

引用格式: 许航, 李韬, 宋健峰. 旱区农业灌溉用水反弹效应及其区域差异: 以西北五省(区)为例[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1808-1820. [Xu H, Li T, Song J F. Estimation, driving factors, and regional differences of agricultural irrigation water rebound effect in arid areas: Examples of five provinces in northwestern China[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1808-1820.] DOI: 10.18402/resci.2021.09.08

# 旱区农业灌溉用水反弹效应及其区域差异 ——以西北五省(区)为例

许航, 李韬, 宋健峰

(西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 在干旱半干旱地区, 农业部门用水量大, 但利用率不高, 所以发展节水灌溉成为缓解水资源短缺的可能路径。但是在节水灌溉技术提高的条件下, 如果实际节水效果达不到预期, 就会出现“灌溉用水反弹效应”。基于此, 本文从理论上构建了灌溉用水反弹效应的衡量方法, 然后利用LMDI分解法将灌溉用水反弹效应分解为气候效应、单产效应、结构效应、面积效应和灌溉效应, 并利用西北五省(区)2005—2016年的数据, 在效应测算和分解的基础上分析了其驱动因素及区域差异。结果发现: ①西北五省(区)整体的反弹效应高达340.00%, 即新增用水量达到了预期节水量的3.4倍, 其中甘肃、宁夏、青海、陕西和新疆的灌溉用水反弹效应分别为374.97%、55.10%、117.46%、434.51%和384.32%; ②单位面积产量增长和种植面积扩大始终是促进西北整体和各省(区)灌溉用水反弹效应上升的驱动因素; ③西北整体灌溉用水反弹效应上升的主导因素为单位面积产量增长, 但各省(区)存在区域差异, 其中甘肃、宁夏和陕西为单位面积产量增长, 青海为气候变化, 新疆为种植面积扩大。所以, 为缓解旱区农业灌溉用水反弹效应, 在整体策略上, 不能追求单产的最大化, 而应当适当采取亏缺灌溉, 并合理规划灌溉农业规模; 在局部策略上, 要实行差异化的区域政策, 因地制宜。

**关键词:** 旱区农业; 灌溉用水; 节水效果; 反弹效应; 西北地区

DOI: 10.18402/resci.2021.09.08

## 1 引言

中国水资源总量占到全球水资源的6%, 但是人均占有量仅为世界平均水平的1/4, 属于世界上13个贫水国家之一<sup>[1]</sup>。中国作为农业大国, 农业仍是最大的用水部门, 所以农业部门的节水成为缓解中国水资源短缺的重要途径。中国的节水农业战略始于20世纪末, 1998年十五届三中全会通过了《中共中央关于农业和农村工作若干重大问题的决定》, 并提出“制定促进节水的政策, 大力发展节水农业, 把推广节水灌溉作为一项革命性措施来抓, 大幅度提高水的利用率, 努力扩大农田有效灌溉面

积”, 成为了节水农业发展的重大政策保障<sup>[2]</sup>。2019年, 习主席“在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话”中指出“要坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产, 把水资源作为最大的刚性约束, 大力发展节水产业和技术, 大力推进农业节水”, 再次强调了农业节水技术的重要性。

农业节水技术推广的目的在于提高灌溉水利用系数, 提高水资源利用率, 根据数据显示, 全国的灌溉水利用系数从2005年的0.4512提高到2016年的0.5420, 上升幅度达20.12%<sup>[3]</sup>, 但是农业用水量从2005年的3580亿m<sup>3</sup>增加到2016年的3768亿m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>,

收稿日期: 2020-10-14 修订日期: 2021-05-26

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(17YJC790126); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-112); 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目(2021ND0380)。

作者简介: 许航, 男, 湖北仙桃人, 博士研究生, 研究方向为水资源管理。E-mail: xuhang93@126.com

通讯作者: 宋健峰, 女, 山西芮城人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为水资源管理。E-mail: s\_jf@nwafu.edu.cn

2021年9月

出现节水技术提高但农业用水量不降反增的现象。对于这种现象,在理论上被普遍称为“反弹效应”。节水灌溉技术在实施后,实际节水量达不到预期节水量的现象,具体被称为“灌溉用水反弹效应”。中国的水资源在地区间的分布严重不均,西北地区是中国主要的干旱半干旱地区,也是节水灌溉推广的主要地区,所以西北地区的“灌溉用水反弹效应”需要得到关注。一方面,对于中国西北地区天然水资源总量无法增加的客观背景下,高效节水作为缓解水资源短缺的重要路径,其效果因为“灌溉用水反弹效应”被部分或全部抵消,甚至如果发生超过100%的反弹效应,会严重影响到农业的可持续发展。另一方面,西北地区包括了黄河流域上游的大部分地区,西北地区的节水效果也会影响到黄河流域下游的水资源利用问题。对灌溉用水反弹效应进行研究可以为干旱半干旱地区更好实施节水政策提供理论依据,对于包括黄河流域在内的干旱半干旱地区在水资源约束下的可持续发展具有一定的参考价值。

反弹效应的研究始于能源反弹。更高效的蒸汽机降低了煤炭价格,最终却增加了对煤炭的需求,所以能源效率提高并没有带来能源消耗总量的下降<sup>[5]</sup>。这种现象反映了能源效率提高会导致经济增长,经济增长反过来使能源消费增加,这就是著名的杰文斯悖论<sup>[6]</sup>。新技术的使用提高了能源利用效率,降低了单位产出的能耗,相同的产量所需的能源会降低,从而可以实现节能的效果,但是技术进步带来的消费增长及能源相对价格下降会导致对能源消耗需求的增加,所以能源反弹效应被定义为效率提高的节能效果被新增需求所抵消的程度<sup>[7]</sup>。

与能源反弹类似,节水灌溉技术的改进可以提高灌溉水利用效率,但是效率提高的节水效果可能会被新增用水所抵消。已有很多研究关注了节水灌溉技术的采用<sup>[8-12]</sup>,其中部分文献进一步分析节水技术提高下的节水效果。Ward等<sup>[13]</sup>考虑田间尺度时发现,节水技术提高后灌溉用水减少了,但他们进一步分析流域尺度时发现,节水技术提高后灌溉用水反而增加了。Peterson等<sup>[14]</sup>认为节水技术提高下灌溉用水减少的原因在于灌溉面积减少,所以灌溉效率的增加既有可能增加也有可能减少灌溉用

水量。Fishman等<sup>[15]</sup>也发现节水技术改进下的地下用水节约潜力被灌溉面积扩大带来的新增用水所抵消。从灌溉耗水的角度来看也存在类似情况,Contor等<sup>[16]</sup>和Berbel等<sup>[17]</sup>研究发现节水技术提高后,虽然灌溉用水减少了,但是灌溉耗水却增加了。Lopez等<sup>[18]</sup>对西班牙阿利坎特地下水灌区的节水效果进行了分析,也发现实际的灌溉耗水节约量远低于预期水平。灌溉效率提高的节水效果被抵消的原因可能来源于一系列因素,Contor等<sup>[16]</sup>总结了3个可能途径:第一,灌溉系统特定的物理特性;第二,节约的水将应用于新用途或扩大灌溉面积;第三,作物产量增加引致了新增用水。第一个途径可以视为水文悖论,第二、三个途径可以视为杰文斯悖论<sup>[19]</sup>。Grafton等<sup>[20]</sup>指出现行的节水技术补贴政策使得农业用水价格处于相对低位,从而出现提高灌溉效率而没能实现农业用水减少的悖论,所以政策制定者需要重新审视现行的农业节水政策。

少量文献从“反弹效应”的视角来分析节水效果。Pfeiffer等<sup>[21]</sup>研究发现更高效的灌溉技术实施后灌溉用水量反而增加了,明确指出这是大于100%的反弹效应,这是学界第一次用“反弹效应”的概念表达节水效果。虽然用水反弹与能源反弹类似,但具体定义存在差异。一种观点强调节水效果被新增用水部分抵消即构成反弹效应<sup>[19,21,22]</sup>,另一种观点则认为,灌溉技术改进增加而不是减少了总用水量的现象才称为反弹效应<sup>[23,24]</sup>。虽然两种观点存在一定差异,但两者都一致认为灌溉用水反弹效应衡量的是节水效果被抵消的程度,第二种观点强调的只是预期节水量被全部抵消的情况,可以视为第一种观点的特殊情形。佟金萍等<sup>[25]</sup>在研究中国农业水资源利用效率时提到技术进步会引起用水的反弹效应,虽未进行具体的分析,但属于第一种观点。邓光耀等<sup>[26]</sup>使用DEA方法测算了全要素水资源利用效率,并研究技术进步所引起的用水反弹效应,认为中国水资源利用存在反弹效应。Song等<sup>[27]</sup>利用省级数据根据技术进步的贡献率计算了中国农业用水反弹效应,发现存在平均61.49%的反弹效应,并且中国北部和西部地区的农业用水反弹效应比南部和东部地区更大。王哲等<sup>[28]</sup>基于DEA模型测算技术进步贡献率方法估计了河北省

农业用水反弹效应,并认为河北省普遍存在着农业用水反弹效应。

综上所述,近年来许多学者关注到了节水灌溉技术改进下的节水效果,且有部分学者借鉴“反弹效应”的概念,深入分析了灌溉技术改进下的节水效果,但仍存在以下不足:一方面,现有研究中,佟金萍等<sup>[25]</sup>首次提出中国的农业水资源利用中存在“反弹效应”,但是只有 Song 等<sup>[27]</sup>和王哲等<sup>[28]</sup>通过估算技术进步贡献率的方法测算了农业用水反弹效应的大小,但未聚焦于节水灌溉技术本身,也没能提出更为合理的测算灌溉用水反弹效应的方法;另一方面,只有 Contor 等<sup>[16]</sup>和王哲等<sup>[28]</sup>提出了灌溉用水反弹效应形成的可能驱动因素,具体可以总结为年降雨量的变化、种植结构调整和种植面积扩大,但没能系统分析这些可能驱动因素的合理性,未能在理论分析中给予更为合理的解释。本文基于已有文献,将进一步聚焦于节水灌溉技术改进的角度来衡量灌溉用水反弹效应,再基于 LMDI 分解法的分析框架来系统地从理论上分析灌溉用水反弹效应的驱动因素,并利用西北五省(区)2005—2016年的数据来测算中国旱区农业灌溉用水反弹效应,再考察其驱动因素及区域差异。

## 2 理论构建、测算方法与数据说明

### 2.1 灌溉用水反弹效应的理论构建

#### 2.1.1 灌溉用水反弹效应的定义

在能源反弹的研究中,能源反弹效应反映的是节能技术提高后预期节能效果被新增能源消耗所抵消的程度<sup>[7]</sup>。参考能源反弹效应的定义,灌溉用水反弹效应可以定义为如下形式:

$$WRE = \frac{RWU}{EWS} = \frac{EWS - AWS}{EWS} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $WRE$  为灌溉用水反弹效应;  $RWU$  为灌溉用水反弹的绝对量,指节水技术提高后,预期节水量中被新增用水所抵消的部分;  $EWS$  为节水技术提高后的预期节水量;  $AWS$  为节水技术提高后的实际节水量。

根据定义,灌溉用水反弹效应衡量了在灌溉技术提高后预期节水量被新增用水量所抵消的程度,且以百分比的形式来表示。根据反弹效应的大小可以对灌溉用水反弹效应进行分类,具体见表1。节水的理想状况是零反弹,即预期节水目标完全实现,实际节水量与预期节水量相同。介于0%~100%之间的反弹效应意味着没有完全达到预期的节水目标,有部分预期节水量被新增用水所抵消。灌溉用水反弹效应为100%时,意味着完全反弹,即实际节水量为0。如果实际节水量为负数,即新增的灌溉用水量超过了预期节水量,会发生大于100%的反弹效应,也被称为“回火现象”。如果反弹效应小于0,即实际节水量超过预期节水量,则属于负反弹。

#### 2.1.2 灌溉用水反弹效应的衡量

按照灌溉用水反弹效应的定义,它表达的是在节水技术提高的情况下,预期节水效果被新增用水所抵消的程度。相比能源市场,农业灌溉用水价格属于政府调控,与能源价格的市场化机制存在差异,不能直接借用能源反弹根据需求弹性所采取的构建方法<sup>[29]</sup>,所以直接比较灌溉效率提高后的实际节水量和预期节水量成为研究灌溉用水反弹效应的可行办法。在节水灌溉技术普及的过程中,高效节水灌溉技术旨在提高灌溉水利用系数以促进作物单位灌溉用水量的消耗量增加,进而提高水资源的利用率,所以使用灌溉水利用系数作为效率指

表1 灌溉用水反弹效应分类

Table 1 Classification of irrigation water rebound effect

类型	$WRE$ 的范围/%	$AWS$ 与 $EWS$ 的关系	$RWU$ 与 $EWS$ 的关系
回火反弹	$WRE > 100$	$AWS < 0$	$RWU > EWS$
完全反弹	$WRE = 100$	$AWS = 0$	$RWU = EWS$
部分反弹	$0 < WRE < 100$	$0 < AWS < EWS$	$0 < RWU < EWS$
零反弹	$WRE = 0$	$0 < EWS = AWS$	$RWU = 0$
负反弹	$WRE < 0$	$0 < EWS < AWS$	$RWU < 0$



2021年9月

标,灌溉用水量作为用水指标。灌溉用水量、灌溉耗水量和灌溉水利用系数之间的关系可以表示为:

$$WU = \frac{WC}{\eta} \quad (2)$$

式中:  $WU$  为灌溉用水量;  $WC$  为灌溉耗水量;  $\eta$  为灌溉水利用系数。

当节水技术改进使得灌溉水利用系数从基期的  $\eta^0$  提升到第  $T$  期的  $\eta^T$ , 技术改进后的预期节水量  $EWS$  可以表示为:

$$EWS = WU_0 - WU_c = \frac{WC^0}{\eta^0} - \frac{WC^0}{\eta^T} \quad (3)$$

式中:  $WU_0$  指灌溉水利用系数提高前的原始用水量;  $WU_c$  指灌溉水利用系数提高后的预期用水量;  $WC^0$  为基期的灌溉耗水量;  $\eta^0$  为基期的灌溉水利用系数;  $\eta^T$  为第  $T$  期的灌溉水利用系数。

预期节水量衡量的是在其他农业生产条件不变的情况下所需耗水量在提高灌溉水利用系数的情况下所能节约的灌溉用水量。但是,水资源是农业生产中必不可少的投入要素,灌溉水利用系数的提高会缓解水资源的稀缺性,从而为农业生产条件的改进提供了空间,包括扩大灌溉面积或种植面积等,这些都会引致新的灌溉用水需求<sup>[6]</sup>。对灌溉用水需求的增加会导致灌溉耗水量从基期的  $WC^0$  增加至第  $T$  期的  $WC^T$ 。所以,实际节水量  $AWS$  可以表示为:

$$AWS = WU_0 - WU_a = \frac{WC^0}{\eta^0} - \frac{WC^T}{\eta^T} \quad (4)$$

式中:  $WU_a$  指灌溉水利用系数提高后的实际用水量;  $WC^T$  为第  $T$  期的灌溉耗水量。

因此,灌溉用水反弹的绝对量  $RWU$  可以表示为:

$$RWU = EWS - AWS = WU_a - WU_c = \frac{WC^T}{\eta^T} - \frac{WC^0}{\eta^T} \quad (5)$$

最后,根据公式(1)、(3)和(5),灌溉用水反弹效应  $WRE$  可以由下式得到:

$$WRE = \frac{RWU}{EWS} \times 100\% = \frac{\frac{WC^T}{\eta^T} - \frac{WC^0}{\eta^T}}{\frac{WC^0}{\eta^0} - \frac{WC^0}{\eta^T}} \times 100\% \quad (6)$$

根据公式(6)可以发现,在基期灌溉水利用系数  $\eta^0$  给定的情况下,当期的灌溉水利用系数  $\eta^T$  越大,意味着灌溉用水反弹效应会越小。所以,代表灌溉技术水平的灌溉水利用系数提高的越多,则灌

溉用水反弹效应会越低,也代表其农业节水效果会越好。

## 2.2 灌溉用水反弹效应的测算方法

根据公式(6),为测算西北整体和各省(区)的灌溉用水反弹效应,首先需要测算灌溉耗水量  $WC$ 。参考吴普特等<sup>[30]</sup>的计算方法,  $i$  省(区)的灌溉耗水量  $WC_i$  可由不同农作物单位面积消耗的灌溉水量按照作物灌溉面积加权加总得到:

$$WC_i = \sum_j WC_{ij} = \sum_j PW_{ij} \times IA_{ij} \quad (7)$$

式中:  $WC_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物的灌溉耗水量;  $PW_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物单位面积消耗的灌溉水量;  $IA_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物的灌溉面积。

公式(7)中作物单位面积消耗的灌溉水量  $PW_{ij}$  可以根据 CROPWAT8.0 软件的计算方法得到<sup>[31,32]</sup>,但考虑到各作物灌溉面积  $IA_{ij}$  的可获取性,本文利用种植面积与有效灌溉率的乘积来代替,具体可以表示为:

$$IA_{ij} = SA_{ij} \times \beta_i \quad (8)$$

式中:  $SA_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物的种植面积;  $\beta_i$  为  $i$  省(区)的有效灌溉率,即有效灌溉面积与耕地面积之比。

根据公式(7)和(8),  $i$  省(区)的灌溉耗水量  $WC_i$  可以由下式得到:

$$WC_i = \sum_j WC_{ij} = \sum_j PW_{ij} \times SA_{ij} \times \beta_i \quad (9)$$

在得到灌溉耗水量  $WC_i$  后,再根据公式(3),  $i$  省(区)的预期节水量  $EWS_i$  可以表示为:

$$\begin{aligned} EWS_i &= \frac{WC_i^0}{\eta_i^0} - \frac{WC_i^0}{\eta_i^T} = \frac{\sum_j WC_{ij}^0}{\eta_i^0} - \frac{\sum_j WC_{ij}^0}{\eta_i^T} \\ &= \frac{\sum_j PW_{ij}^0 \times SA_{ij}^0 \times \beta_i^0}{\eta_i^0} - \frac{\sum_j PW_{ij}^0 \times SA_{ij}^0 \times \beta_i^0}{\eta_i^T} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $WC_i^0$  为基期  $i$  省(区)的灌溉耗水量;  $\eta_i^0$  为基期  $i$  省(区)的灌溉水利用系数;  $\eta_i^T$  为第  $T$  期  $i$  省(区)的灌溉水利用系数;  $WC_{ij}^0$  为基期  $i$  省(区)  $j$  作物的灌溉耗水量;  $PW_{ij}^0$  为基期  $i$  省(区)  $j$  作物单位面积消耗的灌溉水量;  $SA_{ij}^0$  为基期  $i$  省(区)  $j$  作物的种植面积;  $\beta_i^0$  为基期  $i$  省(区)的有效灌溉率。

在得到灌溉耗水量  $WC_i$  后,再根据公式(5),  $i$  省(区)的灌溉用水反弹的绝对量  $RWU_i$  可以表示为:

$$RWU_i = \frac{WC_i^T}{\eta_i^T} - \frac{WC_i^0}{\eta_i^0} = \frac{\sum_j WC_{ij}^T}{\eta_i^T} - \frac{\sum_j WC_{ij}^0}{\eta_i^0} \quad (11)$$

$$= \frac{\sum_j PW_{ij}^T \times SA_{ij}^T \times \beta_i^T}{\eta_i^T} - \frac{\sum_j PW_{ij}^0 \times SA_{ij}^0 \times \beta_i^0}{\eta_i^0}$$

式中:  $WC_i^T$  为第  $T$  期  $i$  省(区)的灌溉耗水量;  $WC_{ij}^T$  为第  $T$  期  $i$  省(区)  $j$  作物的灌溉耗水量;  $PW_{ij}^T$  为第  $T$  期  $i$  省(区)  $j$  作物单位面积消耗的灌溉水量;  $SA_{ij}^T$  为第  $T$  期  $i$  省(区)  $j$  作物的种植面积;  $\beta_i^T$  为第  $T$  期  $i$  省(区)的有效灌溉率。

所以,根据公式(6)、(10)和(11),可以通过以下公式来测算西北各省(区)的灌溉用水反弹效应  $WRE_i$ :

$$WRE_i = \frac{RWU_i}{EWS_i} \times 100\% \quad (12)$$

另外,西北整体的灌溉用水反弹效应可以通过类似方法得到。

### 2.3 灌溉用水反弹效应的分解方法

研究驱动因素的分解方法主要以结构分解法和指数分解法为主,相对于结构分解法,指数分解法由于其简单和灵活而得到了普遍使用<sup>[33]</sup>。其中,对数平均迪式指数(LMDI)分解法是指数分解法中最为理想和实用的分解方法<sup>[33]</sup>,所以本文利用LMDI分解法来分析灌溉用水反弹效应的驱动因素。

根据公式(11),可以将灌溉用水反弹的绝对量  $RWU_i$  改写为如下形式:

$$RWU_i = \frac{WC_i^T}{\eta_i^T} - \frac{WC_i^0}{\eta_i^0} = \sum_j \frac{WC_{ij}^T}{\eta_i^T} - \sum_j \frac{WC_{ij}^0}{\eta_i^0} \quad (13)$$

$$= \sum_j \frac{\Delta WC_{ij}}{\eta_i^T}$$

式中:  $\Delta WC_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物的第  $T$  期与基期灌溉耗水量的差额。

根据灌溉耗水量的测算(式(9)),可以对  $i$  省(区)  $j$  作物的灌溉耗水量  $WC_{ij}$  进行改写,具体可以表示为如下形式:

$$WC_{ij} = PW_{ij} \times SA_{ij} \times \beta_i$$

$$= \frac{PW_{ij}}{Y_{ij}/SA_{ij}} \times \frac{Y_{ij}}{SA_{ij}} \times \frac{SA_{ij}}{TSA_i} \times TSA_i \times \beta_i \quad (14)$$

$$= UBWF_{ij} \times \frac{Y_{ij}}{SA_{ij}} \times \frac{SA_{ij}}{TSA_i} \times TSA_i \times \beta_i$$

式中:  $PW_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物单位面积消耗的灌溉

水量;  $SA_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物的种植面积;  $\beta_i$  为  $i$  省(区)的有效灌溉率;  $Y_{ij}$  为  $i$  省(区)  $j$  作物的产量;  $TSA_i$  为  $i$  省(区)的总种植面积;  $UBWF_{ij}$  表示为  $i$  省(区)  $j$  作物的单位蓝水足迹。

根据Ang等<sup>[33,34]</sup>的方法,具体采用加法总量指标的LMDI-I模型,基于公式(13)和(14),可以将  $i$  省(区)灌溉用水反弹的绝对量  $RWU_i$  分解为如下形式:

$$RWU_i = \sum_j \frac{\Delta WC_{ij}}{\eta_i^T} = RWU_i^{ubwf} + RWU_i^{int} + RWU_i^{str} + RWU_i^{act} + RWU_i^{irr} \quad (15)$$

根据以上分解,灌溉用水反弹的绝对量可被分解为单位蓝水足迹变化导致的反弹用水量( $RWU_i^{ubwf}$ )、单位面积产量变化导致的反弹用水量( $RWU_i^{int}$ )、种植结构变化导致的反弹用水量( $RWU_i^{str}$ )、种植面积变化导致的反弹用水量( $RWU_i^{act}$ )和有效灌溉率变化导致的反弹用水量( $RWU_i^{irr}$ )等五大来源,各分解项为:

$$RWU_i^{ubwf} = \sum_j \frac{1}{\eta_i^T} L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0) \cdot \ln \left( \frac{UBWF_{ij}^T}{UBWF_{ij}^0} \right) \quad (16)$$

$$RWU_i^{int} = \sum_j \frac{1}{\eta_i^T} L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0) \cdot \ln \left( \frac{Y_{ij}^T/SA_{ij}^T}{Y_{ij}^0/SA_{ij}^0} \right) \quad (17)$$

$$RWU_i^{str} = \sum_j \frac{1}{\eta_i^T} L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0) \cdot \ln \left( \frac{SA_{ij}^T/TSA_i^T}{SA_{ij}^0/TSA_i^0} \right) \quad (18)$$

$$RWU_i^{act} = \sum_j \frac{1}{\eta_i^T} L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0) \cdot \ln \left( \frac{TSA_i^T}{TSA_i^0} \right) \quad (19)$$

$$RWU_i^{irr} = \sum_j \frac{1}{\eta_i^T} L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0) \cdot \ln \left( \frac{\beta_i^T}{\beta_i^0} \right) \quad (20)$$

公式(16)-(20)中,  $WC_{ij}^0$  和  $WC_{ij}^T$  都可以由公式(9)得到,而函数  $L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0)$  由下式得到:

$$L(WC_{ij}^T, WC_{ij}^0) = \begin{cases} \frac{WC_{ij}^T - WC_{ij}^0}{\ln WC_{ij}^T - \ln WC_{ij}^0} & WC_{ij}^T \neq WC_{ij}^0 \\ WC_{ij}^T & WC_{ij}^T = WC_{ij}^0 \end{cases} \quad (21)$$

根据公式(12)和(15),西北各省(区)的灌溉用水反弹效应  $WRE_i$  可以被分解五大部分,具体为:

$$WRE_i = \frac{RWU_i}{EWS_i} = WRE_i^{ubwf} + WRE_i^{int} + WRE_i^{str} + WRE_i^{act} + WRE_i^{irr} \quad (22)$$

根据公式(22),西北各省(区)的灌溉用水反弹

2021年9月

效应都可以被分解为5种效应,各个分解效应的驱动因素可以视为灌溉用水反弹效应的驱动因素。 $WRE_i^{ubwf}$  为单位蓝水足迹变化对灌溉用水反弹效应的贡献值,主要受到降雨和气温等气候变化所影响,将其定义为气候效应; $WRE_i^{int}$  为单位面积产量变化对灌溉用水反弹效应的贡献值,将其定义为单产效应; $WRE_i^{str}$  为种植结构变化对灌溉用水反弹效应的贡献值,将其定义为结构效应; $WRE_i^{act}$  为种植面积变化对灌溉用水反弹效应的贡献值,将其定义为面积效应; $WRE_i^{irr}$  为有效灌溉率变化对灌溉用水反弹效应的贡献值,将其定义为灌溉效应。西北整体的灌溉用水反弹效应也可以通过类似方法分解为以上5种效应。所以,灌溉用水反弹效应可以分解为气候效应、单产效应、结构效应、面积效应和灌溉效应,其背后的驱动因素分别为气候变化、单位面积产量变化、种植结构变化、种植面积变化和有效灌溉率变化。

## 2.4 驱动因素的贡献率测算方法

基于LMDI分解方法可以将灌溉用水反弹效应分解为5种效应,其值的正负符号可以反映各驱动因素对灌溉用水反弹效应的影响是促进或抑制作用。贡献值的大小可以反映对灌溉用水反弹效应贡献的绝对大小,但无法反映相对大小,所以需要考虑各分解效应对灌溉用水反弹效应的贡献率。根据各分解效应对灌溉用水反弹效应的贡献率的大小,可以识别出西北各省(区)主要的影响灌溉用水反弹效应的驱动因素。西北各省(区)和西北整体的各分解效应对灌溉用水反弹效应的贡献率可以通过如下公式得到:

$$\begin{aligned} ROC_p^{ubwf} &= \frac{WRE_p^{ubwf}}{WRE_p}; ROC_p^{int} = \frac{WRE_p^{int}}{WRE_p}; ROC_p^{str} = \frac{WRE_p^{str}}{WRE_p}; \\ ROC_p^{act} &= \frac{WRE_p^{act}}{WRE_p}; ROC_p^{irr} = \frac{WRE_p^{irr}}{WRE_p} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $p$  代表地区,主要指西北整体或各省(区); $ROC_p^{ubwf}$ 、 $ROC_p^{int}$ 、 $ROC_p^{str}$ 、 $ROC_p^{act}$  和  $ROC_p^{irr}$  分别为西北整体或各省(区)的气候效应、单产效应、结构效应、面积效应和灌溉效应等分解效应对灌溉用水反弹效应的贡献率; $WRE_p$  为西北整体或各省(区)的灌溉用水反弹效应; $WRE_p^{ubwf}$ 、 $WRE_p^{int}$ 、 $WRE_p^{str}$ 、 $WRE_p^{act}$  和  $WRE_p^{irr}$  分别为西北整体或各省(区)的气候

效应、单产效应、结构效应、面积效应和灌溉效应等分解效应对灌溉用水反弹效应的贡献值。

## 2.5 数据来源与说明

### 2.5.1 研究范围界定

考虑到灌溉水利用系数的可获得性,研究的时间范围界定为2005—2016年。中国的干旱半干旱区主要位于西北地区,且西北地区包括黄河流域上游的大部分地区,所以研究的地域范围界定为西北五省(区)。西北五省(区)主要包括甘肃省、宁夏回族自治区、青海省、陕西省和新疆维吾尔自治区。由于西北各省(区)的农作物种类繁多,所以本文根据各省(区)统计年鉴的界定,只分析西北五省(区)的主要农作物。根据各省(区)的统计年鉴,甘肃的主要农作物包括小麦、稻谷、玉米、豆类、薯类、油料、棉花、烟叶和蔬菜,共计9类作物;宁夏的主要农作物包括小麦、稻谷、玉米、薯类、豆类、油料、药材、蔬菜和瓜果类,共计9类作物;青海的主要农作物包括小麦、杂粮、薯类、油料和蔬菜,共计5类作物;陕西的主要农作物包括小麦、稻谷、玉米、大豆、棉花、油料、麻类、糖料、烤烟和蔬菜,共计10类作物;新疆的主要农作物包括小麦、稻谷、玉米、大麦、豆类、薯类、棉花、油料、甜菜、蔬菜、果用瓜和苜蓿,共计12类作物。

### 2.5.2 数据来源

本文主要需要测算灌溉用水反弹效应,以及灌溉用水反弹效应的各分解效应贡献值和贡献率,具体计算所需的数据及其来源如下:灌溉用水反弹效应的测算所需要的数据主要包括作物单位面积消耗的灌溉水量、作物的种植面积、有效灌溉率和灌溉水利用系数。其中,作物单位面积消耗的灌溉水量是通过联合国粮食及农业组织(FAO)提供的CROPWAT8.0软件计算得到的,计算中所需要的数据主要包括气象数据(降雨、湿度、日照时数、风速、最低最高温度)和农时数据(作物播种与收割的时间),其中气象数据来源于国家气象科学数据中心<sup>[35]</sup>,而农时数据来源于中华人民共和国农业农村部<sup>[36]</sup>网站整理获得,并且借鉴已有文献的方法<sup>[37]</sup>,气象数据都以省会城市附近的气象站点作为该省(区)的代表。西北五省(区)的各作物的种植面积和有效灌溉率(有效灌溉面积/耕地面积)主要来源于各省(区)的统计年鉴<sup>[38-42]</sup>。灌溉水利用系数来源



于中国灌溉排水发展中心<sup>[3]</sup>,部分缺失数据具体采用线性插补法补齐。测算灌溉用水反弹效应的各分解效应贡献值和贡献率时,除了需要以上数据外,还需要各作物的产量和总种植面积,这些数据都来源于各省(区)的统计年鉴<sup>[38-42]</sup>。

### 2.5.3 数据处理与说明

为避免出现部分极端的灌溉用水反弹效应的测算值,抑或出现部分驱动因素对灌溉用水反弹效应的极端影响——这都可能无法得到更为有效的客观规律,从而丧失结论的稳健性,所以,本文对测算所需的数据进行平滑处理。通过计算当期与前后两期数据均值的方式对数据进行平滑处理,并将其界定为当期的平滑值。平滑处理的变量主要包括各作物单位面积消耗的灌溉水量、各作物的种植面积、有效灌溉率、灌溉水利用系数、各作物的产量和总种植面积。研究所使用的原始数据主要是西北五省(区)2005—2016年的数据,在进行平滑处理后,平滑年份变为2006—2015年。根据LMDI分解方法,需要选择基期(第0期)和当期(第T期),根据已有文献的选择方法<sup>[43]</sup>,本文选择平滑后的2006年为基期,为避免信息重叠,当期从平滑后的2009年开始,即平滑后的2009—2015年分别相对于平滑后的2006年计算灌溉用水反弹效应,并利用LMDI分解法来测算各分解效应的贡献值和贡献率。

## 3 结果与分析

### 3.1 效应测算

以平滑处理后的2006年为基期,分别测算了西北各省(区)和西北整体平滑处理后的2009—2015年相对于基期的灌溉用水反弹效应(图1)。对于西北整体而言,灌溉用水反弹效应整体呈现小幅上升趋势,反映了西北地区长期的反弹效应略高于短期水平。对于西北各省(区)而言,甘肃的灌溉用水反弹效应整体呈现先大幅下降后小幅上升的趋势,而陕西的灌溉用水反弹效应整体呈现大幅上升的趋势,反映了甘肃和陕西的灌溉用水反弹效应在短期和长期内存在较大差异,也体现了甘肃和陕西农业生产条件在长期内的变化较大;新疆的灌溉用水反弹效应整体呈现小幅上升趋势,而宁夏和青海灌溉用水反弹效应整体呈现小幅下降趋势,反映了新疆、宁夏和青海的灌溉用水反弹效应在短期和长期的差异较小,也体现了新疆、宁夏和青海农业生产

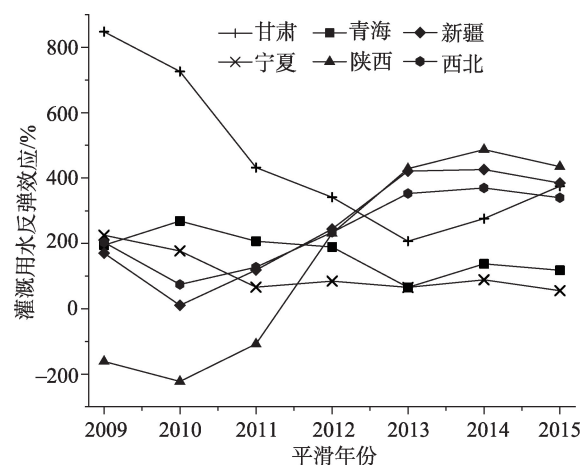


图1 西北五省(区)主要农作物灌溉用水反弹效应

Figure 1 Irrigation water rebound effect for the main crops in the five northwestern provinces (autonomous regions)

条件在长期内的变化较小。从基期到末期,西北整体的灌溉用水反弹效应高达340.00%,即新增用水量达到了预期节水量的3.4倍,属于反弹效应超过100%的“回火现象”。对于西北各省(区)而言,甘肃、宁夏、青海、陕西和新疆的灌溉用水反弹效应分别为374.97%、55.10%、117.46%、434.51%和384.32%,即西北地区除宁夏的灌溉用水反弹效应小于100%以外,其他省份都存在反弹效应超过100%的“回火现象”,且甘肃、陕西和新疆的灌溉用水反弹效应更为严重。

### 3.2 驱动因素

以平滑处理后的2006年为基期,分别测算了西北各省(区)和西北整体平滑处理后的2009—2015年相对于基期的灌溉用水反弹效应及五大分解效应的贡献值,表2只展示了西北各省(区)和西北整体从基期到末期灌溉用水反弹效应的分解结果。从西北各省(区)和西北整体来看,在不同阶段内(包括未展示阶段),单产效应和面积效应对灌溉用水反弹效应的贡献都为正值。所以,无论是西北整体还是各省(区),单产效应和面积效应对应的单位面积产量增长和种植面积扩大始终是促进西北地区灌溉用水反弹效应上升的驱动因素,属于西北旱区在灌溉技术提高条件下新增用水形成的关键来源。

#### 3.2.1 单位面积产量增长

单产效应反映的是单位面积产量变化对灌溉用水反弹效应的贡献,其所引致的新增灌溉用水主

表2 西北五省(区)灌溉用水反弹效应的分解结果

区域	阶段	气候效应	单产效应	结构效应	面积效应	灌溉效应	总效应
甘肃	2006—2015	-44.34	155.28	18.33	151.29	94.41	374.97
宁夏	2006—2015	-160.01	123.47	7.99	55.14	28.51	55.10
青海	2006—2015	73.44	26.91	14.79	18.70	-16.38	117.46
陕西	2006—2015	187.78	236.02	-14.25	13.16	11.80	434.51
新疆	2006—2015	-117.29	68.78	-2.72	287.02	148.53	384.32
西北	2006—2015	-94.02	94.27	0.01	222.93	116.81	340.00

注:阶段内展示的都属于平滑年份。

要反映在灌溉强度的增加或从亏缺灌溉到充分灌溉。促进灌溉水利用系数提高的节水灌溉技术可以实现精准灌溉,从而满足农作物生长所需的耗水量,这可以实现灌溉用水从亏缺灌溉到充分灌溉,在此过程中,既可以实现农作物单位面积产量的增加,也伴随着新增灌溉用水。在不考虑农作物种植结构的情况下,可以考察西北五省(区)主要农作物单位面积产量的变化(图2)。图2反映了平滑年份2009—2015年单位面积产量相对于2006年的变化量,可以发现,各平滑年份的单位面积产量相对于基期都是增加的,其中西北整体的单位面积产量从基期到末期增加了2453.5 t/千hm<sup>2</sup>。具体而言,除了新疆的单位面积产量变化量较为平稳以外,其他省(区)的变化量都具有上升趋势,这也体现了国家节水政策在促进农业生产中的重要作用。

1998年十五届三中全会以来,国家持续推进了农业节水政策,并通过水利设施建设和节水灌溉技术补贴政策,不断促进了水资源在农业生产中的利

用效率。这种通过增加农作物产量而引致的灌溉用水需求,可以将其称之为灌溉用水反弹效应中的“水文反弹”。“水文反弹”体现的是节水灌溉技术的内在属性,节水灌溉能够更为精确地满足农作物的水资源需求,在增加农作物产量的同时也伴随着农作物灌溉用水的增加<sup>[18,44]</sup>。但是,在西北地区水资源总量无法增加的客观条件下,完全实现作物充分灌溉所带来的产量增加有限,甚至可能降低水分生产率(单位水资源量所获得的产量),这并不利于农业的可持续发展。根据节水农业的生理生态基础,农作物各个生理过程对水分亏缺的敏感性不同,并且在一定条件下,有限水分亏缺虽然达不到充分灌溉的产量,但是对农作物产量的减少相对较小<sup>[45]</sup>。所以,需要遵循习主席提出的“以水定产”的思想,即在西北干旱半干旱地区,不应该通过强化灌溉追求高产,而应该在科学的指导下适当采取亏缺灌溉的方式<sup>[45]</sup>,从而避免灌溉用水反弹。

### 3.2.2 种植面积扩大

面积效应反映的是种植面积变化对灌溉用水反弹效应的贡献,其所引致的新增灌溉用水主要反映在新增的种植面积对灌溉用水需求量的增加。灌溉水利用系数的提高会缓解水资源的稀缺性,从而为农业生产条件的改进提供了空间,在此过程中,种植面积的扩大也会伴随着新增灌溉用水。在不考虑种植结构的情况下,可以分析西北地区 and 各省(区)主要农作物的种植面积的变化(图3)。图3反映了平滑年份2009—2015年种植面积相对于2006年的变化量,可以发现,各平滑年份的种植面积相对于基期都是增加的,其中西北整体的种植面积从基期到末期增加了2573.79千hm<sup>2</sup>。具体而言,新疆的种植面积增加的最多,甘肃次之,宁夏、陕西

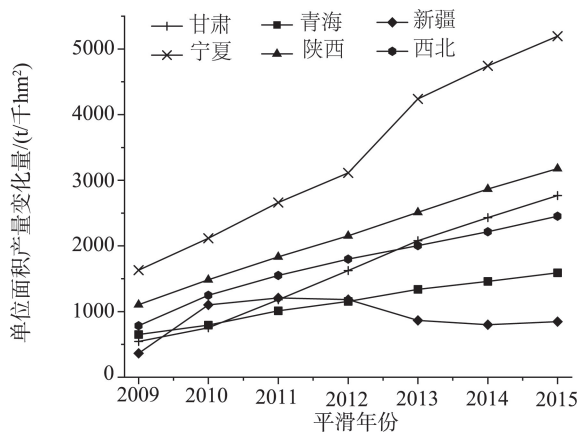


图2 西北五省(区)主要农作物单位面积产量变化量

Figure 2 Changes in the yield per unit area of the main crops in the five northwestern provinces (autonomous regions)



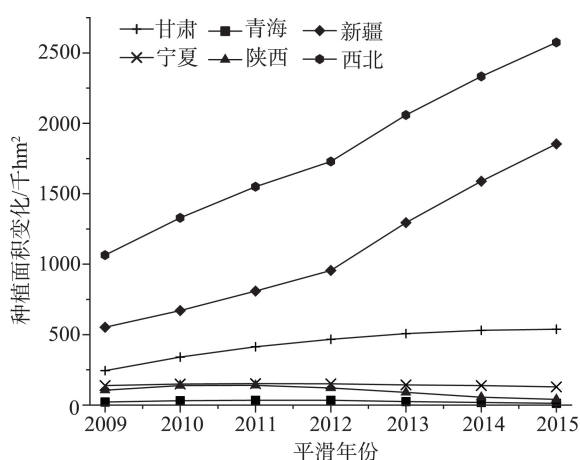


图3 西北五省(区)主要农作物种植面积变化量

Figure 3 Changes in the planting area of the main crops in the five northwestern provinces (autonomous regions)

和青海增加的相对较少。

1998年十五届三中全会以来,国家的农业节水政策不仅通过补贴政策不断增加节水灌溉面积,而且通过灌区水利工程建设扩大了有效灌溉面积,以保障有效灌溉率。在保障有效灌溉率的条件下,灌溉用水的增加会体现在种植面积的扩大上,这也体现了种植面积扩大对灌溉用水反弹效应上升的驱动作用。这种调整农作物种植规模的途径所引致的灌溉用水需求被称为灌溉用水反弹效应中的“经济反弹”。“经济反弹”一般反映的是灌溉水利用系数提高会影响到农作物的种植规模或种植结构,这都可能影响到对农业灌溉用水的需求<sup>[27,46,47]</sup>。种植面积的扩大会引致农业规模的增长,同时也会增加灌溉用水量。但是在水资源无法增加的客观条件下,盲目扩大农业规模会面临巨大的水资源供需矛盾。所以,在干旱半干旱区种植面积扩大所导致的灌溉用水反弹效应并不利于农业的可持续发展。而需要遵循习主席提出的“以水定地”的思想,即在西北干旱地区,根据区域的水资源量合理规划农业种植规模,不应该盲目发展灌溉农业,并避免种植面积扩大所导致的灌溉用水反弹。

### 3.3 区域差异

以平滑处理后的2006年为基期,并以平滑处理后的2015年为末期,分别测算了西北各省(区)和西北整体在平滑年份2006—2015年间各分解效应的整体贡献率(图4)。根据图4可以发现,对于西北整体各分解效应的贡献率而言,面积效应对灌溉用水

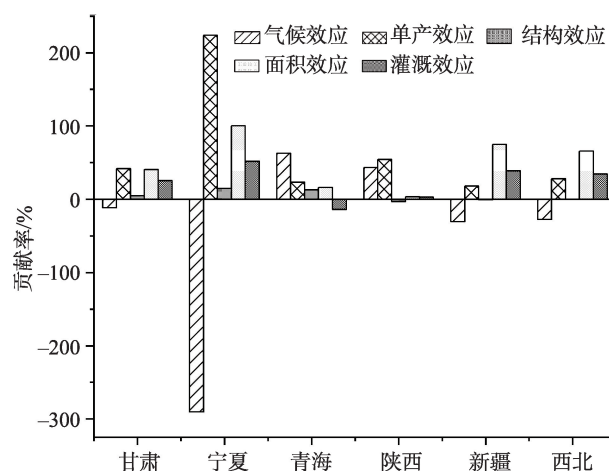


图4 西北地区各驱动因素的整体贡献率

Figure 4 The contribution rates of driving factors in northwestern China

反弹效应的贡献率最大,达65.57%,其他分解效应按贡献率绝对值大小依次是:灌溉效应为34.35%,单产效应为27.73%,气候效应为-27.65%,结构效应几乎为0。所以,西北整体灌溉用水反弹效应上升的主导因素为种植面积扩大。但是,西北各省(区)对灌溉用水反弹效应上升的主导因素仍存在着区域差异,具体表现为:

在甘肃,单产效应对灌溉用水反弹效应的贡献率最大,达41.41%,其他分解效应按贡献率绝对值大小依次是:面积效应为40.34%,灌溉效应为25.18%,气候效应为-11.82%,结构效应为4.89%(图4)。所以,单位面积产量增长为甘肃灌溉用水反弹效应上升的主导因素。在不考虑种植结构的情况下,从平滑年份来看,甘肃2015年的单位面积产量相对于2006年增加了2768 t/千hm<sup>2</sup>(图2)。由于面积效应与单产效应的贡献率相当,所以甘肃缓解灌溉用水反弹的关键在于适当采取亏缺灌溉方式,并合理规划灌溉农业的规模。

在宁夏,气候效应对灌溉用水反弹效应的贡献率最大,达-290.4%,其他分解效应按贡献率绝对值大小依次是:单产效应为224.08%,面积效应为100.07%,灌溉效应为51.74%,结构效应为14.51%(图4)。所以,气候变化对宁夏灌溉用水反弹效应存在抑制作用,而单位面积产量增长为宁夏灌溉用水反弹效应上升的主导因素。在不考虑种植结构的情况下,从平滑年份来看,宁夏2015年的单位面积产量相对于2006年增加了5195 t/千hm<sup>2</sup>(图2)。

2021年9月

所以,适当采取亏缺灌溉方式是宁夏缓解灌溉用水反弹效应的关键。

在青海,气候效应对灌溉用水反弹效应的贡献率最大,达62.52%,其他分解效应按贡献率绝对值大小依次是:单产效应为22.91%,面积效应为15.92%,灌溉效应为-13.94%,结构效应为12.59%(图4)。所以,气候变化为青海灌溉用水反弹效应上升的主导因素。气候变化主要表现为降雨量的减少或温度上升引起的蒸腾量上升,从而增加了对灌溉用水的需求。所以,青海缓解灌溉用水反弹效应需要通过适当引导农户适应气候变化,如抗旱耐盐作物品种选取、土壤蓄水保墒和保护性耕作。

在陕西,单产效应对陕西灌溉用水反弹效应的贡献率最大,达54.32%,其他分解效应按贡献率绝对值大小依次是:气候效应为43.21%,结构效应为-3.28%,面积效应为3.03%,灌溉效应为2.72%(图4)。所以,单位面积产量增长为陕西灌溉用水反弹效应上升的主导因素。在不考虑种植结构的情况下,从平滑年份来看,陕西2015年的单位面积产量相对于2006年增加了3177 t/千 $\text{hm}^2$ (图2)。所以,陕西缓解灌溉用水反弹效应需要通过适当采取亏缺灌溉的方式。

在新疆,面积效应对灌溉用水反弹效应的贡献率最大,达74.68%,其他分解效应按贡献率绝对值大小依次是:灌溉效应为38.65%,气候效应为-30.52%,单产效应为17.90%,结构效应为-0.71%(图4)。所以,种植面积扩大为新疆灌溉用水反弹效应上升的主导因素。从平滑年份来看,新疆2015年的种植面积相对于2006年增加了1854千 $\text{hm}^2$ (图3),所以新疆缓解灌溉用水反弹效应需要合理规划灌溉农业规模。

## 4 结论与启示

### 4.1 结论

本文引入“灌溉用水反弹效应”的概念来研究灌溉技术改进下的节水效果,从理论上构建了灌溉用水反弹效应的衡量和分解方法,并利用西北五省(区)2005—2016年的数据,在效应测算和分解的基础上分析了其驱动因素及区域差异,得到如下结论:

(1)西北整体的灌溉用水反弹效应高达340.00%,即新增用水量达到了预期节水量的3.4

倍,其中甘肃、宁夏、青海、陕西和新疆的灌溉用水反弹效应分别为374.97%、55.10%、117.46%、434.51%和384.32%,即西北地区除宁夏的灌溉用水反弹效应小于100%以外,其他各省(区)都存在反弹效应超过100%的回火现象。

(2)虽然灌溉水利用系数的提高有助于减少灌溉用水量,但是会有一些驱动因素会抵消预期的节水效果,并导致灌溉用水反弹效应。其中,单位面积产量增长和种植面积扩大始终是促进西北整体和各省(区)灌溉用水反弹效应上升的驱动因素。

(3)在驱动因素的影响程度上,西北各省(区)灌溉用水反弹效应上升的主导因素仍存在区域差异。西北整体的主导因素为种植面积扩大。对于西北各省(区)而言,甘肃的主导因素为单位面积产量增长,且种植面积扩大的贡献略低于主导因素,宁夏和陕西的主导因素为单位面积产量增长,青海的主导因素为气候变化,新疆的主导因素为种植面积扩大。

### 4.2 启示

灌溉效率提高所带来的节水效果可能会被新增用水所抵消,进而形成灌溉用水反弹效应。西北地区水资源供需矛盾突出,灌溉用水反弹效应的存在不利于水资源的可持续利用。结合本文的研究结论,对西北地区水资源管理提出以下启示:

(1)继续提高灌溉水利用系数。虽然灌溉水利用系数提高后预期节水量会被新增用水量所部分抵消,但是提高灌溉水利用系数仍有助于减少灌溉用水量,并缓解灌溉用水反弹效应。所以,继续提高灌溉水利用系数确实是缓解水资源约束,降低灌溉用水反弹效应的重要途径。由于提高灌溉水利用系数需要采用高成本的节水灌溉技术,国家仍需进行灌溉水利设施建设,并采用补贴的方式来推广节水灌溉技术。

(2)在提高灌溉水利用系数的同时,还需要适当采取亏缺灌溉的方式,并合理规划灌溉农业的规模。虽然灌溉水利用系数的提高有助于减少灌溉用水量,并缓解灌溉用水反弹效应,但是单位面积产量增长和种植面积扩大始终是西北地区灌溉用水反弹效应上升的驱动因素。所以,在提高灌溉水利用系数的同时,还需要在科学政策的指导下,适当采取亏缺灌溉的方式,并合理规划灌溉农业的规

模,这也与习主席提出的“以水定产”和“以水定地”的思想一致。

(3)区域间仍需要实行差异化的政策。虽然单位面积产量增长和种植面积扩大始终是西北地区灌溉用水反弹效应上升的驱动因素,但是各省(区)的主导因素仍存在区域差异,所以区域间的农业节水政策仍需实行差异化的政策。具体而言,甘肃需要适当采取亏缺灌溉方式,并合理规划灌溉农业的规模,宁夏和陕西需要在科学政策指导下适当采取亏缺灌溉的方式,青海需要适当引导农户适应气候变化,新疆需要根据水资源情况合理规划灌溉农业规模。

### 参考文献(References):

- [1] 张峰,薛惠锋. 基于绿色发展的工业全要素水资源效率时空特征[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 964-973. [Zhang F, Xue H F. Spatiotemporal characteristics of industrial total factor water resource efficiency based on green development[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 964-973.]
- [2] 韩振中. 我国灌溉发展历程与新时代发展对策[J]. 中国农村水利水电, 2020, (3): 1-3. [Han Z Z. The irrigation development process and the countermeasures in the future in China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, (3): 1-3.]
- [3] 中国灌溉排水发展中心. 中国灌溉排水发展研究报告[R/OL]. (2016-12-31) [2019-07-08]. <http://www.jszg.com.cn/Index/TopicList.asp?TopicNameID=74>. [China Irrigation and Drainage Development Center. Research Report on the Development of Irrigation and Drainage in China[R/OL]. (2016-12-31) [2019-07-08]. <http://www.jszg.com.cn/Index/TopicList.asp?TopicNameID=74>.]
- [4] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[EB/OL]. (2016-12-31) [2019-07-08]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin[EB/OL]. (2016-12-31) [2019-07-08]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>.]
- [5] Siami N, Winter R A. Jevons' paradox revisited: Implications for climate change[J]. Economics Letters, 2021, DOI: 10.1016/j.econlet.2021.109955.
- [6] Cansino J M, Román-Collado R, Merchán J. Do Spanish energy efficiency actions trigger JEVON'S paradox?[J]. Energy, 2019, 181: 760-770.
- [7] Berkhout P H G, Muskens J C, Velthuisen J W. Defining the rebound effect[J]. Energy Policy, 2000, 28(6): 425-432.
- [8] 薛彩霞,黄玉祥,韩文霆. 政府补贴、采用效果对农户节水灌溉技术持续采用行为的影响研究[J]. 资源科学, 2018, 40(7): 1418-1428. [Xue C X, Huang Y X, Han W T. Influence of government subsidies and adoption effect on continuous adoption behavior of water-saving irrigation technology by farmers[J]. Resources Science, 2018, 40(7): 1418-1428.]
- [9] 贺志武,胡伦,陆迁. 农户风险偏好、风险认知对节水灌溉技术采用意愿的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 797-808. [He Z W, Hu L, Lu Q. Influence of farmer's risk preference and risk perception on water-saving irrigation technology adoption[J]. Resources Science, 2018, 40(4): 797-808.]
- [10] 张哲晰,穆月英,侯玲玲,等. 环渤海地区滴灌的资源与经济效应: 政府与农户目标一致性检验[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1400-1415. [Zhang Z X, Mu Y Y, Hou L L, et al. Resource and economic effects of drip irrigation in the Bohai Rim area: Consistency of goals of the government and farmers[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1400-1415.]
- [11] 张华,王礼力. 农业水贫困对农户节水灌溉技术采用决策的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 105-109. [Zhang H, Wang L L. Impact of agricultural water poverty on the decision-making of farmers' water saving irrigation technology adoption[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 105-109.]
- [12] 张益,孙小龙,韩一军. 社会网络、节水意识对小麦生产节水技术采用的影响: 基于冀鲁豫的农户调查数据[J]. 农业技术经济, 2019, (11): 127-136. [Zhang Y, Sun X L, Han Y J. The effects of social network and water saving awareness on wheat production water-saving technology adoption: Based on the farmer household survey data from Hebei, Shandong and Henan provinces[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019, (11): 127-136.]
- [13] Ward F A, Pulido-Velazquez M. Water conservation in irrigation can increase water use[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the America, 2008, 105(47): 18215-18220.
- [14] Peterson J M, Ding Y. Economic adjustments to groundwater depletion in the high plains: Do water-saving irrigation systems save water?[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2005, 87(1): 147-159.
- [15] Fishman R, Devineni N, Raman S. Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater?[J]. Environmental Research Letters, 2015, DOI: 10.1088/1748-9326/10/8/084022.
- [16] Contor B A, Taylor R G. Why improving irrigation efficiency increases total volume of consumptive use?[J]. Irrigation and Drainage, 2013, 62(3): 273-280.
- [17] Berbel J, Gutiérrez-Martín C, Rodríguez-Díaz J A, et al. Literature review on rebound effect of water saving measures and analysis of a Spanish case study[J]. Water Resources Management, 2015, 29(3): 663-678.
- [18] Lopez-Gunn E, Zorrilla P, Prieto F, et al. Lost in translation? Water efficiency in Spanish agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2012, 108: 83-95.
- [19] Gómez C M, Pérez-Blanco C D. Simple myths and basic maths about greening irrigation[J]. Water Resources Management, 2014, 28(12): 4035-4044.



2021年9月

- [20] Grafton R Q, Williams J, Perry C J, et al. The paradox of irrigation efficiency[J]. *Science*, 2018, 361(6404): 748–750.
- [21] Pfeiffer L, Lin C Y C. Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2014, 67(2): 189–208.
- [22] Li H Y, Zhao J H. Rebound effects of new irrigation technologies: The role of water rights[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2018, 100(3): 786–808.
- [23] Berbel J, Mateos L. Does investment in irrigation technology necessarily generate rebound effects? A simulation analysis based on an agro-economic model[J]. *Agricultural Systems*, 2014, 128: 25–34.
- [24] Loch A, Adamson D C. Drought and the rebound effect: A Murray-Darling Basin example[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(3): 1429–1449.
- [25] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 农业用水效率与技术进步: 基于中国农业面板数据的实证研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(9): 1765–1772. [Tong J P, Ma J F, Wang H M, et al. Agricultural water use efficiency and technical progress in China based on agricultural panel data[J]. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1765–1772.]
- [26] 邓光耀, 韩君, 张忠杰. 中国各省水资源利用效率的测算及反弹效应研究[J]. *软科学*, 2017, 31(1): 15–19. [Deng G Y, Han J, Zhang Z J. Study on measure of water use efficiency and rebound effect of Chinese provinces[J]. *Soft Science*, 2017, 31(1): 15–19.]
- [27] Song J F, Guo Y N, Wu P T, et al. The agricultural water rebound effect in China[J]. *Ecological Economics*, 2018, 146: 497–506.
- [28] 王哲, 陈煜. 技术进步一定会带来一个区域农业用水总量下降吗? 基于河北省面板数据实证分析[J]. *农业技术经济*, 2020, (6): 81–89. [Wang Z, Chen Y. Will technological progress lead to a decline in agricultural water use? An empirical study based on panel data of Hebei Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020, (6): 81–89.]
- [29] 宋健峰, 王玉宝, 吴普特. 灌溉用水反弹效应研究综述[J]. *水科学进展*, 2017, 28(3): 452–461. [Song J F, Wang Y B, Wu P T. A reviews on irrigation water rebound effect[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 452–461.]
- [30] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 651–660. [Wu P T, Sun S K, Wang Y B, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 651–660.]
- [31] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome: FAO, 1998.
- [32] Döll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. *Water Resources Research*, 2002, DOI: 10.1029/2001wr000355.
- [33] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867–871.
- [34] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, 86: 233–238.
- [35] 国家气象科学数据中心. 气象数据[DB/OL]. (2016–12–31) [2019–07–08]. <http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0013.0001.html>. [China Meteorological Data Service Center. Meteorological Data Set[DB/OL]. (2016–12–31) [2019–07–08]. <http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0013.0001.html>.]
- [36] 中华人民共和国农业农村部网站. 农时数据[DB/OL]. (2016–12–31) [2019–07–08]. <http://www.moa.gov.cn/zt/>. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Farm Time Data[DB/OL]. (2016–12–31) [2019–07–08]. <http://www.moa.gov.cn/zt/>.]
- [37] Sun S K, Song J F, Wang F F, et al. Evaluating the impacts of socio-economic factors on regional grain virtual water flows in China using a structural equation modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 132–141.
- [38] 甘肃省统计局. 甘肃发展年鉴[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. [http://tjj.gansu.gov.cn/tjj/c109464/info\\_disp.shtml](http://tjj.gansu.gov.cn/tjj/c109464/info_disp.shtml). [Gansu Province Bureau of Statistics. Gansu Development Yearbook [DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. [http://tjj.gansu.gov.cn/tjj/c109464/info\\_disp.shtml](http://tjj.gansu.gov.cn/tjj/c109464/info_disp.shtml).]
- [39] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. <http://nxdata.com.cn/publish.htm?cn=G01>. [Statistic Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region. Ningxia Statistical Yearbook[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. <http://nxdata.com.cn/publish.htm?cn=G01>.]
- [40] 青海省统计局. 青海统计年鉴[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. <http://tjj.qinghai.gov.cn/tjData/qhtjnj/>. [Qinghai Province Bureau of Statistics. Qinghai Statistical Yearbook[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. <http://tjj.qinghai.gov.cn/tjData/qhtjnj/>.]
- [41] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/>. [Shaanxi Province Bureau of Statistics. Shaanxi Statistical Yearbook[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/>.]
- [42] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. [http://tjj.xinjiang.gov.cn/tjj/tjfw/list\\_tjfw.shtml](http://tjj.xinjiang.gov.cn/tjj/tjfw/list_tjfw.shtml). [Statistic Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang Statistical Yearbook[DB/OL]. (2017–12–31) [2019–07–08]. [http://tjj.xinjiang.gov.cn/tjj/tjfw/list\\_tjfw.shtml](http://tjj.xinjiang.gov.cn/tjj/tjfw/list_tjfw.shtml).]
- [43] 胡振, 何晶晶, 王玥. 基于IPAT-LMDI扩展模型的日本家庭碳排放因素分析及启示[J]. *资源科学*, 2018, 40(9): 1831–1842. [Hu Z, He J J, Wang Y. Factor analysis and enlightenment of household carbon emissions in Japan based on IPAT-LMDI extension model[J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1831–1842.]
- [44] Brinegar H R, Ward F A. Basin impacts of irrigation water conservation policy[J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 414–426.
- [45] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. *应用生态学报*, 1991, (1): 70–76. [Shan L, Xu M. Water-saving agriculture and its physiological and ecological basis[J]. *Chinese Journal of Ap-*

- plied Ecology, 1991, (1): 70–76.]
- [46] Freire-González J. Does water efficiency reduce water consumption? The economy-wide water rebound effect[J]. Water Resources Management, 2019, 33(6): 2191–2202.
- [47] Wheeler S A, Carmody E, Grafton R Q, et al. The rebound effect on water extraction from subsidising irrigation infrastructure in Australia[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104755.

## Estimation, driving factors, and regional differences of agricultural irrigation water rebound effect in arid areas: Examples of five provinces in northwestern China

XU Hang, LI Tao, SONG Jianfeng

(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In arid and semi-arid regions, the agricultural sector uses a lot of water, but the utilization rate is not high. Therefore, the development of water-saving irrigation has become a possible way to alleviate the scarcity of water resources. However, under the conditions of improved water-saving irrigation technology, if the actual water-saving effect fails to meet expectations, the “irrigation water rebound effect” will appear. Based on this situation, this paper theoretically constructs a method for measuring the irrigation water rebound effect, and then uses the LMDI method to decompose the irrigation water rebound effect into climate effect, unit yield effect, structural effect, area effect and irrigation effect. And, with the data of five northwestern provinces from 2005 to 2016, based on the calculation and decomposition of the effect, this paper analyses the driving factors and regional differences of agricultural irrigation water rebound effect in arid areas. The results show that: (1) The overall rebound effect in the northwest of China is as high as 340.00%, that is, the newly added water use has reached 3.4 times the expected water saving. Among them, the irrigation water rebound effects in Gansu, Ningxia, Qinghai, Shaanxi and Xinjiang are 374.97%, 55.10%, 117.46%, 434.51%, and 384.32%, respectively. (2) The increase in output per unit area and expansion of planting area are always the driving factors that promote the increase in the irrigation water rebound effect in the entire northwest or the provinces. (3) The increase in output per unit area is the main driving factor for increase in the overall irrigation water rebound effect in the northwest. However, there are still regional differences among the northwestern provinces. Among them, the main driving factors in Gansu, Ningxia, and Shaanxi are the increase in output per unit area, while the main driving factors in Qinghai and Xinjiang are the climate change and expansion of planting area, respectively. Based on these results, in order to avoid the agricultural irrigation water rebound effect in arid and semiarid regions, the overall strategy should not be to pursue the maximization of yield. Deficit irrigation should be appropriately adopted instead, and the scale of irrigated agriculture should be rationally planned. In terms of local strategies, regionalized policies should be adapted based on local conditions.

**Key words:** agriculture of arid area; irrigation water; water saving effect; rebound effect; northwestern China