

西北干旱区作物灌溉技术效率及影响因素

李贵芳¹, 周丁扬², 石敏俊³

(1. 中国人民大学经济学院, 北京 100872; 2. 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875; 3. 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058)

摘要: 水资源短缺是制约西北干旱区可持续发展的硬约束, 提高作物灌溉技术效率、压缩农业灌溉用水是缓解水资源供需矛盾的可能途径之一。基于2014年张掖市农户调研数据, 采用DEA-Tobit模型, 分析了黑河流域中段不同类型灌区作物灌溉技术效率及其影响因素。结果表明: (1) 典型灌区主要作物灌溉技术效率均存在改进空间, 节水潜力较大。在其他投入保持不变的情况下, 如果典型灌区主要作物灌溉技术效率达到目前的最高水平, 平原灌区生产同样产量的制种玉米和大田玉米, 灌溉用水可分别减少34.47%和38.15%; 北部荒漠灌区生产同样产量的棉花、制种西瓜和玉米套小麦, 灌溉用水可分别减少48.42%、34.82%和22.99%; 沿山灌区生产同样产量的小麦、马铃薯、大麦和大田玉米, 灌溉用水可分别减少14.48%、30.75%、25.50%和35.96%。(2) 不同灌区之间作物灌溉技术效率的变异系数与作物种植面积占比呈负向关系, 同一灌区内部种植相同作物的农户生产管理水平存在明显差异。(3) 农地细碎化程度和农户耕地面积扩大会降低作物灌溉技术效率, 改善耕地质量能提高北部荒漠灌区作物灌溉技术效率, 增加井水灌溉会提高平原灌区大田玉米和沿山灌区作物灌溉技术效率, 灌溉次数与多数作物灌溉技术效率呈“倒U型”关系, 而农户耕作需求及其对风险态度的影响需结合具体情况进行判断。合理确定种植规模、加快农地空间优化, 因地制宜地改善耕地质量, 完善水利设施、合理使用井灌、增强河水灌溉放水的灵活性, 是提升黑河流域作物灌溉技术效率的主要途径。

关键词: 张掖市; 黑河流域; 典型灌区; 作物灌溉技术效率; DEA-Tobit模型

西北干旱区面临水资源供给有限的硬约束, 随着人口增加和经济发展, 用水需求持续增长, 水资源供需矛盾日趋尖锐, 实施用水总量零增长战略, 是缓解水资源供需矛盾的唯一出路。为了实现用水总量零增长, 不同部门之间的用水矛盾将会更趋激烈。由于用水总量中农业用水占比高达90%左右, 提高农业用水效率, 压缩农业用水, 将成为节水型社会建设中不可避免的政策选择^[1-2]。过去十多年来, 西北干旱区通过推进农业供给侧结构性改革, 调整作物种植结构, 对于提高农业用水效率发挥了积极的作用。然而, 从作物灌溉技术效率的视角出发, 研究如何提高农业灌溉用水效率, 相对而言关注较少。因此, 本文着眼于提高作物灌溉技术效率, 以黑河流域为例, 客观测度作物灌溉技术效率的现状, 考察影响作物灌溉技术效率的主要因素, 以期为提高作物灌溉技术效率、改进流域水资源管理提供科学参考。

灌溉用水效率被界定为在产出和其他投入要素不变的前提下, 可能达到的最小灌溉

收稿日期: 2018-08-09; 修订日期: 2019-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91325302)

作者简介: 李贵芳 (1990-), 女, 河南汤阴人, 博士研究生, 研究方向为区域可持续发展。

E-mail: liguifang55@163.com

通讯作者: 石敏俊 (1964-), 男, 浙江新昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市可持续发展与环境管理。E-mail: mjshi@zju.edu.cn

用水量与实际灌溉用水量之比^[3]。已有研究^[4-5]大多选取土地、劳动、资金、水资源等为投入指标,农作物收入为产出指标,来测度灌溉用水效率。譬如,Speelman等^[6]以作物收入为产出指标,采用数据包络分析法(DEA)测度水资源利用效率,但没有剔除作物结构差异和市场价格波动对农作物收入的影响。韩洪云等^[7]利用甘肃省张掖市山丹县马营河灌区和内蒙古包头市磴口黄河扬水灌区432份农户的数据,采用DEA方法,测度了小麦生产的灌溉用水效率,但没有排除不同区域自然因素和灌溉方式的差异对结果的影响。Njiraini等^[8]以肯尼亚奈瓦沙湖2010年201份蔬菜种植农户数据为样本,采用DEA方法,测度灌溉用水效率,但该研究以农户为决策单元,忽略了农户之间作物种植结构的差异和市场价格波动对农作物收入的影响。由于作为产出指标的农作物收入容易受到作物结构差异和市场价格波动的影响,难以体现真正的灌溉技术效率,因此需要引入作物灌溉技术效率的概念,剔除作物结构和市场价格对灌溉用水效率带来的影响。

作物灌溉技术效率是属于生产技术效率^[9-11]范畴的概念,可以界定为:在控制自然因素、耕种方式、作物种植结构的差异,并剔除市场价格波动等因素的影响的条件下,以作物产量为产出指标,单位作物灌溉用水可以实现的最大作物产出的能力。与已有的灌溉用水效率分析相比,灌溉技术效率剔除了由于不同区域的自然因素(如气候、海拔、降水等)和耕种条件(如灌溉方式)、作物种植结构差异、市场价格波动等外部因素对灌溉用水效率的影响,可以真实客观地反映灌溉技术效率的高低^[12]。

在实际运用中,灌溉技术效率往往被界定为在作物产量和其他投入要素固定不变的前提下所得到的灌溉用水最低使用量与实际使用量的比值。因此,随机前沿法(SFA)^[13-14]和DEA^[15]是最常用的灌溉技术效率的测度方法。由于DEA考虑了投入和产出要素的关系^[16],相比SFA,具有无需事先设定函数形式和误差项分布,可以避免主观因素影响的优点,并且不用假定投入产出之间的关系^[17],对于矢量效率的测算具有更大灵活性^[18-19]。本文也将采用DEA技术来测度灌溉技术效率。

关于灌溉技术效率的影响因素,已有研究大多从人口社会学特征、种植特征、灌溉条件及水资源管理制度等方面进行分析。譬如,Dhehibi等^[20]以尼泊尔和突尼斯144个柑橘种植农户为样本,发现灌溉技术效率与户主年龄、受教育水平、农业培训、农户规模和农户对水资源可利用程度等因素密切相关;Frija等^[21]以突尼斯Teboulba地区内布哈州灌区种植温室大棚蔬菜的小型灌溉农户为样本,认为农业培训、节水和农田施肥技术的推广有助于提高灌溉技术效率;许朗等^[22]以安徽省蒙城县2010年小麦种植农户的数据为样本,认为提升农户种植经验、规模化生产、提高节水意识、推广井水灌溉、调整水价等有助于提高灌溉技术效率;黄季焜等^[23]以中国中东部5省为例,通过建立灌溉效率和影响因素的函数关系,发现灌溉水源和水利设施、家庭生产投入、气候变化等对小麦灌溉技术效率有正向影响。归纳起来,生产技能培训、农户规模、灌溉水源和灌溉技术是影响灌溉技术效率的主要因素。此外,Coventry等^[24]、Jin等^[25]考虑农户风险识别、耕作需求等因素的影响,发现农户耕作需求和对风险态度会在一定程度上影响灌溉行为。在影响因素分析的模型选择上,由于DEA得到的作物灌溉技术效率是处于0和1之间的连续变量,这意味着被解释变量观测值存在最高和最低值的限定,针对这类“归并问题”,Tobin提出利用最大似然法估计(MLE)的Tobit模型,为解决该问题提供了稳健的估计方法^[20-23]。此外,Bootstrap截断自助回归模型^[26]和CLAD模型^[27]也被运用于该类分析中。

本文拟以张掖市典型灌区为研究区域,利用2014年农户调研数据,以作物单位面积产量为产出指标,分区域分作物构建“投入导向”的子矢量DEA-C²R技术效率模型,在

控制自然因素、耕种条件、作物结构差异和市场价格波动等因素的条件下,测度作物灌溉技术效率,并采用Tobit模型,考察农户的人口社会学特征、生产管理经验和耕作需求和风险态度等因素对作物灌溉技术效率的影响。本文的主要贡献在于在控制自然因素、耕种条件、作物结构差异和市场价格波动等因素的条件下测度作物灌溉技术效率,进而分析灌溉技术效率的影响因素,有助于准确把握作物灌溉技术效率及其影响因素,可为提升西北干旱区的作物灌溉技术效率、改进流域水资源管理提供科学参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

张掖市位于黑河流域中游,海拔1200~5565 m,按地貌特征,大体可分为祁连山区、走廊平原区和北部荒山区。下辖甘州区、临泽县、高台县、山丹县、民乐县、肃南裕固族自治县6个区/县。其中,肃南县属黑河上游地区,以牧业为主;甘州区和临泽县属中游干流平原灌区,高台县属中游干流北部荒漠灌区,民乐县和山丹县属中游沿山灌区,均为灌溉农业区。由于不同灌区的自然因素和耕种条件差异较大,导致灌区间作物结构空间异质性比较明显。平原灌区因水热资源充裕、土壤肥沃、灌溉条件较好,以制种玉米、大田玉米和蔬菜种植为主;北部荒漠灌区因降水较少、蒸发量大、地下水位高、土壤盐碱化严重、灌溉条件相对较差,以棉花、玉米套小麦、制种西瓜为主;沿山灌区由于海拔高、温度较低、降水相对充裕,以种植小麦、马铃薯、大麦等为主。

2017年,张掖市第一产业占GDP的比例为25.03%,远高于全国7.9%的平均水平,可见绿洲农业仍是地区经济发展的支柱产业。但张掖市历年农业用水平均占比89%,高于全国61%的平均水平,其中,灌溉用水占比高达95%。由于甘州区、高台县和民乐县的耕地面积占比为67.72%,农业用水占比高达75%,是张掖市水资源的主要消耗区^[28],因此以平原灌区甘州大满灌区和盈科灌区、北部荒漠灌区高台罗城灌区和沿山灌区民乐益民灌区为重点研究区域,探讨典型灌区主要作物灌溉技术效率的差异及其影响因素。

1.2 数据来源

为全面反映典型灌区主要作物的投入产出特征,选择甘州区小满镇康宁村、店子闸村、小满村和甘州区长安乡万家墩村、洪兴村、前进村、八一村、河满村,高台县罗城乡罗城村、花墙子村、河西村,民乐县三堡镇三堡村、韩庄村等4个乡镇13个村庄为典型样本点(图1)。2014年6-9月,按照全面覆盖典型样本点的原则,对3个典型灌区13个村庄开展了3次农户调查,采集了2013年农户主要作物的投入产出和家庭收支的数据,共收集到1402份有效调查问卷。其中,甘州区小满镇典型村共392份(占比27.96%),甘州区长安乡典型村共331份(占比23.61%),高台县罗城乡典型村共320份(占比22.82%),民乐县三堡镇典型村共359份(占比25.61%)。3个典型灌区的主要作物和灌溉方式如表1所示。其中,采用漫灌技术的典型灌区主要作物调研问卷有效率为94%,符合模型要求;但采用滴灌技术的问卷很少,不符合模型要求。本文重点研究漫灌方式下典型灌区主要作物的灌溉技术效率,影响因素不再考虑灌溉方式的差异。

1.3 DEA模型构建与指标说明

1.3.1 DEA模型构建

基于DEA的基本原理^[29-30],Färe等^[31]提出了“Sub-vector Efficiency”,即子向量效率,为计算单一投入要素的技术效率提供了理论依据,且该模型更贴近农户现实生产^[32]。

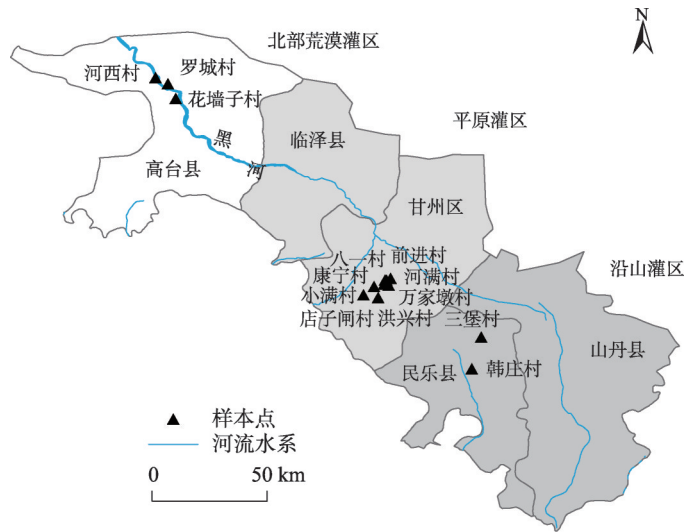


图1 研究区样本点分布概况

Fig. 1 Survey site and sample distribution

表1 典型灌区主要作物调研问卷分布情况

Table 1 Farmers survey questionnaire distribution of the TECI in the typical irrigation zones

灌区类型	作物类型	采用漫灌技术的调研问卷分布	采用滴灌技术的调研问卷分布
平原灌区	制种玉米	327	0
	大田玉米	128	11
北部荒漠灌区	棉花	115	10
	制种西瓜	88	0
	玉米—小麦	201	6
沿山灌区	小麦	256	0
	马铃薯	80	0
	大麦	115	0
	大田玉米	91	0

本文引入子矢量效率模型，在产出和其他投入要素不变的前提下，将某种作物的灌溉用水量与对应的生产前沿面上的生产单元的灌溉用水量进行对比，以测度作物不同生产单元灌溉技术效率的相对高低。基于投入导向的子矢量DEA-C²R技术效率模型如下：

$$\begin{aligned} &\min \theta^w \\ &s.t. \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{rk} \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^w \leq \theta^w x_j^w \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^{m-w} \leq x_j^{m-w} \\ &\lambda \geq 0; i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \tag{1}$$

式中： n 代表决策单元（Decision Making Unit，简记为DMU）的个数；每个DMU有 m

种投入, 计为 $i=1, 2, 3, \dots, m$; q 种产出, 计为 $r=1, 2, 3, \dots, q$ 。模型的最优解 θ^w 代表作物灌溉技术效率值, 取值范围为 $(0, 1]$, $\theta^w=1$ 意味着 DMU 位于生产前沿面上, 是技术有效的; λ 是 $N \times 1$ 阶常数向量, 表示 DMU 的线性组合系数; 第一个约束条件确保第 j 个农户的作物产量小于生产边界上该作物的产量; 第二个约束条件是仅对水资源进行的约束; 第三个约束条件是对除水资源之外的其他投入要素进行约束。

1.3.2 指标说明

本文以不同灌区主要作物生产和投入情况的调研样本为决策单元, 控制了不同灌区之间自然因素、耕种条件、种植结构、市场价格的影响, 保证不同生产单元生产技术行为的相似和可比性。由于在生产过程中土地、水资源、劳动和资金是相互联系、相互作用的有机整体, 本文的投入产出指标均采用单位面积数据, 即将单位面积的土地投入作为固定投入, 灌溉用水和其他投入作为可变投入要素纳入模型。具体指标为: 产出指标为作物亩均产量, 投入指标包括单位面积土地、劳动投入、灌溉用水、种子投入、农药投入、地膜投入、化肥投入、农机投入 (表2、表3)。投入产出指标之间的方差膨胀因子不超过5, 符合研究要求。

1.4 Tobit模型构建

作物灌溉技术效率值处于0和1之间, 是典型“归并回归”问题, 采用经典OLS估计, 会导致参数估计量的偏误, 因此本文利用基于最大似然法估计 (MLE) 的Tobit模型进行分析, 具体函数式如下:

$$\begin{aligned} \ln TECI_{ij} = & \beta_0 + \beta_1 \ln AGE_{ij} + \beta_2 D1_{ij} + \beta_3 \ln AL_{ij} + \beta_4 \ln FLA_{ij} + \beta_5 \ln SI_{ij} \\ & + \beta_6 \ln D2_{ij} + \beta_7 D3_{ij} + \beta_8 \ln IN_{ij} + \beta_9 (\ln IN)_{ij}^2 + \beta_{10} D4_{ij} + \beta_{11} D5_{ij} \\ & + \beta_{12} D6_{ij} + \beta_{13} \ln AIR_{ij} + \beta_{14} \ln CT_{ij} + \beta_{15} \ln CP_{ij} + \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

$$TECI_{ij} = \begin{cases} 0, & TECI_{ij} \leq 0 \\ \ln TECI_{ij}, & 0 < TECI_{ij} \leq 1 \\ 1, & TECI_{ij} > 1 \end{cases}$$

式中: i 和 j 表示灌区和农户 ($i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3, \dots, n$); $TECI$ (Technical Efficiency of Crop Irrigation) 为作物灌溉技术效率; ε 为误差项; β 为待估参数。结合相关文献^[9,20-24]及实地调研情况, 将影响变量分为三类 (表4)。

(1) 农户人口社会学特征。一般认为农户种植经验越丰富、学习和接受能力越强、家庭农业劳动力越多, 越有利于提高作物灌溉技术效率^[20-21], 因此选择户主年龄、户主受教育水平、家庭农业劳动力人数等反映农户人口社会学特征变量对作物灌溉技术效率的影响。

(2) 农户生产管理特征。首先, 耕地是农业生产的基础, 农户耕地规模、地块在空间上的分散程度以及耕地质量等都与灌溉技术效率息息相关^[6]。一般认为, 小规模农户更有助于精耕细作, 提高灌溉技术效率, 选择“农户耕地面积”反映农户生产规模对灌溉技术效率的影响; 农地的空间集中程度越高, 越有助于提高灌溉技术效率, 选择“农地细碎化程度”反映农地空间集中程度对灌溉技术效率的影响^[33]; 耕地质量越高, 即土地平整度越高、土壤保水保肥特性越好、土壤盐碱度越低, 越有助于提高灌溉技术效率, 选择“耕地质量”作为影响灌溉技术效率的主要变量之一。其次, 一般认为根据作物需水规律进行合理灌溉有助于提升灌溉技术效率, 但频繁灌溉会产生副作用, 因此选择灌溉水源^[22]反映灌溉条件的影响, 并引入灌溉次数及二次项验证灌溉次数与灌溉技术效率

表2 典型灌区主要作物投入产出指标描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of main crops' input-output indicators in the typical irrigation zones

灌区	作物类型和指标		劳动/ (天/亩)	灌溉用水/ (m ³ /亩)	种子/ (元/亩)	农药/ (元/亩)	地膜/ (元/亩)	化肥/ (元/亩)	农机/ (元/亩)	作物产出/ (kg/亩)
平原灌区	制种玉米	平均值	7.55	807.20	71.97	49.00	38.59	256.45	100.10	962.10
		最大值	25.00	1146.67	120.00	200.00	75.60	433.28	400.00	1400.00
		最小值	2.50	537.50	40.00	0	0	64.02	0	450.00
		标准差	7.22	788.33	72.00	50.00	37.20	258.36	105.00	1000.00
	大田玉米	平均值	7.13	721.06	66.60	46.69	51.84	254.98	194.73	747.06
		最大值	30.67	1600.00	135.00	260.00	120.00	634.87	555.00	1300.00
		最小值	1.22	333.33	16.00	0	0	0	0	500.00
		标准差	6.00	666.67	64.00	30.00	60.00	267.68	220.00	750.00
	北部荒漠灌区	平均值	13.73	432.33	87.22	37.38	49.63	215.76	53.13	156.32
		最大值	53.00	610.00	200.00	300.00	78.00	450.00	400.00	350.00
		最小值	5.00	401.67	24.00	0	30.00	0	0	55.50
		标准差	11.00	427.00	84.00	30.00	48.00	189.36	0	150.00
沿山灌区	制种西瓜	平均值	6.32	437.99	40.97	63.93	18.31	248.04	34.89	31.07
		最大值	29.00	610.00	150.00	300.00	70.00	774.58	180.00	58.00
		最小值	1.75	406.67	10.00	0	0	0	0	10.00
		标准差	4.50	423.95	39.75	50.00	0	227.53	0	30.25
	小麦	平均值	3.38	431.42	113.59	12.10	0	186.00	73.13	484.28
		最大值	32.25	1333.33	176.00	50.00	0	418.62	200.00	600.00
		最小值	0.88	254.17	76.00	0	0	0	0	300.00
		标准差	2.33	381.25	112.00	10.00	0	175.44	80.00	500.00
	马铃薯	平均值	11.70	417.37	441.81	37.16	53.82	255.44	80.44	2588.13
		最大值	56.50	666.67	640.00	150.00	195.00	596.27	250.00	4000.00
		最小值	0.79	254.17	245.00	0	0	90.81	0	1000.00
		标准差	9.80	381.25	455.00	20.00	46.80	243.10	80.00	2500.00
	大麦	平均值	3.61	416.98	78.00	12.19	0	186.23	65.74	490.00
		最大值	12.67	1047.92	98.67	50.00	0	472.76	190.00	650.00
		最小值	1.00	254.17	30.00	0	0	0	0	400.00
		标准差	3.00	305.00	80.17	10.00	0	181.15	50.00	500.00
	大田玉米	平均值	7.49	517.45	60.31	11.67	34.04	211.75	39.07	575.27
		最大值	27.00	1575.00	220.00	50.00	169.00	468.84	230.00	800.00
		最小值	1.17	203.33	10.00	0	0	0	0	400.00
		标准差	7.00	381.25	50.00	10.00	39.00	199.62	40.00	600.00

之间的关系。最后，考虑种子和化肥是体现农户生产管理水平的的重要因素，一般认为杂交种更有利于提升灌溉技术效率，但水和肥的关系较难衡量^[21]，因此借助虚拟变量D4和D5反映种子类型和化肥使用量的影响。

(3) 农户耕作需求及对风险态度。一般认为农户扩大生产规模的需求以及家庭对农业收入依赖程度可能会影响作物灌溉技术效率^[24]，因此选择土地流入和家庭农业收入占比等变量反映其作用；同时，考虑农户规避风险、追求高收益的特征可能会影响农户种

表3 北部荒漠灌区玉米套小麦投入产出指标描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of corn-wheat input-output indicators in the northern desert irrigation zone

投入产出指标	北部荒漠灌区玉米套小麦			
	平均值	最大值	最小值	标准差
玉米劳动投入/ (天/亩)	6.36	35.00	0.80	5.00
小麦劳动投入/ (天/亩)	5.10	25.00	1.14	4.00
灌溉用水/ (m ³ /亩)	440.97	854.00	254.17	424.97
玉米种子投入/ (元/亩)	49.80	180.00	27.00	45.00
小麦种子投入/ (元/亩)	67.76	91.80	30.60	61.20
农药投入/ (元/亩)	39.06	300.00	0	30.00
地膜投入/ (元/亩)	10.30	65.00	0	0
化肥投入/ (元/亩)	246.87	567.43	0	242.87
农机投入/ (元/亩)	25.02	210.00	0	0
玉米产量/ (kg/亩)	465.66	700.00	225.00	500.00
小麦产量/ (kg/亩)	313.95	500.00	200.00	300.00

表4 典型灌区主要作物灌溉技术效率主要影响变量及其含义

Table 4 The main determinants and their specific meaning of the TECI in the typical irrigation zones

变量类型	影响因素	变量名	具体含义
农户人口社会学特征	户主年龄	$\ln AGE$	户主实际年龄的对数, 反映农户种植经验的影响
	户主受教育水平	$D1$	$D1=1$ 户主接受过初等及以上教育; 否则 $D1=0$
	家庭农业劳动力人数	$\ln AL$	家庭农业劳动力人数的对数
农户生产管理特征	农户耕地面积	$\ln FLA$	农户总耕地面积的对数, 反映农户生产规模的影响
	农地细碎化程度	$\ln SI$	用辛普森多样性指数的对数 (Simpson Index, $\ln SI$) 表示农地细碎化程度, 反映农户耕地空间集中程度对灌溉技术效率的影响
	耕地质量	$D2$	$D2=1$ 好地; $D2=0$ 差地
	灌溉水源	$D3$	$D3=1$ 井水灌溉; $D3=0$ 河水灌溉
	灌溉次数	$\ln IN$	作物灌溉次数的对数和作物灌溉次数对数的二次项, 验证灌溉次数与灌溉技术效率之间的关系
	灌溉次数的二次项	$(\ln IN)^2$	
	种子类型	$D4$	$D4=1$ 有使用杂交种的情况; 否则 $D4=0$
	化肥使用量	$D5$	$D5=1$ 作物化肥使用量大于灌区内同种作物的平均使用量; 否则 $D5=0$
农户耕作需求及对风险态度	土地流入	$D6$	$D6=1$ 农户有土地流入情况; 否则 $D6=0$ 。反映耕作需求的影响
	家庭农业收入占比	$\ln AIR$	家庭农业收入占比的对数, 反映农户对农业收入依赖程度的影响
	作物种类数	$\ln CT$	农户种植作物种类数的对数, 反映农户对待风险的态度影响
	作物价格	$\ln CP$	作物市场价格的对数, 反映作物市场价格波动的影响

植结构和灌溉行为^[25], 因此选择作物种类数和作物价格等作为代表性指标。

经检验, 影响变量之间的方差膨胀因子均不超过 5, 说明不存在多重共线性; 模型扰动项服从正态分布, 通过取对数和采用稳健检验的操作对异方差进行处理。

2 结果分析

2.1 灌溉技术效率结果说明

根据本文构建的子矢量 DEA 模型和调研数据, 运用 MaxDEA 软件, 测算了不同灌区

主要作物灌溉技术效率（表5），结果表明：

表5 典型灌区主要作物灌溉技术效率描述性统计
Table 5 Descriptive statistics of the *TECI* in the typical irrigation zones

灌区类型	作物类型	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数
平原灌区	制种玉米	0.6553	1.0000	0.3068	0.6442	0.2580
	大田玉米	0.6185	1.0000	0.1399	0.5939	0.4558
北部荒漠灌区	棉花	0.5158	1.0000	0.1708	0.4503	0.4316
	制种西瓜	0.6518	1.0000	0.1765	0.6120	0.3366
	玉米—小麦	0.7701	1.0000	0.2381	0.7857	0.2659
沿山灌区	小麦	0.8552	1.0000	0.2163	1.0000	0.2757
	马铃薯	0.6925	1.0000	0.1906	0.6653	0.4084
	大麦	0.7450	1.0000	0.2138	0.7949	0.3371
	大田玉米	0.6404	1.0000	0.0861	0.6523	0.4714

第一，主要作物灌溉技术效率均存在改进空间，说明减少农业灌溉用水在一定程度上是可行的。作物灌溉技术效率等于1的DMU处于农业生产前沿面上，实现了灌溉用水的最有效利用，除此之外的其他DMU均处于生产的相对无效状态，说明灌溉用水存在改进空间。即在其他投入保持不变的情况下，如果某种作物的灌溉技术效率达到目前的最高水平，生产同样产量的该种农作物，灌溉用水可以减少的空间。由此得到：（1）平原灌区制种玉米和大田玉米的灌溉技术效率平均值为0.6553和0.6185，说明灌溉用水可分别减少34.47%和38.15%。即制种玉米和大田玉米的亩均灌溉用水可由目前的807.20 m³和721.06 m³，分别压缩用水量278.24 m³和275.08 m³。（2）北部荒漠灌区的棉花、制种西瓜、玉米套小麦灌溉技术效率平均值分别为0.5158、0.6518和0.7701，说明灌溉用水可分别减少48.42%、34.82%和22.99%。即棉花、制种西瓜和玉米套小麦的亩均灌溉用水可由目前的432.33 m³、437.99 m³和440.97 m³，分别压缩用水量209.33 m³、152.94 m³和101.38 m³。（3）沿山灌区的小麦、马铃薯、大麦和大田玉米灌溉技术效率平均值为0.8552、0.6925、0.7450、0.6404，说明灌溉用水可分别减少14.48%、30.75%、25.50%和35.96%。即小麦、马铃薯、大麦和大田玉米的亩均灌溉用水可由目前的431.42 m³、417.37 m³、416.98 m³和517.45 m³，分别压缩用水量62.47 m³、128.34 m³、106.33 m³和186.08 m³。

第二，不同灌区作物灌溉技术效率的变异程度与该作物的种植面积占比呈负向关系，灌区内部相同作物的农户之间生产管理水平存在较大差异。不同灌区主要作物灌溉技术效率变异系数由高到低依次为：沿山灌区大田玉米为0.4714，平原灌区大田玉米为0.4558，北部荒漠灌区棉花为0.4316，这些作物的种植面积占比相对较低；沿山灌区马铃薯为0.4084，大麦和北部荒漠灌区制种西瓜比较接近，分别为0.3371和0.3366，种植面积占比较大；沿山灌区小麦、北部荒漠灌区玉米套小麦和平原灌区制种玉米的种植面积占比最大，变异系数却相对较小，分别为0.2757、0.2659、0.2580。一定程度上表明，在同一灌区内部，规模化种植某种作物有利于缩小不同决策单元灌溉技术效率的差异。

表6给出的典型灌区主要作物灌溉技术效率频度分布，旨在说明同一作物不同决策单元灌溉技术效率的分布差异情况。其中，平原灌区62.39%的制种玉米种植户的灌溉技术效率处于0.50~0.75之间，呈两头轻、中间重，大田玉米农户大多分布在两端，仅有

表6 典型灌区主要作物灌溉技术效率频度分布

Table 6 Frequency distribution of the TECI in the typical irrigation zones

灌溉 技术效率	平原灌区制种玉米		平原灌区大田玉米		北部荒漠区棉花		北部荒漠区制种西瓜		北部荒漠区玉米—小麦	
	DMU	占比/%	DMU	占比/%	DMU	占比/%	DMU	占比/%	DMU	占比/%
0~0.25	0	0	12	9.23	9	7.83	2	2.27	1	0.50
0.25~0.50	57	17.43	41	31.54	56	48.70	22	25.00	22	10.95
0.50~0.75	204	62.39	30	23.08	32	27.83	34	38.64	72	35.82
0.75~1.00	66	20.18	47	36.15	18	15.65	30	34.09	106	52.74
合计	327	100.00	128	100.00	115	100.00	88	100.00	201	100.00

灌溉 技术效率	沿山灌区小麦		沿山灌区马铃薯		沿山灌区大麦		沿山灌区大田玉米	
	DMU	占比/%	DMU	占比/%	DMU	占比/%	DMU	占比/%
0~0.25	1	0.39	2	2.50	4	3.48	14	15.38
0.25~0.50	30	11.72	23	28.75	18	15.65	19	20.88
0.50~0.75	45	17.58	19	23.75	25	21.74	23	25.27
0.75~1.00	180	70.31	36	45.00	68	59.13	35	38.46
合计	256	100.00	80	100.00	115	100.00	91	100.00

23.08%在0.50~0.75之间，与制种玉米相反呈两头重、中间轻；北部荒漠灌区棉花种植户有56.53%分布处于0~0.50之间，玉米套小麦农户有52.74%在0.75~1之间，呈反向的一头重分布，制种西瓜的分布则相对均匀；沿山灌区70.31%的小麦农户和将近60%的大麦农户处于0.75~1之间，与其他作物相较在同区间占比要高，而马铃薯和大田玉米的分布比较均匀。这说明，同一灌区内部种植相同作物的农户之间灌溉技术效率存在明显差异，导致该差异的主要原因可能是农户生产管理水平的不同。

2.2 影响因素结果说明

利用Stata 12.0得到回归结果，见表7。模型整体拟合效果较好，且Prob>F=0.000，说明回归方程总体显著，具有较强的解释力。主要影响变量的结果如下：

（1）农户人口社会学特征变量结果说明。农户种植经验影响有正有负，但大多影响较小且不显著，可能是因为农户年龄均值偏高、差异性较小，导致其不显著；而提高户主受教育水平和增加家庭农业劳动力人数对多数作物灌溉技术效率的提升具有正向作用。

（2）农户生产管理特征变量结果说明。首先，农户耕地面积的扩大和农地细碎化程度（显著水平为1%）的增加对作物灌溉技术效率具有负向作用，说明农户生产规模越大作物灌溉技术效率越低，耕地空间分散程度越高作物灌溉技术效率越低，该结论与预期相符，且与Speelman等^[6]的研究一致。由于北部荒漠灌区的大部分耕地存在土层较薄，保肥保水能力较差，土壤含有盐碱的情况，灌区内部相同作物的耕地质量差异比较明显，结果显示，耕地质量（显著水平5%）的改善有利于提高作物灌溉技术效率，该结论与实际相符。但是由于平原灌区和沿山灌区不同样本点的农户之间的耕地质量差异很小，导致耕地质量对灌溉技术效率的影响不明显。其次，井水灌溉有助于提高作物（平原灌区大田玉米和沿山灌区作物）灌溉技术效率，原因是井水灌溉比河水灌溉更灵活，有利于提高农户的生产管理水平，农户可以根据不同作物的需水规律灵活安排灌溉时间，增加产量，提升灌溉技术效率，与预期相符。但无论是井水灌溉还是河水灌溉，灌溉次数与大多数作物灌溉技术效率之间存在“倒U型”关系，这说明并不是灌溉次数越

表7 典型灌区主要作物灌溉技术效率影响因素 Tobit 回归结果

Table 7 Tobit regression results of determinants of the TECI in the typical irrigation zones

类型	影响 变量	平原灌区		北部荒漠灌区			沿山灌区			
		制种玉米	大田玉米	玉米—小麦	棉花	制种西瓜	小麦	马铃薯	大麦	大田玉米
人口 社会学 特征	β_0	-0.535 (0.97)	0.744 (3.20***)	1.066 (3.23***)	0.681 (1.94*)	0.014 (0.03)	0.866 (4.63***)	0.687 (5.04***)	-3.975 (-3.03***)	3.146 (1.71*)
	$\ln AGE$	0.041 (1.51)	0.021 (0.39)	-0.077 (-1.71*)	-0.008 (-0.28)	0.030 (0.98)	-0.027 (-0.61)	0.070 (1.82*)	0.595 (2.68***)	-0.585 (-1.31)
	$D1$	0.015 (1.35)	0.032 (1.07)	0.008 (0.44)	-0.010 (-0.38)	0.008 (0.34)	0.016 (0.85)	0.081 (2.10**)	0.182 (1.90**)	0.449 (2.51**)
生产 管理 特征	$\ln AL$	0.008 (0.59)	0.029 (0.86)	0.043 (1.98**)	0.058 (1.77*)	0.041 (1.09)	0.016 (0.79)	-0.013 (-0.24)	-0.084 (-0.80)	0.017 (0.08)
	$\ln FLA$	-0.034 (-2.78***)	0.007 (0.23)	-0.021 (-0.95)	-0.006 (-0.18)	-0.021 (-0.50)	-0.001 (-0.03)	0.023 (0.52)	0.100 (0.90)	-0.021 (-0.11)
	$\ln SI$	-0.109 (-2.35**)	-0.335 (-2.09***)	-0.369 (-3.13***)	-0.042 (-2.37**)	-0.186 (-3.69***)	-0.169 (-1.74*)	-0.820 (-2.49**)	-2.373 (-3.16***)	-3.865 (-4.15***)
	$D2$	—	—	—	0.073 (2.45**)	0.098 (3.06***)	—	—	—	—
	$D3$	—	0.076 (2.42**)	—	—	—	0.008 (0.36)	0.028 (0.49)	—	0.172 (0.63)
	$\ln IN$	0.161 (0.23)	0.125 (0.42)	-0.149 (-0.61)	-0.226 (-0.78)	0.648 (1.38)	0.020 (0.17)	0.124 (0.84)	1.102 (3.40***)	-1.190 (-1.50)
	$(\ln IN)^2$	-0.085 (-0.36)	-0.068 (-0.66)	0.039 (0.55)	0.120 (0.98)	-0.194 (-1.42)	-0.115 (-1.65)	-0.141 (-1.52)	-1.156 (-5.49***)	0.510 (1.08)
	$D4$	—	—	0.042 (2.27)	—	—	0.010 (0.54)	—	—	—
耕作 需求 及对 风险 态度	$D5$	-0.026 (-2.35**)	-0.032 (-4.75***)	-0.044 (-2.50**)	-0.060 (-2.28**)	-0.064 (-2.29**)	0.006 (0.38)	-0.091 (-2.69***)	0.150 (1.68*)	-0.011 (-0.07)
	$D6$	0.033 (1.65*)	0.021 (0.51)	-0.006 (-0.32)	0.073 (2.45**)	0.002 (0.05)	-0.043 (-0.88)	0.026 (0.52)	-0.168 (-0.83)	0.192 (0.46)
	$\ln AIR$	0.013 (1.46)	0.024 (1.74*)	-0.095 (-2.39**)	-0.022 (-0.82)	0.025 (0.42)	-0.060 (-1.17)	0.095 (0.69)	0.165 (0.52)	-0.017 (-0.08)
	$\ln CT$	—	0.017 (2.42)	0.098 (2.63***)	-0.047 (-0.72)	0.018 (0.34)	0.034 (1.32)	0.068 (0.95)	0.448 (2.38**)	0.721 (2.32**)
	$\ln CP$	-0.131 (-1.93**)	-0.025 (-0.16)	-0.003 (-0.02)	-0.117 (-0.77)	-0.055 (-1.22)	-0.173 (-1.91*)	0.091 (1.44)	2.275 (2.44**)	5.534 (3.86***)
	$\ln CP2$	—	—	0.109 (1.35)	—	—	—	—	—	—
套小麦										
LogLikelihood		301.639	58.777	160.613	73.297	66.720	157.841	39.392	-73.658	-79.106
Obs		327	128	201	115	88	253	80	115	91
Prob>F=		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注：*、**、***分别表示在10%、5%以及1%水平下显著；括号中的值为t值。

多，作物灌溉技术效率就越高，要以作物需水规律为前提进行科学灌溉，不能盲目地以增加水资源投入来换取作物产量的可能增加，该结论与预期相符，且与许朗等^[22]的研究结论一致。最后，使用杂交种更有利于提升小麦灌溉技术效率；多数作物灌溉技术效率不会因化肥投入超过灌区平均量而提高，说明要重视水肥匹配，不能盲目地增加化肥投入，需避免以肥定产。

(3) 农户耕作需求及对风险态度变量结果说明。农户强烈的耕作需求有助于提高大多数作物灌溉技术效率，虽符合预期，与 Coventry 等^[24]的研究结果一致，但需结合农户

已有的耕地规模和农地细碎化程度等情况对土地流入的影响进行分析。家庭对农业收入的高依赖程度则具有“两面性”，一方面，农户为了满足生活需求，获得较高的农业收入，会增强自身生产管理能力，提高灌溉技术效率；另一方面，农户盲目追求农业高收入，又会导致灌溉用水的增加，降低灌溉技术效率。就农户对风险的态度而言，一般农户是风险规避且追求高收益的，对自然灾害和市场价格的波动比较敏感，促使农户选择多元化的种植结构，以规避风险，提升灌溉技术效率；但农户为追求高收益，也会扩大作物种植面积，使灌溉用水量增加^[34]，并且目前灌溉用水边际成本比农作物收入边际收益要低，导致农户无节水动力。

3 结论与讨论

本文基于2014年张掖市典型灌区调研数据，对作物灌溉技术效率及其影响因素进行了分析，得到了以下结论。

第一，不同灌区主要作物的灌溉技术效率均存在改进空间。即在其他投入保持不变的情况下，如果典型灌区某种作物的灌溉技术效率达到目前的最高水平，生产同样产量的该种农作物，其灌溉用水均存在下降空间。其中，平原灌区制种玉米和大田玉米的灌溉技术效率平均值为0.6553、0.6185，灌溉用水可分别减少34.47%和38.15%；北部荒漠灌区棉花、制种西瓜、玉米套小麦灌溉技术效率平均值为0.5158、0.6518、0.7701，灌溉用水可分别减少48.42%、34.82%和22.99%；沿山灌区小麦、马铃薯、大麦和大田玉米灌溉技术效率平均值为0.8552、0.6925、0.7450、0.6404，灌溉用水可分别减少14.48%、30.75%、25.50%和35.96%。

第二，不同灌区农作物灌溉技术效率的变异程度与该作物的种植面积占比呈负向关系，灌区内部种植相同作物的农户生产管理水平存在明显差异。

第三，农地细碎化程度和农户耕地面积扩大不利于作物灌溉技术效率的提高；耕地质量改善有助于提高北部荒漠灌区作物灌溉技术效率；增加井水灌溉有助于提高平原灌区大田玉米和沿山灌区作物灌溉技术效率，灌溉次数与多数作物灌溉技术效率之间存在“倒U型”关系；超出灌区平均使用量的化肥投入会降低作物灌溉技术效率，农户耕作需求及其对风险态度的影响需结合具体情况进行判断。

本文研究结果为提升作物灌溉技术效率、改善黑河流域水资源管理，提供以下政策启示：

(1) 以提高作物灌溉技术效率为目标，合理确定种植规模，实现细碎农地的空间优化重组，因地制宜地改善耕地质量。考虑张掖市典型灌区间农户耕地面积存在一定差异且地块比较分散的现状，结合农户耕地面积和农地细碎化程度对作物灌溉技术效率呈负向作用的结论，认为合理确定农户生产规模并进行耕地资源空间优化重组是必要的^[35]。在实践中，应该鼓励土地流转，促进以农民自主型的“互换并地”。农户（或生产队）为主导型的“小块并大块”进行耕地整治，加快耕地在空间上的优化重组，促进不同农户土地资源的优化配置和高效利用。此外，就北部荒漠灌区质量较差的耕地而言，可以通过合理使用土壤调理剂、种植绿肥和耐盐碱作物、增施有机肥和生物肥、改变灌溉技术等农艺、生物、化学、工程等技术，以改善耕地质量，提高作物灌溉技术效率。

(2) 以作物需水规律为指导，完善水利设施，引导井灌合理使用，增强河水灌溉放水的灵活性。对于有井灌条件的作物（平原灌区大田玉米和沿山灌区小麦、马铃薯、大

麦), 根据作物需水规律充分发挥井灌的灵活性, 避免无效灌溉。对于仅利用河水灌溉的作物, 如平原灌区制种玉米和北部荒漠灌区主要作物, 效率的提高会受到河水定期供应的影响, 需要强化农田水利基础设施建设, 改善河水供应现状, 增强河水灌溉放水的灵活性, 为农户节约灌溉用水提供条件, 避免灌溉用水的过度浪费。

(3) 提高农户生产管理水平, 增强高效用水和节水意识。一方面, 重视农业知识和灌溉技能的宣传和培训, 发挥政府部门的作用, 对积极采取节水措施的农户给予补贴和优惠, 促进灌溉技术效率的提升; 另一方面, 发展农户参与式灌溉管理, 通过让农户对关系其切身利益的水资源进行管理, 增强农户自觉节水意识, 进而促进水资源的高效利用。

参考文献(References):

- [1] LI N, WANG X J, SHI M J, et al. Economic impacts of total water use control in the Heihe River Basin in Northwestern China: An integrated CGE-BEM modeling approach. *Sustainability*, 2015, 7(3): 3460-3478.
- [2] 王晓君, 石敏俊, 王磊. 干旱缺水地区缓解水危机的途径: 水资源需求管理的政策效应. *自然资源学报*, 2013, 28(7): 1117-1129. [WANG X J, SHI M J, WANG L. Solutions to water scarcity in arid regions: Effectiveness of water demand management policy. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7): 1117-1129.]
- [3] 王晓娟, 李周. 灌溉用水效率及影响因素分析. *中国农村经济*, 2005, (7): 11-18. [WANG X J, LI Z. Analysis of efficiency of irrigation water use and influencing factors. *Chinese Rural Economy*, 2005, (7): 11-18.]
- [4] OMEZZINE A, ZAIBET L. Management of modern irrigation systems in Oman: Allocative vs. irrigation efficiency. *Agricultural Water Management*, 1998, 37(2): 99-107.
- [5] HAJI J. Production efficiency of smallholders' vegetable-dominated mixed farming system in Eastern Ethiopia: A non-parametric approach. *Social Science Electronic Publishing*, 2008, 16(1): 1-27.
- [6] SPEELMAN S, HAESE M, BUYSE J, et al. A measure for the efficiency of water use and its determinants: A case study of small-scale irrigation schemes in North-West province, South Africa. *Agricultural Systems*, 2008, 98(1): 31-39.
- [7] 韩洪云, 赵连阁, 王学渊. 农业水权转移的条件: 基于甘肃、内蒙典型灌区的实证研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(3): 100-106. [HAN H Y, ZHAO L G, WANG X Y. The precondition for water right out of agriculture: A positive analysis based on two typical irrigation districts. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(3): 100-106.]
- [8] NJIRAINI G W, GUTHIGA P M. Are small-scale irrigators water use efficient? Evidence from Lake Naivasha Basin, Kenya. *Environmental Management*, 2013, 52(5): 1192-1201.
- [9] WANG X Y. Irrigation water use efficiency of farmers and its determinants: Evidence from a survey in Northwestern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2010, 9(9): 1326-1337.
- [10] DHUNGANA B R, NUTHALL P L, NARTEA G V. Measuring the economic inefficiency of Nepalese rice farms using data envelopment analysis. *Australian Journal of Agricultural & Resource Economics*, 2004, 48(2): 347-369.
- [11] CHAVAS J P, PETRIE R, ROTH M. Farm household production efficiency: Evidence from the Gama. *American Journal of Agricultural Economics*, 2005, 87(1): 160-179.
- [12] FARRELL M J. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1957, 120(3): 253-290.
- [13] KARAGIANNIS G, TZOUVELEKAS V, XEPAPADEAS A. Measuring irrigation water efficiency with a stochastic production frontier. *Environmental & Resource Economics*, 2003, 26(1): 57-72.
- [14] 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. *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. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6): 934-943.]
- [15] 赵连阁, 王学渊. 农户灌溉用水的效率差异: 基于甘肃、内蒙古两个典型灌区实地调查的比较分析. *农业经济问题*, 2010, (3): 71-78. [ZHAO L G, WANG X Y. Farmers' irrigation water use efficiency variance: A comparative analysis based on field survey of two typical irrigated areas in Gansu and Inner Mongolia. *Issues in Agricultural Economy*, 2010, (3): 71-78.]

- [16] RAJU K S, KUMAR D N. Ranking irrigation planning alternatives using data envelopment analysis. *Water Resources Management*, 2006, 20(4): 553-566. .
- [17] REIG-MARTINEZ E, PICAZO-TADEO A J. Analysing farming systems with data envelopment analysis: Citrus farming in Spain. *Agricultural Systems*, 2004, 82(1): 17-30.
- [18] THIAM A, BRAVOURETA B E, RIVAS T E. Technical efficiency in developing country agriculture: A meta-analysis. *Agricultural Economics*, 2001, 25(2-3): 235-243.
- [19] CHAMBERS R G, FÄRE R. Using dominance in forming bounds on DEA models: The case of experimental agricultural data. *Journal of Econometrics*, 2004, 85(1): 189-203.
- [20] DHEHIBI B, LACHAAL L, ELLOUMI M, et al. Measuring irrigation water use efficiency using stochastic production frontier: An application on citrus producing farms in Tunisia. *African Journal of Agricultural & Resource Economics*, 2007, 1(2): 1-15.
- [21] FRIJA A, CHEBIL A, SPEELMAN S, et al. Water use and technical efficiency in horticultural greenhouses in Tunisia. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1509-1516.
- [22] 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. *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. *Resources Science*, 2012, 34(1): 105-113.]
- [23] 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. *农业技术经济*, 2014, (2): 4-16. [SONG C X, MA H Y, HUANG J J, et al. Effects of climate change and farmer household adaptability on wheat irrigation efficiency: An empirical study based on the main wheat producing areas in 5 provinces of Eastern Central China. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2014, (2): 4-16.]
- [24] COVENTRY D R, POSWAL R S, YADAV A, et al. A comparison of farming practices and performance for wheat production in Haryana, India. *Agricultural Systems*, 2015, 137: 139-153.
- [25] JIN J J, HE R, GONG H Z, et al. Farmers' risk preferences in rural China: Measurements and determinants. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2017, 14(7): 713.
- [26] 王兵, 唐文狮, 吴延瑞, 等. 城镇化提高中国绿色发展效率了吗?. *经济评论*, 2014, (4): 38-49. [WANG B, TANG W S, WU Y R, et al. Does urbanization increase China's green development efficiency?. *Economic Review*, 2014, (4): 38-49.]
- [27] 张晓敏, 张秉云, 陈晓宇, 等. 我国主要牧区牧业生产效率及影响因素研究: 基于DEA-CLAD的两阶段模型. *中国农业大学学报*, 2017, 22(4): 171-178. [ZHANG X M, ZHANG B Y, CHEN X Y, et al. Study of the efficiency of livestock production and its influence factors in Chinese main pastoral area: Based on the two-phase modeling of DEA-CLAD. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(4): 171-178.]
- [28] 石敏俊, 王磊, 王晓君. 黑河分水后张掖市水资源供需格局变化及驱动因素. *资源科学*, 2011, 33(8): 1489-1497. [SHI M J, WANG L, WANG X J. With the Heihe River water resources in Zhangye city after the water supply and demand pattern changes and driving factors. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1489-1497.]
- [29] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2: 429-444.
- [30] COOPER W W, PARK K S, YU G. IDEA and AR-IDEA: Models for dealing with imprecise data in DEA. *Management Science*, 1999, 45(4): 597-607.
- [31] FÄRE R, GROSSKOPF S, LOVELL C A K. *Production Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [32] HU J L, WANG S C. Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 2006, 34(17): 3206-3217.
- [33] 沈陈华, 冯电军, 王旭姣, 等. 农地细碎化度测度指数计算的改进. *资源科学*, 2012, 34(12): 2242-2248. [SHEN C H, FENG D J, WANG X J, et al. Simpson index calculation of land fragmentation. *Resources Science*, 2012, 34(12): 2242-2248.]
- [34] ZHOU D Y, WANG X J, SHI M J. Human driving forces of oasis expansion in Northwestern China during the last decade: A case study of the Heihe River Basin. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 412-420.
- [35] 吕晓, 黄贤金, 钟太洋, 等. 中国农地细碎化问题研究进展. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 530-540. [LYU X, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Review on the research of farmland fragmentation in China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 530-540.]

Technical efficiency of crop irrigation and its determinants in the arid areas of Northwest China

LI Gui-fang¹, ZHOU Ding-yang², SHI Min-jun³

(1. School of Economics, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The shortage of water resources has become a hard constraint to the sustainable development of the arid areas of Northwest China. Increasing the technical efficiency of crop irrigation (*TECI*) and reducing agricultural irrigation water use may be one of the possible ways to ease the contradiction between water supply and demand. Based on the survey data of farmers in Zhangye city in 2014, this paper uses the DEA-Tobit model to analyze the *TECI* and its determinants in different types of irrigation zones in the middle reaches of the Heihe River Basin. The results show that there is a certain improvement space of *TECI* of main crops in the typical irrigation zones. With the other inputs unchanged, if the *TECI* reaches the current highest level in different types of irrigation zones, in order to produce the same amount of the seed maize and maize, the irrigation water can be reduced by 34.47% and 38.15% in the plain irrigation zone; in order to produce the same amount of the cotton, seed watermelon and maize-wheat (inter-corn), the irrigation water can be reduced by 48.42%, 34.82% and 22.99% in the northern desert irrigation zone; in order to produce the same amount of the wheat, potato, barley and maize, the irrigation water can be reduced by 14.48%, 30.75%, 25.50% and 35.96% in the mountain irrigation zone. In addition, the coefficient of variation of the *TECI* in different irrigation zones is negatively related to the proportion of cropland area, and there is a significant difference in the production management level of farmers who grow the same crop in the same irrigation zone. What's more, the fragmentation degree of cultivated land and the expansion of cultivated area have negative effects on the *TECI* in different irrigation zones, improving the quality of cultivated land has a significant positive effect on main crops in the northern desert irrigation zone. Increasing well water irrigation has a positive effect on crops such as maize in plain irrigation zone and wheat, potato, maize in mountain irrigation zone, and there is an inverted U- shaped relationship between irrigation frequency and the *TECI*. However, the influence of farmers' demand for cultivation and the attitude towards risk need to be judged based on specific conditions. Therefore, determining the production scale, accelerating the optimization and reorganization of cultivated land and improving the quality of cultivated land, rationally guiding the use of well irrigation, and enhancing the water conservancy facility and the flexibility of river water irrigation are the main ways to improve the *TECI* in the Heihe River Basin.

Keywords: Zhangye city; Heihe River Basin; irrigation zone; technical efficiency of crop irrigation; DEA-Tobit model