096)	0.002 (0.258)	0.004 (1.121)	-0.003 (-0.420)	0.001 (0.129)
财政支农	0.036 (0.579)	-0.175 (-1.007)	-0.139 (-0.815)	0.036 (0.590)	-0.288** (-2.286)	-0.252* (-1.798)
产业结构	-0.008* (-1.905)	-0.070*** (-4.956)	-0.078*** (-5.061)	-0.011** (-2.442)	-0.054*** (-4.995)	-0.065*** (-4.841)
城镇化率	0.005* (1.732)	-0.017** (-2.582)	-0.013* (-1.825)	0.004 (1.496)	-0.020*** (-3.566)	-0.017** (-2.628)
Wald-lag 检验		50.360***			49.114***	
LR-lag 检验		55.864***			54.366***	
Wald-error 检验		48.747***			49.771***	
LR-error 检验		52.677***			54.282***	

注:括号中的数字表示t统计量。

拒绝,验证了空间杜宾模型的适用性。两类权重矩阵下的结果较为相似,说明所得结论比较稳健。具体分析如下:

从直接效应来看,水土资源匹配度、化肥价格、节水技术和城镇化率对本地区粮食生产用水效率具有显著的正向影响,供水结构和产业结构的影响效应则显著为负。这一结果表明水土匹配、互补要素价格、城镇化水平、供水结构和产业结构等因素在区域间的差异,是造成粮食生产用水效率呈现东、西、中递减空间分布格局的主要原因。具体来说,东部地区相比中西部地区的经济发展水平和工业化、城镇化水平较高,能够为节水技术创新和水利设施建设提供更多资金支持,同时吸纳了更多水资源和劳动力要素向二、三产业转移,并且东部地区具有较高的水资源禀赋和水土资源匹配度,因此其农业用水效率最高。从中部和西部来看,后者虽然经济发展相对落后,但国家政策支持力度的不断加强,推动农业基础设施的不断完善和高效节水技术的快速推广,因而西部地区粮食生产用水效率高于中部地区位居中位。

从影响因素的直接作用路径来看,现代节水灌溉技术的推广有利于减少渠系输水损失和蒸发损耗,促进粮食生产用水效率提升。水土资源匹配度增加对粮食生产用水效率的正向作用说明单位耕地面积水资源稀缺程度加剧对粮食生产所造成的短板效应大于节水意识提高所带来水资源配置优化效应。降水量是水资源禀赋的直接体现,其对用水效率的直接影响并不显著可以进一步佐证上述结论。随着水肥一体化模式的普及,灌溉与施肥的有机结合在提高肥料利用率的同时会对灌溉用水效率产生影响。受市场机制调节,化肥价格上涨可通过抑制需求从而减少肥料施用量,促进水资源利用率的提高来维持既有产量<sup>[33]</sup>。农村劳动力向城镇迁移是城镇化水平提高的主要来源,农村剩余劳动力转移一方面有利于激发机械生产替代劳动的需求,推动农业机械化、规模化和集约化生产,有利于粮食生产效率和水资源利用率的提高。此外,供水结构和产业结构的负向影响反过来说明以地表水代替地下水供给以及二、三产业比重增加将促进粮食生产用水效率提升。

在影响因素分析基础上,进一步从影响因素的外溢视角揭示粮食生产用水效率存在空间溢出的内在原因。表4中的间接效应回归结果显示,水土资源匹配和化肥价格对粮食生产用水效率具有显著的正向溢出作用,产业结构和城镇化率则表现为负向溢出效应。从溢出机制来看,相比对本地区的直接影响,农业水土资源匹配的溢出效应更为突出,可通过水资源跨区域调配发挥水利设施的外溢作用,基于水资源的要素流动可以改善水资源调入区的水土匹配水平,促进调入区粮食生产用水效率的提升,产生区域互馈效应。水资源开发指数传递了水资源压力水平的信息,地区水资源压力水平加大会推动地方政府加强节水技术引进及推广,对邻近省份产生技术溢出,同时由于水的流动性特点,对本地区水资源的过量开发将加大流域内其他省份的用水压力,共同引致粮食生产用水效率的空间溢出。化肥价格在影响本地区粮食生产用水效率的同时,将通过区域间价格传导对邻近地区用水效率产生间接影响。在产业结构方面,由于粮食生产存在地理空间集聚特征,同一集聚区内的省份之间农业生产布局和产业结构规划相近,某一省份的产业结构调整包含着资本、劳动力等要素在不同产业间的流动,对周围省份具有借鉴效应,产生粮食生产用水效率的空间溢出。在劳动力流动方面,本地区农村劳动力除了向同地区城镇迁移之外,还会进行跨区域转移,可能由于劳动力市场竞争阻碍邻近地区农村剩余劳动力的释放,从而对邻近地区粮食生产效率和资源利用率产生负向影响。综上所述,本地区粮食生产用水效率的影响因素可通过技术溢出、要素流动、生产集聚和价格传导4条路径产生外溢作用,引起粮食生产用水效率的空间关联和溢出。

## 六、结论与启示

本研究将粮食生产水足迹作为水资源投入,采用超效率SBM模型对2001—2019年31省份的全

要素粮食生产用水效率进行测算和评价,在此基础上,利用空间杜宾模型进一步分析粮食生产用水效率的影响因素及其空间溢出效应。主要研究结论如下:

(1)粮食生产用水量存在明显的地区和作物品种差异。在地区层面,2001—2019年全国粮食生产水足迹增长4.5%,增幅的主要来源为中部地区,西部次之,东部地区粮食生产水足迹呈明显下降趋势。在作物层面,三大主粮作物生产水足迹均呈上升态势,加大了地区粮食生产用水压力。

(2)2001—2019年全国粮食生产用水效率表现为先降后升再平稳波动的特征。三大区域划分下,东、西、中部粮食生产用水效率呈逐级降低的分布格局,节水潜力较大的中部地区是造成全国粮食生产用水效率提升缓慢的主要原因。六大区域划分下,粮食生产用水效率由高至低排名依次为:西南地区、南部沿海、长江流域、东北地区、黄河流域和西北地区。此外,省域粮食生产水资源利用水平在空间上趋于两极分化,呈现出向“高耗水—低效率”和“低耗水—高效率”水平跃迁的态势。

(3)从影响因素的直接效应来看,节水技术、水土资源匹配、互补要素价格、供水结构、城镇化水平和产业结构在区域间的异质性,是造成粮食生产用水效率空间分布差异的主要原因。具体表现为:节水技术研发和推广力度较大,水土资源匹配度较优,化肥价格相对较高,以地表水代替地下水源供给以及工业化和城镇化进程较快的地区,具有较高的粮食生产用水效率。

(4)从影响因素的溢出效应来看,水土资源匹配、水资源开发指数和化肥价格对邻近地区粮食生产用水效率具有显著的正向溢出作用,产业结构和城镇化率的溢出效应为负。就溢出机制而言,本地区粮食生产用水效率的影响因素可通过区域间技术溢出、要素流动、生产集聚和价格传导4条路径引致粮食生产用水效率的空间相互关联和溢出。

上述结论的政策启示如下:第一,强化水资源最大刚性约束作用,提高农业整体用水效率。本文测算发现,中西部粮食生产水足迹增幅较大,但用水效率却低于东部地区。因此,应当重视中西部地区农业水资源投入冗余问题,加强水资源管理,优化粮食生产的要素投入结构,深入挖掘用水效率的提升潜力。第二,把握粮食生产用水效率的空间差异,加快制定结合区位条件的适水农业发展策略。本文研究发现,节水技术水平、要素禀赋、供水结构和经济发展水平的区域异质性会导致粮食生产用水效率的差异。因此,应当综合考虑区域粮食生产的比较优势和比较劣势,开展针对性的节水技术扶持和水资源利用配套管理,促进粮食生产和水资源利用的可持续发展。第三,充分发挥粮食生产用水效率的区域互馈效应,完善区域合作机制。本文研究显示,省际粮食生产用水效率存在空间溢出效应,因此,应当深化区域协同发展战略,通过适当发展跨省、跨流域水利工程,搭建节水农业示范平台,促进要素流动和技术扩散,优化资源配置,加快低效率地区向高效率地区的追赶,推动粮食生产用水效率的协同提升。

## 参 考 文 献

- [1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014(8): 880-885.
- [2] 米娜, 蔡福, 张玉书, 等. 雨养作物产量差研究进展[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 140-147.
- [3] 张雄化, 钟若愚. 灌溉水资源效率、空间溢出与影响因素[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2015, 14(4): 20-28.
- [4] KOOP R. The measurement of productive efficiency: a reconsideration[J]. Quarterly journal of economics, 1981, 96: 477-503.
- [5] 雷波, 刘钰, 许迪, 等. 农业水资源利用效用评价研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 732-738.
- [6] 常明, 王西琴, 贾宝珍. 中国粮食作物灌溉用水效率时空特征及驱动因素——以稻谷、小麦、玉米为例[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 2032-2042.
- [7] 刘聪. 中国粮食生产的水资源利用特征评价[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2017(4): 22-29.



- [8] LOVARELLI D, BACENETTI J, FIALA M. Water footprint of crop productions: a review[J]. Science of the total environment, 2016, 548-549: 236-251.
- [9] 李贵芳, 周丁扬, 石敏俊. 西北干旱区作物灌溉技术效率及影响因素[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 853-866.
- [10] 宋春晓, 马恒运, 黄季焜, 等. 气候变化和农户适应性对小麦灌溉效率影响——基于中东部5省小麦主产区的实证研究[J]. 农业技术经济, 2014(2): 4-16.
- [11] 于伟咏, 漆雁斌, 韦锋, 等. 水旱轮作模式和灌溉方式对西南地区水稻灌溉用水效率的影响[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1127-1136.
- [12] 耿献辉, 张晓恒, 宋玉兰. 农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 934-943.
- [13] 黄昌硕, 耿雷华, 陈晓燕. 农业用水效率影响因素及机理分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 82-85.
- [14] 赵姜, 孟鹤, 龚晶. 京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(3): 76-84.
- [15] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 中国农业全要素用水效率及其影响因素分析[J]. 经济问题, 2014(6): 101-106.
- [16] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 农业用水效率与技术进步: 基于中国农业面板数据的实证研究[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1765-1772.
- [17] 李玲, 周玉玺. 基于DEA-Malmquist模型的中国粮食生产用水效率研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 192-199.
- [18] 杨骞, 武荣伟, 王弘儒. 中国农业用水效率的分布格局与空间交互影响: 1998—2013年[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(2): 72-88.
- [19] 赵敏, 刘珊. 基于双前沿面SBM-DEA模型的农业用水效率评价[J]. 水利经济, 2020, 38(1): 54-60.
- [20] 常明, 陈思博, 马冰然, 等. 粮食水资源利用效率及影响因素分析: 基于中国省际面板数据的实证研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 145-151.
- [21] 王昕, 陆迁. 中国农业水资源利用效率区域差异及趋同性检验实证分析[J]. 软科学, 2014, 28(11): 133-137.
- [22] 刘华军, 乔列成, 孙淑惠. 黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 57-68.
- [23] 周迪, 周丰年. 中国水资源利用效率俱乐部趋同的检验、测度及解释: 2003—2015年[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1103-1115.
- [24] 马剑锋, 王慧敏, 佟金萍. 技术进步与效率追赶对农业用水效率的空间效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(7): 36-45.
- [25] 马剑锋, 佟金萍, 王慧敏, 等. 长江经济带农业用水全局技术效率的空间效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2757-2765.
- [26] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 85-90.
- [27] 韩颖, 张珊. 中国省际农业用水效率影响因素分析——基于静态与动态空间面板模型[J]. 生态经济, 2020, 36(3): 124-131.
- [28] 鲍超, 陈小杰, 梁广林. 基于空间计量模型的河南省用水效率影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1138-1148.
- [29] 黎红梅, 陈惠敏. 中国粮食技术效率与灌溉用水效率交互影响——基于省区面板数据的SFA-SEM分析[J]. 系统工程, 2013, 31(5): 117-122.
- [30] 李普峰, 李同昇, 满明俊, 等. 农业技术扩散的时间过程及空间特征分析——以陕西省苹果种植技术为例[J]. 经济地理, 2010, 30(4): 647-651.
- [31] 曲富国, 孙宇飞. 基于政府间博弈的流域生态补偿机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 83-88.
- [32] 侯孟阳, 姚顺波. 中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2475-2486.
- [33] 王学渊, 赵连阁. 中国农业用水效率及影响因素——基于1997—2006年省区面板数据的SFA分析[J]. 农业经济问题, 2008(3): 10-18.
- [34] HOEKSTRA A. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[C]// Value of Water Research Report Series No.12, December 12—13, 2002, Delft, The Netherlands. The Netherlands, UNESCO-IHE: 2003.
- [35] 吴兆丹, 王张琪, UPMANU L. 生产视角下的中国水足迹空间差异研究——基于经济区域分析层次[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 2039-2050.
- [36] 徐长春, 黄晶, RIDOUTT B, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. 自然资源学报, 2013(5): 873-880.
- [37] HOEKSTRA A, CHAPAGAIN A, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Routledge, 2011.
- [38] 田园宏, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978—2010[J]. 中国人口·资源与环境, 2013(6): 122-128.
- [39] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014(11): 1826-1835.
- [40] HU J, WANG S, YEH F. Total-factor water efficiency of regions in China[J]. Resources policy, 2006, 31(4): 217-230.
- [41] 王若梅, 马海良, 王锦. 基于水—土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素——以长江经济带为例[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1450-1461.

- [42] CAO X, HUANG X, HUANG H, et al. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: a study of Jiangsu province, China[J]. *Ecological indicators*, 2018, 95: 444-454.
- [43] 王晓东, 马晓群, 许莹, 等. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 665-672.
- [44] 刘钰, PEREIRA L. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 26-30.
- [45] 李彩霞, 陈晓飞, 韩国松, 等. 沈阳地区作物需水量的预测研究[J]. *中国农村水利水电*, 2007(5): 61-64, 67.

## The Influencing Factors and Spatial Spillover Effects of Water Use Efficiency of Grain Production in China

XU Yiting, MU Yueying, ZHANG Zhexi

**Abstract** Water use efficiency of grain production reflects the relative changes in water use and grain output of agricultural production and is related to long-term food security as well as sustainable agricultural development. This study takes the water footprint of grain production as an indicator of water resources input, adopts the super-efficiency SBM model to scientifically measure the water use efficiency of China's total factor grain production, and on this basis, uses the Spatial Durbin model to analyze the influencing factors and spatial spillover effects of water efficiency. The results of the study show that: ① The water footprint of 31 provinces' grain production increased by an average of 4.5% from 2001 to 2019, of which the water footprint of corn and rice showed an upward trend, and the increase was mainly seen in the central region. ② The water use efficiency of regional grain production is highest in the east followed successively by the west and the middle area. The water use efficiency in the southwest region and the southern coast is higher, while in the northwest region and the Yellow River Basin is lower. Water utilization at the provincial level is spatially divided into two levels: "high water consumption with low efficiency" and "low water consumption with high efficiency". ③ Water-saving technology, water-land matching, urbanization level and fertilizer price have significant positive impact on the water use efficiency of grain production, while the impact of water resources supply structure as well as industrial structure is significantly negative. The regional heterogeneity of these factors is the main reason for the difference in the spatial distribution of water use efficiency. ④ Water efficiency of grain production can be spatially correlated and spilled through technology spillover, factor flow, production agglomeration and price transmission. Based on this, it is proposed to explore the potential of water efficiency improvement, use regional mutual feedback effect, and realize the coordinated improvement of water use efficiency in grain production.

**Key words** agricultural water use efficiency; water footprint; spillover effect; super efficiency SBM model; Spatial Durbin model

(责任编辑:余婷婷)