

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.011

# 资源与环境双重约束下的粮食生产用水效率研究

李静, 孙有珍

(合肥工业大学经济学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 基于1999—2013年省际面板数据, 利用Meta-frontier和SBM-Undesirable模型研究了资源与环境约束下的粮食生产用水效率, 进一步运用随机效应的Tobit模型对粮食生产用水效率的影响因素进行分析。结果表明, 受制于不同地区粮食生产的技术“鸿沟”, 我国东中西部地区以及粮食主产区与非粮食主产区粮食生产用水效率存在较大差异; 农业机械化程度、技术因素、人均粮食产量以及农民人均纯收入对粮食生产有显著影响; 灌溉费的影响不显著, 机械化程度逆向显著, 说明节水灌溉设备并没有得到广泛使用, 灌溉费及农业水价的制定不合理, 没有起到促进粮食生产用水效率提高的作用。

**关键词:** 粮食生产用水效率; 农业水污染; 水资源约束; 技术落差比

中图分类号: F323.213

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2015)06-0067-09

## Study on efficiency of agriculture water utilization under dual constraints of resource and environment

LI Jing, SUN Youzhen

(School of Economics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Based on the provincial panel data during 1999—2013, the agriculture water utilization efficiency under the constraints of resource and environment is studied using SBM-Undesirable and Meta-frontier model, and the influence factors of grain production water use efficiency is analyzed with random effect Tobit model. The results indicate that cause by the gap of grain production technology among different regions, there is big difference in the efficiency of grain production between the East and the West of China. The agricultural mechanization level, technical factor, per capita grain output and farmers' per capita net income all have influence on grain production. The influence of irrigation fee is not significant and the level of mechanization is rather significant, which means that water saving irrigation equipment has not been widely used, and irrigation and agricultural water price is not reasonable, in which case they do not play a role in promoting the efficiency of grain production.

**Key words:** efficiency of agriculture water utilization; agricultural water pollution; water resources constraint; technology gap ratio

从“十二五”规划提出构建节水型社会以来, 提高水资源利用效率便成为研究热点, 其中关于农业用水效率的研究最多。一方面, 随着我国经济的快速发展, 工业用水和生活用水占总用水量的份额均不断上升, 从1999—2013年, 工业用水和生活用水占总用水量平均每年增长分别约为1.7%和2.1%。

农业用水份额虽有所下降, 但从1999—2013年平均占63.6%来看, 农业仍然是主要用水大户。另一方面, 我国人口仍然在缓慢增长, 并且人口高峰期预测在2033年到来, 届时14.73亿的人口需要粮食为6.63亿~6.92亿t<sup>[1]</sup>, 因而在有限的耕地面积和水资源条件下, 必须提高农业用水效率。在水资源约

基金项目: 国家自然科学基金项目(71473068)

作者简介: 李静(1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源环境经济与区域发展研究。E-mail: lyb@hfut.edu.cn

束下,农业水污染问题一直未被重视,导致农业水污染成为制约提高农业用水效率的一个重要问题。根据第一次全国污染源普查,农业 TN 和 TP 排放量分别为 270.46 万 t 和 28.47 万 t,分别占 TN、TP 总排量的 57.2% 和 67.4%,表明农业已成为整个 TN 和 TP 排放的主要来源。而 2012 年颁发的《关于实行最严格水资源管理制度意见》提出,到 2030 年农田灌溉水有效利用系数提高到 0.6 以上,确立水功能区限制纳污红线,到 2030 年主要污染物入河湖总量控制在水功能区纳污能力范围之内,水功能区水质达标率提高到 95% 以上。由此可见,在资源与环境双重约束下,提高农业用水效率,增强群众节水意识,已是势在必行。

由于水是人类生产、生活必不可少的有限自然资源,人类可用水量的稀缺自然引起各国学者广泛关注。美国学者 Postel<sup>[2]</sup> 就认为世界各地有很多迹象表明人类用水已经超过可持续发展水平。斯里兰卡学者 Rijsberman<sup>[3]</sup> 提出人口稠密的干旱地区水资源更稀缺,比如亚洲中部和西部、北非人均年可用水量预计少于 1 000 m<sup>3</sup>。国内学者甘泓等<sup>[4]</sup> 对我国缺水最为严重的海河流域进行了年度用水量考核估计,发现截至 2010 年该流域平均年缺水约 80 亿 m<sup>3</sup>。

农业是整个国民经济发展的基础行业,农业用水占据着社会用水量的最大份额,有许多学者更关注农业用水量。刘渝等<sup>[5]</sup> 提出中国农业用水与经济增长的 Kuznets 假说,发现目前中国正处于库兹涅茨曲线右半段,但农业用水量下降的速度较为缓慢,表明在促进经济增长的同时,要注重管理和技术等手段来发展节水农业。李保国等<sup>[6]</sup> 构建了基于“绿水”、“蓝水”的中国农业用水的新综合分析框架,根据广义农业水资源量的分析计算,认为主要粮食作物(水稻、小麦、玉米和大豆)用水安全红线应该划定在每年 7 800 亿 m<sup>3</sup> 左右。

在对用水量及农业用水量有了一定研究之后,国内外学者针对水资源不足问题将研究重心放在水资源利用效率上,并运用不同方法对此进行分析。Allan<sup>[7]</sup> 指出提高水资源利用效率是解决水资源不足问题的有效途径。Hu 等<sup>[8]</sup> 在全要素框架下运用 DEA 方法分析生活和生产用水效率;国内学者基于投入导向的 DEA<sup>[9]</sup>、投影寻踪及遗传算法<sup>[10]</sup>、投入距离函数的 SFA<sup>[11]</sup> 分析我国水资源利用效率。

而研究最多、最深的还是农业用水效率问题,许多学者运用不同方法测算农业用水效率,如:Kaneko 等<sup>[12-14]</sup> 采用 SFA 方法,Dhehibi 等<sup>[15-16]</sup> 使用的超越对数 SFA 方法,Speelman 等<sup>[17-18]</sup> 运用 DEA 方法等测算农业用水效率值。在此基础上学者们进一步分

析了农业用水效率的影响因素,如灌溉用水量、农场规模、农作物选择、农田水利设施、农村人均 GDP、农业水价、农业灌溉面积、人均灌溉面积等。Dhehibi 等<sup>[15]</sup> 的研究结果表明,灌溉用水量对农业灌溉用水效率影响最大;Speelman 等<sup>[17]</sup> 认为农场规模、土地所有权、灌溉方案的类型、作物选择都对灌溉用水效率有积极影响;国内学者王晓娟等<sup>[16]</sup> 认为灌溉用水效率方面,水价的影响最大;王学渊等<sup>[13]</sup> 认为减少水密集型作物的种植将有利于降低用水量和提高农业用水效率;孙才志等<sup>[19]</sup> 通过计算规模冗余率和技术冗余率,得出人均 GDP、人均水资源量、第三产业比重与用水效率有显著关系的结论。

从最初宽泛的用水量研究到如今细致深入的农业用水效率研究,始终极少涉及粮食生产用水效率研究,虽然在节约水资源、提高用水效率方面取得了很大的进步,但仍忽视提高农业用水效率同时给环境带来压力,造成大量农业水污染的环境问题。一直以来,许多学者在研究工业用水效率方面基本考虑了工业水污染问题,而对农业用水效率问题却鲜有重视农业水污染。虽然也有文献将化肥、农药作为投入要素来计算农业用水效率<sup>[20]</sup>,但没有考虑化肥、农药作为污染源所带来的污染产出。实际上,化肥、农业固体废弃物、畜禽的粪便均是农业水污染的主要来源,也成为制约提高粮食生产用水效率的因素。针对以往研究的成果与不足,笔者基于 1999—2013 年全国 31 省市面板数据,采用 Meta-frontier 生产函数和 SBM-Undesirable 模型相结合的分析框架,在资源与环境双重约束下,测算粮食生产用水效率及其变化趋势,重点考虑农业水污染并将其引入到所研究的模型中,探索农业水污染和粮食生产用水效率的关系,以期引起相关部门对农业水污染的重视,为有关部门制定长期粮食生产用水政策提供依据。

## 1 研究方法 with 数据处理

### 1.1 SBM-Undesirable 模型

DEA 研究技术效率可分为 3 阶段。第 1 阶段:传统的 DEA-CCR 模型和 DEA-BCC 模型研究阶段。该阶段研究技术效率时均没有考虑期望产出与非期望产出之分。第 2 阶段:主要是对传统 DEA 模型中非期望产出问题提出 3 种解决办法<sup>[21]</sup>:①将非期望产出作为传统 DEA 模型的投入变量,称为投入产出转置法;②将非期望产出转化为期望产出,称为正向属性转换法;③将非期望产出与期望产出同等对待,即增加期望产出的比例与减少非期望产出的比例是一样的,称为方向性距离函数法。前 2 种办法可能

导致效率值偏移或无效率,第3种办法是目前运用最广的,但是没有考虑变量松弛性问题。第3阶段:在前2个阶段的基础上,Tone<sup>[22]</sup>构建了SBM模型,此模型有效解决了变量松弛性问题。

笔者试图综合上述问题并集中加以改进,采用SBM-Undesirable模型,兼顾水资源约束和农业污染,重新估计我国各省区粮食生产用水效率问题。2012年颁发的《关于实行最严格水资源管理制度意见》指出以往水资源利用方式比较粗放,农田灌溉水有效利用系数仅为0.5,与世界先进水平0.7~0.8有较大差距,并提出到2030年农田灌溉水有效利用系数提高到0.6以上,不仅如此,根据《中国统计年鉴》,我国总用水量越来越接近总供水量,粮食生产用水也是如此,因此有必要对上述SBM模型中投入变量粮食生产用水( $x^w$ )进行约束,以增强研究结果的可靠性。不妨将粮食生产实际用水量乘以0.6作为 $x^w$ 的下界( $W_L$ ),将粮食生产供水量作为其上界( $W_U$ )。有约束的SBM模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i_0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r_0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r_0}^b} \right)} \\ \text{s. t. } x_0 = X\phi + s^- \\ y_0^g = Y^g\phi - s^g \\ y_0^b = Y^b\phi + s^b \\ W_L \leq x^w \leq W_U \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \phi \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, $m$ 为投入种数; $s_1$ 为期望产出种数; $s_2$ 为非期望产出种数; $x_{i_0}$ 为第 $i$ 种投入的数量; $s_i^-$ 为第 $i$ 种投入的松弛量; $y_{r_0}^g$ 为第 $r$ 种期望产出的数量; $s_r^g$ 为第 $r$ 种期望产出松弛量; $y_{r_0}^b$ 为第 $r$ 种非期望产出的数量; $s_r^b$ 为第 $r$ 种非期望产出的松弛量; $x, y^g, y^b$ 分别为实际投入向量、实际期望产出向量、实际非期望产出向量; $X, Y^g, Y^b$ 分别为最优投入向量、最优期望产出向量、最优非期望产出向量; $s^-, s^g, s^b$ 分别为投入松弛变量、期望产出松弛变量、非期望产出松弛变量; $W_L$ 为粮食生产用水下界; $W_U$ 为粮食生产用水上界; $\phi$ 为权重向量; $\rho^*$ 为决策单元DMU的效率值, $0 \leq \rho^* \leq 1$ ,严格递减,且当 $\rho^* = 1$ 时,DMU才有效,当 $\rho^* < 1$ 时,DMU无效。

## 1.2 共同前沿(Meta-frontier)模型

用传统DEA方法测度不同省区的粮食生产用水效率时,其潜在假设是决策单元(DMU)具有相同或类似的技术水平。然而,我国各省市的水资源禀

赋、劳动力人数、农业发达程度以及经济发展状况等方面都存在显著差别,如果不考虑这些因素,贸然采用总体样本数据进行粮食生产用水效率的测算,将无法准确衡量各省市真实的粮食生产用水效率。对这一问题,Battese等<sup>[23]</sup>提出了共同前沿生产函数分析框架,即根据某一特定标准将DMU划分为不同群组,利用SFA方法构建出所有DMU的共同前沿和分组后的DMU的群组前沿,并测算出不同DMU的共同前沿和群组前沿的技术效率,最后比较两者的技术效率差异。然而,这一研究是建立在所有DMU均可能达到相同技术水平这一假设的基础之上的,忽略了它可能导致共同前沿无法包络群组前沿的问题<sup>[24]</sup>。因此,Battese等<sup>[25]</sup>按照原来的思路,用DEA方法测算共同前沿技术效率,解决了上述问题。

### 1.2.1 群组划分及模型建立

由于共同前沿和群组前沿的主要区别在于所涵盖的技术组合不同,故将全国31省市按农业发展情况分为粮食主产区与非粮食主产区两大群组。因为这两大群组的农业发展状况、劳动力人数、技术水平以及经济发展水平等都存在显著差别,因此,按是否为粮食主产区来划分对研究粮食生产用水效率是有必要的。然后再将全国31省市按经济发展水平分为东、中、西部3大群组,研究不同经济发展水平下的粮食用水效率变化。

根据Battese等<sup>[25]</sup>的Meta-frontier模型,沿用SBM模型定义的变量,考虑非期望产出的共同技术集合(Meta-technology Set)为

$$T^m = \{ (x, y^g, y^b) \mid x \geq 0, y^g, y^b \geq 0; x_{\text{生产}}(y^g, y^b) \} \quad (2)$$

式中, $x_{\text{生产}}(y^g, y^b)$ 表示投入指标 $x$ 可产生期望产出 $y^g$ 和非期望产出 $y^b$ 。则相应的生产可能性集(也即共同前沿)表示为

$$p^m = \{ (y^g, y^b) \mid (x, y^g, y^b) \in T^m \} \quad (3)$$

因此,共同前沿下的共同距离函数可表示为

$$D^m(x, y^g, y^b) = \sup_{\lambda} \left\{ \lambda > 0 \mid \frac{x}{\lambda} \in p^m(y^g, y^b) \right\} \quad (4)$$

式中, $\lambda$ 为达到最优产出的情况下投入向量的最大收缩比例。同理,按上述2种标准划分得出群组技术集合以及相应的群组前沿,进而得出群组前沿下的群组距离函数,表达式为

$$D^i(x_i, y_i^g, y_i^b) = \sup_{\lambda} \left\{ \lambda > 0 \mid \frac{x_i}{\lambda} \in p^i(y_i^g, y_i^b) \right\} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

### 1.2.2 技术落差比

由于技术效率可采用基于投入导向的距离函数

表示,则共同前沿和群组前沿下的技术效率分别表示为

$$\begin{cases} T_E^m(x, y^g, y^b) = \frac{1}{D^m(x, y^g, y^b)} \\ T_E^i(x_i, y_i^g, y_i^b) = \frac{1}{D^i(x_i, y_i^g, y_i^b)} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

由于共同前沿总是包络群组前沿,即同一 DMU 在群组前沿下的技术效率必定大于或等于共同前沿下的技术效率,所以用二者之比(即技术效率落差比  $T_{GR}$ )来衡量不同前沿面下技术效率差异,表达式为

$$T_{GR}^i(x_i, y_i^g, y_i^b) = \frac{T_E^m(x, y^g, y^b)}{T_E^i(x_i, y_i^g, y_i^b)} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

若  $T_{GR}$  越靠近 1,表明群组技术效率与共同前沿技术效率差异越小;若  $T_{GR}$  越靠近 0,表明群组技术效率与共同前沿技术效率差异越大,从而分组的效果越明显。

### 1.3 数据来源及指标处理

#### 1.3.1 投入与产出变量的选取

因为本文主要研究粮食生产用水效率,而所选取的投入指标农业劳动力、第一产业资本存量估计值、农业用水量均是大农业口径下的统计数据,因此本文借鉴闵锐等<sup>[26]</sup>的做法,设置 2 个权重系数  $A = (\text{农业总产值}/\text{农林牧渔业总产值}) \times (\text{粮食播种面积}/\text{农作物播种总面积})$ 、 $B = \text{粮食播种面积}/\text{农作物播种总面积}$ ,使得粮食生产要素能从大农业投入总量中剥离出来,相关处理见表 1。

表 1 投入产出指标及其计算方法

指标	计算方法
投入指标	
粮食生产劳动力人数(万人)	农业劳动力人数×B
粮食生产资本存量估计值(亿元)	第一产业资本存量估计值×A
粮食生产用水量(万 t)	农业用水量×B
产出指标	
粮食总产量(万 t)	粮食总产量可直接获得
粮食生产过程造成的水污染 TN 排放量(万 t)	参照文献[27]计算农业污染物排放量的做法
粮食生产过程造成的水污染 TP 排放量(万 t)	参照文献[27]计算农业污染物排放量的做法

#### 1.3.2 数据来源

本文中农业劳动力人数、第一产业资本存量估计值来源于中国国家统计局年度地区数据(2000—2014 年),农业用水量、粮食总产量来源于《中国统计年鉴》(2000—2014 年)。在计算农业水污染 TN、TP 时涉及的指标来源于《中国农业统计年鉴》、《新中国六十年农业统计资料》,涉及的系数来源于《污染源普查农业源系数手册》和赖斯芸等<sup>[28]</sup>的文献。

## 2 粮食生产用水效率分析

### 2.1 粮食主产区与非粮食主产区的粮食生产用水效率

本文使用 SBM 模型和 Meta-frontier 相结合的框

架,得出基于共同前沿下的粮食生产用水效率和基于群组前沿下的粮食生产用水效率。结果分别见图 1 和图 2。

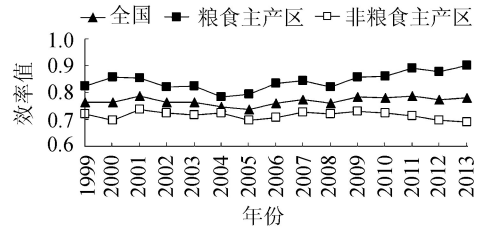


图 1 1999—2013 年共同前沿下粮食生产用水效率

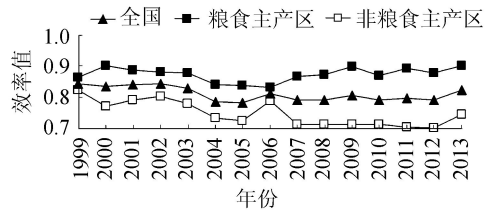


图 2 1999—2013 年群组前沿下粮食生产用水效率

对比图 1 和图 2,无论共同前沿还是群组前沿下,粮食主产区用水效率总是高于非粮食主产区,这主要是因为粮食主产区是事关国家粮食安全、部署粮食科技工作的重要地区,所以相关部门在粮食生产方面提供了先进的技术支撑和大量的政策扶持,而非粮食主产区虽然包括很多经济发达地区,但毕竟不是以粮食生产为主,所以用水效率大大低于粮食主产区就不足为奇了。

再分别看粮食主产区和非粮食主产区用水效率的时间趋势变化。由图 1 可知,从 1999—2013 年,粮食主产区用水效率呈波动性上升,2004 年最低,大约为 0.7846;非粮食主产区用水效率没有大的波动,但 2009 年以后却有逐年下降的趋势。再来看图 2,从 1999—2013 年,粮食主产区用水效率仍呈波动上升,2006 年最低,大约为 0.8319;非粮食主产区波动性较大,1999—2012 年粮食生产效率值一直都是波动性下降,2003 年有明显上升趋势。对比两图可以看出,粮食主产区与非粮食主产区的粮食生产用水效率仍有较大差异。

### 2.2 东、中、西部地区粮食生产用水效率

比较了粮食主产区与非主产区粮食生产用水效率趋势变化,再来比较按东、中、西部划分的粮食生产用水效率趋势变化(图 3 和图 4)。

由图 3 可知,中部和西部地区粮食生产用水效率在 1999—2007 年间互相交错,在 2008—2013 年间中部地区开始上升,而西部地区开始下降;总体上,虽然中、西部地区用水效率高于东部地区,但东部地区一直处于上升趋势,且在 2012 年超过西部地

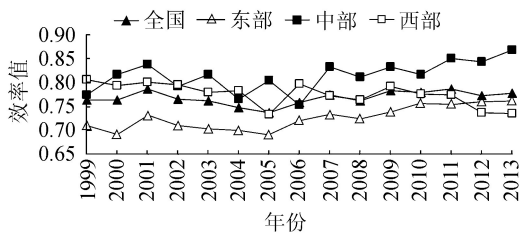


图3 1999—2013年东、中、西部共同前沿下粮食生产用水效率

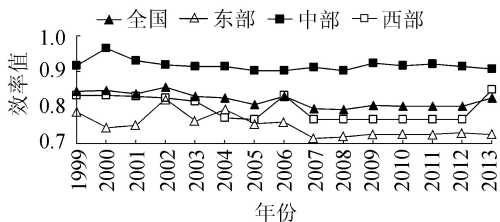


图4 1999—2013年东、中、西部群组前沿下粮食生产用水效率

区。再来看图4,在群组前沿下,中部地区粮食生产用水效率基本处于稳定状态且明显高于东、西部地区;东部和西部基本处于全国平均水平之下。综合图3和图4,可知中部地区粮食生产用水效率最高,这主要因为中部8省中有7省为粮食主产省,又由2.1节分析可知,粮食主产区用水效率明显高于非粮食主产区,从而得出中部地区用水效率最高;而西部地区用水效率次之。东部地区用水效率最低的情况,分析其原因,可能是因为东部地区是经济发达地区,主要以第二和第三产业为主,且东部地区相对于西部地区水资源较丰富,而西部地区虽在经济上落后于东部地区,但农业仍是其主要发展产业,所以西部地区粮食生产用水效率略高于东部地区。

### 2.3 技术落差比率

在得出共同前沿和群组前沿下粮食主产区、非粮食主产区以及东、中、西部地区的粮食生产用水效率后,通过技术落差比公式进一步得出粮食主产区和非粮食主产区技术落差比以及东、中、西部地区技术落差比的时间趋势变化。由于技术落差比反映了不同边界下的技术效率差异,粮食生产的技术效率差异主要体现在地理环境、政策支持和先进技术等方面。粮食主产区具有地域环境良好、政策支持的优势,而非粮食主产区在农业机械化等技术方面具有优势。图5为粮食主产区与非粮食主产区粮食生产用水效率的技术落差比时间趋势变化情况。

从图5可以看出,粮食主产区和非粮食主产区技术落差比均值总体上呈上升趋势,表明粮食生产用水效率总体上也呈上升趋势。其中,除个别年份外,粮食主产区的落差比均值要比非粮食主产区高,说明粮食主产区的地理环境、政策支持和技术环境

等方面要优于非粮食主产区,最靠近技术前沿面。非粮食主产区的技术落差比均值波动较大,且在2010年之后呈现下降趋势,说明不同前沿面对非粮食主产区的粮食生产用水效率影响较大。再来看图6,东部地区技术落差比总体上呈上升趋势,波动较大,中部地区技术落差比在2005年以前处于0.90左右,在2005年以后基本等于1,而西部地区在1999—2011年表现出波动上升,2011年之后呈现明显下降趋势。总体说来,东、西部地区的技术落差比相较于中部地区波动更明显,不同前沿面对东、西部地区的粮食生产用水效率影响更大,这也和前面得出的结论相符合。

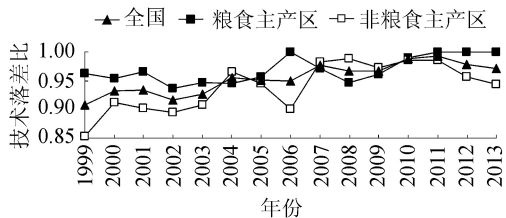


图5 1999—2013年粮食主产区与非粮食主产区技术落差比

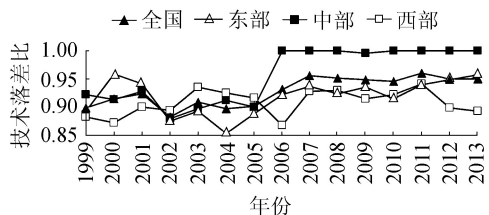


图6 1999—2013年东、中、西部地区技术落差比

### 2.4 粮食生产用水效率的空间比较

根据全国6大分区种植模式一览表,将全国各地分为北方高原地区、东北半湿润平原区、黄淮海半湿润平原区、南方山地丘陵区、南方湿润平原区和西北干旱半干旱地区。通过资料查询将全国31省市按地理位置分别对应到6大区域中,若某些省份位于两个或两个以上区域中,则将其归为面积分布最大的那个区域中,所以31省市对应的6大分区为:北方高原地区(山西、陕西、宁夏)、东北半湿润平原区(黑龙江、吉林、辽宁)、黄淮海半湿润平原区(河北、河南、山东、北京、天津)、南方山地丘陵区(江西、四川、湖南、浙江、福建、广东、广西、云南、贵州、重庆、海南)、南方湿润平原区(湖北、安徽、江苏、上海)、西北干旱半干旱地区(内蒙古、青海、新疆、甘肃、西藏)。图7即将群组前沿下各省市粮食生产用水效率值的高低通过颜色深浅表现在数据地图上。

首先从是否是粮食主产区来看,共同前沿和群组前沿下粮食主产区用水效率平均值分别为0.8422和0.8724,群组前沿下有5个地区(黑龙江、吉林、河

### 3 粮食生产用水效率的影响因素

#### 3.1 粮食生产用水效率的基本影响机制

粮食主产区与粮食非主产区粮食生产用水效率存在较大差异,引起这种差异的原因是多样的,可主要归纳为以下几种:①水资源禀赋。佟金萍等<sup>[30]</sup>认为水资源禀赋对农业用水效率有负面影响。笔者用人均水资源量来反应各地区水资源禀赋情况。②农村居民人均纯收入。农村居民人均纯收入越高,可能会有更多资本投入到粮食生产灌溉中,从而提高粮食生产的用水效率。③灌溉成本。一般来说,单位面积灌溉费越高,用水效率越高;但如果灌溉费制定不合理,如偏低,则也可能导致单位面积灌溉费对粮食生产用水效率产生反方向影响。④技术因素。这可能和各个地区经济发达程度有关,经济越发达的地区技术效率越高,对粮食生产的用水效率影响越显著。⑤农业发达程度。本文用农业机械化程度(单位播种面积的农业机械总动力)和人均粮食产出来表示一个地区的农业发达程度。预期一个地区农业越发达,粮食生产的用水效率越高。

为了验证以上因素是否对粮食生产用水效率有显著影响,将人均水资源量、人均粮食产出、农村居民人均纯收入、单位面积灌溉费、农业机械化程度和技术落差比作为解释变量,将粮食生产用水效率作为被解释变量。为了消除量纲和异方差影响,将各变量取对数(相关变量的描述性统计见表2),选用两端截尾的随机效应 Tobit 模型作计量检验。因为固定效应的 Tobit 模型在面板数据条件下被证明是有偏的,且由于本文效率值处于 0.6 到 1 之间,处理之后处于 60 到 100 之间,因此 Tobit 模型左端在 60 处截取,右端在 100 处截取。回归方程如下:

$$M = \alpha_0 + \alpha_1 \ln W + \alpha_2 \ln I + \alpha_3 \ln F + \alpha_4 T + \alpha_5 \ln O + \alpha_6 \ln D \quad (8)$$

$$G = \beta_0 + \beta_1 \ln W + \beta_2 \ln I + \beta_3 \ln F + \beta_4 \ln O + \beta_5 \ln D \quad (9)$$

式中, $\alpha_0, \beta_0$  均为常数; $\alpha_1 \sim \alpha_6, \beta_1 \sim \beta_6$  分别为共同前沿和群组前沿对应的解释变量的系数。

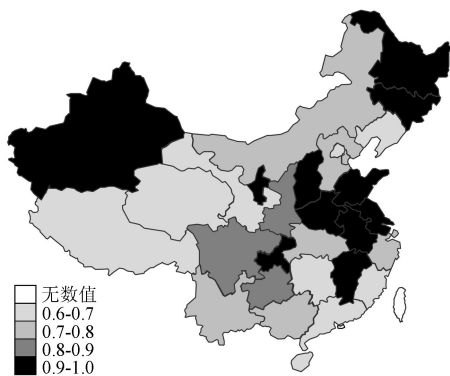


图7 1999—2013年粮食生产平均用水效率的区域差异

南、安徽、江苏)效率均值为1,效率均值最低的是湖南(0.6170);非粮食主产区用水效率平均值分别为0.7064和0.7624,群组前沿下有3个地区(宁夏、重庆、新疆)效率均值为1,效率值最低的是福建、广东、青海和西藏,效率均值都是0.6000。总体说来,群组前沿下的效率均值均大于共同前沿下的效率均值,且非粮食主产区效率值低,差距更大,这可能和这些地区的地理环境以及制定的相应政策有关。

再来看6大分区,首先比较粮食主产区。黄淮海半湿润平原区表现最好,群组前沿下效率均值为0.9190,最差的是西北干旱半干旱地区,群组前沿下效率均值为0.7227;再来比较非粮食主产区,群组前沿下北方高原地区效率均值最高,约为0.9539,剩下4个区域的效率均值都在0.7左右,而效率均值最低的区域是黄淮海半湿润平原区(约为0.6960)。这表明:①不同区域的种植模式和地理环境有较大差异,决定粮食作物种类选择差异大,如南方湿润平原区主要粮食作物为水稻和玉米,西北干旱半干旱地区主要粮食作物为小麦,而主要粮食作物水稻、玉米的用水效率要高于小麦的用水效率<sup>[29]</sup>,从而导致不同分区粮食生产用水效率差异也较大;②是否为粮食主产区对粮食生产用水效率影响很大,如黄淮海半湿润平原区在粮食主产区下表现最优,而在非粮食主产区下表现最差。从整个图7来看,效率值均大于等于0.6,这主要是因为对粮食生产实际用水量这一变量附加了约束条件,从而使得测算出的用水效率值较无约束时的高。

表2 影响因素描述性统计

变量	M	G	lnI	lnO	lnD	T	lnW	lnF
变量说明	共同前沿下 粮食生产 用水效率/%	群组前沿下 粮食生产 用水效率/%	农村居民 人均纯 收入/元	人均粮食 产量/kg	农业机 械化程 度/ (kW·hm <sup>-2</sup> )	技术 落差比/%	人均水 资源量/m <sup>3</sup>	单位面积 灌溉费/ (元·hm <sup>-2</sup> )
均值	76.80	81.16	7.90	5.76	0.60	95.2	7.16	0.15
标准差	18.22	19.04	0.39	0.64	0.04	11.4	1.56	0.06
最小值	60	60	7.25	3.68	0.47	60	1.72	-0.03
最大值	100	100	8.97	7.36	0.66	100	12.13	0.27

注:模型中样本容量为465个。

### 3.2 实证结果

不同前沿下的粮食生产用水效率影响因素的Tobit模型回归结果如表3。

大, $p$ 值均接近于0,表明模型的整体回归效果较好。Rho值均在0.6以上,表明个体效应变化主要解释了粮食生产用水效率的变化,面板数据模型优于混合数据模型。

从农村居民人均纯收入来看,其粮食生产用水效率呈正相关关系,表明农村居民人均纯收入越高,粮食生产用水效率也越高,其中共同前沿下和非粮食主产区群组下农村居民人均纯收入影响显著。

从农业发达程度来看,一个是人均粮食产量,3个模型下均表现为显著,且为正向关系;另一个是农业机械化程度,3个模型结果均显示农业机械化程度与粮食生产用水效率呈逆向显著关系。原因可能是由于目前农民节水灌溉意识还不是太高,节水灌溉设备在全国并没有得到广泛使用,因而大多数农民选用的灌溉设备仍然是诸如水泵之类的大功率、对节水要求不高甚至产生水资源浪费的灌溉设备,导致单位面积机械总动力越高时粮食生产用水效率越低的情况。总的来说,农业发达程度越高,对粮食生产用水效率的影响越显著。

从技术因素来看,技术落差比与粮食生产用水效率呈正向显著关系,与预期一致。一方面,表明一个地区农业经济越发达,应用于粮食生产的技术效率越高,使得粮食生产用水效率越高;另一方面,表明不同前沿面下同一决策单元技术效率差异较大,也就是说分组研究粮食生产用水效率是有必要的。

从人均水资源量来看,共同前沿下和主产区群组的人均水资源量与粮食生产用水效率呈正向关系,在粮食非主产区群组下呈负向关系。这与预期不符,在共同前沿和粮食主产区群组下这似乎与资源禀赋对资源利用效率存在逆向影响理论相悖<sup>[31]</sup>。于是分别在共同前沿和粮食主产区群组下,利用混合回归模型估计人均水资源量对粮食生产用水效率的变动效应。结果表明人均水资源量均与粮食生产用水效率呈逆向关系,且人均水资源量对共同前沿下粮食生产用水效率有显著影响。

从单位面积灌溉费来看,其与粮食生产用水效率呈正相关,但并不显著,表明灌溉费虽然能促进水

资源有效利用,但效果不明显。主要原因是目前国内农业灌溉费仍然较低,有的丰水地区甚至不收取灌溉费,有的地区政府虽设置了灌溉费,但是费用收取却是直接从政府给农民生产补贴中扣除,这会让农民误认为灌溉用水不需要钱,从而对节水灌溉意识薄弱,也就使得这种促进水资源有效利用的作用不显著。这说明了政府仍没有很好地向农户传达灌溉节水意识及相应收费政策,没有制定合理的用水价格制度,也就不能促进水资源的优化配置。

从表3中可知:共同前沿模型、粮食主产区群组模型和非粮食主产区群组模型的Wald检验值均较

## 4 结论与政策建议

笔者基于1999—2013年省际面板数据,利用Meta-frontier和SBM-Undesirable模型,研究了资源与环境双重约束下的粮食生产用水效率,并进一步利用Tobit模型对粮食生产用水效率影响因素进行了分析,得出以下结论。

a. 从时间趋势来看,共同前沿下粮食主产区粮食生产用水效率呈波动上升趋势,而非粮食主产区用水效率在1999—2008年间处于较稳定状态,但在2008年之后呈下降趋势;群组前沿下,无论是主产区还是非主产区,粮食生产用水效率都呈现较大波动,非主产区粮食生产用水效率在1999—2011年间呈波动下降趋势,而在2011年之后呈明显上升趋势。而就东、中、西部划分来看,共同前沿下东、中、西部粮食生产用水效率总体差距不大,3大地区效率值的大小关系不是很明显;群组前沿下中、西、东部粮食生产用水效率依次递减,且东西部与中部地区效率差距明显,这主要是因为中部地区基本为粮食主产区。另外,通过比较主产区与非主产区的技术落差比时间变化趋势,发现粮食主产区的技术效率更接近技术前沿面,而非粮食主产区的技术效率落差比波动趋势更大、更明显,说明不同前沿面的选择对非主产区的粮食用水效率影响较大。比较东、中、西部技术落差比,也得出相似结论,表明对决策单元进行群组划分是有必要的。

b. 从空间划分结果来看,①不同区域的种植模式和地理环境有较大差异,导致粮食生产用水效率

表3 Tobit模型回归结果

	lnI	lnO	lnD	T	lnW	lnF	常数	个体效应 标准差	随机干扰 项标准差	Rho值	Wald 检验值	P值
共同前沿	(1.87)*	(7.89)***	(-3.56)***	(11.25)***	0.78	0.86	(-3.41)***	(6.44)***	(23.18)***	0.82	181.63	0.0000
粮食主产区	1.16	(3.61)***	(-2.46)*	—	1.56	0.83	-1.5	(3.43)***	(12.23)***	0.94	20.38	0.0011
非粮食主产区	(2.13)**	(7.07)***	(-3.76)***	—	-1.34	0.56	(-1.67)*	(4.46)***	(17.42)***	0.61	85.49	0.0000

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%和10%水平下显著。

差异较大;②是否为粮食主产区对粮食生产用水效率影响很大。

c. 从影响因素来看,农业机械化程度的影响显著为负;农业单位面积灌溉费影响结果虽然为正,但均不显著,表明农业节水灌溉设备并没有得到广泛使用,节水灌溉政策并没有有效实施,加上农户节水意识较薄弱,导致农业机械化程度和单位面积灌溉费的影响结果没有达到预期效果。

笔者提出以下政策建议:政府部门应制定较为全面的粮食生产评估体系和农业水污染治理体系;地方政府应积极引进并推广节水灌溉设备和先进技术,并对购买和使用节水灌溉设备的农民给予补贴或奖励;制定或调整灌溉费用收取制度,根据地区实际经济情况,制定有效的农业灌溉水价,使其真正起到促进粮食生产用水效率的作用。

## 参考文献:

[ 1 ] 封志明. 中国未来人口发展的粮食安全与耕地保障 [J]. 人口研究, 2007, 31 ( 2 ): 15-29. ( FENG Zhiming. Future food security and arable land guarantee for population development in China [ J ]. Population Research, 2007, 31 ( 2 ): 15-29. ( in Chinese ) )

[ 2 ] POSTEL S L. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead [J]. Ecological Applications, 2000, 10 ( 4 ): 941-948.

[ 3 ] RIJSBERMAN F R. Water scarcity: fact or fiction? [J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/2/3): 5-22.

[ 4 ] 甘泓,游进军,张海涛. 年度用水总量考核评估技术方法探讨[J]. 中国水利, 2013 ( 17 ): 25-28. ( GAN Hong, YOU Jingjun, ZHANG Haitao. The technical approach of annual gross water usage evaluation [ J ]. China Water Resources, 2013 ( 17 ): 25-28. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 刘渝,杜江,张俊飏. 中国农业用水与经济增长的Kuznets 假说及验证[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 593-597. ( LIU Yu, DU Jiang, ZHANG Junbiao. Hypothesis and validation on the Kuznets Curve of agricultural water use and economic growth [ J ]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17 ( 4 ): 593-597. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 李保国,黄峰. 1998—2007 年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21 ( 4 ): 575-583. ( LI Baoguo, HUANG Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach [ J ]. Advances in Water Science, 2010, 21 ( 4 ): 575-583. ( in Chinese ) )

[ 7 ] ALLAN T. Productive efficiency and allocative efficiency: why better water management may not solve the problem [J]. Agricultural Water Management, 1999, 40(3): 71-75.

[ 8 ] HU Jinli, WANG Shichuan, YE Fangyu. Total-factor water

efficiency of regions in China [ J ]. Resources Policy, 2006, 31 ( 4 ): 217-230.

[ 9 ] 钱文婧,贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究 [ J ]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21 ( 2 ): 55-57. ( QIAN Wenjing, HE Canfei. China's regional difference of water resource use efficiency and influencing factors [ J ]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21 ( 2 ): 55-57. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用 [ J ]. 系统工程理论与实践, 2013, 33 ( 3 ): 776-784. ( GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. New model for water use efficiency evaluation of China and its application [ J ]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33 ( 3 ): 776-784. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 李跃. 基于 SFA 的我国区域水资源利用效率及影响因素分析 [ J ]. 水电能源科学, 2014, 32 ( 12 ): 40-42. ( LI Yue. Use efficiency of domestic water resources and influencing factors analysis based on stochastic frontier analysis [ J ]. Water Resources and Power, 2014, 32 ( 12 ): 40-42. ( in Chinese ) )

[ 12 ] KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T. Water efficiency of agricultural production in China: regional comparison from 1999 to 2002 [ J ]. International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology, 2004, 3 ( 3/4 ): 231-251.

[ 13 ] 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, 29 ( 3 ): 10-18. ( WANG Xueyuan, ZHAO Liange. Agricultural water efficiency and the causal factors: a stochastic frontier analysis is based on Chinese provincial panel data: 1997—2006 [ J ]. Issues in Agricultural Economy, 2008, 29 ( 3 ): 10-18. ( in Chinese ) )

[ 14 ] 许朗,黄莺. 农业灌溉用水效率及其影响因素分析: 基于安徽省蒙城县的实地调查 [ J ]. 资源科学, 2012, 34 ( 1 ): 105-113. ( XU Lang, HUANG Ying. Measurement of irrigation water efficiency and analysis of influential factors: an empirical study of Mengcheng County in Anhui Province [ J ]. Resources Science, 2012, 34 ( 1 ): 105-113. ( in Chinese ) )

[ 15 ] DHEHIBI B, LACHAAL L, ELLOURNI M, et al. Measuring irrigation water use efficiency using stochastic production frontier: an application on citrus producing farms in Tunisia [ J ]. African Journal of Agricultural and Resource Economics, 2007, 1 ( 2 ): 1-15.

[ 16 ] 王晓娟,李周. 灌溉用水效率及影响因素分析 [ J ]. 中国农村经济, 2005 ( 7 ): 11-18. ( WANG Xiaojuan, LI Zhou. Analysis on the efficiency of irrigation water and its influencing factors [ J ]. Chinese Rural Economy, 2005 ( 7 ): 11-18. ( in Chinese ) )

[ 17 ] SPEELMAN S, HAESE M D, BUYSSE J, et al. Technical

- efficiency of water use and its determinants, study at small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa [EB/OL]. [2015-06-22]. <http://www.doc88.com/p-254258076105.html>.
- [18] 孙才志,李红新. 辽宁省水资源利用相对效率的时空分异[J]. 资源科学, 2008, 30(10): 1442-1448. (SUN Caizhi, LI Hongxin. Spatio-temporal differences in relative efficiency of water resource utilization in Liaoning Province [J]. Resources Science, 2008, 30(10): 1442-1448. (in Chinese))
- [19] 孙才志,王妍,李红新. 辽宁省用水效率影响因素分析[J]. 水利经济, 2009, 27(2): 1-5. (SUN Caizhi, WANG Yan, LI Hongxin. Influencing factors of water utilization efficiency in Liaoning Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2009, 27(2): 1-5. (in Chinese))
- [20] 雷贵荣,胡震云,韩刚. 基于 SFA 的农业用水技术效率和节水潜力研究[J]. 水利经济, 2010, 28(1): 55-58. (LEI Guirong, HU Zhenyun, HAN Gang. Technical efficiency and water saving potential in agriculture water based on SFA [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(1): 55-58. (in Chinese))
- [21] 刘玉海,武鹏. 能源消耗、二氧化碳排放与 APEC 地区经济增长: 基于 SBM-Undesirable 和 Meta-frontier 模型的实证研究[J]. 经济评论, 2011(6): 109-120. (LIU Yuhai, WU Peng. Energy consumption, carbon dioxide emission and regional economic growth in the APEC economies [J]. Economic Review, 2011(6): 109-120. (in Chinese))
- [22] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 13(2): 498-509.
- [23] BATTESE G E, RAO D S P. Technology gap, efficiency and a stochastic metafrontier function [J]. International Journal of Business and Economics, 2002, 1(2): 87-93.
- [24] RAO D S P, O' DONNELL C J, BATTESE G E. Meta-frontier functions for the study of inter-regional productivity differences [D]. Queensland: Queensland University, 2003.
- [25] BATTESE G E, O' DONNELL C J, RAO D S P. A metafrontier frameworks production function for estimation of technical efficiency and technology gap for firms operating under different technology [J]. Journal of Productivity Analysis, 2004, 21(1): 91-103.
- [26] 闵锐,李谷成. 环境约束条件下的中国粮食全要素生产率增长与分解: 基于省域面板数据与序列 Malmquist-Luenberger 指数的观察[J]. 经济评论, 2012(5): 34-42. (MIN Rui, LI Gucheng. A study on growth and decomposition of China's grain TFP growth under environmental constrains: empirical analysis based on provincial panel data and sequential Malmquist-Luenberger index [J]. Economic Review, 2012(5): 34-42. (in Chinese))
- [27] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命: 1978—2008 年 [J]. 经济学, 2014, 13(2): 537-558. (LI Gucheng. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008 [J]. China Economic, 2014, 13(2): 537-558. (in Chinese))
- [28] 赖斯芸,杜鹏飞,陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1184-1187. (LAI Siyun, DU Pengfei, CHEN Jining. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(9): 1184-1187. (in Chinese))
- [29] 李静,马潇璨. 资源与环境约束下的产粮区粮食生产用水效率与影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(2): 252-258. (LI Jing, MA Xiaocan. Study on water utilization efficiency and its influencing factors of grain production under the constraints of resource and environment in grain-producing regions [J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(2): 252-258. (in Chinese))
- [30] 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. (TONG Jinping, MA Jianfeng, WANG Huimin, et al. Research on agricultural total-factor water use efficiency and its influencing factors in China [J]. Economic Issues, 2014(6): 101-106. (in Chinese))
- [31] 张力小,梁竞. 区域资源禀赋对资源利用效率影响研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1237-1247. (ZHANG Lixiao, LIANG Jing. Effect of the regional resource endowment on resource utilization efficiency [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1237-1247. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-08-15 编辑: 彭桃英)

+++++  
(上接第 56 页)

- [21] 余志堂,邓中彝,许蕴珩,等. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流四大家鱼产卵场的现状及工程对家鱼繁殖影响的评价[C]//葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988.
- [22] 常剑波,陈永柏,高勇,等. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策[C]//中国水利学会 2008 学术年会论文集. 北京: 中国水利学会, 2008.
- [23] 李建,夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 678-684. (LI Jian, XIA Ziqiang. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 678-684. (in Chinese))
- [24] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biol, 2010, 55: 147-170.

(收稿日期: 2015-08-09 编辑: 彭桃英)