中国生态农业学报 2018 年 9 月 第 26 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2018, 26(9): 1407−1414

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180365

刘维哲, 常明, 王西琴. 基于随机前沿的灌溉用水效率及影响因素研究——以陕西关中地区小麦为例[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1407−1414
LIU W Z, CHANG M, WANG X Q. Irrigation water efficiency based on stochastic production frontier and influencing factors: An empirical study of wheat in Guanzhong Region, Shaanxi[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1407−1414

基于随机前沿的灌溉用水效率及影响因素研究*

——以陕西关中地区小麦为例

刘维哲, 常 明, 王西琴**

(中国人民大学农业与农村发展学院 北京 100872)

摘 要: 农业部门是我国用水大户, 随着水资源短缺问题的日益严峻, 提高农业灌溉用水效率是实现农业可持续发展的重要途径。本文基于陕西关中地区小麦种植户实地调研数据, 选取 C-D 生产函数构建随机前沿模型(SFA)测算小麦种植中的生产技术效率与灌溉用水效率, 在此基础上选取农户个人特征、家庭特征、灌溉特征和耕地特征相关变量, 采用 Tobit 模型进行影响因素分析, 以识别限制和促进灌溉效率的关键因素。研究结果显示, 关中地区小麦生产技术效率较高, 为 0.7~1.0, 均值为 0.87。灌溉用水效率远低于生产技术效率, 为 0~0.5, 均值仅为 0.31, 存在较大的提升空间。对影响因素的研究发现, 农户教育水平、家庭经济水平、灌渠完好程度、用水紧缺程度和节水灌溉技术等对灌溉用水效率等有显著的正向影响, 农户非农就业、家庭非农收入比例为负向影响, 农户年龄、灌溉水价、经营规模和耕地块数与灌溉用水效率没有明显相关性。说明关中地区灌溉用水具有节水空间, 可通过维修灌渠、改进节水灌溉技术、适当提高水价等, 逐步提高灌溉用水效率。

关键词: 灌溉用水效率; 生产技术效率; 农户特征; 灌溉特征; 地块特征; 随机前沿; 关中地区

中图分类号: F303.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)09-1407-08

Irrigation water efficiency based on stochastic production frontier and influencing factors: An empirical study of wheat in Guanzhong Region, Shaanxi*

LIU Weizhe, CHANG Ming, WANG Xiqin**

(School of Agricultural Economics and Rural Development, China Renmin University, Beijing 100872, China)

Abstract: Water resources are scarce in China, with a per capita water resource of 2 300–2 500 m^3 which is only 1/4 of the world's average. Because of water shortages, there has been continuous conflict between various water consuming sectors. This has made it necessary to conduct studies on the efficiency of agricultural irrigation water for sustainable development. Although irrigation water efficiency has been studied in China, such research driven by micro-data is largely lacking for Northwest China. In this paper, a stochastic frontier analysis (SFA) model based on Cobb-Douglas production function was used to measure technical efficiency of wheat farmers and irrigation efficiency in Guanzhong Region, Shaanxi. Then the Tobit model was used to determine the influencing factors of irrigation efficiency. A total of 12 variables were selected, which reflected the personal, family, irrigation and cultivated

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111001)资助
** 通信作者: 王西琴, 主要研究方向为资源管理与环境经济。E-mail: wxiqin@ruc.edu.cn
刘维哲, 主要研究方向为资源管理与环境经济。E-mail: liuvzhe@126.com
收稿日期: 2018-04-10 接受日期: 2018-06-08
* This study was supported by the National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2018ZX07111001).
** Corresponding author, E-mail: wxiqin@ruc.edu.cn
Received Apr. 10, 2018; accepted Jun. 8, 2018

land characteristics of farmers in the region. The results showed that technical efficiency of wheat farmers in Guanzhong Region was relatively high, with a range of 0.7–1.0 and a mean of 0.87. Irrigation efficiency was 0–0.5 and the mean was 0.31, which was far below technological efficiency. Analysis of the influencing factors of irrigation efficiency showed that farmers' education level, family economic status, irrigation channel condition, water shortage degree and irrigation water-saving degree had significant positive impact on irrigation efficiency. Then off-farm employment and non-farm income had a negative impact on irrigation efficiency. Age of farmers, irrigation water price, planting scale and subdivision of cultivated land had no obvious correlation with irrigation efficiency. Thus the study not only revealed the current conditions of wheat irrigation efficiency in Guanzhong Region, but also put forward critical suggestions on agricultural water resources management through the study of the influencing factors. The study also provided a reference base for improving irrigation water efficiency in Guanzhong Region in Shaanxi Province.

Keywords: Irrigation water efficiency; Technical efficiency; Famer characteristics; Irrigation characteristics; Cultivated land characteristics; Stochastic frontier; Guanzhong Region

我国是水资源严重短缺的国家，人均水资源量约为 2 300~2 500 m^3，仅为世界人均水平的 1/4，略高于 1 700 m^3 的国际严重缺水警戒线，被联合国列为 13 个贫水国家之一。农业部门作为我国用水大户，用水占比达 60%以上。随着人口持续增长和生活水平改善，为了保障粮食安全，农业生产的规模和强度在过去几十年中迅速扩大[1]。近年来农业部门缺水量已达 300×10^8 m^3[2]。在此背景下，节水对于保障世界 22%人口的粮食安全具有重要意义，而当前我国灌溉水的有效利用率与水分利用率仍具有较大的提升空间[3]。因此，研究现状灌溉用水效率以及影响因素，对于未来灌溉用水效率的提高，具有十分重要的现实意义。灌溉用水从输送过程到生产过程，对水的利用均存在着有效利用问题[4]。工程学上较常用的概念为灌溉水利用系数，在 2006 年由水利部出版的《农村水利技术术语》中将灌溉水利用系数定义为农作物利用的净水量与渠首引进的总水量比值，实际上是对灌溉水在输送途中损失量的一种衡量。这个定义是在给定技术条件下，假设管理不变的一种物理测量值，忽略了农户个体管理能力差异对用水效率的影响[5]。Kopp[6]基于技术效率角度提出灌溉用水效率概念，定义为在其他要素投入和产出不变的情况下，可能达到的最小灌溉用水量同实际灌溉水量之比，实际是从生产端的角度衡量灌溉水的有效利用问题。本文研究的灌溉用水效率是指后者。目前针对这一问题的研究，主要从两个层面展开：一类从宏观角度分析区域灌溉用水效率差异。如对中国东北地区、黄河流域、长江流域、南部沿海、西南地区和西北地区灌溉用水效率的研究认为南部沿海地区农业灌溉用水效率最低[7]。佟金萍等[8]基于省份面板数据测算发现我国西部地区农业用水效率显著低于中部和东部地区。另一类基于微观层面的农户数据进行研究，Karagiannis 等[9]基于超越对数函数测算了希腊蔬菜种植中的灌溉用水效率。许朗等[10]运用随机前沿模型(SFA)测算了安徽小麦种植的灌溉用水效率，并对灌溉用水影响因素进行研究。于伟咏等[11]使用数据包络分析法(DEA)对西南地区水稻种植户灌溉用水效率进行研究，发现平原地区用水效率更高。目前基于微观层面数据对西北地区粮食生产的研究缺乏。本文在借鉴已有成果基础上，以陕西关中地区为例，基于 C-D 生产函数的随机前沿模型测算小麦种植户的灌溉用水效率，并进一步选取农户个人特征、家庭特征、灌溉特征、耕地特征 4 个层面因素，分析影响灌溉用水效率的因素，为提高农业灌溉用水效率提供科学依据。

1 研究方法与数据

1.1 研究方法

1.1.1 农户灌溉用水效率测定模型

目前常用的测算效率模型主要有数据包络模型(Data Envelopment Analysis, DEA)和随机前沿模型(Stochastic Frontier Analysis, SFA)。DEA 模型作为一种线性规划方法不需要对函数形式做出假设，可以避免函数设定偏差带来的问题。但是 DEA 模型缺点在于未考虑随机因素的影响，容易受异常点的影响[12]。而 SFA 模型将实际产出分为生产函数、随机因素和技术无效率项，由于农业生产受自然条件、灾害等不可控制因素的影响，随机因素对技术效率损失影响较大。因此使用 SFA 模型估计结果稳定性较好。此外，从适用条件来看，SFA 适合微观数据计算，DEA 更适合宏观数据效率估计[13]。本文根据 Reinhard 等[14]提出的两阶段法，采用微观农户调研数据，选取 SFA 模型对农户生产技术效率进行估计，在此基础上进一步计算灌溉用水效率。

随机前沿生产模型可表示为：

$$Y_i=f(X_{ij}, W_i, \beta)\exp(v_i-\mu_i) \quad (1)$$

式中：W_i 为第 i 个农户灌溉水投入量；X_{ij} 表示第 i 个

农户除灌溉水以外第 j 种要素的投入量; β 为待估计参数; $v_i \sim N(0, \sigma_v^2)$为服从独立正态分布的随机误差, 包括测量误差、自然灾害、气候变化等农业生产中不可控制因素; $u_i \sim N(0, \sigma_u^2)$为服从断尾分布的随机误差项, 表示第 i 个农户生产效率的损失值; v_i 与 μ_i 相互独立, 且均独立于其他投入变量。使用随机前沿模型时首先要设定农业生产函数 $f(X_{ij}, W_i, \beta)$的形式。尽管 Translog 函数具有更高的包容性, 但是大量交叉项的引入可能带来自由度不足以及多重共线性等统计问题[15]。因此本文选择经典的 C-D 生产函数作为 SFA 模型的生产函数表达式, 对 C-D 生产函数取对数后公式(1)可表示为:

$$\ln Y_i=\beta_0+\sum_j \beta_j \ln X_{ij}+\beta_W \ln W_i+v_i-\mu_i \quad (2)$$

公式(2)可以通过最大似然法(ML)对参数进行估计。此外, 定义方差参数 $\gamma=\sigma_u^2/(\sigma_u^2+\sigma_v^2)$, $0\leqslant\gamma\leqslant 1$, 当 γ 越趋于 1, 说明实际产出同最大产出之间的差距主要是由技术效率损失引起的, 模型设定合理; 如果 γ 趋近于 0, 则说明实际产出同最大产出之间的差距主要是来自于随机误差, 此时仅需要 OLS 估计即可。当技术效率损失 $\mu=0$ 时, 估计结果 $\hat{Y}_i$ 为农户可能实现的最大产出。农户生产实际产出 Y_i 同可能实现的最大产出 $\hat{Y}_i$ 之比即为农户生产效率(TE_i), 可以通过对误差项($v_i-\mu_i$)进行估计得到:

$$\mathrm{TE}_i = Y_i / \hat{Y}_i = Y_i / f(X_{ij}, W_i, \beta)\exp(v_i) = \exp(-u_i) \quad (3)$$

根据前文灌溉用水效率(TER_i)的定义, 其计算公式可以表示为:

$$\mathrm{TER}_i=\exp(-\mu_i/\beta_W) \quad (4)$$

1.1.2　Tobit 回归模型

以公式(4)的计算结果作为因变量, 进一步研究灌溉用水效率影响因素, 由于因变量灌溉用水效率值介于[0, 1]之间, 本文采用受限因变量(Tobit)模型进行最大似然估计。模型如下:

$$y=\delta_0+\sum_k \delta_{ik} Z_{ik}+\xi_i \quad (5)$$

式中: y 为被解释变量, δ_0 为常数项, δ_{ik} 为待估参数, ξ_i 为随机误差项, Z_{ik} 为可能的被解释变量。本文结合研究区和种植生产特点, 选取农户个人特征、家庭特征、灌溉特征以及地块特征 4 个方面的变量进行回归分析。

1.2　研究区与数据来源

本文以陕西关中地区为研究区域, 关中地区水利兴修历史悠久, 是陕西省重要的粮、棉、油、果、菜生产基地, 以陕西省 34%的水资源、52%的耕地面积, 生产了 62.6%的粮食。关中地区属大陆性季风气候, 年平均降雨量为 600 mm, 降雨多集中在 7、8 月份, 占全年降雨量 50%左右, 年蒸发量达 1 400~1 800 mm, 属于典型的半干旱地区。降水与灌溉的季节性差异, 使得水资源成为关中地区粮食产量的重要制约因素。本文选取关中地区主要粮食作物小麦进行灌溉用水效率研究, 采用 2015 年 8 月、9 月对关中地区 7 个灌区的实地调研数据。样本选择依据随机抽样原则, 在每个灌区选取 2 个乡镇, 每个乡镇选取 2 个村进行调研, 共计走访了 14 个乡镇, 28 个村。调研对象为当地灌区进行种植生产的农户, 通过一对一访谈的方式共收集问卷 240 份, 其中有效问卷 215 份。问卷内容主要分为两部分: 第一部分是农户基本信息, 包括被访者的年龄、教育水平、家庭非农劳动就业等情况; 第二部分是农户生产信息, 包括被访者家庭作物种植类型、规模、灌溉设施等, 以及详细的各要素投入产出情况。此外, 由于样本农户存在兼种情况, 进行处理后得到小麦种植户样本量为 143。

2　变量选取与统计

2.1　投入产出变量

本文以小麦单产为产出变量, 其他投入变量包括种子投入、化肥投入、机械投入、劳动投入、灌溉水投入以及其他投入。其中为控制种子质量对单产的影响, 本文对种子投入变量的处理参照相关文献, 以种子投入量乘单价得到的资金投入(元·hm^{-2})进行衡量; 化肥投入以实际投入数量(kg·hm^{-2})计算; 机械投入为每公顷均机械费用(元·hm^{-2}); 劳动投入为家庭自有劳动力和雇工投入工时之和(小时·hm^{-2}); 灌溉用水为单位面积生产周期内总灌溉量(m^3·hm^{-2}); 其他投入包括农膜、除草剂、农药等生产支出费用(元·hm^{-2})。表 1 给出了各投入产出变量的统计均值。

表 1　关中地区小麦生产投入产出变量均值统计
Table 1　Statistics of input and output variables of wheat production in Guanzhong Region

投入产出变量 Input and output variable	单位 Unit	均值 Mean value	标准差 Standard error
产出 Output	¥·hm^{-2}	26.22	6.22
种子 Seed	¥·hm^{-2}	4.40	1.86
化肥 Fertilizer	kg·hm^{-2}	3.89	1.50
机械 Machine	¥·hm^{-2}	7.92	3.70
劳动 Labor	h·hm^{-2}	2.19	0.51
灌溉水 Irrigation water	m^3·hm^{-2}	25.14	13.87
其他 Others	¥·hm^{-2}	5.64	1.54

2.2　影响因素变量

参考已有研究成果[5,8,10]并结合调研数据, 本文

对灌溉用水效率影响因素的研究选取农户个人特征、家庭特征、灌溉特征和地块特征 4 个部分作为自变量。其中，农户个人特征包括年龄、教育水平和非农就业。家庭特征方面选取了家庭务农劳动力总人数、家庭经济水平、非农收入占家庭总收入比例 3 个变量。灌溉特征包括灌溉水价、灌渠完好程度、用水紧缺程度、灌溉方式。地块特征选取了农户种植该作物的总规模，以及种植该作物耕地块数。回归模型中主要变量定义及统计见表 2。

表 2 灌溉用水效率影响因素变量定义与统计

Table 2 Definition and statistics of influential factors of irrigation efficiency

变量名称 Variable name	含义 Definition	均值 Mean value
年龄 Age	户主的年龄 Age of householder	54.07
受教育水平 Education level	1=文盲; 2=小学; 3=初中; 4=高中或中专; 5=大专及以上 1 = illiteracy; 2 = primary school; 3 = junior middle school; 4 = high school or technical secondary school; 5 = college or higher	2.97
非农就业 Off-farm employment	0=务农; 1=非务农 0 = farming; 1 = off-farming	0.17
务农劳动力人数 Number of farming labor	家庭中从事务农的劳动力人数 Number of farming labor of household	2.32
家庭经济水平 Economic level of household	1=较低; 2=中等偏下; 3=中等; 4=中等偏上; 5=较好 1 = low; 2 = below average; 3 = medium level; 4 = above average; 5 = high	2.72
非农收入比例 Proportion of non-farm income	非农收入占家庭总收入比重 Proportion of non-farm income to total household income	0.61
灌溉水价 Irrigation water price	现行农业水价 Current irrigation water price	0.29
灌渠完好程度 Irrigation channel condition	1=非常差; 2=较差; 3=一般; 4=较好; 5=非常好 1 = very bad; 2 = bad; 3 = average; 4 = good; 5 = excellent	3.81
用水紧缺程度 Degree of water shortage	1=非常充足; 2=比较充足; 3=一般; 4=比较紧缺; 5=严重紧缺 1 = very sufficient; 2 = sufficient; 3 = average; 4 = short; 5 = seriously short	1.88
灌溉方式 Irrigation method	0=传统灌溉; 1=节水灌溉 0 = traditional irrigation; 1 = water-saving irrigation	0.49
种植面积 Planting scale	农户该种作物种植面积 Wheat planting area of household	5.26
耕地块数 Subdivision of cultivated land	该作物耕地细分块数 Number of wheat cultivated land	2.02

3 结果与分析

3.1 灌溉用水效率

对随机前沿生产函数采用公式(2)进行计算，可以得到各生产要素的产出弹性(表 3)。由于不同灌区地形、土地质量等存在差异，本文在模型中控制了样本所在地的灌区虚拟变量。各生产要素中，化肥、机械、灌溉水和其他资金投入对小麦产出均有显著正向影响，表明增加以上各要素投入可以有效提升作物产出。种子投入未通过模型显著性检验，且产出弹性为负，与关中地区作为小麦重要种植区，长期以来不断进行小麦品种的培育与推广，种子投入已达到较好水平有关。劳动力投入未通过显著性检验，一方面农户往往会低估家庭自有劳动力投入以及其他非正式劳动投入；另一方面，受调研条件制约，样本量较少也可能导致回归结果不显著。估计结果中 γ 为 0.861，接近于 1，符合 SFA 模型适用条件，因此本文模型设定合理。

表 3 关中地区小麦生产中各要素产出弹性

Table 3 Output elasticity of variables in wheat production in Guanzhong Region

变量 Variable	系数 Coefficient	标准差 Standard error
种子 Seed	–0.052	0.045
化肥 Fertilizer	0.044*	0.047
机械 Machine	0.076*	0.041
劳动 Labor	0.055	0.067
灌溉水 Irrigation water	0.104***	0.035
其他资金 Others	0.266**	0.104
常数项 Constant	5.253***	0.542
灌区虚拟变量 Irrigation area variable	—	—
γ	0.861	

*、**、***分别表示在 10%、5%和 1%水平上显著。*, ** and *** mean significance at 10%, 5% and 1% levels, respectively.

使用两阶段法，在随机前沿估计结果基础上先对农户生产效率进行计算，进一步将农业生产效率值及参数估计结果代入公式(3)得到小麦的灌溉用水效率。样本生产技术效率及灌溉用水效率结果统计列入表 4。从结果可以看出，关中地区小麦生产技术效率均值为 0.87，最小值为 0.57，最大值为 0.96。根据生产技术效率定义，说明当前关中地区小麦实际产出仅为可能实现最大产出的 87%，因此在现有生产条件和要素投入基础上通过技术效率的提高，小麦产出的提升潜力为 23%。本文生产技术效率计算结果与新疆农业生产效率 0.85 基本相当[5]。关中地区小麦灌溉用水效率均值仅为 0.31，远低于农业生产技术效率，意味着关中地区小麦生产的节水潜力较大，通过技术提高和灌溉方式等的改进，在维持相同的小麦产量的前提下，最多可节省约 69%的灌溉用水。该计算结果与甘肃省灌溉用水效率 0.29 基本一致[16]，略低于全国平均灌溉用水效率 0.39[17]。

表 4　关中地区小麦生产技术效率和灌溉用水效率均值统计

Table 4　Mean values of farmers' technical efficiency and irrigation efficiency of wheat production in Guanzhong Region

效率类型 Type of efficiency	样本量 Observations	均值 Mean value	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	标准差 Standard error
生产技术效率 Technical efficiency	143	0.87	0.57	0.96	0.07
灌溉用水效率 Irrigation efficiency	143	0.31	0.01	0.68	0.15

图 1a 为农业生产技术效率计算结果的频数分布直方图，小麦的农业生产技术效率基本分布在 0.5 以上，没有农户位于技术效率为 1 的随机前沿。从分布情况来看，生产技术效率普遍集中分布在 0.70~0.95 区间内，有 84.61%分布在 0.80~0.95 区间内。说明目前关中地区小麦种植的生产技术效率普遍达到较高水平。从灌溉用水效率分布直方图(图 1b)可以看出，目前灌溉用水效率普遍较低，所有样本的灌溉用水效率均低于 0.70，相较于生产技术效率，灌溉用水效率集中分布在 0~0.5 区间段，该区间段占比为 91.67%。目前关中地区小麦灌溉用水效率仍有较大的提升空间。

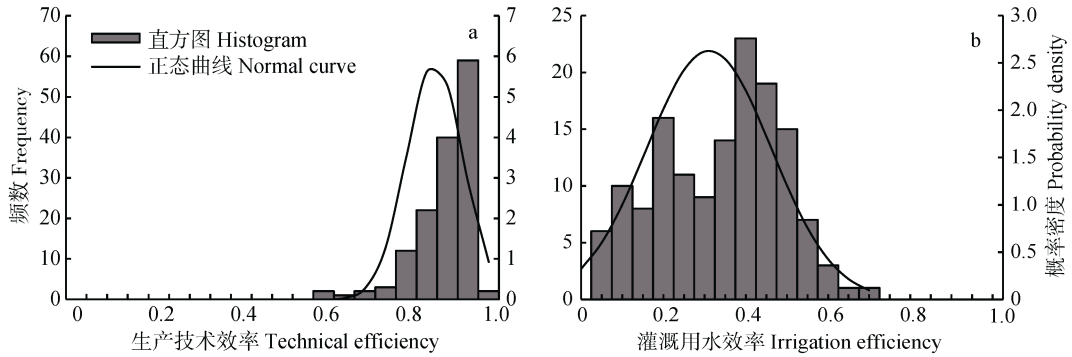

图 1　关中地区小麦种植户生产技术效率(a)和灌溉用水效率(b)频数分布图

Fig. 1　Frequency distribution histograms of farmers' technical efficiency (a) and irrigation efficiency (b) of wheat production in Guanzhong Region

3.2　灌溉用水效率影响因素

以小麦生产技术效率、灌溉用水效率计算结果分别为因变量进行 Tobit 回归，表 5 给出了影响因素的估计结果。生产技术效率回归模型中，受教育水平、务农劳动力人数、家庭经济水平和用水紧缺程度通过了显著性检验且影响方向为正，说明农户受

表 5　研究区小麦生产技术效率和灌溉用水效率影响因素回归结果

Table 5　Regression results of influential factors of farmers' technical efficiency and irrigation efficiency of wheat production in Guanzhong Region

类型 Type	变量 Variable	生产技术效率 Technical efficiency		灌溉用水效率 Irrigation efficiency	
		系数 Coefficient	标准误 Standard error	系数 Coefficient	标准误 Standard error
个人特征 Householder characteristic	年龄 Age	0.003	0.001	0.001	0.001
	受教育水平 Education level	0.025***	0.007	0.039**	0.016
	非农就业 Off-farm employment	−0.103***	0.018	−0.128***	0.042
家庭特征 Household characteristic	务农劳动力人数 Number of farming labor	0.008*	0.004	0.007	0.010
	家庭经济水平 Economic level of household	0.015**	0.007	0.037**	0.016
	非农收入比例 Proportion of non-farm income	−0.023	0.016	−0.098***	0.037
灌溉特征 Irrigation characteristic	灌溉水价 Irrigation water price	0.049	0.092	0.120	0.215
	灌渠完好程度 Irrigation channel condition	0.007	0.006	0.231*	0.014
	用水紧缺程度 Degree of water shortage	0.019***	0.006	0.033**	0.014
	灌溉方式 Irrigation method	0.017	0.014	0.061*	0.033
地块特征 Land characteristic	种植面积 Planting scale	−0.007*	0.001	−0.002	0.002
	耕地块数 Subdivision of cultivated land	−0.007	0.005	−0.014	0.012
	常数 Constant	0.873***	0.068	0.236	0.159
	样本量 Observations	143		143	

*、**、***分别表示在 10%、5%和 1%水平上显著。*, ** and *** mean significance at 10%, 5% and 1% levels, respectively.

教育水平越高、家庭务农劳动力人数越多、较好的家庭经济水平以及农户对水资源紧缺的认知，能有效促进生产技术效率的提高。户主非农就业和经营规模对小麦生产技术效率具有显著负向影响，年龄、非农收入比例、灌溉水价、灌溉方式、耕地块数未通过模型显著性检验。

灌溉用水效率影响因素的回归结果中，各变量影响方向均与生产技术效率模型相同，通过显著性检验的变量则略有差异。除受教育水平、非农就业、家庭经济水平和用水紧缺程度显著外，非农收入比例、灌渠完好程度及灌溉方式等 3 个变量仅对灌溉效率具有显著影响。务农劳动力人数和经营规模仅对生产技术效率有显著影响，务农劳动力人数、经营规模与灌溉用水效率未体现出显著相关性，年龄、灌溉水价、耕地块数在两个模型中均未通过显著性检验。下面对灌溉用水效率影响因素进行具体分析:

1)个人特征。与生产技术效率模型类似，个人特征除年龄变量外，户主受教育水平和非农就业均通过了显著性检验。户主年龄同种植经验呈正比，但随着年龄的增加其劳动能力开始下降，本文样本中种植小麦的农户平均年龄为 54.07，超出陈菲菲等[18]测算的技术效率最优点的 47 岁，两种效应可能相互抵消影响变量显著性。农户教育水平对灌溉用水效率有显著促进作用，教育水平越高的农户往往更容易接受新的技术。户主非农就业对灌溉用水效率有较强的负相关，户主是家庭生产的主要决策者和劳动者，当户主以非农就业为主时，其在种植生产中的劳动投入将部分由家庭中其他非主要劳动力替代，如配偶、子女等，其生产技术往往较低，导致灌溉用水低效率。

2)家庭特征。家庭务农劳动力人数与灌溉效率没有显著相关性，一般情况下劳动力投入数量越多对要素使用效率越高，但劳动力过多的家庭为了降低成本，会减少灌溉设施的投入，可能影响其显著性。家庭经济水平呈现显著正向影响，这意味着经济水平越高的农户，其在农业灌溉中越能表现出更高的效率，这是由于良好的家庭经济水平有更充足的资金进行灌溉设施维护和投资，有助于提高灌溉水使用效率。非农收入比例对灌溉用水效率的影响在 1%水平显著且作用方向为负，目前农户生产经营越来越趋于多样化，对于非农收入比例越高的家庭，农业往往在家庭生产经营中扮演辅助性角色，农业生产管理比较粗放，从而阻碍灌溉效率提高。

3)灌溉特征。水价变量在生产技术效率和灌溉效率模型中均未表现出相关性，一般来说水价上涨会提高农户用水成本，刺激农户减少不必要水资源浪费从而提高灌溉用水效率。但是相关研究表明，水价同用水量仅在一定价格区间内具有弹性关系[19]。在水价较低阶段提高水价对水量的需求变化影响不大，只有当水价上升到一定阈值后才表现出明显的相关关系[20]。目前关中地区灌溉水价介于 0.17~0.45 元·m^{-3}，仅为供水成本的 17%~39%。因此，过低的水价区间难以对农户用水效率起到刺激作用。灌渠完好程度、用水紧缺程度和灌溉方式均通过了模型显著性检验。良好的灌渠设施有利于减少水资源运输中的渗漏状况，无效损失的减少使水资源得到最大程度的利用，促进灌溉效率的提高。农户对用水紧缺程度的感知在 5%统计水平上显著且影响方向为正，这代表着当农户感知到用水紧缺状况时，其在灌溉中的节水意识会增强，这种节水意识在实践中转化为减少水资源浪费，提高了农户的用水效率。与陈大波等[21]研究结论相同，采用节水灌溉方式对灌溉效率提升具有显著正效应。关中地区通过政府补贴方式鼓励农户建设节水灌溉设施，至 2014 年关中地区节水灌溉面积占总耕地面积比例已达到 46%，节水灌溉的推广在保障农业生产的情况下有效减少了灌溉用水量，显著提高了农户灌溉用水效率。

4)耕地特征。经营规模在生产技术效率模型中有显著影响，经营规模和耕地块数与灌溉用水效率均未体现相关性。一般随着经营规模的增加会带来规模效应，有助于提高农户生产效率，但是规模扩大的同时也会增加农户对灌溉管理的难度。调研样本中农户平均经营规模仅为 0.35 hm^2，有 90.6%的农户经营规模在 1.33 hm^2 以下，此时规模效应较小，而管理难度的增加可能抵消这种规模效应，导致经营规模与灌溉效率相关性不显著。耕地块数对灌溉用水效率影响为负且不显著。

4 结论与讨论

本文基于 C-D 生产函数构建的随机前沿模型(SFA)计算了关中地区小麦种植户的生产技术效率和灌溉用水效率，进一步采用 Tobit 模型，结合小麦生产特点选取了农户个人特征、家庭特征、灌溉特征和耕地特征 4 个方面的变量进行影响因素分析。本文研究发现：关中地区小麦种植的生产技术效率较高，样本农户生产技术效率普遍分布在 0.7~1.0 区

间内, 均值为 0.87, 灌溉用水效率则明显低于生产技术效率, 主要分布区间为 0~0.5, 均值仅为 0.31, 揭示目前关中地区灌溉用水效率偏低, 存在较为严重的水资源浪费情况。对灌溉用水效率影响因素的研究发现, 农户教育水平、家庭经济水平、灌渠完好程度、用水紧缺程度和节水灌溉技术对灌溉用水效率提升有显著的促进作用, 农户非农就业以及家庭非农收入比例过高导致了灌溉用水的低效率。根据以上结论, 本文对关中地区农业水资源管理提出以下建议:

1)提高农户灌溉管理能力和节水意识。农户灌溉管理水平直接影响其灌溉用水效率, 应当充分利用基层农技服务机构和组织, 为农户搭建灌溉技术学习与推广的平台, 特别是对那些非农收入占比较大的家庭, 通过大力普及灌溉相关知识和技术, 帮助其改变原有的粗放型灌溉方式。此外, 本文研究表明, 当农户意识到用水紧缺时, 其灌溉效率会提升。因此, 通过宣传等手段增强农户对当前水资源短缺状况的水情认识, 科学引导农户树立节水意识, 可以有效促进农户将这种节水意识向节水行为进行转化。

2)完善灌溉设施建设。一方面要加强对灌溉渠道的日常维护, 近年来由于资金匮乏、责任主体缺失等问题, 灌溉设施存在不同程度的老化, 导致渠道渗漏等问题。政府应当给予必要的经济支持帮助改善灌溉渠道状况, 避免灌溉用水在运输途中的无效损失。另一方面要继续推广节水灌溉技术, 节水灌溉方式对有效节约农业水资源、提高灌溉用水效率具有良好促进作用。

3)改革灌溉水价。目前关中地区灌溉水价远低于成本水价, 难以发挥经济杠杆的作用, 本文研究结果显示水价与灌溉用水效率呈现非相关性, 其原因是当前水价过低, 未达到水价与用水需求的弹性阶段, 未能达到对农户节水形成有效激励。因此, 积极推行农业水价综合改革, 在保障粮食安全情况下推动灌溉水价有序调整, 将促进农业水资源的有效利用, 提高灌溉用水效率。

参考文献 References

[1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880–885
KANG S Z. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880–885

[2] 王西琴, 吴若然, 李兆捷, 等. 我国农业用水安全的分区及发展对策[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1428–1434
WANG X Q, WU R R, LI Z J, et al. Agricultural water security zoning and developmental countermeasures in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1428–1434

[3] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875–879
LIU C M. Agricultural water issues in China: Discussions on research highlights[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 875–879

[4] 崔远来, 熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 590–598
CUI Y L, XIONG J. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 590–598

[5] 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——基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 934–943
GENG X H, ZHANG X H, SONG Y L. Measurement of irrigation water efficiency and analysis of influential factors: An empirical study based on stochastic production frontier and cotton farmers' data in Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 934–943

[6] KOPP R J. The measurement of productive efficiency: A reconsideration[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1981, 96(3): 477–503

[7] KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T, et al. 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

[8] 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 J P, MA J F, WANG H M, et al. Research on agricultural total-factor water use efficiency and its influencing factors in China[J]. On Economic Problems, 2014, (6): 101–106

[9] KARAGIANNIS G, TZOUVELEKAS V, XEPAPADEAS A. Measuring irrigation water efficiency with a stochastic production frontier[J]. Environmental and Resource Economics, 2003, 26(1): 57–72

[10] 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 L, HUANG Y. 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

[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
YU W Y, QI Y B, WEI F, et al. The impact of FDD rotation mode and irrigation methods on rice irrigation water efficiency in southwestern China[J]. Resources Science, 2017, 39(6): 1127–1136

[12] 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

SONG C X, MA H Y, HUANG J K, et al. Impact of climate change and farmers' adaptability on wheat irrigation efficiency[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2014, (2): 4–16

[13] 李双杰, 范超. 随机前沿分析与数据包络分析方法的评析与比较[J]. 统计与决策, 2009, (7): 25–28
LI S J, FAN C. Analysis and comparison of stochastic frontier analysis and data envelopment analysis methods[J]. Statistics and Decision, 2009, (7): 25–28

[14] REINHARD S, LOVELL C A K, THIJSSEN G. Econometric estimation of technical and environmental efficiency: An application to Dutch dairy farms[J]. American Journal of Agricultural Economics, 1999, 81(1): 44–60

[15] 王志平. 生产效率的区域特征与生产率增长的分解——基于主成分分析与随机前沿超越对数生产函数的方法[J]. 数量经济技术经济研究, 2010, 27(1): 33–43
WANG Z P. Regional disparity in production efficiency and decomposition of productivity growth[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2010, 27(1): 33–43

[16] 夏莲, 石晓平, 冯淑怡, 等. 农业产业化背景下农户水资源利用效率影响因素分析——基于甘肃省民乐县的实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(12): 111–118
XIA L, SHI X P, FENG S Y, et al. Impact factor of farmers' water use efficiency under the background of the agriculture enterprise — Minle County in Gansu Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(12): 111–118

[17] 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
ZHAO J, MENG H, GONG J. Measurement of total factor agricultural water efficiency and analysis of influential factors in Jing-Jin-Ji area[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(3): 76–84

[18] 陈菲菲, 张崇尚, 罗玉峰, 等. 农户种植经验对技术效率的影响分析——来自我国 4 省玉米种植户的微观证据[J]. 农业技术经济, 2016, (5): 12–21
CHEN F F, ZHANG C S, LUO Y F, et al. Analysis of farming household's experience on technical efficiency: Micro-evidence from 4 Chinese provinces corn growers[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2016, (5): 12–21

[19] BERBEL J, GÓMEZ-LIMÓN J A. The impact of water-pricing policy in Spain: An analysis of three irrigated areas[J]. Agricultural Water Management, 2000, 43(2): 219–238

[20] HUFFAKER R, WHITTLESEY N, MICHELSEN A, et al. Evaluating the effectiveness of conservation water-pricing programs: Reply[J]. Journal of Agricultural and Resource Economics, 1998, 23(2): 571–572

[21] 陈大波, 张新焕, 杨德刚, 等. 三工河流域农户灌溉效率及影响因素[J]. 地理科学进展, 2012, 31(4): 468–475
CHEN D B, ZHANG X H, YANG D G, et al. A study of farmers' irrigation efficiency and influencing factors in Sangong River Basin[J]. Progress in Geography, 2012, 31(4): 468–475

全国优秀农业期刊 · 北方优秀期刊 · 吉林省十佳科技期刊 · 吉林省一级期刊

国际标准刊号：ISSN 1672-0180
国内统一刊号：CN22-1215/S

吉林蔬菜

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊　中国期刊全文数据库收录期刊　中文科技期刊数据库收录期刊
中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊　万方数据数字化期刊群全文入网期刊　"农家书屋"工程入选期刊

邮发代号12-151　每期订价20元　季刊

《吉林蔬菜》杂志，原名《蔬菜科技》，是由吉林省农委主管、吉林省蔬菜科学研究院主办的科技期刊。创刊于 1974 年，公开发行。

《吉林蔬菜》杂志秉持"关注民生，服务三农"的信念，努力塑造北方地区蔬菜名牌期刊形象。传种菜之经，播科技之火，引致富之路，做农民之友。不懈追求，开拓创新，不断提升吉林蔬菜杂志的品牌形象。内容更丰富，设计更精美。更多精彩，敬请期待。

吉林蔬菜杂志是北方蔬菜的代表，凭借北方市场的信息平台、完善的服务体系、灵活的信息化应用，提升企业经济效益，助力企业开发北方市场，成就巅峰价值！

主要栏目：蔬菜栽培、植物医院、新优品种、保鲜加工、试验报告、工作研究、园林花卉、食用菌专栏、技术创新、菜业咨讯等。是蔬菜种植者、种子经销商、生产管理人员、农业院校、农业科技推广部门的重要参考读物和宣传媒体。

诚邀加盟杂志广告，选择吉林蔬菜，开发北方市场。

杂志社地址：长春净月经济开发区千朋路 555 号　邮编：130033
联系人：齐心 13504487898　刘敬红 13844813115
总编邮箱：mingkuan7898@163.com　QQ:516313972
E-mail：jlshucai@163.com　编辑部电话：0431-82532029