

中国农业的用水效率及其影响因素

——基于 MinDW 模型的分析

李 静 徐德钰*

摘要:农业一直是主要耗水量最大的部门,与此同时,中国水资源的地区分布不均、低效使用问题长期以来一直制约着农业的发展,加之农业面源污染的环境约束,都导致了农业水资源供需矛盾的不断恶化。本文基于 MinDW 模型,克服传统 DEA 模型及基于松弛测度的 SBM 模型的缺陷,并把用水效率分解成纯技术效率和规模效率,考察不同农业区域农业用水效率及规模波动,最后使用 Tobit 模型对农业用水效率的决定因素进行了计量检验。结果表明,全国综合用水效率仍有较大节水潜力,且具有空间、时间波动大的特点;不同用水区之间,纯技术用水效率与模型效率差异较大。用水效率决定因素的计量检验表明,地区水资源禀赋并不是唯一因素,因此需要针对不同地区的实际情况开展水资源管理、规模化生产以及尝试建立合理的农业用水价格机制等,都会提升农业用水效率。

关键词:农业用水效率;空间异质性;MinDW 模型;影响因素

一、引言

“十三五”规划提出要构建节水型社会,逐步提高产业的水资源利用效率,表明节约用水、提高水资源利用效率已经成为未来产业可持续发展的重要内容。随着我国经济的稳步发展,工业用水和生活用水占总用水量的份额均不断上升,2005-2016年,工业用水和生活用水占总用水量平均每年增长约为1.65%和2.26%。农业方面用水份额虽有所减少,但从同期平均占63%来看,农业仍然是主要的需水产业。因此,在有限的农业水资源保证有效的粮食生产供给的同时,必须逐步提高农业用水效率才能实现农业可持续发展。

在政策层面,中央及相关部门相继出台了很多水资源控制的法规和政策。2011年2月,

*李静,合肥工业大学经济学院,邮政编码:230009,电子信箱:lyb@hfut.edu.cn;徐德钰,浙江大学经济学院,邮政编码:310058,电子信箱:1790713540@qq.com。

本文系国家自然科学基金项目“资源与环境双重约束下的产业用水效率研究”(71473068)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的宝贵意见,文责自负。

中国水资源管理部门颁布并实行最严格的水资源管理制度,确立包括水资源开发利用控制、用水效率控制和水功能区限制纳污的“三条红线”。中央在 2014 年的一号文件《关于全面深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见》中进一步提出了面临资源环境的双重约束,深入推进农业发展方式的转变。在党的十九大报告中,更是明确提出“推进资源全面节约和循环利用,实施国家节水行动”。可以看出,中国为提高农业用水效率和缓解水危机所付出的努力。而农业用水效率的高低也会对我国经济增长和粮食生产安全产生影响。鉴于此,测算农业用水效率并探寻提高农业用水效率的途径具有重要的研究意义。

二、文献回顾

在农业用水效率领域,从研究层次来说,国外学者的研究主要以微观尺度为主,以往多基于田间和不同作物的视角,主要通过获取农作物水分生产率和灌区水分生产率等多个指标来体现效率水平。从研究的侧重点来说,当农业用水效率划分为技术效率和经济效率两类时,一些学者在灌溉技术效率方面的研究显示,平均地表灌溉效率约为 0.6,而滴灌和喷灌的灌溉效率则大约能达到 0.95(赵凯、孙天合,2014)。灌溉经济效率方面,Ali 等(2000)认为效率是水的传送效率、使用效率以及分配效率的综合结果。Kaneko 等(2004)基于随机前沿分析法(SFA)评价了全国各省的农业用水效率,结果显示农业用水效率与生产技术效率存在较大差距,农业用水效率的影响因素主要包括气候、土壤等自然条件,以及农田水利基础设施的建设。Lilienfeld 和 Asmild(2007)利用传统的 DEA 方法测算出用水效率,并比较了与 SFA 效率的差异,认为 DEA 效率容易受到异常年份投入产出的影响。而 Pereira 和 Marques(2017)在整理了已有的与测算灌溉用水效率相关的文献后,总结出 DEA 方法是测算农业用水效率方法中较为常用的一种方法。Dhehibi 等(2007)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,而其他因素的影响要小一些。Speelman 等(2015)在详细比较了诸如土地规模、作物选择和产权等因素后认为农场规模、土地所有权、灌溉方案的类型、作物选择等都对灌溉用水效率有积极的作用。

国内对此的研究也多集中于农业的灌溉效率方面,研究方法主要有两种:一是使用土壤相对含水量和叶片水分利用效率的方法,根据现场试验观测的作物蒸发量与作物产量间的比率来表示(Ali et al.,2000);二是使用经济学的投入产出办法,使用计量经济等来对农业用水效率进行评价,主要思想就是将水作为一种生产要素,即投入一定的水量可以得到最大的农业产出量(如粮食产量),该方法要求获得所研究地区的第一手资料和数据(孟令杰,2000)。从研究的计量方法来说,划分为非参数法和参数法。数据包络分析法(DEA)可视作非参数法中的代表,该方法是通过将灌溉投入加入至农业生产函数中,然后测算出农业的技术效率值(田伟、柳思维,2012),而且不要求具体的函数形式,且能处理多投入多产出的情况。而随着

DEA-Malmquist 指数法的普及,该法也不断被运用到农业用水效率的动态变化的研究中。参数法中的代表则是随机前沿分析法(SFA),该方法需要预设一定的函数形式,但能分离统计误差和技术非效率等问题。一些研究发现,SFA 计算的中国农业平均灌溉效率值约为 0.75,也有文章探讨了水价、节水技术和用水协会等的作用,发现这些因素都对农业灌溉效率有着显著影响(王晓娟、李周,2005)。王学渊和赵连阁(2008)研究发现所研究样本的平均农业用水效率仅为 0.49,说明达到目前的产量可减少一半的用水量,且农业用水效率与生产技术效率相比地区间差异更大,西北地区是全国最具节水潜力的区域。他们提出通过减少水密集型作物的种植、新建和改造农田水利设施、调整农业用水供给系统、加强农业水资源需求管理、采取有利于增加农民节水积极性的经济措施等提高农业用水效率。陈洪斌(2017)运用三阶段 DEA 模型和空间计量模型测评了各省农业用水效率及溢出效应,得出了绝大多数省份农业用水效率较低和效率提升空间大的结论。俞雅乖和刘玲燕(2017)利用超效率 DEA-Tobit 两阶段模型对水资源效率进行评价,并对水资源效率的区域差异及其影响因素进行分析,结果显示用水效率的区域差异明显,可以从加大科技投入、提升科技水平和优化产业用水结构来加以提升。梁静溪等(2018)基于权重约束 DEA 和 Tobit 模型对黑龙江省 13 个地区的农业灌溉用水效率及其影响因素进行测算和分析,认为可以通过引入水价、制度和技术措施来提高灌溉效率。

综上,目前对于农业用水效率或农业灌溉效率的研究文献已经较多,研究对象主要集中在两个层面:一是对于农业区域用水效率的宏观研究;二是对于具体农作物的灌溉效率的研究。从研究的文献量来观察,对农业区灌溉经济效率的研究明显少于对灌溉技术效率的研究(佟金萍等,2014),这是由于经济效率需要涉及到成本和价格的问题,而农业用水多为免费或低价使用亦或无法获取农业用水投入的相关成本价格资料。目前国内相关研究主要侧重使用统计方法来计算单独一个部门和用水量之间的关系,对综合不同部门的研究较少;对于农业用水效率的定义也不够明确,存在多种说法和不同的测算办法;对具有不同的资源禀赋、经济发展水平、气候条件的地区缺乏差别处理和考虑。相关研究在使用传统 DEA 方法时更多地强调这种方法的多投入多产出特点,对于其可能产生的问题,比如容易忽略相关单元提升用水效率的积极性的问题等,则研究较少。

针对以上文献研究的不足,本文以中国 31 个省份(不包含香港、澳门和台湾地区)2005-2015 年相关数据为样本,采用 MinDW 模型对中国和各区域农业用水效率进行测度,并结合各地区农业的自然地理因素、灌溉技术、产业结构以及农业基础设施等因素进行面板随机效应 Tobit 模型的实证检验,从多个层面反映农业用水效率的影响因素,以更好地提出合适的农业用水效率提升的政策建议。此外,本文的创新之处,体现在以下三个方面:

一是本文所选用的模型方法新颖、贴合实际。利用 MinDW 模型测算农业用水效率,相比

较 SFA 等参数方程,由于 MinDW 模型不需要设定函数形式,克服了 SFA 等参数方法对于投入、产出变量的限制,另一方面,也克服了传统 CCR 模型和 SBM 方法中前沿太远、挫伤非有效生产单元追赶“积极性”的缺点。

二是本文采用的分区方法较为合理。根据五年农业平均用水量这一标准,再经过聚类分析后将 31 个省市划分为不同层次的用水区,更多考虑了地区间的异质性,同时兼顾了传统东中西部以及南北方等农业区的划分。

三是在对影响因素的定量分析中,本文确定出四大类影响因素,加入了气象和农业基础设施建设等以往研究中容易被忽略的因素。在每类影响因素中选取了有代表性的代理变量,涵盖面广,解释性较强。

本文余下部分安排如下:第三部分针对以往研究的不足,引入较为新颖的 MinDW 模型方法,介绍本文所用数据和方法;第四部分对中国和各用水区域的农业用水效率测算结果进行分析;第五部分实证检验决定用水效率的多方面因素;第六部分则针对研究结果,提出结论和政策建议。

三、研究方法与数据来源

(一) 研究方法

在以往研究中,SFA 是一种随机前沿分析法,通常认为生产过程中会由于管理、组织的存在而产生效率损失。一般常见的随机前沿生产函数通过设定技术效率损失等于零,得到生产技术上有效的产出,并与实际产出作对比,可以得到生产技术效率;假定农业产出一定时,存在最小可行灌溉用水量和灌溉用水技术有效时的有效产出水平,可以得到灌溉用水效率。由此可见,SFA 方法虽然能够通过偏微分法算出灌溉用水效率,但是无法合理控制投入和产出两类变量以及内生性问题,存在需要设定合理生产函数的缺点。

DEA 作为一种非参数方法,其基本逻辑是先建立线性规划方程组,后构造出有效的前沿面,最后评价决策单元 DMU。当被评价的 DMU 技术效率为 1 时,意味着 DMU 此时正处于有效前沿面上,处于最有效率的状态。反之,当 DMU 为 0 至 1(不包含 1)时,意味着为非效率。考虑到 DEA 方法不需要提前设定函数的形式和误差项的分布情况,可以有效避免主观因素的干扰,还能在测算过程中对于无效的 DMU 算出冗余度,因此本文选用 DEA 方法对用水效率进行测算。但传统 DEA 模型大都属于径向模型,如 BCC 模型和 CCR 模型,投入和产出会同比例增加或者缩减,也就存在无法改变松弛性的问题。SBM 虽然能最大程度纠正松弛度问题,得到的技术效率也能最大程度识别径向模型可能存在的松弛测度问题,然而 SBM 由于设定的前沿太远,使得多数 DMU 在短期内无法追赶或者达到前沿有效,挫伤追赶的“积极性”,不利于整体 DMU 技术进步或者生产效率的改善。故本文采用较新的 MinDW 模型(至弱有效

前沿最近距离的模型)进行农业用水效率的测算,该方法不需要设定最合理的函数形式,克服了SFA方法中对于投入、产出变量的限制和传统DEA的非动态问题,还克服了SBM方法中前沿太远致使的追赶“积极性”挫伤的缺点,得出的结果也相对更贴合实际。

MinDW模型,该距离函数是指被评价的DMU与前沿的最近距离的测度方法,并且不管它在前沿的投影点是强有效还是弱有效的。该模型能够实现非期望SBM模型的运行,同时可以将效率分解为纯技术效率、规模效率和规模收益情况。MinDW模型修正了传统DEA的CCR模型以及基于松弛测度的SBM模型的问题,可避免某些因素对研究结果的主观影响,如权重、数据异常值及大幅经济波动等的影响。

MinDW方法可以表示为 $m+q$ 个线性规划(m 是投入指标的数量, q 是产出指标的数量):

$$\max \beta_z, z = 1, 2, \dots, m + q \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + \beta_z e_i \leq x_{ik}, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - \beta_z e_r \geq y_{rk}, r = 1, 2, \dots, q \quad (2)$$

$$\lambda \geq 0$$

上式中, x, y 分别指投入和产出变量, β 是指投入或产出可缩减(扩大)的比例, λ 指DEA分配的客观权重。 e_i 和 e_r 都是常数,在规划式中只有一个 e 等于1,其余均为0,即:

$$e_i = 1 \text{ if } i = z; e_i = 0 \text{ if } i \neq z \quad (3)$$

$$e_r = 1 \text{ if } r = z - m; e_r = 0 \text{ if } r \neq z - m \quad (4)$$

$$\text{每个模型的效率值为 } \theta_z^* = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \beta_z^* e_i / x_{ik}}{1 + \frac{1}{q} \sum_{r=1}^q \beta_z^* e_r / y_{rk}}$$

MinDW模型值为 $\theta_{\max}^* = \max(\theta_z^*, z = 1, 2, \dots, m + q)$,最大的效率值对应最小的 β^* ,即至前沿的最近距离。

进一步地,投入变量可以进行调整,且能调整生产安排来提高效率,从减少水资源投入、缓解用水危机的角度来考虑,则选择以投入为导向,此时有 q 个线性规划:

$$\max \beta_z, z = 1, 2, \dots, m + q \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + \beta_z e_i \leq x_{ik}, i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{rk}, r = 1, 2, \dots, q$$

$$\lambda \geq 0$$

通过测试,MinDW模型效率值不会小于采用任何其他方向向量的方向距离函数的效率

值,即 MinDW 模型所得到的效率值为最大的。根据模型,就能得到最优的农业用水投入量 W^* , 其与实际用水量 W 的比例就是我们需要的用水效率值,即 $Eff_w = W^*/W$ 。

(二) 数据来源

本部分选取的数据时间跨度是 2005-2015 年,选取的研究对象则包括中国 31 个省份(不包含香港、澳门和台湾地区),而在后续的部分分区处理中,由于重庆部分数据缺失,且部分指标缺少相应的平减指数,我们将重庆数据合并到四川一并处理。农业投入产出数据主要来源于 2006-2016 年的《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》和《中国水资源公报》等,气象数据和水利数据来源于国家气象局和水利部记载公布的数据,还有部分数据来自于 EPS 数据平台和三农数据库等在线资源平台。

众所周知,中国地域广阔,在自然地理条件、资源禀赋和经济发展水平等诸多方面存在差异性,农业生产布局也有明显的地域性特点,如果不加区别,不充分考虑诸多因素分布的多样化,显然不够严谨。本文针对我国农业区域特点和农业水资源分布,把农业用水区域划分为高、中、低三个区域。划分办法主要借鉴佟金萍等(2014),基于农业的五年平均用水量高低进行聚类分析,分区结果见表 1。该方法依据我国农业用水量的现状来区分出高、中、低用水区,既做到针对性地反映不同用水区的农业用水实情,充分考虑资源禀赋因素,还可以有区别地考察不同区域的用水效率和影响因素。

表 1 中国农业用水区域划分情况

区域	省份
高农业用水区	新疆、江苏、广东、黑龙江、广西、湖南、内蒙古、湖北、河北、四川(含重庆)、河南、安徽、山东、江西
中农业用水区	福建、云南、浙江、甘肃、辽宁、贵州、陕西、吉林、宁夏
低农业用水区	山西、海南、青海、上海、西藏、北京、天津

(三) 农业用水的基本概况分析

本文利用常用的万元农业增加值用水量指标来粗略描述 2005-2015 年间农业用水效率的时间演化与空间分布情况。当其数值变小时,说明产生一万元农业增加值所消耗水量在不断减少,也就意味着农业用水效率在不断提高。

计算可以发现,平均来看,万元农业增加值用水量随时间不断下降,从 2005 年的 2805.97 立方米/万元不断减少到 2015 年的 1011.66 立方米/万元,且平均值为 1737.61 立方米/万元。中国万元农业增加值用水量随时间的演化不断下降,且下降幅度明显,2005 年的万元农业增加值用水量约是 2015 年的两倍多,说明农业用水效率不断提高。从图 1 可以发现,对于不同用水区域,万元农业增加值用水量都大致随时间不断减少,说明无论是全国还是不同用水区

的农业用水效率都随着时间演化而不断提升。但与此同时,随着时间的变动,高用水区在 2005 年的万元农业增加值用水量值为 4434.88 立方米/万元,2005-2015 年的万元农业增加值用水量均值为 2563.06 立方米/万元;对于中用水区来说,万元农业增加值用水量最大值是 2005 年的 4310.92 立方米/万元,均值为 2463.25 立方米/万元;低用水区万元农业增加值用水量最大值为 2005 年的 3626.18 立方米/万元,均值为 2133.32 立方米/万元。由此可见,不同用水区间的农业用水效率在提高过程中不断接近,而且效率差距不断缩小。

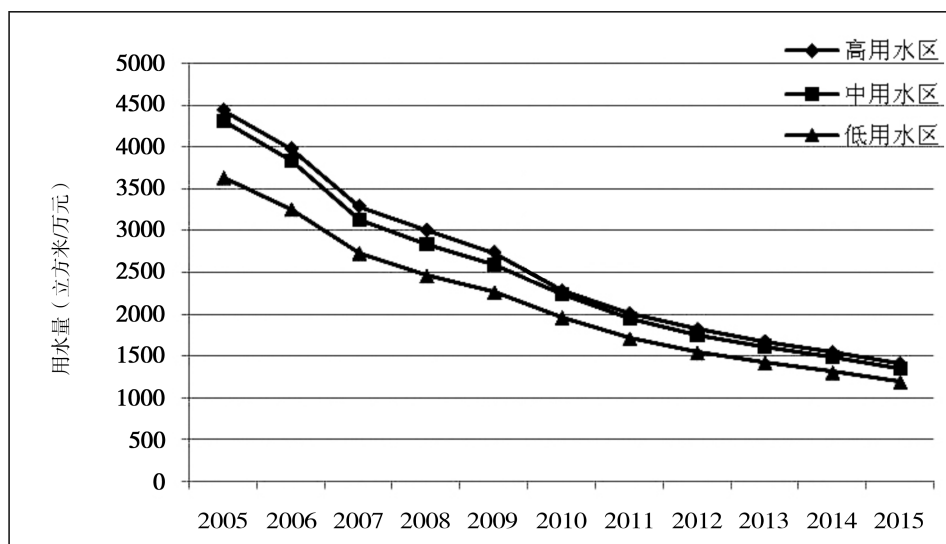


图 1 主要农业区万元农业增加值用水量

(四) 农业用水效率的测算结果

在研究农业用水效率时,综合参照以往文献做法选取变量。例如,王学渊和赵连阁(2008)的研究中以农业总产值而非农林牧渔总产值作为农业产出变量,并换算成可比价格的农业总产值。在投入方面,采用农业机械总动力代理农业资本投入,化肥施用量和播种面积代理中间投入,农业就业人数和农业用水量分别代理劳动投入和水资源投入。如表 2 所示,本文用第一产业增加值作为产出变量,并以 2005 年为基期,利用各省的第一产业增加值指数将各年换算成可比较的不变价格的农业产出变量。投入变量方面,根据研究的需要、数据的可得性等要求,农业机械总动力代表资本投入,第一产业就业人数代表劳动力投入,农业用水量代表水资源投入,农作物总播种面积代表的是中间投入。用水效率可以从致因角度分成完全由于用水效率因素导致的和由于用水的规模因素导致的两方面。仿照技术效率的分解,用水效率也可以分解为两个部分构成,即用水效率=纯用水效率×规模用水效率。

表 2 投入产出变量说明

变量	变量解释
产出变量： 第一产业增加值	2005 年为基期处理的不变价的增加值
投入变量：	
农业机械总动力	用来表示农业资本投入
第一产业就业	用来表示劳动力投入
农业用水量	代表农业水资源投入
农作物总播种面积	代表农业中间投入

表 3 展示了不同 DEA 方法得到的农业用水效率状况。从结果上可以发现,与传统的 CCR 模型和 SBM 模型相比,MinDW 法得到的农业用水效率值相对较高,这与此方法构建的前沿更加贴近于每一个 DMU 有关,使得较低效率的 DMU 相当程度上能够易于改善自己的效率评价处境。这也体现了此方法的优势所在,通过提高无效单元的相对效率来改善可能“挫伤”一些单元进行追赶的积极性。

表 3 不同 DEA 方法农业平均用水效率的比较

省份	CCR	SBM	MinDW	省份	CCR	SBM	MinDW
上海	0.4518	0.4537	0.4594	山西	0.6896	0.4411	1.0000
云南	0.7329	0.5728	0.8487	广东	0.6191	0.6191	0.6191
内蒙古	0.4429	0.4739	0.4896	广西	0.4615	0.4459	0.4615
北京	0.8690	0.8789	0.8911	新疆	0.1088	0.1282	0.1451
吉林	0.8298	0.7903	0.8178	江苏	0.5173	0.5591	0.5782
四川	0.9542	0.8001	1.0000	江西	0.4976	0.4978	0.4999
天津	0.8629	0.8653	0.8815	河北	0.9865	0.8709	1.0000
宁夏	0.1238	0.1387	0.1397	河南	1.0000	0.8770	1.0000
安徽	0.6973	0.5533	0.7612	浙江	0.8883	0.8796	0.9150
山东	1.0000	0.9235	1.0000	海南	1.0000	1.0000	1.0000
湖南	0.6761	0.5950	0.7228	湖北	0.7818	0.6241	0.8176
甘肃	0.3478	0.2999	0.3933	贵州	0.7453	0.4641	1.0000
福建	0.8637	0.8573	0.8679	辽宁	0.9800	0.9554	1.0000
西藏	0.1626	0.1596	0.1591	陕西	0.8338	0.5856	0.9502
青海	0.3095	0.3117	0.3552	黑龙江	0.3093	0.3439	0.3867

注:根据表 3,综合各个省份来看,CCR 模型计算的平均用水效率为 0.6672,SBM 模型计算的为 0.6156,MinDW 模型计算的为 0.7088。

通过运算得到图 2,反映了 11 年来中国整体的年均 CRS 用水效率、VRS 用水效率和用水规模效率变动情况。首先,2005-2015 年的平均 VRS 用水效率值明显高于其他两个效率值,平均为 0.84;平均的用水规模效率次之,效率值为 0.82;而 CRS 用水效率值最低,平均效率值为 0.70。此外,CRS 用水效率值在 2008 年和 2013 年略有下降,与之对应的 VRS 用水效率最大值为 2009 年和 2010 年的 0.85,两侧各年份呈现一定的递减趋势。用水规模效率变动除了 2010-2012 年的略有上升以外,整体呈现出下降趋势,但没有出现较大的下降或波动。

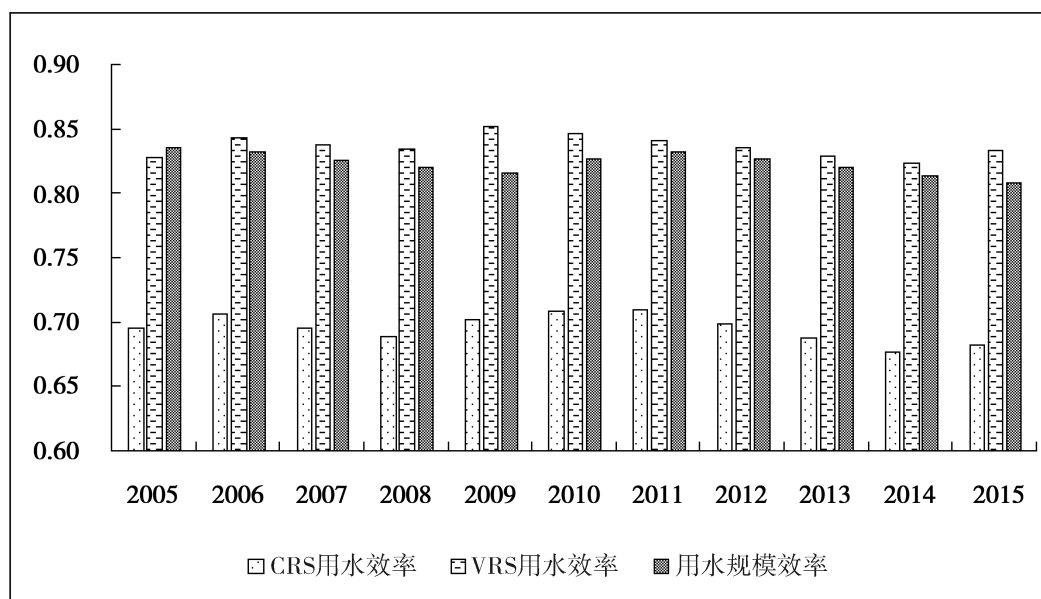


图 2 2005-2015 年中国整体年均农业用水效率变动

由于我国降水时空分布不平衡和地域自身差异明显,故沿用本文前面的不同用水分区的方法。结合表 4 可以发现,全国平均的 CRS 用水效率、VRS 用水效率和用水规模效率分别为 0.72、0.86 和 0.81。在 CRS 用水效率值方面,中农业用水区平均最高为 0.77,高农业用水区以 0.71 排在第二位,排名第三的低农业用水区效率值为 0.68。虽然低农业用水区的 CRS 用水效率并不是最高,看起来与农业区的区划有一定的矛盾之处,但仔细观察就会发现,效率低的原因是区内差异性比高、中农业区更大,且主要是由于较低的规模效率引起的,其纯技术用水效率表现仍最为突出,这也显示出与农业用水量的区域划分有密切关系。此外,根据传统的东中西部的划分办法,仍然可以发现,从东到西部地区用水效率呈现依次下降的现象,表明农业发达的省区,农业用水效率也相应较高。

表 4 2005-2015 年不同农业用水区年均用水效率及分解结果

用水区	省份	CRS 用水效率	VRS 用水效率	用水规模效率
高农业用水区	新疆	0.77	0.12	0.78
	江苏	0.58	1	0.58
	广东	0.62	1	0.62
	黑龙江	0.29	0.37	0.80
	广西	0.46	0.64	0.72
	湖南	0.72	0.98	0.74
	内蒙古	0.47	0.57	0.84
	湖北	0.82	1	0.82
	河北	1	1	1
	四川(含重庆)	1	1	1
	河南	1	1	1
	安徽	0.76	0.96	0.80
	山东	1	1	1
	江西	0.47	0.57	0.84
	分区平均	0.71	0.80	0.82
中农业用水区	福建	0.87	1	0.87
	云南	0.85	0.94	0.90
	浙江	0.91	1	0.91
	甘肃	0.39	0.41	0.97
	辽宁	1	1	1
	贵州	1	1	1
	陕西	0.95	0.97	0.98
	吉林	0.82	0.93	0.89
	宁夏	0.14	0.23	0.61
分区平均	0.77	0.83	0.90	
低农业用水区	山西	1	1	1
	海南	1	1	1
	青海	0.36	0.85	0.43
	上海	0.45	1	0.45
	西藏	0.16	0.81	0.26
	北京	0.89	1	0.89
	天津	0.88	0.96	0.92
	分区平均	0.68	0.95	0.71
全国/区域平均	全国平均	0.72	0.86	0.81
	东部平均	0.84	0.99	0.84
	中部平均	0.74	0.83	0.88
	西部平均	0.60	0.69	0.77

最后,对 2005-2015 年 30 个省份(重庆数据合并到四川)的年均农业用水效率进行了频数统计分析。在表 5 中,CRS 用水效率、VRS 用水效率和用水规模效率值在 0.80~1 之间的分布占比最高,均大于 53.33%。CRS 用水效率在 0.60~1 间的样本数占总体的三分之二。VRS 用水效率在 0.60~0.80 间只有一个样本数量,但在 0.80~1 间的样本数占比高达 76.67%。用水规模效率值在 0~0.20 效率区间无样本数,但 0.60~1 间共有 26 个,占比高为 86.66%。CRS 用水效率最小值为 0.14, VRS 用水效率最小值为 0.12, 用水规模效率最小值为 0.26, 三者最大值均为 1。

表 5 2005-2015 年 30 个省份年均农业用水效率的频数分布

效率区间	CRS 用水效率		VRS 用水效率		用水规模效率	
	样本个数	比例	样本个数	比例	样本个数	比例
0~0.20	2	6.67%	1	3.33%	0	0
0.20~0.40	3	10.00%	2	6.67%	1	3.33%
0.40~0.60	5	16.67%	3	10.00%	3	10.00%
0.60~0.80	4	13.33%	1	3.33%	7	23.33%
0.80~1	16	53.33%	23	76.67%	19	63.33%
最小值	0.14		0.12		0.26	
最大值	1		1		1	

注:各区间包括上限,不包括下限。

五、农业用水效率的影响因素

(一) 影响因素选取

影响农业用水效率的因素较多,且影响作用机制各不相同,故本文在结合已有研究的基础上,将可能的影响因素大致分为自然地理因素、节水灌溉技术、基础设施和气象条件以及农业结构因素四个方面,在说明其来源和主要影响变量选取的同时,介绍其对农业用水效率的影响机制。

(1) 第一类是自然地理因素。中国国土面积辽阔,东西南北跨度都很大,无论是地理分布,还是水资源分布等方面都存在明显的差异。因此,本文结合数据的可得性和研究需要选取包含降水量、人均水资源量和农作物总播种面积在内的三个变量。这些因素在一定程度上能够反映地区拥有的自然地理特点和水资源水平,既考虑了资源的总量大小,也考虑了人口因素,更加全面、真实地刻画地区自然地理和资源的相对情况。

(2) 第二类是节水灌溉技术。理论上,节水灌溉技术应用于农业生产时,会减少灌溉用水量,甚至可能出现用更少水量生产出更多产出的现象。节水技术的重要性也在一些发达国家

和我国某些发达地区的实践中得到印证,由于刻画节水技术水平的数据相对难以获取,本文就以节水灌溉面积来代表节水技术的水平(马光明,2015)。

(3)第三类是农业水利基础设施和气象因素。我国水资源存在时间和空间上分布不均衡的问题,基础设施的修建有利于缓解水资源时空分布不均衡,在不同季节或者区域间利用基础设施来实现储水、用水和调水,因而地区的基础设施情况也是重要的影响因素之一。本文用地区的水库库容量来体现区域的基础设施水平。而气象因素,例如温度和湿度,也会对作物种植和作物耗水水平产生影响。故用年平均气温和年平均相对湿度来表现地区的气象特点。

(4)第四类是结构因素。结构因素可以分为地区产业结构和作物种植结构两类。一方面,不同产业对某个地区的贡献不同,农业所占比重一般也不同,人们对农业的认识以及农业用水效率也存在很大差异,故用第一产业所占比重来进行描述。另一方面,作物种植结构也会对农业用水效率产生影响,例如水稻作为一种耗水性作物,若地区中水稻的占比较高,一方面会侧面反映出当地的水资源水平高,另一方面水稻生长所需农业用水量自然会增多,进而导致用水效率的降低。本文利用稻谷占主要农作物的比重来描述作物的种植结构。综上,关于农业用水效率影响因素的变量说明和描述见表6。

表6 农业用水效率影响因素的变量说明

因素	变量	变量含义	单位
自然地理因素	X_1	降水量	亿立方米
	X_2	人均水资源量	立方米/人
	X_3	农作物总播种面积	千公顷
节水灌溉技术因素	X_4	节水灌溉面积	千公顷
基础设施和气象因素	X_5	水库库容量	亿立方米
	X_6	年平均气温	摄氏度
	X_7	年平均相对湿度	%
结构因素	X_8	第一产业所占比重	%
	X_9	稻谷占主要农作物的比重	%

(二) 模型设定

由前面的效率测算结果可知,农业用水效率的数值都在0~1之间,如果只简单地用OLS进行回归会造成结果有偏和不一致。此外,部分省份出现效率值均为1的情况,此时要想区分出不同地区效率的差异,可以使用特殊的因变量模型,因此本文使用受限因变量的面板Tobit模型进行影响因素分析。计量经验已经证明,面板固定效应的Tobit模型的估计量是有偏的,且会存在条件性限制等问题(李静、马潇璨,2014)。而直接使用随机效用模型,也可能

产生偏误,不具有说服力,故参考目前学术界的大多数做法,本文在采用 Tobit 模型的同时,使用 Bootstrap 自助法计算稳健标准误。由于农业用水效率的数值大多为 0~1 间的小数,代表影响因素的变量中又有 X_7 、 X_8 、 X_9 的数据为百分数,因此对因变量乘以 100 进行处理,使其数值在 0 至 100 之间,右端限制为 100^①。同时,在经过模型运算的尝试后,发现对剩余的 9 个变量数据取对数后,更加适合本研究。综上,回归方程如下:

$$Y^* = C + \beta^T X_{i,t} + u_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

$$Y = \begin{cases} Y^* & 0 < Y^* \leq 100 \\ 0 & Y^* < 0 \\ 100 & Y^* > 100 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)-(8)中, Y^* 表示潜在的因变量, Y 表示被观察到的因变量; $X_{i,t}$ 代表解释变量向量, $u_{i,t}$ 为服从正态分布的随机变量,且只随个体变化而变化并不随着时间变化, $\varepsilon_{i,t}$ 为随时间和个体而独立变化的、服从正态分布的随机变量,这两种随机效应独立; C 代表常数, β^T 代表由参数组成的向量。

本文对于决定农业用水效率的因素进行分析,样本涵盖了中国 2005-2015 年间的 30 个省份(重庆数据合并到四川),其中总样本数为 330 个,高用水区包含 14 个省份,样本数为 154 个;中用水区涵盖 9 个省份,样本数为 99 个;低用水区涵盖 7 个省份,样本数为 77 个。

(三) 影响因素结果分析

首先,对变量进行了多重共线性的检验,可以发现,虽然平均的 VIF 值大于 1,但是最大的 VIF 值为 4.24,远小于 10,故不存在严重的多重共线性。其次,对不同用水区利用 LSDV 法检验发现各变量都比较显著,F 检验的 P 值为 0.0000,故拒绝所有个体虚拟变量都为 0 的原假设,认为存在个体效应,此时混合回归被排除。

运行随机效应 Tobit 模型,并分别对全国和高、中、低用水区进行具体回归和分析。根据式(7)和(8),对全国样本进行影响因素分析,结果见表 7。在处理面板数据时,究竟使用随机效应模型还是固定效应模型一直被学者们所关注,常规解决方式是豪斯曼检验,但在实际应用中,聚类稳健标准误与普通标准误相差较大时,传统的豪斯曼检验则不再适用。故本文采用 Bootstrap 自助法来解决这一问题。该方法有两个优势,一是方便得到标准误的估计量,二是有助于更加方便地得到渐进有效的估计量。通过设定 400 次抽样运算,得到表 8 所示结果。

^①文献中,多数左端限制在 0 值,这一设定是值得商榷的。因为 DEA 效率值虽说介于 0~1 之间,但不可能等于 0,显然左端限制为 0 并不合理。本文以样本效率最小值为左端值更为合理。

表 7 全国和各用水区农业用水效率影响因素 Tobit 模型回归结果

变量	全国	高用水区	中用水区	低用水区
$\ln X_1$	10.71 ** (2.37)	52.07 *** (8.99)	-13.67 (-1.43)	-1.69 (-0.24)
$\ln X_2$	-14.45 *** (-3.95)	-35.72 *** (-10.39)	5.76 (0.94)	-13.52 *** (-2.73)
$\ln X_3$	-15.80 *** (-2.89)	14.87 *** (2.84)	4.20 (1.44)	23.80 *** (3.61)
$\ln X_4$	7.16 *** (2.84)	-6.50 ** (-2.33)	4.07 (0.51)	13.53 *** (2.66)
$\ln X_5$	-6.25 (-1.43)	31.35 *** (5.33)	39.93 *** (4.85)	-26.33 *** (-3.13)
$\ln X_6$	12.97 *** (8.71)	-3.10 (-0.92)	13.28 *** (3.98)	9.13 *** (4.72)
$\ln X_7$	25.07 *** (7.53)	38.16 *** (8.12)	56.91 *** (7.39)	30.68 *** (4.26)
$\ln X_8$	8.31 ** (2.30)	15.20 *** (3.71)	7.25 (0.56)	25.88 *** (6.73)
$\ln X_9$	26.62 *** (6.47)	3.55 (0.65)	61.57 *** (5.45)	3.52 (0.38)
常数项	-161.7 *** (37.34)	-822.3 *** (89.43)	-992.3 *** (150.67)	-272.7 *** (36.44)
Pseudo R ²	0.058	0.1671	0.1656	0.2375

注:表格括号里的是 t 值,符号 **、*、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著。下表同。

表 8 全国和各用水区农业用水效率影响因素 Bootstrap 法结果

变量	全国	高用水区	中用水区	低用水区
$\ln X_1$	10.43 ** (2.35)	51.32 *** (8.19)	-12.78 (-1.16)	-1.46 (-0.18)
$\ln X_2$	-14.26 *** (-4.02)	-35.29 *** (-9.77)	5.35 (0.78)	-13.49 ** (-2.35)
$\ln X_3$	-15.53 *** (-2.85)	15.17 *** (2.69)	4.15 (0.99)	24.24 *** (2.95)
$\ln X_4$	7.23 *** (2.90)	-6.56 ** (-2.18)	2.59 (0.29)	14.42 ** (2.35)
$\ln X_5$	-6.30 (-1.43)	31.34 *** (4.82)	40.34 *** (4.66)	-27.34 *** (-2.86)
$\ln X_6$	12.94 *** (8.59)	-3.18 (-0.87)	12.81 *** (3.42)	8.80 *** (3.90)
$\ln X_7$	25.04 *** (7.34)	38.14 *** (7.16)	56.09 *** (6.75)	31.08 *** (3.50)
$\ln X_8$	8.28 ** (2.17)	15.16 *** (3.59)	4.86 (0.33)	26.12 *** (6.17)
$\ln X_9$	26.18 *** (6.72)	2.61 (0.42)	59.88 *** (4.88)	2.72 (0.25)
常数项	-160.9 *** (36.67)	-817.0 *** (100.66)	-958.6 *** (171.80)	-275.4 *** (49.71)
R^2	0.428	0.796	0.796	0.904

在对全国进行回归前,我们通过引入虚拟变量 D 来检验分区域是否显著,令其分别表示的是高、中、低三个不同的用水区,发现虚拟变量 D 的 P 值为 0,通过了 1% 以下的显著性检验,由此证明本文的分区是有效的、显著的。通过对比表 7 和表 8 可以发现,无论是全国层面还是不同用水区层面,对应的变量显著性和数值都十分接近,实证结果是一致的,且拟合程度普遍提高了,较好地克服了随机效应中可能存在的偏误问题。全国层面人均水资源量、农作物总播种面积、年平均气温和年平均相对湿度、稻谷所占农作物比重通过了 1% 的显著性检验,第一产业所占比重和降水量通过了 5% 的显著性检验。

从全国来看,在自然地理因素方面,农业用水效率与降水量同向变动,并在 5% 水平下显

著。中国作为农业大国,作物生长在全国范围内受到水资源短缺的资源约束,当降水量减少时,农业用水效率也随之下降。而人均水资源量和作物播种总面积与农业用水效率间是负向关系,人均层面上的水资源量提高时,往往伴随浪费水和不重视水资源保护的问题。在节水技术灌溉因素方面,亦通过了显著性检验,说明节水技术确能在一定程度上提高农业的用水效率。在基础设施和气象因素方面,水库库容量没有像预期中会对用水效率产生正向影响,但年平均气温和年平均相对湿度与农业用水效率之间呈现出同向变动关系,即当气温条件和相对湿度改善,农业用水效率也随之提高。在结构因素方面,第一产业所占比重变量在5%的显著性水平下通过检验,稻谷所占比重通过1%的显著性检验,说明规模经济对农业用水效率有正向的影响。

不同用水区的农业用水效率影响因素回归结果显示出大致的规律,但亦有不同特点,异质性较为明显。在高用水区,从自然地理因素来看,降水量数值为较大的正数,说明降水量与农业用水效率间存在很强的正相关关系,在高用水区水资源总量越丰富,水资源对农作物生长的制约力越小,农业用水的效率越高。人均水资源量与农业用水间呈现出负相关关系,即人均水资源量相对多的地区,由于资源相对丰裕,农业用水效率反而变低,一般来说,在降水量丰富的地区,农户的节水意识会因为水量丰富而变得相对薄弱,低效率利用水资源的现象较为普遍。农作物总播种面积系数估计值为正,反映了随着农作物播种总面积的扩大,种植规模不断扩大,农业用水效率呈现出上升的趋势,这与规模经济密不可分。从节水技术灌溉因素来看,在高用水区,其系数估计值为负数,说明在高用水区随着节水灌溉技术的提高,农业用水效率反而会降低,不利于农业生产。在高用水区的各省份一般水资源丰富,采用节水技术短期内反而会加重农业生产的负担。从基础设施和气象因素来看,水库库容量和年平均相对湿度通过1%显著性检验,且都对用水效率产生正向的影响,这符合我们的预期。从结构因素来看,一产比重与用水效率正相关,可以用规模经济来解释,而在高用水区稻谷所占比重没有通过显著性检验。

对于中用水区来说,在自然地理因素和节水灌溉技术因素方面,人均水资源量、降水量、农作物总播种面积和节水灌溉面积四个变量都没有通过显著性检验,可能是由于中用水区的资源禀赋和消耗水的能力处于中等,往往可以通过调整结构因素等其他方面来减少支出,增加农户收入。在基础设施和气象因素方面,水库库容量、年平均气温和年平均相对湿度三个变量都通过1%水平显著性检验,且与农业用水间呈现出正相关关系,水库库容量的增加一定程度上使农业生产用水受时间、空间的限制变小以及水资源量的波动变得相对平缓,从而提高了农业用水效率,气温和湿度条件改善也有利于作物生长和提高用水效率。在结构因素方面,一产比重并不显著,而稻谷所占比重与用水效率正相关,且影响系数较大,耗水型作物比重增加会造成用水压力,从而促进节约用水和提高利用效率。

对于低用水区来说,在自然地理因素方面,人均水资源量与农业用水效率负相关,农作物总播种面积与用水效率同向变动,体现了规模经济。在节水灌溉技术因素方面,节水灌溉面积与用水效率正相关,在低用水区,除了在经济发达的城市农业占比少以外,低用水区大多面临了严重的水资源危机,节水灌溉技术能更好地利用水资源,故在该区域,政府和人民往往乐于采取节水灌溉技术。在基础设施和气象因素方面,前者与用水效率负相关,后者与用水效率正相关。而在结构因素方面,一产所占比重通过显著性检验,且与用水效率之间是正向变动关系,而在该区域稻谷作为耗水性作物,往往较少生产或者不种植来减少水资源的消耗。

六、结论和政策建议

(一) 主要结论

在水危机日益加剧的今天,农业作为用水大户,提高农业生产对水资源的高效利用已然成为一个刻不容缓的问题。本文基于 2005-2015 年中国 30 个省份的面板数据,使用较新颖的 DEA 方法中的 MinDW 模型对农业用水效率进行估计,并分为全国和高、中、低用水区来分层次地分析,同时又利用随机效应 Tobit 模型对可能影响农业用水效率的主要因素作计量检验。主要结论如下:

(1) 在农业用水效率方面,尽管人们的节水意识和节水技术有所提升,农业用水效率仍然有很大的提升空间,且用水效率在不同区域和不同年份都有较大差异。对于全国来说,在至前沿的最近距离假定下,平均综合用水效率约为 0.70,即还有相对 30%的水量是无效使用的。对于各个地区来说,部分省市能够始终位于前沿有效面上,然而大部分省市是远低于平均水平,甚至存在绝大部分农业水资源是与生产无关。

对于不同用水区来说,可以发现综合用水效率是中用水区最高,高用水区次之,低用水区最低的结论,且在不同用水区区内,能够发现高用水区和中用水区的用水规模效率高于纯技术用水效率,用水规模效率的影响更加明显,低用水区则是纯技术用水效率明显高于用水规模效率,纯技术用水效率对综合用水效率的作用更大一些。这也与实际情况相符合,在水资源丰富的地区,水资源使用压力小,人们的节水意识不够强烈,浪费水的情况会相对普遍,同时,作物生产规模相对大,规模经济效益大。在水资源相对短缺的地区,农业用水压力大,节水意识和节水技术都有所提高,纯技术用水效率相对于用水规模效率较高。

(2) 对可能影响农业用水效率的因素,本文通过使用 Tobit 模型进行了固定效应和随机效应的计量分析,且应用 Bootstrap 方法来得到更加稳健的结果。农作物总播种面积、年平均气温、年平均相对湿度、稻谷比重通过了 1%的显著性检验,第一产业所占比重和降水量在 5%显著性水平下通过检验。其中,降水量、年平均气温、年平均相对湿度、第一产业所占比重和稻谷所占比重与农业用水效率间呈现正相关关系,人均水资源量与农业用水效率间呈现负相关

关系。不同用水区的回归结果虽有相似,但也体现出区域农业用水效率的异质性特点。

(二) 政策建议

针对本文研究所得的结论,可为不同地区提高农业用水效率提供一定的依据。根据结论,提出以下提高水资源有效利用的政策建议:

(1) 在不同用水区要有侧重点地开展水资源利用管理方案,不同区域资源禀赋差异比较大,可以根据地区差异制定有区别的、分阶段的、符合地区特色的管理方案,并循序渐进地开展,进而扩展到全国。

(2) 自然地理因素和水资源禀赋仍然是用水效率的重要影响因素,但并不是唯一的因素,因地制宜的基础设施和适当的作物种植结构也会影响区域的农业用水效率。对作物结构进行优化,例如在水资源并不十分丰富的区域,尽量减少高耗水性作物的种植,以及充分考虑成本后再采取节水技术或者完善基础设施建设将会更加有利于水资源的高效利用。

(3) 设定合理的用水价格,让水资源不再是免费取用的资源,从而充分调动起用水者的节水积极性。鼓励减少水资源污染和水资源循环使用,加强水资源管理,从制度层面保证农业用水综合效率的提高。

参考文献:

- [1] 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(02): 85-90.
- [2] 李静, 马潇霖. 资源与环境双重约束下的工业用水效率——基于 SBM-undesirable 和 Meta-frontier 模型的实证研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 920-933.
- [3] 梁静溪, 张安康, 李彩凤. 基于权重约束 DEA 和 Tobit 模型农业灌溉用水效率实证研究——以黑龙江省为例[J]. 节水灌溉, 2018, (04): 62-68.
- [4] 马光明. 国内外农田节水灌溉发展现状与技术前沿[J]. 农业与技术, 2015, (16): 47-50.
- [5] 孟令杰. 中国农业产出技术效率动态研究[J]. 农业技术经济, 2000, (5): 1-4.
- [6] 田伟, 柳思维. 中国农业技术效率的地区差异及收敛性分析——基于随机前沿分析方法[J]. 农业经济问题, 2012, (12): 11-18+110.
- [7] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 秦腾, 刘高峰. 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.
- [8] 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): 11-28.
- [9] 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, (03): 10-18+110.
- [10] 俞雅乖, 刘玲燕. 中国水资源效率的区域差异及影响因素分析[J]. 经济地理, 2017, 37(07): 12-19.
- [11] 赵凯, 孙天合. 滴灌技术下的农业用水配置效率评价研究——基于杨凌示范区温室大棚的数据[J]. 节水灌溉, 2014, (12): 71-75.
- [12] Ali, M. H., L. T. Shui, K. C. Yan, A. F. Eloubaidy, and K. C. Foong. Modeling Water Balance Components and Irrigation Efficiencies in Relation to Water Requirements for Double-cropping Systems [J]. Agricultural Water Management, 2000, 46(2): 167-182.

[13] Dhehibi, B., L. Lachaal, M. Ellourni, and E. B. Messaoud. Measuring Irrigation Water Use Efficiency Using Stochastic Production Frontier: An Application on Citrus Producing Farms in Tunisia[J]. African Journal of Agricultural and Resources Economics, 2007, 1(2):1-15.

[14] Kaneko, S., K. Tanaka, T. Toyota, and S. Managi. 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.

[15] Lilienfeld, A. and M. Asmild. Estimation of Excess Water Use in Irrigated Agriculture: A Data Envelopment Analysis Approach[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1-3): 73-82.

[16] Pereira, H. and R. C. Marques. An Analytical Review of Irrigation Efficiency Measured Using Deterministic and Stochastic Models[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 28-35.

[17] Speelman, S., M. Dhaese, J. Buysse, and L. Dhaese. Technical Efficiency of Water Use and Its Determinants, Study at Small-scale Irrigation Schemes in North-West Province, South Africa[R]. 2015.

Agricultural Water Utilization Efficiency and Its Influencing Factors in China: Based on MinDW Model

Li Jing^a and Xu Deyu^b

(a: School of Economics, Hefei University of Technology; b: School of Economics, Zhejiang University)

Abstract: Agriculture has always been the main water-consuming sector. At the same time, the unequal distribution and inefficient use of water resources in China has restricted the development of agriculture for a long time. In addition to the environmental constraints of agricultural non-point source pollution, all of these lead to the continuous deterioration of the contradiction between supply and demand of agricultural water resources. Based on a new DEA frontier model to overcome the shortcomings of the traditional DEA model and the SBM model based on the slacks measure, this paper investigates the agricultural water use efficiency and scale fluctuations in different agricultural regions and decomposes it into pure technical efficiency and scale efficiency. Moreover, the paper uses the Tobit model to measure the determinants of agricultural water efficiency. The results show that the national comprehensive water use efficiency have a large potential to save water, which has the characteristics of large fluctuations in space and time. There is a large difference between pure technical water use efficiency and scale efficiency among different water use zones. The empirical test of water efficiency determinants shows that regional water endowment is not the only factor affecting it. Therefore, it is necessary to carry out the water resources management system, the appropriate scale management and try to establish a reasonable water price mechanism for agriculture in different regions, which will help improve the efficiency of agricultural water use.

Keywords: Agricultural Water Utilization Efficiency; Spatial Heterogeneity; MinDW Model; Influencing Factors

JEL Classification: Q25

(责任编辑:朱静静)