

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.017

灌溉用水反弹效应研究综述

宋健峰^{1,2}, 王玉宝³, 吴普特^{1,3}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 推行节水灌溉技术的节水效果可能被产出增长带来的新增用水抵消, 甚至出现用水有增无减的现象, 表现为灌溉用水的反弹效应。目前有关灌溉技术节水效果的研究已有丰富成果, 但关于灌溉用水反弹效应的研究还缺乏系统梳理。从灌溉用水反弹效应概念内涵、灌溉用水特性与节水的尺度效应、灌溉用水反弹机制以及反弹程度 4 个角度综述相关文献。灌溉过程中的水量转化、水分消耗及用水效率评价非常复杂, 对灌溉用水反弹的研究还需进一步深入。未来研究的重点领域包括: ① 灌溉用水反弹的定义, 如区分水文反弹和经济反弹, 区分用水反弹和耗水反弹, 区分一般反弹效应和回火效应(大于 100%的反弹); ② 灌溉用水反弹的作用机理和控制路径; ③ 设计合理的方法实证计算反弹效应。

关键词: 反弹效应; 灌溉用水; 节水; 耗水; 效率

中图分类号: S274; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)03-0452-10

全球水资源消耗量在过去几十年里不断增加, 预计未来还将继续增加^[1]。考虑到不断增长的工业、生活和生态用水需求以及气候变化, 水管理者断言“水危机”的存在, 并寻找减少水资源消耗的途径。农业作为最大的用水部门, 是主要的节水对象^[2-3]。发展节水技术、提高灌溉效率作为控制农业用水最有效的方法之一, 得到了广泛关注。学者对此进行了大量研究, 普遍认为高效节水灌溉技术可节约大量水资源^[4-5]。然而, 在过去几十年里, 很多地方实践发现灌溉效率大幅提高的同时, 灌溉用水还在持续增长^[6]。在水资源相比土地资源更为稀缺的区域(如中国西部、北部), 高效的灌溉技术使同样产出用水更少, 农户会倾向于扩大灌溉面积以增加产出和收入^[6]。

效率提高的节约效果无法完全实现的现象在资源利用领域具有普遍性, 最先被研究能源的学者关注。1866 年, Jevons^[7]发现更高效的蒸汽机降低了煤炭消耗的同时也减少了煤炭价格, 最终反而增加了对煤炭的需求“杰文斯悖论”。Khazzoom^[8]和 Brookes^[9]提出“反弹效应”概念来描述这种现象, 认为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, 即 Khazzoom-Brookes 假说。此后学者从理论上对反弹效应进行了广泛讨论并通过实证分析验证了反弹效应的存在^[10-11]。

灌溉效率提高的节水效果也可能被产出增长带来的新增用水抵消, 表现为灌溉用水的反弹效应。联合国环境规划署和欧盟相关报告已对灌溉用水反弹效应的存在做出警示^[1,12]。中国农业生产实践中也存在用水反弹现象, 如“节水型社会用水总量增加”、“节水增粮刺激灌溉用水总量增加”等问题。反弹效应对节水政策的有效性产生极大影响, 深入认识灌溉用水反弹效应对于切实节约中国农业用水量、揭示并解决缺水地区节水困境有重要价值。

学者们很早就关注到不同尺度的节水潜力存在差异^[4,13-15], 发现高效灌溉技术耗水更多^[16]。很多学者在对灌溉技术节水效果的研究中也观察到农户用水行为的调整带来灌溉水需求增加的问题。但直到最近才出现

收稿日期: 2016-10-02; 网络出版时间: 2017-04-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170426.0932.038.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71103144); 中国博士后科学基金资助项目(2014M560815)

作者简介: 宋健峰(1981—), 女, 山西芮城人, 副教授, 博士, 主要从事水资源管理方面的研究。

E-mail: s_jf@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 吴普特, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

研究灌溉用水反弹效应的文献[2, 17-21]。本文梳理了国内外灌溉技术改进节水效应的相关文献, 讨论灌溉用水反弹效应的特殊性和作用机制, 综述灌溉用水反弹效应理论和实证研究进展, 指出当前研究中存在的问题, 展望今后需加强研究的重要方向, 为灌溉用水反弹效应的研究和节水实践提供参考。

1 灌溉用水反弹效应概念

目前定义灌溉用水反弹效应的文献很少, 虽均认为灌溉用水的反弹与能源反弹类似, 但具体定义存在差异。一种观点强调高效灌溉技术的节水效果被新增用水部分抵消即构成反弹^[2, 17-20], 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/耗水的现象称为反弹效应或杰文斯悖论^[18-21]。国内学者佟金萍等^[22]在研究中国水资源利用效率时均提到技术进步会引起灌溉用水的反弹效应, 虽未进行具体分析, 但属于第一种观点。明确灌溉用水反弹效应的定义有助于理清这两种观点的内涵。

参考能源反弹^[23-24], 灌溉用水反弹效应概念式如下:

$$R = \frac{S_e - S_a}{S_e} \times 100\% = \frac{W_r}{S_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为灌溉用水反弹效应; S_e 为灌溉技术升级后的预期节水量; S_a 为实际节水量; $W_r = (S_e - S_a)$ 为反弹用水量, 指灌溉效率提高后, 因为产出增加导致的新增用水量。

可以根据反弹效应的大小对灌溉用水反弹效应进行分类(见表1)。由表1可知, 节水的理想状况是零反弹, 即预期节水完全实现。介于0%~100%之间的反弹意味着没有完全达到预期的节水目标, 有部分节水被新增用水抵消。如果新增用水量超过预期节水量, 会发生大于100%的反弹, 也称为“回火现象”, “杰文斯悖论”本质上是指回火而非一般的反弹效应。目前对灌溉用水反弹效应定义的第二种观点将用水增加视为反弹, 是第一种观点所指的反弹效应超过100%的特殊情形。事实上, 即使用水量没有增加, 预期节水量被部分抵消的情形也是值得关注的重要问题。目前大多对能源反弹效应的计算结果都小于100%^[25-26]。

表1 灌溉用水反弹分类
Table 1 Type of the water rebound effect

类型	$R/\%$	S_a 与 S_e 的关系	W_r 与 S_e 的关系
回火	$R > 100$	$S_a < 0$	$W_r > S_e$
完全反弹	$R = 100$	$S_a = 0$	$W_r = S_e$
部分反弹	$0 < R < 100$	$0 < S_a < S_e$	$0 < W_r < S_e$
零反弹	$R = 0$	$0 < S_a = S_e$	$W_r = 0$

2 灌溉用水特殊属性与节水的尺度效应

灌溉过程中的水量转化、水分消耗及用水效率远比能源消耗复杂, 决定灌溉用水反弹效应的两个关键变量——灌溉效率和用水量的定义会因为研究视角和尺度的不同产生差异。水文学家很早就观察到不同尺度上的效率和节水评价存在差异, 主要原因在于可重复利用回流和渗漏的存在, 或“用水”与“耗水”的区别^[27-28]。

2.1 灌溉用水特殊属性

灌溉用水的特征是灌溉并没有消耗全部的取用水, 未消耗的部分通过径流和排水回流至地表水体, 或补给地下蓄水层^[29]。要研究灌溉用水反弹效应, 需要区分用水和耗水^[19]。Perry^[30]提出, 用水最终转化为4种形式: ① 有益蒸散; ② 无益蒸散; ③ 不可回收的回流和渗漏; ④ 可回收的回流和渗漏; 前3个部分为耗水。在田间尺度被视为损失的不可回收回流和渗漏, 在灌区和流域尺度或更长的时间尺度上可能被重复利用^[13, 31]。

实践中存在诸多灌溉效率评价指标, 包括灌溉水利用系数(=[田间蒸散量+深层渗漏量(水田)]/取水量)、水分生产率(=产值/单位毛灌溉水量或净灌溉水量)、水分利用效率(=作物经济产量/田间蒸散量)等^[32]。对于不同空间尺度或研究需要, 同一指标的计算方法也存在诸多差异。国际水管理研究院(International Water Management Institute, IWMI)将灌溉效率评价指标分为3类: ① 水分生产率; ② 总消耗

比例指标; ③ 水分有益消耗比例指标。无论哪一种效率指标, 效率提高意味着同样的产出用水或耗水更少。然而回流带来重复用水的存在导致流域尺度的灌溉效率不同于田间尺度, 需要被重新定义^[33]。基于此, 很多学者推荐用水账户方法评价用水效率^[16]。

2.2 节水的尺度效应与灌溉用水反弹

节水的含义也依赖于研究对象的尺度, 提高灌溉效率的节水效果因为研究尺度不同存在差异^[4]。贾绍凤^[28]研究发现, 提高渠系水有效利用系数能否节约水资源取决于渠系渗漏水的去向, 当渠系渗漏水全部得到重新利用时, 提高渠系有效利用系数的节水量等于零。雷波等^[34]区分用水和耗水, 得出同样结论, 认为节水灌溉工程措施的节水潜力很大, 但主要是毛节水量, 而净节水量的节水潜力不大。学者们还进一步分析了各效率指标和节水的尺度变化规律^[35-37]。

当节水措施旨在减少灌溉水的田间损失时, 理论上节约的水并没有形成新的供水, 而是在更大尺度上不同用水户间的重新分配^[38]。更重要的是, 高效的灌溉技术如喷灌、滴灌等节水的同时会增加产出, 而增产意味着耗水更多^[13]。因此, 提高灌溉效率后, 回流和渗漏减少, 但田间耗水增加, 田间用水可能减少但达不到预期, 也可能不变甚至增加, 同时流域尺度用水和耗水增加^[20, 39]。因为高效灌溉措施的增产功能带来的用水增加现象是水资源特有的, 很多学者将其视为灌溉用水反弹效应的一种情形^[20, 38]。值得注意的是, 如果不考虑增产效果, 提高灌溉水利用系数导致局部区域节水但流域尺度未节水的现象, 是研究尺度差异导致的, 并没有发生反弹现象, 因为此时流域尺度灌溉效率并没有提高。

3 灌溉用水反弹机制

3.1 水文反弹和经济反弹

对于为什么会发生灌溉用水的反弹, 目前研究还未形成一致观点。Contor 和 Taylor^[38]将导致反弹的因素总结为: ① 灌溉技术的特性; ② 灌溉面积增加; ③ 产出增加。Gómez 和 Pérez-Blanco^[20]将第一个因素称为水文悖论, 将第二、三个因素总结为杰文斯悖论。目前对灌溉用水反弹的来源主要有水文学和经济学两种解释。水文反弹是从耗水角度衡量的耗水增加, 建立在节水的尺度效应基础上。经济反弹建立在对农户用水行为的分析上, 灌溉效率的提高降低了农户的用水成本, 农户会自发地增加灌溉用水以增加产出和收入^[2, 20-21, 40]。灌溉用水的水文反弹是水资源特有的反弹现象, 而经济反弹与能源反弹具有相似的原理, 目前灌溉用水反弹的研究往往不作区分。另外, 虽然大多数学者认同灌溉用水的经济反弹与能源反弹并无本质差异, 但也有学者提出质疑。对能源反弹机制的论述, 往往以实际价格作为中介, 即能源效率提高后, 能源服务名义价格不变的前提下, 实际价格降低, 所以能源需求增加^[41]。同时, 大多能源反弹效应的实证研究使用价格的需求弹性作为中介变量^[42]。然而, 目前大多国家的灌溉用水都没有实现完全的市场化, 不存在完备的价格机制。基于此, Dumont 等^[29]认为, 反弹效应概念不适合用来分析灌溉技术的节水效果。

然而, 许多理论和实证研究证实了灌溉用水经济反弹的存在, 农户面对更高效的灌溉技术和相对低廉的用水成本时会增加灌溉。包括 Dumont 等^[29]也指出对反弹效应的质疑不意味着不承认效率提高后农户行为变化导致了用水增加。对灌溉用水反弹机理的研究需要进一步深入, 重点包括如何区分水文反弹和经济反弹, 明晰反弹效应作用路径等。另外, 是否应该把灌溉技术本身导致的耗水增加视为反弹也需要进一步探讨。

综合以上分析, 灌溉用水反弹机制框架如图 1 所示。 Y 为农业产值; U 为用水量(毛灌溉水量); C 为耗水量(净灌溉水量); E_u 为单位灌溉用水量经济效益(=农业产值/用水量); E_c 为单位灌溉耗水量经济效益(=农业产值/耗水量); L 为田间损失, 在更大尺度可被重复利用的地表径流和深层渗漏; η 为灌溉水利用系数(=耗水量/用水量); S_{eu} 为预期的用水节约量; S_{au} 为实际的用水节约量; S_{ec} 为预期的耗水节约量; S_{ac} 为实际的耗水节约量; R_u 为总用水反弹效应; R_c 为总耗水反弹效应; R_{uh} 为用水水文反弹效应; R_{uc} 为用水经济反弹效应; R_{ch} 为耗水水文反弹效应; R_{ce} 为耗水经济反弹效应。图 1 为灌溉系统升级、灌溉水利用系数提高后, 田间尺度灌溉用水反弹效应的一般情形, 虽然列出了耗水反弹的相关计算式供参考, 但因为假设灌溉

措施改进并没有改变耗水水分生产率, 故未发生耗水反弹, 相关计算没有实际意义。

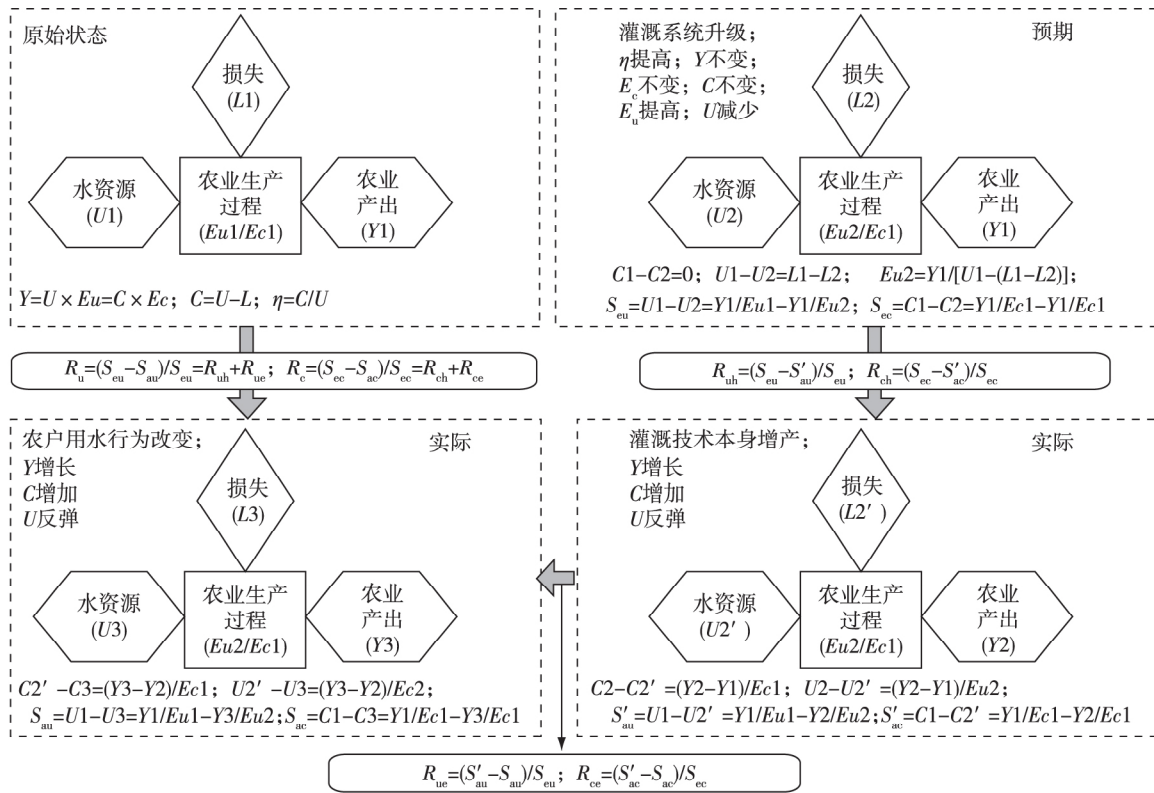


图 1 灌溉用水反弹框架

Fig. 1 Framework of the irrigation water rebound

灌溉用水反弹是水文因素和经济因素共同作用的结果, 但都来源于产出增加。用水和耗水的反弹表现出不同的结果, 计算用水反弹时使用用水效率和总量指标, 计算耗水反弹时使用相应的耗水效率和总量指标。比例指标不能直接用来计算反弹效应, 但会产生影响, 旨在减少渗漏, 提高灌溉水利用系数的节水措施, 不能提高耗水水分生产率, 但会提高用水水分生产率, 在农业产出不变的情况下, 不会发生反弹。如果灌溉技术有增产的效果, 会发生用水水文反弹。同时, 由于用水水分生产率提高, 农户实际灌溉成本下降, 受经济利益激励增加灌溉, 扩大灌溉面积或改变种植结构以增加农业产出, 发生用水经济反弹。如灌溉措施使耗水水分生产率提高, 用水水分生产率也会提高(幅度小), 如果灌溉技术有额外的增产功能(并非来源于耗水水分生产率提高), 会发生耗水和用水的水文反弹。同时因为用水水分生产率提高, 农户用水行为调整会发生耗水和用水的经济反弹。流域尺度反弹类似于田间尺度耗水反弹。现实中用水、效率和产出之间的关系更加复杂, 反弹效应各环节以及各种反弹效应之间的关系需要进一步研究。

3.2 反弹的具体原因和控制路径

对灌溉效率提高节水效果的研究, 在发现节水效果没有达到预期的同时, 以往研究也讨论了原因。总结如下: ① 产出增加导致耗水增加^[5, 13, 39-40, 43-45]; ② 种植结构向高耗水作物转变^[13, 19, 43, 46-47]; ③ 增加灌溉定额^[2, 13, 18, 38, 44, 48]; ④ 灌溉面积扩大^[18, 21, 45-46, 49-50]。其中第 1 个属于水文因素, 后 3 个属于经济因素, 是农户理性选择的结果^[20, 38, 51]。Pfeiffer 和 Lin^[2]把第 2 和第 3 个因素总结为用水强度增强, 把第 4 个因素总结为用水广度扩大。

值得注意的是, 高效的灌溉系统存在安装成本和运营成本, 会抵消效率提高降低实际成本的作用, 即掩盖一部分反弹效应。Gómez 和 Pérez-Blanco^[20]认为灌溉效率提高导致的用水变化除了取决于技术效应和生产力效应(反弹效应)外, 还取决于成本效应, 成本效应源于高效灌溉技术导致较高的用水成本, 与技术效应

一致,将导致用水减少。

学者们进一步讨论了反弹效应发生的条件和控制路径。Berbel 和 Mateos^[21]认为限制灌溉面积扩大可以控制用水反弹,限制用水可以控制充分灌溉时的耗水反弹,但对于亏缺灌溉依然会增加耗水。Berbel 和 Mateos^[21]对西班牙南部瓜达尔基维尔河流域的案例发现没有出现反弹效应。原因在于农户遵守以下规范:① 严格限制灌溉面积扩张;② 用水权减少;③ 为满足环境目标对节约水的重新分配,这些条件是避免反弹效应的关键^[19]。Li 和 Zhao^[17]同样认为限制农户水权可以有效控制反弹效应的发生。

4 灌溉用水反弹程度

4.1 模型分析

开发模型研究灌溉效率提高节水效果的相关文献详见表 2。相关研究主要包括两类,一类文献用经济或农业经济模型论证经济反弹的存在,不关注耗水的变化^[20-21, 49, 52-53]。另一类文献发现高效灌溉技术本身存在的耗水增加特性,使用水文经济模型综合分析水文反弹和经济反弹^[5, 18, 38, 44-45, 48, 51]。其中, Dagnino 和 Ward^[5]、Whittlesey^[40]和 Huffaker^[51]的分析仅揭示了水文反弹的存在,还有一些学者通过耗水的变化来研究环境用水问题^[18, 48]。绝大多数的研究结论都显示在一定条件下耗水或用水存在反弹,而 Peterson 和 Ding^[52]和 Graveline 等^[49]的分析间接证明了这一点。

表 2 建立灌溉用水反弹模型分析的相关文献
Table 2 Model research on the water rebound

文献	尺度	模型形式	模型内容	结论
Peterson 和 Ding ^[52]	流域	风险规划模型	研究灌溉效率对灌溉用水的影响	用水与效率变化没有单调关系
Scheierling 等 ^[44]	流域	线性规划模型	研究农户用水行为	真实节水取决于损失的特性、政策设计和农户行为
Huffaker ^[51]	流域	数学规划模型	求解农户利润最大化问题,研究不同情境节水效果	节水潜力取决于效率提高对水的边际生产力的影响
Ward 和 Pulido-Velazquez ^[45]	田间和流域	动态非线性优化模型	分析节水补贴对灌溉用水和节水的影响	旨在减少用水的政策在流域尺度增加了耗水
Qureshi 等 ^[48]	流域	数学规划模型	求解政府补贴时农户的利润最大化问题	政府补贴导致回流减少
Gutierrez-Martin 和 Gomez ^[53]	流域	数学规划模型	求解农户效用最大化,评价效率改进的节水效果	潜在节水被增加的水需求抵消
Dagnino 和 Word ^[5]	流域	规划模型	求解农户收入最大化问题	补贴滴灌减少了用水量,但增加了作物的耗水需求
Contor 和 Taylor ^[38]	田间	水需求函数	评价短期田间需水	效率提高导致耗水增加是农户理性选择的结果
Gomez 和 Perez-Blanco ^[20]	流域	水需求函数	分解用水的效率弹性	节水效果取决于技术效应、成本效应和生产率效应
Graveline 等 ^[49]	流域	线性规划模型	评价灌溉技术现代化的影响	灌溉技术现代化使用水减少,同时灌溉面积增加
Berbel 和 Mateos ^[21]	流域	规划模型	分析灌水均匀度提高增加用水和/或耗水的条件	如果没有土地限制,用水和耗水增加
Loch 和 Adamson ^[18]	流域	规划模型	研究政府补贴时农户用水行为变化	激励节水的政策降低了环境用水量

以上模型分析只有 Berbel 等^[19]和 Gómez 和 Pérez-Blanco^[20]明确研究反弹效应,其中 Berbel 等^[19]分析的是回火现象而非一般的反弹效应。大多数研究并不是把灌溉效率提高作为输入变量,部分研究比较不同灌溉技术对用水或耗水的影响^[52-53];部分研究考虑节水补贴或灌溉现代化的节水效果,灌溉效率提高是一个中间变量^[18, 44-45, 48-49, 51];还有学者研究提高灌水均匀度的节水效果^[21]。

4.2 实证分析

通过直接比较或构建仿真模型实证分析节水效果的文献见表3。

表3 灌溉用水反弹实证分析的相关文献
Table 3 Empirical evidence on the water rebound

文献	区域	方法	效率提高表现	节水效果
Ellis 等 ^[46]	美国德克萨斯州大平原灌区	规划模型	输水管道升级	用水量没有减少
Peterson 和 Ding ^[52]	美国堪萨斯西部	规划模型	升级为喷灌和滴灌	地下水提取量减少, 每英亩灌溉量增加
Ward 和 Pulido-Velazquez ^[45]	新墨西哥南部大象峰灌区	水文经济模型	不同的滴灌补贴水平	田间尺度用水减少, 流域尺度用水增加
García-Garizábal 和 Causapé ^[56]	埃布罗河流域 Búrdenas 运河灌区	对比	灌溉效率提高	用水增加 26%
Lecina 等 ^[43]	西班牙 Riegos del Alto Aragón 和埃布罗河	水账户方法	灌溉现代化(漫灌升级为喷灌)	流域尺度耗水和用水都增加
Gutierrez-Martin 和 Gomez ^[53]	西班牙瓜达尔基维尔河灌区	揭示偏好模型	滴灌(灌溉效率从 70% 提高到 88%)	预期节水被增加的水需求抵消
Rodrigues 等 ^[57]	西班牙 Guadalquivir 流域灌区	性能指标对比	灌溉现代化(升级为滴灌)	灌溉用水减少约 40%, 耗水量增加约 20%
Dagnino 和 Ward ^[5]	北美里奥格兰德流域大象丘灌区	规划模型	升级为滴灌	用水量减少, 但作物耗水需求增加
López-Gunn 等 ^[55]	西班牙阿利坎特灌区 西班牙阿尔梅里亚	比较 比较	输水管道升级 输水管道升级	耗水节约低于预期 实际没有节水
Contor 和 Taylor ^[38]	美国爱达荷州卷蛇河平原东部	水需求函数	灌溉效率从 60% 提高到 80%	田间用水减少 15%, 耗水量增加 3%
Pfeiffer 和 Lin ^[2]	堪萨斯州西部	计量经济分析	升级为喷灌	地下水抽取量增加
Fernandez 等 ^[47]	西班牙南部 5 个灌区	性能指标对比	输水管道升级	短期用水减少 23%, 中期用水需求增加
Graveline 等 ^[49]	西班牙加利西亚河流域灌区	水文经济模型	升级为喷灌	总用水减少 2%, 灌溉面积增加 4%
Berbel 等 ^[19]	西班牙南部瓜达尔基维尔河流域灌区	对比	灌溉现代化(升级为滴灌)	用水减少了 21%, 耗水增加了 2%
Fishman 等 ^[50]	印度	水文经济模型	升级为滴灌和喷灌	50% 的节水被抵消

以上实证分析中大多数学者关注灌溉效率提高后用/耗水不减反增的极端情形, 只有较少学者关注更一般的反弹效应^[53]。Pfeiffer 和 Lin^[2] 研究发现更高效的灌溉技术实施后用水增加了, 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。Fernandez 等^[47] 研究发现在短期用水减少了, 但承认存在反弹效应, 因为相比预期用水增加了。Berbel 等^[19] 综述了不同节水技术的反弹效应, 但认为用/耗水增多的情形才视为反弹。

对节水效果实证研究的结论分为 4 种情形: ① 田间用水减少但流域尺度用水或耗水增加了。考虑田间尺度用水时用水减少了, 但进一步分析了流域尺度用水后发现用水增加^[45, 54]。另外一些学者研究发现虽然用水减少但是耗水增加了^[5, 19, 38, 57]。② 用水减少, 但减少的理由间接说明反弹效应存在的可能。Peterson 和 Ding^[52] 研究指出用水减少的原因在于灌溉面积减少。认为灌溉效率的增加可能增加也可能减少用水。Graveline 等^[49] 发现总用水量减少了, 但同时灌溉面积增加了。③ 用水增加了^[2, 43, 55]。其中 Lecina 等^[43] 和 López-Gunn 等^[55] 也验证了耗水的增加。④ 用水/耗水没有增加, 但观察到了反弹效应的存在。Ellis 等^[46] 研究发现用水量没有太大的变化。Gutierrez-Martin 和 Gomez^[53] 的研究发现灌溉技术提高的预期节水被抵消。López-Gunn 等^[55] 对西班牙阿利坎特地下水灌区的案例分析发现实际耗水节约小于预期。Fernandez 等^[47] 肯定了短期反弹的存在, 同时认为中长期这一现象会更突出。Fishman 等^[50] 分析发现 50% 的地下水节水潜力被灌

溉面积扩大带来的新增用水抵消,即 50%的反弹效应。

5 结论与展望

(1) 目前对灌溉效率提高节水效果的研究已有丰富成果,但明确研究灌溉用水反弹效应的文献还非常有限,缺乏对灌溉用水反弹效应概念和机理的理论研究,也没有计算灌溉用水反弹效应的实证文献,对灌溉用水反弹效应的研究还需进一步深入。理论研究中迫切需要解决的问题是:①对水文反弹和经济反弹的定位和认识;②对耗水反弹和用水反弹的定位和认识。实证研究中迫切需要解决的问题是:①区分一般的反弹效应和反弹效应大于 100%的特殊情形(回火现象或杰文斯悖论);②选择合理的指标,构建合理的方法计算灌溉用水反弹效应。

(2) 灌溉用水反弹效应研究的主要困境在于灌溉用水的特殊属性。相比能源,灌溉过程中的水量转化、水分消耗及用水效率非常复杂,不能直接套用能源反弹的概念和研究框架。另外对于能源反弹效应的计算经常使用价格弹性作为中间变量,但农业水价往往没有反应真实的供求关系,其作为阻止反弹发生措施的有效性受到质疑。

(3) 为防止灌溉用水反弹的发生,确保节水成效,必须控制农业用水的扩张。可能的措施包括:根据效率调整水权、限制灌溉面积扩大、限制高耗水作物种植和提高水价等,这些都需要进一步研究,不同政策组合的研究对于水资源管理有重要价值。

灌溉用水反弹效应的研究虽然才刚刚起步,但已经体现出重要的价值。面对缺水现状,提高灌溉效率通常被认为是减少农业用水以满足其他用途的必要条件,反弹效应的存在说明效率提高并不是节水的充分条件。必须限制灌溉用水的反弹效应才能实现真正的节水,否则节约的水将被用来进一步增加农业产出,无法有效缓解缺水区的水危机。由于中国水资源区域分布极不均衡,这一认识对于中国农业可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture: managing systems at risk [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [2] PFEIFFER L, LIN C Y C. Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence [J]. Agricultural and Applied Economics Association, 2014, 67(2): 189-208.
- [3] SUN S, WANG Y, LIU J, et al. Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework [J]. Journal of Hydrology, 2015, 532: 140-148.
- [4] CLEMMENS A J, ALLEN R G, BURT C M. Technical concepts related to conservation of irrigation and rainwater in agricultural systems [J]. Water Resources Research, 2008, 44: 1-16.
- [5] DAGNINO M, WARD F A. Economics of agricultural water conservation: empirical analysis and policy implications [J]. International Journal of Water Resources Development, 2012, 28(4): 577-600.
- [6] HOEKSTRA A Y. The water footprint of modern consumer society [M]. New York: Routledge, 2013.
- [7] JEVONS W S. The coal question: can Britain survive? [M]. London: Macmillan, 1866.
- [8] KHAZZOOM J D. The incorporation of new technologies in energy supply estimation [M]. London: Springer, 1980.
- [9] BROOKES L. The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution [J]. Energy Policy, 1990, 18(2): 199-201.
- [10] GREENING L A, GREENE D L, DIFIGLIO C. Energy efficiency and consumption: the rebound effect: a survey [J]. Energy Policy, 2000, 28(617): 389-401.
- [11] SAUNDERS H D. A view from the macro side: rebound, backfire, and Khazzoom-Brookes [J]. Energy Policy, 2000, 28(6): 439-449.
- [12] MCGLADE J, WERNER B, YOUNG M, et al. Measuring water use in a green economy: a report of the working group on water efficiency to the international resource panel [R]. Nairobi: UNEP, 2012: 654-659.

- [13] PLAYÁN E, MATEOS L. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1/2/3): 100-116.
- [14] 崔远来, 谭芳, 郑传举. 不同环节灌溉用水效率及节水潜力分析 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(6): 788-794. (CUI Y L, TAN F, ZHENG C J. Analysis of irrigation efficiency and water saving potential at different scales [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 788-794. (in Chinese))
- [15] 刘路广, 崔远来, 吴瑕. 考虑回归水重复利用的灌区用水评价指标 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 522-528. (LIU L G, CUI Y L, WU X. Water use assessment indices under the influence of return flows in irrigation districts [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 522-528. (in Chinese))
- [16] PERRY C. Accounting for water use: terminology and implications for saving water and increasing production [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(12): 1840-1846.
- [17] LI H Y, ZHAO J H. Rebound effect of irrigation technologies? The role of water rights November [C]//Boston: Agricultural and Applied Economics Association, 2016.
- [18] LOCH A, ADAMSON D. Drought and the rebound effect: a Murray-Darling Basin example [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(3): 1429-1449.
- [19] 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.
- [20] GÓMEZ C M, PÉREZ-BLANCO C D. Simple myths and basic maths about greening irrigation [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(12): 4035-4044.
- [21] 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.
- [22] 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. (in Chinese))
- [23] BERKHOUT P H, MUSKENS J C, VELTHUIJSEN J W. Defining the rebound effect [J]. *Energy Policy*, 2000, 28(6): 425-432.
- [24] ALCOTT B. Jevons' paradox [J]. *Ecological Economics*, 2005, 54(1): 9-21.
- [25] GHOSH N K, BLACKHURST M F. Energy savings and the rebound effect with multiple energy services and efficiency correlation [J]. *Ecological Economics*, 2014, 105: 55-66.
- [26] LIN B, LIU H. A study on the energy rebound effect of China's residential building energy efficiency [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 86: 608-618.
- [27] HAFEZ M M, BOUMAN B A M, GIESEN N V D, et al. Scale effects on water use and water productivity in a rice-based irrigation system (UPRIS) in the Philippines [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 92(1/2): 81-89.
- [28] 贾绍凤. 提高渠系水有效利用系数的节水效果计算 [J]. *灌溉排水学报*, 1997, 16(2): 47-50. (JIA S F. Estimation on economizing on water resource by raising the effective coefficient of canal water utilization [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1997, 16(2): 47-50. (in Chinese))
- [29] DUMONT A, MAYOR B, LÓPEZ-GUNN E. Is the rebound effect or Jevons paradox a useful concept for better management of water resources? Insights from the irrigation modernisation process in Spain [J]. *Aquatic Procedia*, 2013, 1: 64-76.
- [30] PERRY C. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations [J]. *Irrigation and Drainage*, 2007, 56(4): 367-378.
- [31] 陈皓锐, 伍靖伟, 黄介生, 等. 关于灌溉用水效率尺度问题的探讨 [J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(6): 1-6. (CHEN H R, WU J W, HUANG J S, et al. Discussion about several scale issues of irrigation water use efficiency [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(6): 1-6. (in Chinese))
- [32] 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. (in Chinese))
- [33] PEREIRA L S, CORDERY I, IACOVIDES I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 108(11): 39-51.
- [34] 雷波, 刘钰, 许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 10-14. (LEI B, LIU Y, XU

- D. Estimating theory and method of irrigation water-saving potential based on irrigation district scale [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 10-14. (in Chinese)
- [35] 谢先红, 崔远来. 灌溉水利用效率随尺度变化规律分布式模拟 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 681-689. (XIE X H, CUI Y L. Distributed hydrological modeling of irrigation water use efficiency at different spatial scales [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 681-689. (in Chinese))
- [36] 陈皓锐, 伍靖伟, 黄介生, 等. 石津灌区冬小麦水分生产率的尺度效应 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(1): 49-55. (CHEN H R, WU J W, HUANG J S, et al. Scale effect of water productivity for winter wheat in Shijing Irrigation District [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(1): 49-55. (in Chinese))
- [37] van HALSEMA G E, VINCENT L. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 108: 9-15.
- [38] 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.
- [39] HUFFAKER R, WHITTLESEY N. The allocative efficiency and conservation potential of water laws encouraging investments in on-farm irrigation technology [J]. *Agricultural Economics*, 2000, 24(1): 47-60.
- [40] WHITTLESEY N. Improving irrigation efficiency through technology adoption: when will it conserve water? [J]. *Developments in Water Science*, 2003, 50(3): 53-62.
- [41] BINSWANGER M. Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect? [J]. *Ecological Economics*, 2001, 36(1): 119-132.
- [42] GALVIN R. Estimating broad-brush rebound effects for household energy consumption in the EU 28 countries and Norway: some policy implications of Odyssee data [J]. *Energy Policy*, 2014, 73(5): 323-332.
- [43] LECINA S, ISIDORO D, PLAYAN E, et al. Irrigation modernization and water conservation in Spain: the case of Riegos del Alto Aragon [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1663-1675.
- [44] SCHEIERLING S M, YOUNG R A, CARDON G E. Public subsidies for water-conserving irrigation investments: hydrologic, agroeconomic, and economic assessment [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42: W034283.
- [45] WARD F A, PULIDO-VELAZQUEZ M. Water conservation in irrigation can increase water use [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(47): 18215-18220.
- [46] ELLIS J R, LACEWELL R D, RENEAU D R. Estimated economic impact from adoption of water-related agricultural technology [J]. *Western Journal of Agricultural Economics*, 1985 (12): 307-321.
- [47] FERNANDEZ G I, RODRIGUEZ D J A, CAMACHO P E, et al. Effects of modernization and medium term perspectives on water and energy use in irrigation districts [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 131: 56-63.
- [48] QURESHI M E, SCHWABE K, CONNOR J, et al. Environmental water incentive policy and return flows [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: 475-478.
- [49] GRAVELINE N, MAJONE B, van DUINEN R, et al. Hydro-economic modeling of water scarcity under global change: an application to the Gallego River basin (Spain) [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 119-132.
- [50] FISHMAN R, DEVINENI N, RAMAN S. Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater? [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 84022.
- [51] HUFFAKER R. Conservation potential of agricultural water conservation subsidies [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(7): 761-768.
- [52] 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.
- [53] GUTIERREZ-MARTIN C, GOMEZ C M. Assessing irrigation efficiency improvements by using a preference revelation model [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2011, 9(4): 1009-1020.
- [54] JACKSON T M, KHAN S, HAFEEZ M. A comparative analysis of water application and energy consumption at the irrigated field level [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1477-1485.
- [55] LÓPEZ-GUNN E, ZORRILLA P, PRIETO F, et al. Lost in translation? Water efficiency in Spanish agriculture [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 108(2): 83-95.

- [56] GARCÍA-GARIZÁBAL I, CAUSAPÉ J. Influence of irrigation water management on the quantity and quality of irrigation return flows [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 385 (1/2/3/4): 36-43.
- [57] RODRIGUES G C, PAREDES P, GONÇALVES J M, et al. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: ranking for water saving vs farm economic returns [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 126(8): 85-96.

A reviews on irrigation water rebound effect*

SONG Jianfeng^{1 2}, WANG Yubao³, WU Pute^{1 3}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;*

2. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China;*

3. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)*

Abstract: Technological methods for improving irrigation efficiency are widely regarded as effective for reducing water use. However, it has not achieved the expected water savings; water use in some areas even increased. This situation implies that the so-called rebound effect may occur, which means the expected water savings are offset by the additional water demand arising from agricultural output increasing. Research on irrigation efficiency improvement's effect on water savings has palpable benefits nowadays. Nevertheless, the literatures on the rebound effect of irrigation water not been reviewed systematically. This paper reviews these literatures from these aspects of the following: a definition of water rebound effect, scale effects of water savings, and the rebound mechanism and magnitude of the water rebound effect. The irrigation water rebound effect needs to be researched further, and cannot be studied with the framework and method for energy rebound effects, due to the measuring complexity of water use, savings and efficiency. Future research areas should focus on the following: ① providing a clarified definition of irrigation water rebound effect, as to distinguish the hydrological and economic rebound, water use and consumption rebounds, and the general rebound and the backfire effects; ② deeply study the mechanism of irrigation water rebound; ③ develop a reasonable method for calculating the irrigation water rebound effect.

Key words: rebound effect; irrigation water use; water saving; water consumption; efficiency

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 71103144) and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2014M560815) .