

分类号 C8/401
U D C

密级 公开
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 基于 CGE 模型的甘肃省水资源回弹
效应研究

研究生姓名: 毛颖

指导教师姓名、职称: 邓光耀、教授

学科、专业名称: 统计学、应用统计

研究方向: 经济统计应用

提交日期: 2024年6月3日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 毛颖 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 陈巍 签字日期： 2024.6.3

导师(校外)签名： _____ 签字日期： _____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意
(选择“同意”/“不同意”)以下事项：

1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 毛颖 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 陈巍 签字日期： 2024.6.3

导师(校外)签名： _____ 签字日期： _____

Research on Gansu Province's Water Efficiency Rebound Effect Based on CGE Model

Candidate : Mao Ying

Supervisor: Deng Guangyao

摘 要

甘肃省面临严重的水资源短缺问题，人均水资源占有量仅占全国的四分之一。传统观点认为用水效率提高会使得水资源使用量减少，各地都将提高水资源利用率作为保护环境的重要措施之一，然而，越来越多的学者提出了水资源回弹效应，即用水效率的提高不一定会带来水资源消耗量的减少。出现这种情况主要是由于用水效率提高后，所产生的替代效应、价格效应和产出效应会带来新的水资源需求。高效利用水资源作为缓解甘肃省水资源短缺的重要措施，其所达到的效果可能会因为水资源回弹效应的存在被部分或全部抵消，甚至如果发生超过 100% 的回弹效应，会严重影响到甘肃省经济可持续发展，为了助力甘肃省经济与水资源的协调发展，有必要测算该地区的水资源回弹效应。

本文以社会核算矩阵为数据基础，构建了以生产用水为生产要素，生活用水、生态用水为商品的静态、动态 CGE (Computable general equilibrium model) 模型，来研究甘肃省水资源回弹效应，同时分析了提高用水效率所带来的经济效应和节水效应，以便重新审视用水效率与经济发展之间的联系，得到的结论如下：

(1) 提高各部门生产用水效率会促进 GDP、政府收入、企业收入、居民收入、进口总量、出口总量上升，即生产用水效率越高，越能刺激甘肃省经济发展，并使得农业、制造业等高耗水行业部门产出增加，同时减少了各部门的用水量，而导致生活用水量和生态用水量上升。

(2) 提高用水效率时，甘肃省宏观层面存在水资源回弹效应，且不同部门之间差异较大，除水的生产和供应业外，其它部门均存在部分回弹情况，其中，制造业的回弹效应最大，即提高制造业部门的用水效率所带来的实际节水效果不理想。农业、采矿业、燃气生产和供应业、建筑业、服务业部门回弹效应均小于 50% 并大于 0，即提高用水效率后的理论水资源节约量部分被抵消，节水政策只实现了一部分，并且各部门的水资源回弹效应随着用水效率的提高而不断增加。

(3) 从长期来看，各部门的产出水平都随着生产用水效率的提高而出现不同程度的增长，其增长速度最快的为制造业，最慢的为建筑业。各部门水资源消耗量的增长速度从快到慢依次为制造业、农业、采矿业、水的生产和供应

业、燃气的生产和供应业、服务业、建筑业。生活用水量、生态用水量也呈现出逐年增加的趋势。由于用水效率的提高使产品生产成本下降，使得如农业、制造业等高耗水部门产品竞争力提高和出口量增加，进而导致整体经济发展过程中对水资源需求的增加，所以回弹效应也呈现出逐年增加的趋势。

关键词：用水效率 回弹效应 动态 CGE 模型

Abstract

Gansu Province is facing a serious water shortage, with only a quarter of the country's per capita water resources. However, more and more scholars have proposed the water rebound effect, that is, the improvement of water use efficiency does not necessarily lead to a decrease in water consumption. This is mainly due to the substitution, price and output effects that result from increased water use efficiency and lead to new demand for water resources. As an important measure to alleviate the shortage of water resources in Gansu Province, the effect of efficient use of water resources may be partially or completely offset by the existence of water resources rebound effect, and even if the rebound effect exceeds 100%, it will seriously affect the sustainable economic development of Gansu Province.

Based on the social accounting matrix, this paper constructs a static and dynamic CGE (Computable general equilibrium model) model with production water as the production factor and domestic water and ecological water as commodities to study the rebound effect of water resources in Gansu Province, and analyzes the economic and environmental effects brought about by improving water use efficiency, so as to re-examine the relationship between water use efficiency and economic development.

(1) Improving the production water efficiency of various sectors will promote the increase of GDP, government revenue, enterprise income, household income, total imports and total exports, that is, the higher the production water use efficiency, the more it can stimulate the economic development of Gansu Province, and increase the output of high water-consuming industries such as agriculture and manufacturing, while reducing the water consumption of various departments, resulting in the increase of domestic water consumption and ecological water consumption.

(2) When improving water use efficiency, there is a rebound effect of water resources at the macro level in Gansu Province, and there is a large difference between different sectors, except for the water production and supply industry, there are some rebound situations in other sectors, among which the rebound effect of the manufacturing industry is the largest, that is, the actual water-saving effect brought about by improving the water use efficiency of the manufacturing sector is not ideal. The rebound effect of agriculture, mining, gas production and supply, construction and service industries is less than 50% and greater than 0, that is, the theoretical water resource savings after improving water use efficiency are partially offset, and the water conservation policy is only partially realized, and the water resource rebound effect of each sector increases with the improvement of water use efficiency.

(3) In the long run, the output level of each sector has increased to varying degrees with the improvement of production water efficiency, with the fastest growth rate in the manufacturing industry and the slowest in the construction industry. The growth rate of water consumption in each sector is in order of manufacturing, agriculture, mining, water production and supply, gas production and supply, service industry, and construction industry. Domestic water consumption and ecological water consumption are also increasing year by year. The rebound effect is also increasing year by year due to the increase in the production cost of products due to the improvement of water use efficiency, which improves the competitiveness of products and increases the export volume of high-water-consuming sectors such as agriculture and manufacturing, which in turn leads to the increase in the demand for water resources in the process of overall economic development.

Keywords: Water efficiency; Rebound effect; Dynamic Computable general equilibrium model

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外相关研究综述.....	2
1.2.1 能源回弹效应研究.....	3
1.2.2 水资源回弹效应研究.....	4
1.2.3 CGE 模型在水资源领域的应用研究.....	4
1.2.4 文献述评.....	6
1.3 研究的主要内容及方法.....	6
1.3.1 研究的主要内容.....	6
1.3.2 技术路线.....	7
1.3.3 主要的研究方法.....	8
1.4 本文创新之处.....	9
1.5 本章小结.....	9
2 模型与理论基础.....	11
2.1 CGE 模型简介.....	11
2.2 投入产出理论.....	11
2.3 一般均衡理论.....	12
2.4 提高用水效率的双向作用机制.....	13
2.4.1 正向作用机制.....	13
2.4.2 反向作用机制.....	14
2.5 水资源回弹效应.....	14
2.6 本章小结.....	15
3 甘肃省水资源 CGE 模型的构建.....	17
3.1 静态 CGE 模型的构建.....	17
3.1.1 生产模块.....	17

3.1.2 商品模块.....	19
3.1.3 机构模块.....	22
3.1.4 均衡闭合模块.....	25
3.1.5 宏观指标模块.....	26
3.2 动态 CGE 模型的构建.....	26
4 数据基础及参数设定.....	29
4.1 社会核算矩阵 (SAM) 概述.....	29
4.2 甘肃省社会核算矩阵 (SAM) 的编制.....	31
4.2.1 投入产出表.....	31
4.2.2 宏观社会核算矩阵的编制.....	31
4.2.3 微观社会核算矩阵的编制.....	33
4.3 SAM 表的平衡方法.....	33
4.4 模型参数的设定.....	34
4.5 本章小结.....	34
5 甘肃省水资源回弹效应的模拟研究.....	35
5.1 情景设计.....	35
5.2 静态模拟.....	36
5.2.1 用水效率提高后的经济效应.....	36
5.2.2 用水效率提高后的节水效应.....	38
5.2.3 用水效率提高后的回弹效应.....	39
5.3 敏感性分析.....	40
5.4 动态模拟.....	41
5.4.1 用水效率提高后的经济效应.....	42
5.4.2 用水效率提高后的节水效应.....	43
5.4.3 用水效率提高后的回弹效应.....	44
5.5 本章小节.....	44
6 结论与建议.....	46
6.1 主要结论.....	46

6.2 建议.....	47
6.3 展望与不足.....	48
参考文献.....	50
致谢.....	55
附录.....	56

1 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

水资源在人类生存和社会发展过程中扮演着重要角色，维持着生态平衡，是必不可少的自然资源，是有战略意义的经济资源，在现代化农业中发挥重要作用。

甘肃省是内陆城市，水资源的严重不足导致甘肃发展缓慢并且限制了未来的发展空间，人均水资源占有量在全国 31 个省（区、市）中排名第 27 位，已接近世界严重缺水线（郑洋，2022）。全省约有 63 个县存在缺水问题，水资源地理布局严重限制了现代经济社会的发展，甘肃省以较少的水资源量承载着所有人口的消耗和 GDP 增长（史海春等，2021）。

“十三五”时期，甘肃省大力提倡宣传农业节水，并在科研技术方面加大投入，力争提高农业用水效率，与“十二五”末相比，用水效率得到了大幅度提高。甘肃省在“十四五”水利发展规划中，要求合理布局水资源配置并且不断优化，提高水资源利用率，将用水总量控制在 121 亿 m^3 以内。

甘肃省经济发展过程中面临着如何平衡水资源消耗和经济快速发展的重要难题，传统观点认为提高水资源利用效率，即代表生产一单位产品所需要耗费的水资源量减少，水资源使用总量随之减少，因此世界各国都将提高水资源利用率作为环境保护的重要措施之一。但是根据国内外学者的研究结果显示（Scheierling 等，2006；Ward 等，2008；Pfeiffer 等，2014；邓光耀等，2017；Sears 等，2018）以提高水资源利用效率为主导的节水政策在一定程度上是无效的，潜在节水效果中有相当一部分并未实现，仍然存在较大的节水潜力，单纯依靠改进水资源利用效率的政策只能解决部分问题。水资源回弹效应的出现让部分学者开始重新思考提高用水效率能否一定使得水资源消耗总量减少，审视用水效率与经济发展之间的联系。

1.1.2 研究意义

水资源回弹效应的提出促使人们重新审视提高用水效率来降低水资源消耗量的政策选择。结合上述背景，从系统和结构的视角，测算极度缺水省份——甘肃省的水资源回弹效应，具有较强的理论意义和现实意义。

(1) 理论意义

回弹效应已成为水资源经济学领域的一个重要课题，学者们对其测算方法进行了有益探索，普遍认为用水效率提高会促进经济规模扩张而引致水资源回弹效应，但其所采用的方法大部分是基于计量经济学进行的。与已有文献不同，本文采用 CGE 模型对甘肃省水资源回弹效应进行测算。CGE 模型最大的特点是能够处理庞大且复杂的经济系统，与计量经济学模型相比较，运用该模型所得到的结果与实际情况偏差较小，由此采用 CGE 模型能够较为客观准确地测算出甘肃省水资源回弹效应。

(2) 现实意义

水资源自古以来是经济社会发展过程中不可替代的生产要素，在如今经济全球化的影响下，尤其是绿色经济的出现，水资源显得尤为重要。近几年甘肃省水利、自然资源等部门主动出击通过创新理念、升级设备等方式来优化节水技术，以此来降低水资源消耗总量，然而由于水资源回弹效应的存在，使得以提高用水效率为主的节水效果受到影响。由此，本文利用 CGE 模型来测算甘肃省各生产部门存在的水资源回弹效应，并且讨论了提高用水效率所产生的经济效应和节水效应，这为政府制定节水政策提供理论基础。

1.2 国内外相关研究综述

通过梳理国内外相关文献，本文讨论的文献包括三方面内容：水资源回弹效应是能源回弹效应的扩展和延伸，并且能源回弹效应的研究比水资源回弹效应研究更为成熟，因此研究综述一方面讨论能源回弹效应研究，另一方面讨论水资源回弹效应研究，最后是关于 CGE 模型在水资源领域的应用研究。

1.2.1 能源回弹效应研究

19 世纪 Jevons 提出了能源回弹效应的概念，人们发现提高炼铁技术水平会减少对煤炭的消耗，进而铁的生产成本降低使得利润增加，随之越来越多的厂商加入该行业，扩张了炼铁行业的规模，最终导致对煤炭的需求越来越多，并且成本的降低让以铁为原料的下游产业增加了对煤炭的需求。此现象让学者们开始怀疑能源政策的有效性。20 世纪，现代经济学家 Khazzoom（1980）、Brookes（1990）和 Saunders（2000a、2000b，2008）建立了完整的能源回弹效应理论。

Borenstein（2015）为能源回弹效应提供了全面的微观经济学解释。从理论上讲，效率的提高会降低能源价格，与降价相关的影响有三种。首先，在单一行业的规模上，价格下降、成本降低引发了使用量的增加。第二，一种能源价格的降低扩大了人们对其他产品的购买力，可能会间接导致能源使用量进一步增加。第三，在宏观层面上，由消费模式转变引起的结构性效应也会影响整个系统的能源需求，尽管这种次要效应会增加或减少能源使用。总的来说，上述效应通常会降低能源效率提高带来的潜在效益，因此被称为“回弹效应”。目前国内外学者研究能源回弹效应的方法主要有以下 4 种：

（1）直接测算法（Hong 等，2006；Hens 等，2010）的估算结果往往会出现较大偏误，目前很少有学者使用这种方法。（2）相比于直接测算法，价格弹性法（Hymel 等，2015；Stapleton 等，2016）的优点在于数据可得性较强，但此方法存在高估回弹效应的可能。（3）投入产出法（Thomas 等，2013；杨慧慧，2019；刘宗项，2019）是一种相对来说较为可行的间接回弹效应测算方法，但此方法的缺点是只能够说明静态情形下的回弹效应，不能够体现出消费结构动态变化对回弹效应的影响。（4）CGE（Computable General Equilibrium）模型具有严谨的理论体系和较好的分析效果。Glomsrød 等（2005）、Liang（2009）、查冬兰等（2010）、李元龙等（2011）、庞军等（2018）通过构建中国能源 CGE 模型，发现提高能源效率会诱发更多的能源消耗，证明了我国存在能源回弹效应。Broberg(2015)运用 CGE 模型来评估瑞典经济整体回弹效应，发现瑞典工业能源效率每提高 5%，回弹效应在 40%-70%之间。Yu 等（2015）通过 CGE 模型测算了美国乔治亚州的能源回弹效应，其中交通运输部门回弹效应较

大，并发现当技术变革提高能源效率时，GDP 和各经济主体的消费会随之增加。

1.2.2 水资源回弹效应研究

Pfeiffer (2014) 研究发现改进灌溉技术不会降低农业生产用水，反而会导致用水量的增加，这与能源回弹效应非常相似，更高效的灌溉技术通常会提高用水效率，但节省出来的水被用于提高产量，扩大了灌溉面积，或将水用在更耗水的作物，最终导致用水量超过了节水量，这是学术界首次提出了水资源回弹效应。研究水资源回弹效应是对能源回弹效应研究的扩展和延伸，国内外学者研究得出提高水资源利用效率时，所产生的替代效应、价格效应和产出效应会带来新的水资源需求，这部分新的需求会抵消提高效率时所节约的水资源消耗量。

高效利用农业水资源是学术界的热点之一，Dumont 等 (2013) 借鉴能源回弹效应的定义来测算西班牙农业水资源回弹效应。佟金萍等 (2014)、尚杰等 (2020)、Fei 等 (2021)、陈杰等 (2022) 采用 Malmquist-Luenberger 等方法，Song 等 (2018)、王哲等 (2020)、许航等 (2021) 通过技术进步贡献率的方法，李海鹏等 (2022) 利用动态 GMM 模型，研究得出我国的农业水资源利用中存在“回弹效应”。许莹莹等 (2021) 采用直接比较法，结果证实中国工业用水回弹效应较为严重，即提高用水效率并不能减少水资源消耗量。邓光耀等 (2017) 利用 Malmquist-Luenberger 方法，研究得出中国各省水资源利用存在回弹效应，且省份之间差异较大。Zhou 等 (2021) 将生产用水作为生产要素纳入到 CGE 模型中，探讨了中国水资源效率提高后的回弹效应，研究结果表明回弹效应部分抵消了用水效率提高带来的节水效果，并且用水效率的提高会对宏观经济产生积极影响。

1.2.3 CGE 模型在水资源领域的应用研究

CGE 模型不仅能够描述经济系统中各经济主体，而且能够刻画经济体中各部门之间的关系，其广泛应用在经济领域内。CGE 模型对水问题的研究主要涉及到以下几个方面：

水价格方面的代表文献有:严冬等(2010)、周芳等(2014)、李昌彦等(2014)、钟方雷等(2016)、崔琦等(2019)、曲永馥等(2022)都是通过建立 CGE 模型来模拟水价改革对经济和环境的影响。研究结果表明:水价的提高能改进水资源利用效率,使得用水总量减少、生产部门水价提高及产值增加,但对总产出、GDP、居民收入和就业等指标会造成负面影响。

水环境方面的代表文献有:夏军等(2006)采用 CGE 模型,在生产函数中不仅引入了水资源,还加入了污水处理部门,研究得出海河流域污水治理会使得传统 GDP 下降,但社会经济能够绿色和谐发展。陈雯(2012)建立了动态 CGE 模型,模拟水污染治理投资及其实施成本增加所产生的经济效应,以及产出效应,发现投资水污染治理能够促进经济发展,而实施水污染处理成本的增加不利于 GDP 的增长。原毅军等(2016)通过构建环境 CGE 模型来模拟开征水污染税对宏观经济、产业结构以及水污染排放的影响,发现征收水污染税会降低 GDP 和各部门产出,但影响幅度较小。陈星(2019)构建了水污染减排 CGE 模型,不仅模拟了污染物减排对宏观经济、生产部门产出、各经济主体消费的影响,还模拟了环境税费对经济的影响。

水资源税方面的代表文献有:黄凤羽和黄晶(2016)通过 CGE 模型,研究发现提高水资源税会降低各部门产出,人均水资源消耗量随之减少,为了保障经济不受到大的影响,其提出了合理的水资源税税负区间。吴正等(2021)构建了 CGE 模型,模拟在不同的情景下实施水资源改税政策对经济的影响,研究得出征收水资源税会对经济产生负面影响,但使得各部门用水量下降。信春华和郭凤琪(2023)构建了动态 CGE 模型,在生产活动部门加入了水资源要素,模拟水资源税制政策变动所产生的经济效应和节水效应,发现水资源税变动不仅可以提升社会福利而且有助于水资源的节约。

用水效率方面的代表文献有:Freire(2019)通过构建动态 CGE 模型来模拟提高西班牙用水效率对全球用水的影响,当用水效率提高 50%,整个经济的水资源回弹效应为 100.47%。邓光耀(2020)构建了多区域水资源 CGE 模型,研究结果显示提高农业部门的用水效率会促进 GDP 增长。李敏等(2020)建立包含水资源要素的 CGE 模型,模拟结果显示提高用水效率会有效降低区域水资源的供需矛盾,使得各部门产出、居民收入增加。

1.2.4 文献述评

综上所述，能源回弹效应的研究方法较为丰富，有直接测算法、价格弹性法、投入产出法和 CGE 模型。其中，CGE 模型在回弹效应的研究中具有一定优势，因为该模型能够处理大量经济数据。其次，该模型运行出的结果具有一定的稳定性，能够较为准确的反映实际情况。目前国内学者已经普遍认可了水资源回弹效应的存在，但其研究方法大部分主要为 DEA 模型或者计量经济学模型，仅少数学者（Freire, 2019; Zhou 等, 2021）运用 CGE 模型来研究水资源回弹效应，Freire 和 Zhou 都是从国家层面出发，分别测算了西班牙和中国的水资源回弹效应，并且仅考虑了生产用水。

通过学习和借鉴国内外学者的研究，本文采用 CGE 模型来测算甘肃省水资源回弹效应，为了使得 CGE 模型模拟结果更准确、更符合实际，本文将该地区用水分为了生产用水（生产用水量是指用于农业灌溉和工业生产的用水）；生活用水（生活用水包括城乡人口和牧畜消耗的水）；生态耗水（一是自然生态耗水，二为人工生态耗水）（Xu, 2016）。

基于以上讨论，本文从省际角度出发，构建了水资源静态、动态 CGE 模型，将生产用水作为一种基本生产要素，将生活用水、生态用水视为商品进入到 CGE 模型中，模拟测算当所有生产部门的水资源利用效率分别提高 1%、5%、10%时的水资源回弹效应，讨论不同的用水效率对经济增长、水资源消耗量等方面的影响，并分析节水政策的有效性和作用机制，最后提出有关经济增长与环境保护和谐发展的政策建议。

1.3 研究的主要内容及方法

1.3.1 研究的主要内容

本文的主要研究内容是测算甘肃省水资源回弹效应，虽然提高用水效率能够促进经济发展，但其导致的回弹效应会让节水效果受到不同程度的影响，产生额外的水资源消耗，因此本文利用 CGE 模型来讨论甘肃省各生产部门提高用水效率后所产生的回弹效应，并分析用水效率提高后对经济、各生产部门用水量、生态用水量和生活用水量所产生的影响。

第一部分绪论。该部分主要介绍了论文的研究背景、理论意义和现实意义，研究综述主要涉及国内外学者有关回弹效应的研究和 CGE 模型在水资源领域的应用研究，以及论文的主要内容、所用到的研究方法和本文的创新之处。

第二部分是模型简介及理论基础，介绍了 CGE 模型的特点，投入产出理论、一般均衡理论、提高用水效率的双向作用机制以及水资源回弹效应的概念。

第三部分主要为水资源 CGE 模型的构建。建立了静态 CGE 模型和动态 CGE 模型。根据研究的需要，模型分为了五个模块，并对各模块所需的方程以及变量进行了详细的说明。

第四部分介绍了 CGE 模型所需要的社会核算矩阵、模型的参数设定。社会核算矩阵分为了宏观社会核算矩阵和微观社会核算矩阵，宏观社会核算矩阵为编制微观社会核算矩阵提供了依据。文中列出了编制社会核算矩阵所需的数据来源，详细介绍了平衡社会核算矩阵的几种方法以及模型参数的来源。

第五部分是实证部分，模拟甘肃省各生产部门用水效率分别提高 1%、5%、10% 时的情况，首先分析提高效率对 GDP、各经济主体收入、进出口总量等经济方面产生的影响，其次分析对各部门水资源消耗量的影响以及对生活用水量、生态用水量的影响，测算出水资源回弹效应。通过敏感性分析检验了该模型的稳定性。最后为了讨论用水效率提高所带来的长期影响，进行了动态模拟。

第六部分是结论与展望。该部分对论文进行了总结，以及根据结论提出了相关建议，为甘肃省节水政策的实施提供相关理论参考，为更好地推动甘肃省经济高质量和可持续发展提供理论依据。

1.3.2 技术路线

具体技术路线见图 1.1

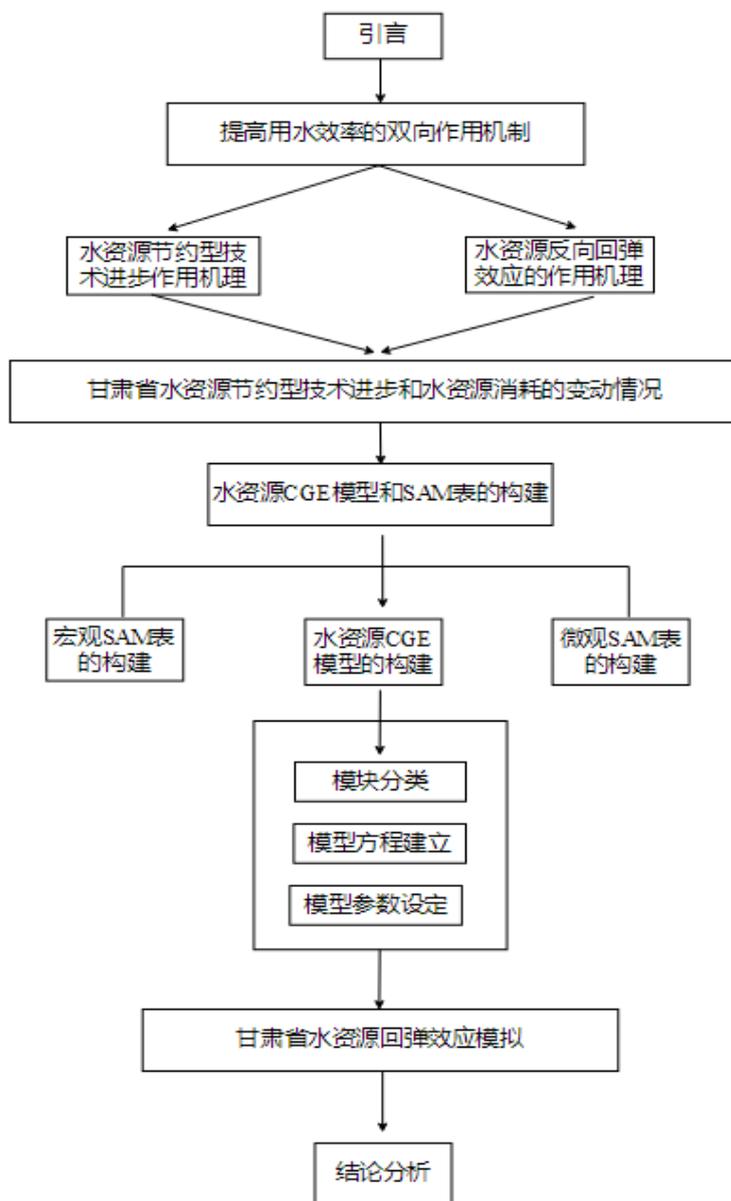


图 1.1 技术路线图

1.3.3 主要的研究方法

(1) 文献分析法

文献分析法主要是对国内外有关回弹效应的文献进行梳理归纳和总结，本文主要梳理了三方面的文献，分别为能源回弹效应研究、水资源回弹效应研究以及 CGE 模型在水资源领域的应用研究。通过对文献的梳理，发现水资源回弹效应是在能源回弹效应的基础上提出的，采用 CGE 模型来测算回弹效应具有一

定的优势，相较于投入产出模型，CGE 模型不仅可以涵盖更多的经济变量，同时还能够反映出市场间各部门的关系，与宏观计量经济模型比较来看，CGE 更侧重于反映价格的变化。此外，与投入产出模型和宏观计量经济模型均不同的是 CGE 模型可以在没有过往参考的基础之上模拟出当冲击产生时会发生的变化，并在此基础上可以为应对政策提供一定的指导方向，因此，CGE 模型在政策模拟分析方面有着突出的优势，文献分析法为本文的研究提供了思路和理论基础。

（2）可计算一般均衡方法

可计算一般均衡（Computable General Equilibrium, CGE）模型是一种政策模拟工具，目前广泛运用于能源环境问题中，该模型能够用来模拟复杂的国民经济运行关系，并将各个行业部门之间的替代关系反映出来，同样 CGE 模型在运用过程中也会暴露出一定的缺点。CGE 模型在构建时所需要的基础统计数据具有稀缺性，较难获得，所引入的弹性系数需要通过大量的计算后才能得到，或者借鉴过往文献中已有的数据，这使得 CGE 模型的运用存在局限性。

1.4 本文创新之处

本文的创新点：（1）研究内容方面，本文将生产用水视为生产要素，将生活用水、生态用水视为商品纳入到 CGE 模型中，并且将投入产出表中的 42 个行业划分为农业、采矿业、制造业、燃气生产和供应业、水的生产和供应业、建筑业、服务业，对这七部门的水资源回弹效应进行测算，并考察用水效率的提高对经济增长，水资源消耗等方面的影响。（2）研究方法方面，本文以编制的甘肃省社会核算矩阵为数据基础，采用 CGE 模型，将经济理论转化为数学形式，用数学等式构建整个经济系统，模型通过自动模拟来获取最终结果，保证结果具有一定的可靠性和合理性。

1.5 本章小结

本章主要介绍了研究背景及意义、国内外相关研究综述、研究内容及方法、创新之处共四部分内容。

甘肃省目前严重缺水，采用提高用水效率的节水措施达不到理想状态，即

可能存在水资源回弹效应，基于这样的研究背景本文梳理了国内外有关回弹效应的研究，发现水资源回弹效应是在能源回弹效应基础上提出的，测算能源回弹效应目前最流行的方法为 CGE 模型，该模型同样广泛应用在水资源领域内，即本文采用 CGE 模型来测算甘肃省水资源回弹效应，目前基于 CGE 模型对水资源回弹效应的研究中只考虑了生产用水，所以本文在前人研究的基础上，加入了生活用水和生态用水，使模型最终得到的结果更符合甘肃省水资源利用情况。

2 模型与理论基础

2.1 CGE 模型简介

可计算一般均衡模型（CGE 模型）基于 Walras 的一般均衡理论，在描述整个经济系统的供求与市场价格之间的关系时，当存在外生冲击时，CGE 模型中的均衡关系会被打破，进一步会过渡到另一种均衡，由此即可研究经济变量的外部干预对经济系统和其他经济变量的影响。本质上，CGE 模型通过一系列方程描述了经济系统中供需平衡之间的关系。从供需关系来看，模型涵盖了供给、需求和供需均衡三大部分，在供给中包含了生产要素和商品供给，在需求中包括了中间需求和最终需求，而供需均衡部分则主要体现在要素市场均衡、产品市场均衡、国际收支均衡和储蓄等于投资均衡等。

模型所涉及到的数据和变量较多，必须利用计算机工具进行求解，本文采用 GAMS（General Algebraic Modeling System）软件对其进行求解。20 世纪末世界银行与美国 GMAS 公司开展合作共同研发了 GMAS 软件，被称为通用数学模型系统，主要用来求解复杂数学问题，其特点包含了：（1）GAMS 语言相较于其他计算机语言，它能够更灵活地以简单的语句来构建不同类型的模型，尤其是在处理线性、非线性等复杂问题时。（2）有很强的灵活性和通用性，问题的最优解不会受到数据形式的限制。（3）GAMS 软件是处理水资源问题的理想工具之一，其已经在水资源配置模型中取得了多项成果，并在不断优化中。

2.2 投入产出理论

投入产出理论，即产业关联理论或产业联系理论，其理论研究基础为投入产出表。投入产出表的概念及编制方法由美国经济学家里昂惕夫提出，于 1953 年发表于《美国经济结构研究》一书。基于投入产出理论所做的研究可以反映自身的投入与产出、产业间的中间投入与产出，因此当研究某一时期某一国家或地区的社会生产过程时，投入产出理论可以作为重要的分析依据来反映各产业间的联系与影响，进一步做出经济走向预测从而达到指导政策的作用。

起初，投入产出理论在使用过程中主要依赖简单的产品投入产出表，随着

社会生产水平的提高、生产范围和内容的扩大，投入产出表所涵盖的行业范围也随之扩大，逐步扩展到包含投资、环境、资产和非物质等诸多行业的投入产出表，同时随着投入产出表应用内容的不断延展，其应用场景和研究方向也在不断更新扩展，投入产出理论的使用也开始出现在了教育、企业财务等各方面的研究。如今该理论的应用已渗入不同层面的经济领域，应用成果也颇为丰富。

以投入产出理论为基础所构建的模型被称为投入产出模型，又被称为里昂惕夫模型。该模型以是否涉及时间变化被分为静态和动态两种类别。其中静态投入产出模型在分析研究时不涉及时间变化，其研究核心为同一时期下的产出与投入间的线性关系。而动态投入产出模型则将时间纳入研究变量，侧重于分析不同时期下的生产过程及相互关系，在研究过程中以及最终结果中所体现的为总产品和最终净产品之间的关系。

在投入产出模型的实际应用中，模型的构建是整个分析研究的基础。在构建时需要对各各部门的投入产出关系做出假设，固定其比例关系，再将整个经济部门组合起来形成联立的线性方程组，以该方程组为基础对其求解并模拟在不同情景下会产生不同解，最终方程组的解即可体现出经济部门间的相互联系以及相互作用。

2.3 一般均衡理论

一般均衡理论源于瓦尔拉斯（Walras）在其出版的《纯粹经济学要义》一书中所提出的理论模型，研究了经济系统中各个要素之间的相互关系。在一般均衡理论中瓦尔拉斯（Walras）提出经济体是一个完整的系统，他认为在整个经济体系内涉及到的所有市场的商品以及要素的价格最终会达成均衡。一般均衡模型不同于仅分析单一市场和商品价格的局部均衡，而是在此基础上进一步能够反映出其内部市场主体间的相互作用影响。

2.4 提高用水效率的双向作用机制

2.4.1 正向作用机制

(1) 替代效应。在产品生产过程中，各部门投入的生产要素可以相互替代，如当水资源要素的成本下降时，它将会取代资本和劳动力两要素，会对资本和劳动力的投入量产生影响，同样，若资本要素发生变化时会对其它要素产生影响，这种情况属于替代效应。

(2) 产出效应。提高生产用水效率后，生产同样多的产品时所需要的水资源减少，同时水资源价格降低，水资源是重要的生产要素，其价格的下降会促进企业生产成本降低，使得企业利润上升，企业将会改变生产决策，扩大生产规模来提高产量，这种表现被称为产出效应。

(3) 价格效应。经济系统内价格具有传递性，当水资源价格发生变化时，首先会改变资本—水资源合成品价格，然后会对资本—水资源—劳动力合成品价格产生影响，产品的生产、销售、出口和进口价格也会随之发生变化，并且会对企业的收入产生影响，最终居民收入和政府税收都会发生变化，其正向作用机制如图 2.1:

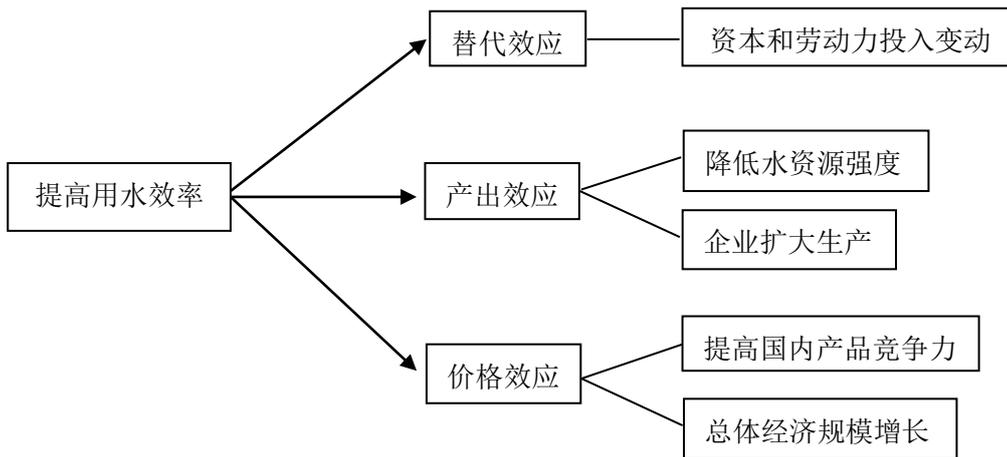


图 2.1 正向机制效应图

2.4.2 反向作用机制

提高用水效率一方面会降低单位产品用水量，另一方面效率的提高会使得产品的生产成本和价格下降，进而引起商品需求和最终消费增多，这样就又产生了额外的水资源需求，最终导致提高用水效率所节约的水资源被新产生的水资源需求部分或全部抵消，这种情况被称为水资源回弹效应。图 2.2 反映了提高用水效率的反向作用机制。

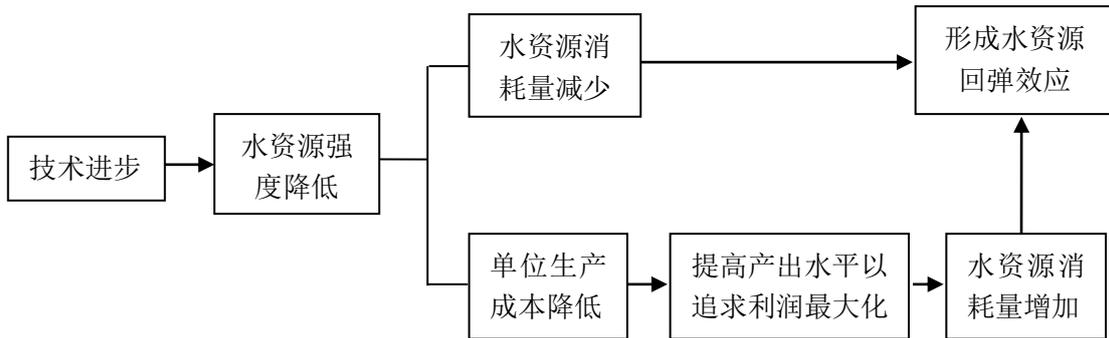


图 2.2 水资源回弹效应传导过程图

2.5 水资源回弹效应

水资源回弹效应受到了新古典能源经济学观点的极大影响。水资源回弹效应认同能源经济学的基本假设，即由技术进步引起的用水效率变化可以通过消费行为和生产要素投入的变化，导致水资源消耗量的变化。简而言之，虽然能源使用及其他相关指标一直是经典回弹效应的焦点。但同样的经济机制也可以应用于水资源领域。水资源回弹效应即由于技术进步存在引起的水资源消耗量与预期的水资源减少量的比值。水资源回弹效应被解释为：技术改进在一定程度上可以提高用水效率并达到节约水资源的目的，但用水效率的提高同时也会使得产品的单位生产成本与价格下降，增加了产品需求和使得消费增长，进而使得对水资源有更多的需求，最终导致用水效率提高所节约的水资源被额外新增的水资源需求部分或全部抵消。已有研究根据回弹效应值的大小将其划分为以下五种：

(1) 回火效应

回弹效应 $> 100\%$ ，即用水效率提高没有使得水资源消耗量减少反而出现增

加的情况，这种情况一般出现在经济发展迅速，人口增长快的地区。

(2) 完全回弹效应

回弹效应=100%，用水效率提高引起的水资源节约量恰好等于水资源回弹量，水资源政策没有起到作用，出现了完全回弹效应。

(3) 部分回弹效应

$0% < \text{回弹效应} < 100%$ ，用水效率提高引起的水资源节约量部分被水资源回弹量抵消。节水政策发挥了部分效果，属于经常出现的情况，容易发生在经济发展较为稳定，人口数量变化幅度较小的地区。

(4) 零回弹效应

回弹效应=0%，提高用水效率所实现的水资源实际减少量等于理论值，现实中很难实现这种理想的情况，称为零回弹效应。

(5) 过度储存效应

回弹效应 $< 0%$ ，表示水资源环境政策实施效果超出预期效果，所带来的水资源节约量大于估计值。这种理想状态难以在目前的发展状况中实现，仅靠技术进步是难以做到的，还与社会节约水资源的意识相关，称为过度储存效应。

水资源回弹效应的提出为研究技术进步、用水效率与水资源消耗之间的关系提供了一种全新的视角，它促使人们重新审视依靠技术进步改善用水效率进而降低水资源消耗的政策思路。回弹效应的大小限制了提高用水效率的有效性，因此在制定相关节水措施时若能够考虑到回弹效应，就可以更加准确地估测和把握预期的节水效果。

2.6 本章小结

本章主要介绍了 CGE 模型和对相关理论基础进行回顾。CGE 模型能够处理大量且复杂的数据，具有很强的灵活性和通用性，可以将水资源系统和经济系统联系起来，是解决水资源问题的理想方法之一。CGE 模型以投入产出理论、一般均衡理论为基础，对整个经济系统的供求与市场价格之间的关系进行描述，当存在外生冲击时，CGE 模型中的均衡关系会被打破，进一步会过渡到另一种均衡，因此，可以用来研究当提高甘肃省各部门生产用水效率时，所产生的一系列连锁反映。提高用水效率时，一方面使得用水强度下降，水资源消

耗量减少；另一方面用水效率提高，产品生产成本和价格下降，进而引起商品需求和最终消费增多，这样就又产生了额外的水资源需求，最终导致提高用水效率所节约的水资源被新产生的水资源需求部分或全部抵消，这种情况引起了水资源回弹效应。

3 甘肃省水资源 CGE 模型的构建

3.1 静态 CGE 模型的构建

本文是在张欣（2010）构建的标准 CGE 模型基础上、借鉴王克强（2015）、邓光耀（2020）的研究，与之不同的是本文以改变甘肃省各部门用水效率为例，来分析其所带来的结果和影响。结合本文所研究的内容，本模型包含了劳动、资本和生产用水三种要素，将居民细分为城镇居民和农村居民，政府部门细分为中央政府和地方政府，本文构建的 CGE 模型包括了生产模块、商品模块、机构模块、均衡闭合模块、宏观指标模块，模块包含的具体内容如下。

3.1.1 生产模块

生产模块描述了 SAM 中活动账户，将劳动力、资本和水资源组合起来。这部分模块的方程主要由各种类型的生产函数组成，具体组合关系如图 3.1。

总产出用 CES 函数来表示，由中间投入和增加值所构成。中间投入是所有中间投入的汇总，形成总投入量。增加值部分包含了三个生产要素：劳动力、资本和生产用水。（式 3.1-3.3）

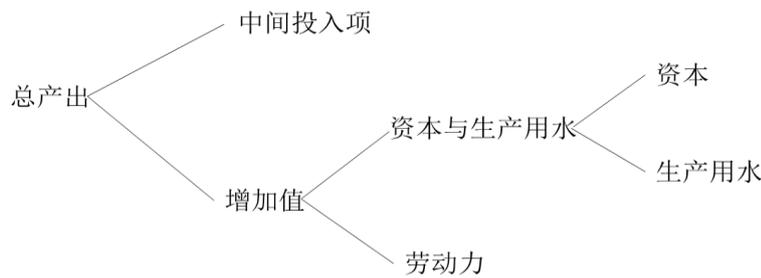


图 3.1 生产函数的结构

各部门产出的 CES 生产函数：

$$QA_a = \alpha_a^a \cdot (\delta_a^a \cdot QVA_a^{-\rho_a^a} + (1 - \delta_a^a) \cdot QIA_a^{-\rho_a^a})^{\frac{1}{\rho_a^a}} \quad (3.1)$$

生产活动总产出的最优要素投入：

$$\frac{PVA_a}{PINTA_a} = \frac{\delta_a^a}{(1-\delta_a^a)} \left(\frac{QINTA_a}{QVA_a} \right)^{1+\rho_a^a} \quad (3.2)$$

生产活动的产值：

$$PA_a \cdot (1 - ta_{a,govdf} - ta_{a,govzy}) \cdot QA_a = PVA_a \cdot QVA_a + PINTA_a \cdot QINTA_a \quad (3.3)$$

中间投入是基于固定投入比例理论构成的 Leontief 生产函数式（式 3.4-3.5）

$$QINT_{c,a} = ica_{c,a} \cdot QINTA_a \quad (3.4)$$

$$PINTA_a = \sum_{c \in C} ica_{ca} \cdot PQ_c \quad (3.5)$$

增加值构成也采用 CES 函数，具体通过所示的嵌套 CES 函数，将劳动力、资本以及生产用水三种生产要素联系起来。

劳动力-资本-生产用水的 CES 生产函数：

$$QVA_a = \alpha_a^{va} [\delta_a^{va} QLAB_a^{-\rho_a^{va}} + (1-\delta_a^{va}) QCW_a^{-\rho_a^{va}}]^{-\frac{1}{\rho_a^{va}}} \quad (3.6)$$

劳动力-资本-生产用水的最优要素投入：

$$\frac{PLAB_a}{PCW_a} = \frac{\delta_a^{va}}{(1-\delta_a^{va})} \left(\frac{QCW_a}{QLAB_a} \right)^{1+\rho_a^{va}} \quad (3.7)$$

劳动力-资本-生产用水投入的价格关系：

$$PVA_a \cdot (1 - tva_{a,govdf} - tva_{a,govzy}) \cdot QVA_a = PLAB_a \cdot QLAB_a + PCW_a \cdot QCW_a \quad (3.8)$$

资本-生产用水的 CES 生产函数：

$$QCW_a = \alpha_a^{cw} [\delta_a^{cw} QCAP_a^{-\rho_a^{cw}} + (1-\delta_a^{cw}) QWATP_a^{-\rho_a^{cw}}]^{-\frac{1}{\rho_a^{cw}}} \quad (3.9)$$

资本-生产用水的最优要素投入：

$$\frac{PCAP_a}{PWATP_a} = \frac{\delta_a^{cw}}{(1-\delta_a^{cw})} \left(\frac{QWATP_a}{QCAP_a} \right)^{1+\rho_a^{cw}} \quad (3.10)$$

资本-生产用水的价格关系：

$$PCW_a \cdot QCW_a = PCAP_a \cdot QCAP_a + PWATP_a \cdot QWATP_a \quad (3.11)$$

表 3.1 生产模块参变量说明

参变量	含义
QA_a	各部门产出
QVA_a	劳动力-资本-生产用水的投入
$QINTA_a$	中间投入的数量求和
PVA_a	劳动力-资本-生产用水的价格
PA_a	生产活动的价格
PQ_c	商品的价格
$QINT_{c,a}$	活动 α 对商品 c 的需求数量
QCW_a	资本-生产用水的投入
$QLAB_a$	劳动投入
$PLAB_a$	劳动价格
PCW_a	资本-生产用水的价格
$QCAP_a$	资本投入
$PCAP$	资本价格
α_a^a	各部门产出 CES 生产函数的转移参数
α_a^{va}	劳动力-资本-生产用水 CES 生产函数的转移参数
α_a^{cw}	资本-生产用水 CES 生产函数的转移参数
δ_a^a	各部门产出的 CES 生产函数的份额参数
δ_a^{va}	劳动力-资本-生产用水 CES 生产函数的份额参数
δ_a^{cw}	资本-生产用水 CES 生产函数的份额参数
ρ_a^a	各部门产出的 CES 生产函数的指数参数
ρ_a^{va}	劳动力-资本-生产用水 CES 生产函数的指数参数
ρ_a^{cw}	资本-生产用水 CES 生产函数的指数参数
$ta_{a,govdf}$	活动 α 地方政府生产税税率
$ta_{a,govzy}$	活动 α 中央政府生产税税率
$tva_{a,govdf}$	地方政府增值税税率
$tva_{a,govzy}$	中央政府增值税税率
$ica_{c,a}$	投入产出系数

3.1.2 商品模块

商品模块嵌套结构如下：第一层嵌套：将总调入与省内市场以 CES 生产函数的形式合称为总供给，用 CET 函数表示省内总产出，将其拆解为省内销售和总调出。第二层嵌套：将总调入分为进口和省际调入，总调出以 CET 函数的形式拆解为出口与省际调出。

地方生产活动 QA 产出到商品 QX 的关系为

$$QA_a = \sum_c sax_{ac} \cdot QX_c \quad (3.12)$$

$$PX_c = \sum_a sax_{ac} \cdot PA_a \quad (3.13)$$

省内总产出 QX 通过 CET 函数分解为省内销售 (QD) 和总调出 (QAE)。

$$QX_c = \alpha_c^t [\delta_c^t QAE_c^{\rho_c^t} + (1 - \delta_c^t) QD_c^{\rho_c^t}]^{\frac{1}{\rho_c^t}} \quad (3.14)$$

$$\frac{PAE_c}{PD_c} = \frac{\delta_a^t}{(1 - \delta_a^t)} \left(\frac{QD_a}{QAE_a} \right)^{1 - \rho_c^t} \quad (3.15)$$

$$PX_c \cdot QX_c = PD_c \cdot QD_c + PAE_c \cdot QAE_c \quad (3.16)$$

总调出 (QAE) 通过 CET 函数分解为省际调出 (QDE) 和出口 (QE)。

$$QAE_c = \alpha_c^{ae} [\delta_c^{ae} QE_c^{\rho_c^{ae}} + (1 - \delta_c^{ae}) QDE_c^{\rho_c^{ae}}]^{\frac{1}{\rho_c^{ae}}} \quad (3.17)$$

$$\frac{PE_c}{PDE_c} = \frac{\delta_a^{ae}}{(1 - \delta_a^{ae})} \left(\frac{QDE_a}{QE_a} \right)^{1 - \rho_c^{ae}} \quad (3.18)$$

$$PAE_c \cdot QAE_c = PE_c \cdot QE_c + PDE_c \cdot QDE_c \quad (3.19)$$

商品的供给 (QQ) 分为省内市场 (QDM) 和总调入 (QAM)，具体方程如下：

$$QQ_c = \alpha_c^q [\delta_c^q QDM_c^{-\rho_c^q} + (1 - \delta_c^q) QAM_c^{-\rho_c^q}]^{\frac{1}{\rho_c^q}} \quad (3.20)$$

$$\frac{PDM_c}{PAM_c} = \frac{\delta_a^q}{(1 - \delta_a^q)} \left(\frac{QAM_a}{QDM_a} \right)^{1 + \rho_c^q} \quad (3.21)$$

$$PQ_c \cdot QQ_c = PDM_c \cdot QDM_c + PAM_c \cdot QAM_c \quad (3.22)$$

总调入 (QAM) 拆分成进口 (QM) 与省际调入 (QDM)，具体方程如下：

$$QAM_c = \alpha_c^{aq} [\delta_c^{aq} QM_c^{\rho_c^{aq}} + (1 - \delta_c^{aq}) QDM_c^{\rho_c^{aq}}]^{\frac{1}{\rho_c^{aq}}} \quad (3.23)$$

$$\frac{PM_c}{PDM_c} = \frac{\delta_a^{aq}}{(1 - \delta_a^{aq})} \left(\frac{QDM_a}{QM_a} \right)^{1 - \rho_c^{aq}} \quad (3.24)$$

$$PAM_c \cdot QAM_c = PM_c \cdot QM_c + PDM_c \cdot QDM_c \quad (3.25)$$

进口商品价格由国际市场价格、汇率和进口关税决定：

$$PM_c = pwm_c \cdot (1 + tm_c) \cdot EXR \quad (3.26)$$

$$PE_c = pwe_c \cdot (1 + te_c) \cdot EXR \quad (3.27)$$

表 3.2 商品模块参变量说明

参变量	含义
PX_c	省内产出品的价格
QAE_c	总调出
PAE_c	总调出品的价格
QDE_c	省际调出
PDE_c	省际调出的省内价格
QE_c	出口
PE_c	出口品的省内价格
QD_c	省内供给
PD_c	省内销售品的价格
PQ_c	总供给商品的价格
QDM_c	省际调入
PDM_c	省际调入品的省内价格
QAM_c	总调入
PAM_c	总调入价格
QM_c	进口
PM_c	进口品的省内价格
a_c^t	省内总产出 CET 函数中的转移参数
δ_c^t	省内总产出 CET 函数中的份额参数
ρ_c^t	省内总销售 CES 函数中的指数参数
a_c^{ae}	总调出 CET 函数中的转移参数
δ_c^{ae}	总调出 CET 函数中的份额参数
ρ_c^{ae}	总调出 CET 函数中的指数参数
a_c^{aq}	总调入 CES 函数中的转移参数
δ_c^{aq}	总调入 CES 函数中的份额参数
ρ_c^{aq}	总调入 CES 函数中的指数参数
a_c^q	省内总供给 CES 函数中的转移参数

续表 3.2 商品模块参变量说明

参变量	含义
δ_c^q	省内总供给 CES 函数中的份额参数
ρ_c^q	省内总供给 CES 函数中的指数参数
sax_{ac}	活动到商品的固定比例关系
pwm_c	进口品的国际价格
pwe_c	出口品的国际价格
EXR	汇率
tm_c	进口关税税率
te_c	出口关税税率

3.1.3 机构模块

CGE 模型中的机构模块主要刻画各个主体的收入来源以及支出去向，机构模块中包括政府、居民、企业三个主体。政府收入来源与各种税收征收，比如关税、居民个人所得税、企业所得税、商品税等，政府支出包括居民的转移支付、政府储蓄等；居民收入来源于劳动和投资、政府对居民的转移支付、企业对居民的转移支付、居民支出包括居民个人所得税、消费、储蓄；企业的收入来源于投资，企业的支出包括对居民的转移支付、企业所得税、投资、储蓄等。

(一) 居民子模块，居民分为城镇居民、农村居民。

$$YH_h = shif_{h,l} \cdot YL + shif_{h,k} \cdot YK + transfr_{h,ent} + transfr_{h,govdf} \quad (3.28)$$

$$YL = PLAB \cdot QLAB \quad (3.29)$$

$$YK = PCAP \cdot QCAP \quad (3.30)$$

以上公式为居民收入部分。

$$EH_h = (1 - mps_h) \cdot (1 - ti_{h,govdf} - ti_{h,govdf}) \cdot YH_h - PWATL \cdot QWATL_h \quad (3.31)$$

$$PQ_c \cdot QH_{c,h} = PQ_c \cdot \gamma_{c,h} + \beta_{c,h} \cdot (EH_h - \sum_c PQ_c \cdot \gamma_{c,h}) \quad (3.32)$$

以上公式为居民支出部分。

表 3.3 机构模块参变量说明

参变量	含义
YH	全体居民的收入
YL	全体居民的劳动收入
YK	资本收入
$shif_{h,l}$	劳动收入份额
$shif_{h,k}$	资本收入份额
$transfr_{h,ent}$	企业对居民的转移支付
$transfr_{h,govdf}$	地方政府对居民的转移支付
EH_h	居民用于商品消费的支出
$PWATW_h$	居民生活用水价格
$QWATL_h$	居民的生活用水量
$QH_{c,h}$	居民对商品的消费量
mps_h	储蓄份额
$ti_{h,govdf}$	缴纳给地方政府的所得税税率
$ti_{h,govzy}$	缴纳给中央政府的所得税税率
$\gamma_{c,h}$	居民对商品的基本消费量
$\beta_{c,h}$	居民对商品的边际消费份额

(二) 企业

1.收入

企业的收入来自企业的资本要素收入：

$$YENT = shif_{ent,k} \cdot YK \tag{3.33}$$

2.支出

企业的支出包括对居民的转移支付、企业所得税以及企业自身的储蓄：

$$ENTSAV = (1 - ti_{ent,govdf} - ti_{ent,govzy}) \cdot YENT - transfr_{h,ent} \tag{3.34}$$

表 3.4 机构模块参变量说明

参变量	含义
$YENT$	企业收入
$shif_{ent,k}$	企业资本收入占资本总收入的份额
$ENTSAV$	企业储蓄
$ti_{ent,govdf}$	缴纳给地方政府的企业所得税税率
$ti_{ent,govzy}$	缴纳给中央丈夫的企业所得税税率

(三) 地方政府子模块

1.收入

地方的财政收入来源于生产税（包括增值税与补贴），对居民征收的个人所得税等，水资源费以及中央下拨给地方的收入，具体方程为：

$$YGDF = \sum_a ta_{a,govdf} \cdot PA_a \cdot QA_a + \sum_h^2 ti_{h,govdf} \cdot YH_h + ti_{ent,govdf} \cdot YENT + YWAT + ZYDF \quad (3.35)$$

$$YWAT = \sum_a PWATP \cdot QWATP_a + \sum_h^2 PWATL \cdot QWATL_h + PWATS \cdot QWATS \quad (3.36)$$

2.支出

地方的财政支出包括地方政府对商品的消费支出、对居民的转移支付、生态用水费用、上交给中央的支出以及自身的储蓄，具体方程为：

$$EGDF = \sum_c PQ_c \cdot QGDF_c + \sum_h^2 transfr_{h,govdf} + YWATS + YDFZY + GDFSAV \quad (3.37)$$

(四)中央政府子模块

1.收入

中央的财政收入来源于生产税（包括增值税与补贴）、进口商品关税、出口退税（实际上是支出）、居民与企业缴纳的所得税以及地方上交给中央的收入，具体方程为：

$$YGZY = \sum_a ta_{a,govzy} \cdot PA_a \cdot QA_a + \sum_c tm_c \cdot pwm_c \cdot EXR - \sum_c te_c \cdot pwm_c \cdot EXR + \sum_h^2 ti_{h,govzy} \cdot YH_h + ti_{ent,govzy} \cdot YENT + YDFZY \quad (3.38)$$

2.支出

中央政府的支出包括中央政府对商品的消费、下拨给地方政府的支出以及自身的储蓄。

$$EGZY = \sum_c PQ_c \cdot QGZY_c + ZYDF + GZYSAV \quad (3.39)$$

3.5 机构模块参变量说明

参变量	含义
$YGDF$	地方财政收入
$YZYDF$	中央下拨给地方的收入
$PWATS$	生态用水价格
$QWATS$	生态用水量
$EGDF$	地方财政支出
$QGDF_c$	地方政府对商品的消费
$YDFZY$	地方上交给中央的支出
$GDFSAV$	地方政府储蓄
$YGZY$	中央财政收入
$EGZY$	中央财政支出
$QGZY_c$	中央政府对商品的消费
$GZYSAV$	中央政府储蓄

3.1.4 均衡闭合模块

宏观闭合条件是 CGE 模型达到平衡的前提，宏观闭合使各个模块方程组形成一个可解的方程组，使内生变量得以求解。该模块主要包括商品市场均衡，要素市场均衡，机构账户的均衡。

(一) 商品市场均衡

市场上的商品总供应应当等于总需求，即总供给等于中间使用、居民的消费、政府的消费以及资本形成总额之和，具体方程为：

$$QQ_c = \sum_a QINT_{c,a} + \sum_h^2 QH_{c,h} + QGDF_c + QGZY_c + QINV_c \quad (3.40)$$

(二) 要素市场均衡

1. 劳动力市场

在静态模型中，劳动力供给量等于劳动力需求量，具体方程为：

$$QLABS = QLABSNC + QLABSCS = \sum_a QLAB_a \quad (3.41)$$

2. 资本市场

资本市场的实际供应量等于需求量，即：

$$QCAPS = \sum_a QCAP_a \quad (3.42)$$

3. 生产用水

生产用水的需求量是水资源的总需求量减去居民生活用水量以及生产用水量，也等于供给量即：

$$\sum_a QWATP_a = QWAT - \sum_h QWATL_h - QWATS \quad (3.43)$$

$$QWATS = \sum_a QWATP_a \quad (3.44)$$

(三) 机构账户均衡

前文中居民、企业、政府账户的方程已经隐含了平衡条件。这里补充国外账户的平衡方程。

国际收支均衡，国外的收入等于国外的支出与国外净储蓄。

$$\sum_c pwm_c \cdot QM_c + shif_{f,k} \cdot YK = \sum_c pwe_c \cdot QE_c + FSAV \quad (3.45)$$

3.6 均衡模块参变量说明

参变量	含义
<i>QLABSNC</i>	农村劳动力的供给量
<i>QLABSCS</i>	城镇劳动力的供给量
<i>QCAPS</i>	资本供应量
<i>QWATPS</i>	生产用水供应量
<i>FSAV</i>	国外账户的净储蓄

3.1.5 宏观指标模块

地区生产总值 GDP：

$$GDP = \sum_c \left(\sum_{h=1}^2 QH_{c,h} + QGDF_c + QGZY_c + QINV_c + QE_c - QM_c \right) \quad (3.46)$$

其中，地区生产总值等于全社会居民消费，政府消费，投资消费，出口总额减去进口总额。

3.2 动态 CGE 模型的构建

为了研究甘肃省水资源回弹效应的长期动态变化，所以本文构建了动态 CGE 模型，该模型是以新古典主义增长理论为基础。相较于静态模型，动态模型考虑了劳动力增加和技术改进等影响因素，并且静态 CGE 模型只能用于基准年度的分析，而动态 CGE 模型可以分析经济变量在多个年度的动态变化。常见

的动态 CGE 模型主要有三种：（1）递推动态模型。通过反复迭代计算多期静态 CGE 模型，用函数关系来表示多期之间的影响，需要设置动态的外生变量以及外生给定的参数。（2）代际交叠模型。（3）随机动态模型。因为递推动态模型较为实用，所以本文拟采用该模型，主要从资本累积和劳动力增长这两个方面来刻画模型的动态化。

1. 劳动力增长

$$QLABS_{t+1} = (1 + lrate_t)QLABS_t \quad (3.47)$$

其中， $QLABS_t$ 为当期的劳动力总供给数量， $lrate_t$ 为劳动增长率。方程表示下一期的劳动力总量等于当期的劳动力总量加上劳动力增长量。

2. 资本累积

$$QCAP_{t+1} = (1 - deprate_t) \cdot QCAP_t + EINTV_t \quad (3.48)$$

其中 $deprate_t$ 和 $EINTV_t$ 分别为全社会的资本折旧率和当期投资总额。因此，方程表示后一期的资本总量等于当期的资本总量减去折旧部分，再加上当期的总投资额。

3.3 本章小结

本章主要介绍了静态、动态 CGE 模型的构建过程，详细列出了模块中所涉及到的方程和参数。

生产模块描述了 SAM 中活动账户，将劳动力、资本和水资源组合起来。这部分模块的方程主要由各种类型的生产函数组成。总产出由中间投入和增加值所构成，用 CES 函数来表示，中间投入是所有中间投入的汇总，形成总投入量。增加值部分包含了三个生产要素——劳动力、资本和生产用水。

商品模块主要分析了商品的供给和调出：第一层嵌套：将总调入与省内市场以 CES 生产函数的形式合称为总供给，用 CET 函数表示省内总产出，将其拆解为省内销售和总调出。第二层嵌套：将总调入分为进口和省际调入，总调出以 CET 函数的形式拆解为出口与省际调出。

机构模块主要分析了居民收入来自于劳动、投资以及转移支付，其支出源于个人所得税、消费储蓄等活动。政府收入主要由各种税收所组成，支出包含

转移支付以及政府储蓄等活动，企业收入依靠投资活动，支出包括转移支付、企业所得税和储蓄等活动。均衡闭合模块主要包括商品市场均衡，要素市场均衡，机构账户的均衡。宏观指标模块是指地区生产总值的计算。

为了研究甘肃省水资源回弹效应的长期动态变化，所以本文构建了递推动态 CGE 模型。

4 数据基础及参数设定

运用 CGE 模型展开模拟分析，需要为模型中的各变量提供一个全面而一致的均衡数据集，确定各类模型方程的参数值，并对模型进行求解。本模型的数据基础是 2017 年甘肃省社会核算矩阵，以及各类来源于以往研究中得到的参数。本章将对甘肃省社会核算矩阵的编制过程、模型参数的设定进行介绍。

4.1 社会核算矩阵（SAM）概述

社会核算矩阵（Social Accounting Matrix，简称 SAM 表），它是以一个地区当年的投入产出表为数据基础，构建的国民经济核算二维矩阵，在 CGE 模型中社会核算矩阵（SAM 表）为重要的数据基础，可以对一定时期内一国或某一地区的经济结构进行全面的描述。

在本文的模型中所使用的 SAM 表采用了“自上而下”的编制原则，分别编制了宏观和微观 SAM 表。从宏观来看，本文所构建的 SAM 表账户包括以下几类：生产活动账户、商品账户、生产要素账户（包含资本、劳动、生产用水）、经济主体账户（居民和企业）、政府账户、资本积累（投资和储蓄）账户和国外账户。

（1）生产活动账户

生产活动账户用来核算社会生产的各种生产活动。反映的主要是在利润最大化条件的供应函数、厂商的生产函数、成本最小化优化条件得到的需求函数等的约束下产出与生产要素投入和中间投入之间的关系。其中生产活动账户的行列分别表示商品的产出和中间投入，其总和分别表示总产出和总成本。

（2）商品账户

商品账户主要是核算各种商品的来源和使用。纵向反映供给状况，而横向则反映了需求状况。其中省内的总供给包含了省内商品生产、外省调入以及关税，省内商品的总需求则包含了中间投入、各经济主体的消费品、存货、调出省外或出口等。以收入和支出角度来看，行方向可以看作商品账户的收入来源，而列方向则是包括了购买省内总产出、外省调入、进口以及支付进口关税等的支出。

（3）生产要素账户

生产要素账户主要用来核算劳动、资本、生产用水等要素收入及生产要素在各机构部门的分配。行方向是劳动者报酬、资本收益、生产用水的资源价值，即劳动要素收入、资本要素的收入及生产用水的收入，列方向是要素在生产活动部门和机构部门的分配量。

（4）经济主体账户

经济主体账户包括了居民和企业两个主体。其中横向主要反映了两个经济主体的收入。其中居民的收入主要来源于转移支付，包括劳动、资本、政府、企业对居民的转移支付；企业的收入来源有资本、政府对企业的转移支付。纵向来看则反映了经济主体的支出。居民的支出包括商品消费、上交的所得税、剩余的则作为居民储蓄转移至资本账户；企业的支出包括了企业对居民的转移支付、企业所得税、剩余的则作为企业储蓄转移至资本账户。

（5）政府账户

本文以甘肃省为例，所以要把地方政府和中央政府两个区分来看，不管是地方政府和中央政府都具有宏观经济的调控能力，都在地方经济发展中发挥着重要作用。政府的收入来源主要由各类税收构成，包括生产环节的生产税、进口税、居民的个人所得税、企业所得税，支出主要用于公共物品消费、对居民社会保障进行的转移支付和储蓄。

（6）资本积累（投资和储蓄）账户

资本积累账户核算被称为投资储蓄账户，能够反映出社会的资本来源和使用情况，包括了资本和存货变动，其中以资本账户为分析重点。在 SAM 表中，横向表示了各储蓄的来源，包括固定资产折旧和国内外储蓄；纵向反映的包括分配到各个部门的固定资产以及存货，构成了资本账户的总储蓄。

（7）国外账户

国外账户核算的是甘肃省与国外的贸易往来。横向表示了总收入，主要来源于商品的进口和国外投资收益；纵向表示的则是国外账户的支出，包含了商品的出口、对省内居民的转移支付以及国外储蓄。

4.2 甘肃省社会核算矩阵（SAM）的编制

SAM 表数据基本来源于投入产出表，甘肃省投入产出表每五年编制一次，目前甘肃省投入产出表最新数据至 2017 年。本文使用的数据主要来源于《甘肃省投入产出表 2017》、《甘肃发展年鉴 2018》、《2017 年甘肃省水资源公报》、《2017 年甘肃省预算决算表》、《2018 年中国税务年鉴》《2018 年中国统计年鉴》等。

4.2.1 投入产出表

投入产出表是由经济学家里昂惕夫发明的，该表能够用来分析实际经济问题，不仅能够帮助政府机构预测经济发展形势，还可以用来评价经济政策。我国根据经济发展的需要，投入产出表每五年更新一次，该表主要有四个象限组成，第 I 象限主要反映了各部门之间的投入产出关系，是表的主体部分，通常被用来产业关联分析。第 II 象限反映了居民、政府对最终产品的消费以及资本形成总额和进出口情况，从表中能够看出农村居民、城镇居民的具体消费情况，出口和进口的结构组成。第 III 象限为增加值的分配情况，具体反映了劳动者取得的收入，政府收入，企业收入。第 IV 象限一般不在表中列出，其代表国民收入的再分配。

4.2.2 宏观社会核算矩阵的编制

宏观 SAM 表是数据基础，还可以作为总量控制表为微观 SAM 表提供依据。本文宏观 SAM 的数据以 2017 年甘肃省 IO 表为基础，部分数据通过统计年鉴整理获得或者通过平衡原则计算得到，本文运用 RAS 法对 SAM 表调平。宏观社会核算矩阵各个账户的数据来源，在表 4.1 中做出说明，水价数据来自于中国水网，用水量均来自于《甘肃发展年鉴 2018》，具体宏观 SAM 表的基本结构见附录中表 1。

表 4.1 宏观社会核算矩阵数据来源

行	列	数据来源	数据	
活动	商品	《甘肃省投入产出表 2017》	总产出-出口	
	国外	《甘肃省投入产出表 2017》	出口合计	
商品	活动	《甘肃省投入产出表 2017》	中间投入	
	居民	《甘肃省投入产出表 2017》	居民消费支出	
	政府	《甘肃省投入产出表 2017》	政府消费支出	
	资本	《甘肃省投入产出表 2017》	固定资产形成	
	存货变动	《甘肃省投入产出表 2017》	存货变动	
要素	劳动力	活动	《甘肃省投入产出表 2017》	劳动者报酬
	资本	活动	《甘肃省投入产出表 2017》	固定资产折旧+营业盈余
	水资源	活动	中国水网、《甘肃发展年鉴 2018》	水资源价值
居民	劳动力	《甘肃省投入产出表 2017》	劳动者报酬	
	资本	《甘肃发展年鉴 2018》	财产净收入	
	企业	列余量		
	政府	《甘肃发展年鉴 2018》	社会保障和就业支付	
企业	资本	列余量		
政府	活动	《甘肃省投入产出表 2017》	生产税净额	
	商品	中国统计年鉴进口货物关税、增值 税、消费税	进口货物关税、消费 税、增值税	
	居民	《甘肃发展年鉴 2018》	个人所得税	
	企业	《甘肃发展年鉴 2018》	企业所得税	
资本	居民	《甘肃发展年鉴 2018》	住户部门储蓄	
	企业	资金流量表	企业部门储蓄	
资本	政府	资金流量表	政府部门储蓄	
	国外	列余量		
存货变动	资本	《甘肃省投入产出表 2017》	存货增加	
国外	商品	《甘肃省投入产出表 2017》	进口货物-进口关税、消 费税、增值税	

4.2.3 微观社会核算矩阵的编制

微观社会核算矩阵是以宏观社会核算矩阵为基础编制的，其可以获得细分部门数据。本文的微观社会核算矩阵将投入产出表的 42 部门合并整理为 7 个部门，部门具体划分见下表 4.2。工业细分部门的用水量是按照《中国经济普查年鉴》中各工业部门用水量的比例把总的工业用水数据进行划分所得来的。生态用水量、生活用水量均来自于甘肃省水资源公报。

表 4.2 微观 SAM 表部门划分

部门分类	部门代码	甘肃省 2017 年投入产出表部门
农业	01	农林牧渔业
采矿业	02	煤炭采选、石油和天然气开采、金属矿采选、非金属矿和其他矿采选
制造业	03	食品和烟草、纺织品、木材加工品及家具、非金属矿物制品、金属制品
燃气的生产和供应业	04	燃气的生产和供应业
水的生产和供应业	05	水的生产和供应业
建筑业	06	建筑业
服务业	07	批发和零售、交通运输、仓储和邮政、住宿餐饮、信息传输、软件和信息技术服务、金融~公共管理、社会保障和社会组织

4.3 SAM 表的平衡方法

在一般情况下，因为各部门数据统计口径不相同，并且一些数据存在缺失和有误差的情况，所获得的 SAM 表行列不平衡，此时需要将初始 SAM 表进行平衡，有以下 4 种平衡方法：（1）最小二乘法。在目前很少用到最小二乘法来平衡 SAM 表，其形式与统计回归有相似性，数据处理前后相比来看误差的平方和最小。（2）RAS 法。其与最小二乘法相类似，它是在交叉熵法被提出之前较为流行的方法，运用迭代的方法使行列达到平衡的状态。（3）交叉熵法。是目前较为流行的方法，应用范围较广、操作简单，它是以经济统计学领域的熵函数为基础。（4）手动平衡法。此方法通常在行列差距不大的情况下使用，并且研究者对数据要有一定的了解，因为是手动调节所以缺乏科学性。

4.4 模型参数的设定

在将 CGE 模型设定好之后，需要估计方程中所需的参数，模型的准确性受到参数估计的影响。模型中不同的参数有不同的设定方法，模型的所需要参数包含了替代弹性、份额参数和转移参数，其中替代弹性是外生给定的，而份额参数与转移参数需要借助 SAM 表的数据进行求解。

替代弹性系数的设置方法，能够利用计量方法来估计，但是因为数据量较大，采用估算的形式非常复杂和困难，并且替代弹性参数一般不会随着时间的变化而变化。目前绝大多数学者采用参考相关文献来设定参数，因此本文借鉴了赵永等（2008）、周焯华等（2002）等对弹性系数的设定，并根据本文 SAM 表数据和模型设定进行了适当调整。

4.5 本章小结

本章主要介绍了社会核算矩阵的数据来源、平衡方法以及模型参数的设定。社会核算矩阵是以投入产出表为基础编制的，其又分为宏观社会核算矩阵和微观社会核算矩阵，微观社会核算矩阵由拆分宏观矩阵所得，矩阵中的数据主要来源于《甘肃发展年鉴 2018》、《甘肃省投入产出表 2017》等。平衡社会核算矩阵的方法为：最小二乘法、RAS 法、交叉熵法以及手动平衡法。模型中所用到的参数一部分通过 SAM 表获得，另一部分通过借鉴前人的研究来设定。

5 甘肃省水资源回弹效应的模拟研究

提高用水效率是缓解甘肃省严重缺水的必要条件，然而它的有效性可能会受到水资源回弹效应的限制，即用水效率的提高往往会降低用水成本，从而通过替代效应和收入效应增加对水资源的消耗，导致节约的水资源部分或全部被新增的水资源需求所抵消掉。因此，有必要对甘肃省水资源回弹效应问题进行研究，探讨甘肃省各部门是否存在水资源回弹效应。在制定节水政策时，应考虑存在的水资源回弹效应，这样将能够做出更加符合实际情况的政策和制度。

5.1 情景设计

经济系统可以被视为一个整体的复杂系统，具有动态、非线性的特点，处于经济系统中的各个经济主体间具有相互影响的作用，当系统内的任一变量发生变动时，经济主体间会产生连锁反应，对于经济系统内的其他变量会产生直接或间接影响。在 CGE 模型中，各经济主体和要素构成了一个完整的经济系统，模型基于完备的理论基础和实际经济系统互动关系，最终以数学方程的形式呈现出来，最终反映出各要素间的复杂联系。由于经济系统间的复杂联系，在不同的情境冲击下会引起经济系统内的某一变量发生变化，进而影响到模型内其他经济主体的活动变化。因此，在以 CGE 模型为基础的研究分析中，可以设置不同的情境对经济系统进行冲击模拟并分析模拟带来的结果和影响。

本文以提高用水效率为例，用水效率的提高将会减少单位耗水量，改变了行业用水成本，企业生产决策在用水成本下降的条件下发生改变，进而总产出和合成品价格会受到影响，从而出口总量、进口总量以及企业收入会发生变化；而企业收入受到的影响会作用于政府税收、居民收入等方面，与此同时商品价格变化将影响到政府、居民等主体的消费、储蓄等行为。

基于上述分析，本文以甘肃省为例，借鉴了 Zhou (2021) 的情景设置，将甘肃省生产用水效率分别提高 1%、5%、10%，与其不同的是本文不仅考虑了生产用水还考虑了生活用水和生态用水，讨论不同用水效率情境下经济发展和水资源消耗的变化，以此来测算出甘肃省水资源回弹效应，为了更好的讨论相关经济变量发生的长期动态变化，将分别进行静态、动态模拟。

5.2 静态模拟

5.2.1 用水效率提高后的经济效应

本小节讨论的是将生产用水效率分别提高 1%、5%、10%后的经济效应，具体分析 GDP、居民收入、企业收入和政府收入，进出口总量、各部门产出受到冲击后的变化，结果如表 5.1-5.2 所示。

表 5.1 生产用水效率提高后的模拟结果 (%)

	GDP	居民收入	企业收入	政府收入	进口总量	出口总量
1%	0.0678	0.0180	0.0250	0.0008	0.3364	0.7530
5%	0.3634	0.1102	0.1534	0.0047	1.6588	3.6968
10%	0.7358	0.2279	0.3170	0.0098	3.2405	7.1768

由表 5.1 可以看出，用水效率提高 1%时，对出口总量影响最大，增加了 0.7530%，其次是进口总量，增加了 0.3364%。甘肃省许多进出口导向部门（农产品、纺织品等）都是水密集型部门，用水效率提高后，生产成本降低，使得出口产品的相对价格降低，由此提高了出口产品的竞争力；另一方面由于生产成本降低，提高了价格竞争力，使得耗水产品产量增加，最终刺激了进口商品的需求。因此，提高用水效率将刺激甘肃省进出口的增长。对政府收入影响最小，政府收入增加了 0.0008%，同时企业收入增加了 0.0250%，GDP 增加了 0.0678%，居民收入增加了 0.0180%，居民收入由劳动收入、资本收入、企业转移支付、政府转移支付构成，一方面，提高生产用水效率使得企业收入提高，从而增加了资本收入和企业转移支付，另一方面，提高用水效率使得政府收入增加，从而增加对居民的转移支付，最终在两方面的作用下，居民收入上升。

当用水效率提高到 5%时，GDP、政府、企业和居民收入、进口量和出口量的变化幅度更明显，分别增加了 0.3634%、0.0047%、0.1534%、0.1102%、1.6588%和 3.6968%。当用水效率提高到 10%时，各经济主体分别增加了 0.7358%、0.0098%、0.3170%、0.2279%、3.2405%、7.1768%。

总体来看，用水效率的提高能够促进宏观经济发展，对各经济主体的影响较大，这是因为水资源使用在甘肃省大多数部门的生产投入中所占的比例较

大，在甘肃省经济发展中处于非常的重要地位，用水效率冲击导致的较大波动是合理的。随着效率的提高，经济主体的变化幅度也越大，主要有两方面原因，第一，水资源消耗强度。水资源效率提高后，一方面意味着生产者在相同条件下生产同样的产品所需的成本减少，企业的利润率上升，这对水资源密集型行业的影响往往更大，使其在市场竞争中处于优势的地位，扩大产品占有率。第二，经济发展。水资源效率提高往往是技术进步的体现，技术进步又会促进经济发展，在这两方面的作用下，提高用水效率将会促进经济发展。

表 5.2 反映了用水效率提高 1%，5%，10% 不同部门产出的变化情况，效率的提高使得各部门的产出均有所增加，并且随着用水效率的增加，各部门的产出也在随之增加。

表 5.2 用水效率提高对部门产出的影响 (%)

	1%	5%	10%
农业	0.6514	3.1159	5.7565
采矿业	0.0003	0.0032	0.0070
制造业	0.2299	1.1201	2.1445
燃气生产和供应业	0.0954	0.4631	0.8625
水的生产和供应业	0.0091	0.0535	0.1219
建筑业	0.0178	0.0934	0.1740
服务业	0.0020	0.0226	0.0439

由表 5.2 可以看出，当生产用水效率提高 1%，5%，10% 时，七个部门的产出都有所增加，并且差异较大。农业部门的增加幅度最大，分别增加了 0.6514%、3.1159%、5.7565%。其次是制造业，制造业的产出分别增加了 0.2299%、1.1201%、2.1445%，增加幅度最小的部门为采矿业，分别增加了 0.0003%、0.0032%、0.0070%，可以发现用水效率的提高有助于各部门产出的增加，并且用水效率越高，产出越大。

农业部门、制造业部门产出受到的影响相对较大，这主要是因为农业和制造业为高耗水产业，甘肃省农业主要采取传统低下的灌溉方式，工业用水技术落后，节水技术产品开发工作滞后，所以用水效率的提高能对农业、制造业部门产出有着明显正面影响。当用水效率提高时，一方面意味着在其它条件不变的情况下生产相同产量的产品所需成本减少，使得需求量增加，直接影响到各部门的产出，另一方面用水效率的提高也往往意味着水价的下降，水密集型行

业在相同条件下会获得更多的利润来扩大生产，在市场竞争中获得优势地位，在这两方面的作用下，用水效率提高使得各部门产出增加。

5.2.2 用水效率提高后的节水效应

表 5.3 反映了生产用水效率提高后各部门生产用水量、生活用水量及生态用水量的变化情况。当生产用水效率提高时，各部门生产用水量出现不同程度的下降，而生活用水量和生态用水量出现上涨的情况，这与 Qian（2016）所得到的结论一致。即在一般情况下，为了经济快速发展，更多的水资源将配置在生产用水上，在保证生活用水的基础上，减少分配给生态用水，而当生产用水的效率增加，生产用水量减少时，将会增加分配给生活、生态的用水量。

表 5.3 生产用水效率提高时水资源消耗量的变化情况 (%)

	1%	5%	10%
农业	-0.6446	-3.1421	-6.2324
采矿业	-0.9346	-4.5022	-8.6343
制造业	-0.4873	-2.3958	-4.7185
燃气的生产和供应业	-0.7843	-3.8040	-7.3608
水的生产和供应业	-1.8870	-8.7545	-16.0617
建筑业	-1.0178	-4.8765	-9.2916
服务业	-0.8787	-4.2347	-8.1302
生活用水	0.0180	0.1102	0.2278
生态用水	0.0008	0.0047	0.0098

具体来看当生产用水效率提高 1% 时，所有生产部门的用水量都出现了下降，水的生产和供应业下降 1.8870%、建筑业下降 1.0178%，采矿业下降 0.9346%、服务业下降 0.8787%、燃气的生产和供应业下降 0.7843%、农业下降 0.6446%、制造业下降 0.4873%，而生活用水上升 0.0180%、生态用水上升 0.0008%。除了水的生产和供应业和建筑业达到了预期的节水效果，其它部门都没有达到预期的节水效果，这是因为用水效率提高导致用水成本相对下降，因此在刺激生产的同时，相应刺激了生产部门用水量的增长。

当生产用水效率提高 5% 时，水的生产和供应业下降 8.7545%、建筑业下降 4.8765%、采矿业下降 4.5022%、服务业下降 4.2347%、燃气的生产和供应业下降 3.8040%、农业下降 3.1421%、制造业下降 2.3958%。生活用水增加

0.1102%，生态用水增加 0.0047%，只有水的生产和供应业部门达到节水效果。当生产用水效率提高 10%时，水的生产与供应业下降 16.0617%、建筑业下降 9.2916%、采矿业下降 8.6343%、服务业下降 8.1302%、燃气的生产和供应业下降 7.3608%、农业下降 6.2324%、制造业下降 4.7185%，生活用水增加 0.2278%、生态用水增加 0.0098%。

5.2.3 用水效率提高后的回弹效应

根据上文的讨论，我们发现提高用水效率可以有效减少用水量，但用水量的减少量远远小于用水效率的提高量，由于用水效率促进了经济增长，刺激了部门生产和居民收入，因此可能会提高生产部门和居民对水资源的需求，这就需要对水资源回弹效应进行测算。回弹效应的测算方法采用 Hass 等（2000）提出的方法，即某一地区的水资源回弹效应等于该地区水资源消耗的回弹量（也即预期节约的水资源与实际节约的水资源之差）除以预期水资源消耗节约量，以百分比来衡量节约水资源未能与水资源效率改善的规模成比例下降的程度，用公式表示如 5.1

$$\text{回弹效应} = (\text{预期节约的水资源} - \text{实际节约的水资源}) / \text{预期节约的水资源} \quad (5.1)$$

理论上，计算回弹效应很简单。例如，我们假设用水效率提高 10%。这意味着只需原始水资源使用量的 90%来提供相同数量的输出或服务。与基准情景相比，水资源使用的减少相当于水资源服务价格的降低，这反过来又推动了水资源使用的增加。这种“反弹”现象就是回弹的原因。如果水资源使用仅减少 4%，那么与预期节省的 10%的水资源相比，节省了 6%的水资源。这表明有 60%的反弹效应。同样，100%的反弹效应意味着水资源使用根本没有减少。超过 100%的反弹效应意味着适得其反，这意味着水资源使用实际上随着水资源效率的提高而增加。

表 5.4 水资源回弹效应 (%)

	1%	5%	10%
农业	35.54	37.16	37.98
采矿业	6.54	9.95	13.65
制造业	51.27	52.08	52.81
燃气生产和供应业	21.57	23.92	26.39
水的生产和供应业	-88.70	-75.09	-60.62
建筑业	-1.78	2.47	7.08
服务业	12.13	15.31	18.70
总耗水	9.16	12.71	16.47

表 5.4 列出了甘肃省各个行业的水资源回弹效应，用水效率为 1%，5%，10%时，总体回弹效应值分别为 9.16%、12.71%、16.47%，表明甘肃省宏观经济层面存在水资源回弹效应，并且回弹效应的大小随着用水效率的上升而增加。不同行业之间的回弹效应差异较大。其中，制造业的回弹效应最大，不同用水效率下的回弹效应分别为 51.27%，52.08%，52.81%，这意味着用水效率提高所带来的节水效果，超过一半被抵消。其次回弹效应最大的是农业，回弹效应分别为 35.54%，37.16%，37.98%，建筑业的回弹效应最小。除水的生产和供应业，其它部门均存在不同程度的水资源回弹效应。

总体来看，甘肃省存在水资源回弹效应，并且随着用水效率的提高，各部门的水资源回弹效应也在增加，技术进步虽然能够提高水资源利用效率从而节约水资源，但效率提高同时也会降低产品的单位成本与价格，引致产品需求和消费增长，从而引发更多的水资源消耗，最终导致用水效率提高所节约的水资源被额外的水资源消耗部分抵消。节水效果中有相当一部分会被技术进步对资本和产出所产生的激励效应所侵蚀，这主要源于甘肃省现阶段经济快速发展所带来的水资源刚性需求，水资源消耗量的减少量被经济快速发展和人口快速增长带来的水资源增加量所抵消掉。

5.3 敏感性分析

为了进一步验证参数设定对模型结果可靠性的影响，采用敏感性检验参数设定对结果的影响，即改变弹性参数的数值，观察弹性参数值变化对模型运行结果没有产生较大影响，则模型稳定性较高。

表 5.5 参数变化对变量的影响 (%)

参数变 化率	GDP	各部门生产用水需求量变化率						
		01	02	03	04	05	06	07
10%	0.29	-3.39	-4.56	-2.46	-3.86	-8.76	-4.92	-4.28
0	0.36	-3.14	-4.50	-2.40	-3.80	-8.75	-4.88	-4.23
-10%	0.43	-2.91	-4.44	-2.34	-3.75	-8.74	-4.84	-4.19

从表 5.5 中可以看出，当替代弹性的变化幅度为 (+10%) 时，GDP 的变动幅度为 0.07%，各部门生产用水量变化幅度最大的为 0.22% 左右，当替代弹性的变化幅度为 (-10%) 时，各个变量的变化幅度同替代弹性上升时基本一致，未超过 1%，即所有宏观经济变量没有方向性的变化，只显示政策效应强弱的差别，这表示该研究结论并不受替代弹性的影响，因此，模型结果可信性较高。

5.4 动态模拟

上节内容讨论了静态模拟中用水效率提高后的经济效应、节水效应以及回弹效应，发现用水效率提高的幅度越大，越对经济发展有正向激励作用，并且水资源回弹效应也越大，为了进一步分析提高用水效率的长期效应，本节以上文分析的 2017 年作为基准情景进行动态模拟。

由于用水效率提高 5% 更符合甘肃省目前的节水状况，所以本节只讨论生产用水效率提高 5% 后的变动情况。模拟出 2018—2028 年期间提高甘肃省生产用水效率时经济发展运行路径和水资源消耗变动趋势，相应的对水资源回弹效应进行测算。

5.4.1 用水效率提高后的经济效应

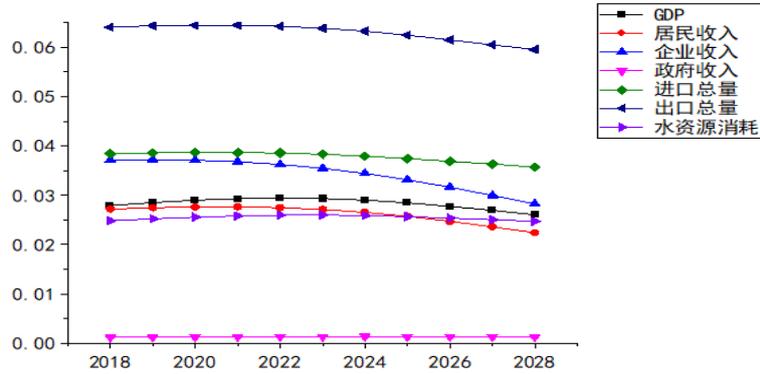


图 5.1 甘肃省水资源动态 CGE 模型的模拟结果

图 5.1 所示，在 2018-2028 年，提高生产用水效率对 GDP、居民收入、政府收入、企业收入、进出口总量及水资源消耗量产生不同的正面效应。对 GDP 而言，2018-2018 年 GDP 的平均增速为 2.83%，居民收入的平均增速为 2.61%，政府收入的平均增速为 0.13%，企业收入的平均增速为 3.43%，进口总量的平均增速为 3.1%，出口总量的平均增速为 6.29%，水资源消耗量平均增速为 2.55%。说明该政策随时间推移，对各经济主体的提升有持续性强化效应。

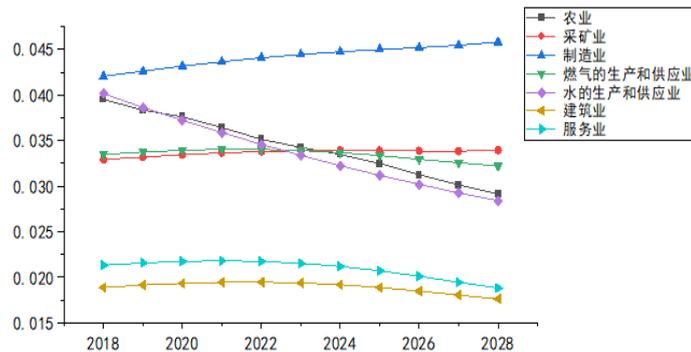


图 5.2 2018-2028 年各部门产出的变化趋势

图 5.2 展示了 2018-2028 年各部门产出的变化情况，各部门的产出水平都随着生产用水效率的提高而出现不同程度的增长，其增长速度最快的为制造业，制造业是甘肃重要的经济支柱产业，为我国国民经济发展特别是在确保重要工

业产业链、供应链稳定方面做出了重要贡献，其对水资源依赖性较强，其次为水的生产和供应业、农业、燃气的生产和供应业、采矿业、服务业、建筑业。

生产用水效率提高对产业部门的产出水平带来的冲击都是正面的。究其原因：首先生产用水效率的提高会直接作用于企业成本，降低企业生产成本，会使得企业扩大生产，其中水资源密集型产业必然会产生更大的产出水平，这是政策所产生的直接影响；与此同时，由于水资源密集型行业资本利润、劳动工资会因更低的成本下降幅度而被扩大，为追求收益最大化，投资和就业会相应地从低耗水转向高耗水行业。

5.4.2 用水效率提高后的节水效应

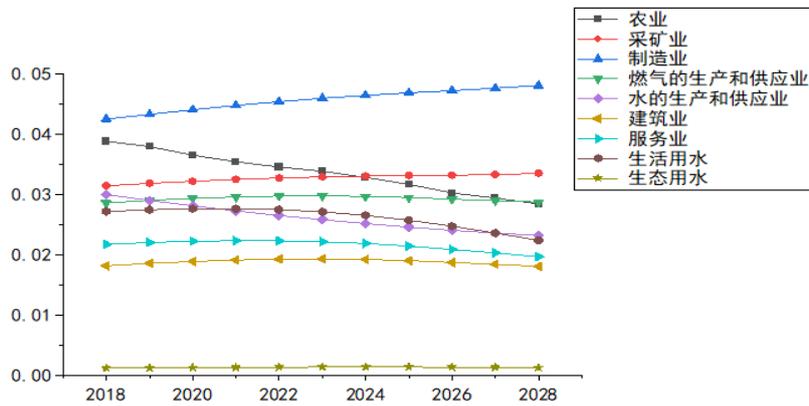


图 5.3 2018-2028 年各部门水资源消耗量的变化趋势

各部门 2018-2028 年水资源消耗量的变化情况如图 5.3 所示，各部门水资源消耗量的增长速度从快到慢依次为制造业、农业、采矿业、水的生产和供应业、燃气的生产和供应业、服务业、建筑业、另外，生活用水、生态用水的消耗量比以上各部门生产用水消耗量更慢。

受产业结构的影响，甘肃省农业用水占总用水量的 80% 以上，制造业中有色、黑色、石油化工等高耗水行业占总用水量的 11% 左右。用水效率提高时，制造业的水资源消耗量增速高于农业用水量增速，说明制造业发展对水资源的依赖性更强。

5.4.3 用水效率提高后的回弹效应

通过以上分析发现，用水效率提升对甘肃省宏观经济影响不仅范围广，而且程度较大，但能否在节水方面发挥优势，仍需要对其回弹效应程度进行评估。依据所建立的动态模型，模拟并测算生产用水效率提高 5% 后的水资源回弹效应，并表示为表 5.6 所示。

表 5.6 2018-2028 年水资源回弹效应的变化趋势

时间	农业	采矿业	制造业	燃气的生产和供应业	水的生产和供应业	建筑业	服务业	总体回弹效应值
2018	56.6	7.5	66.3	31.3	-99.8	2.0	16.9	15.8
2019	77.8	8.5	81.4	41.1	-110.8	5.8	21.8	22.4
2020	99.0	9.6	96.6	50.9	-121.7	9.6	26.7	29.2
2021	120.3	10.7	111.9	60.8	-132.5	13.5	31.6	35.9
2022	141.7	11.9	127.2	70.6	-143.3	17.3	36.6	42.8
2023	163.1	13.2	142.8	80.8	-154.0	21.3	41.6	49.6
2024	184.6	14.5	158.3	90.7	-164.6	25.2	46.5	56.6
2025	206.1	15.9	147.1	100.8	-175.2	29.3	51.7	63.5
2026	227.7	17.3	189.9	110.9	-185.7	33.3	56.8	70.6
2027	249.3	18.8	205.8	121.2	-196.1	37.4	62.0	77.6
2028	271.0	20.4	221.8	131.4	-206.5	41.5	67.1	84.7

从表 5.6 中可以看出，用水效率提高引起的水资源回弹效应仍表现为部分回弹效应，2018 年甘肃省水资源回弹效应为 15.77%，到 2028 年回弹效应为 84.7%，呈逐年递增趋势。说明仅仅依赖提高用水效率来达到降低用水总量的目的可能会得不到理想的效果。

提高用水效率意味着生产同产量的产品需要更少的水资源，然而，用水效率的提高会使得产品相对价格下降，耗水产品产量增加，进一步刺激了对水资源的需求，通过技术改进提高用水效率所实现的节水成果会被产出结构调整所需的水资源所抵消。提高用水效率还能够刺激甘肃省水密集型产品的消费和出口，让经济结构向水资源需求更多的方向靠近，在产出结构和经济结构两方面的变化下，水资源回弹效应会呈现出增加的趋势。

5.5 本章小节

本章为论文的实证部分，该部分主要分为：情景设计、静态模拟、敏感性

分析以及动态模拟。由于本文研究的是甘肃省水资源回弹效应，但还进行了经济效应和节水效应的分析，这是为了更好的讨论水资源回弹效应与经济效应、节水效应之间的关系。

本文以甘肃省为例，借鉴了 Zhou（2021）的情景设置，将甘肃省生产用水效率分别提高 1%、5%、10%，与其不同的是本文不仅考虑了生产用水还考虑了生活用水和生态用水，讨论不同用水效率情境下经济发展和水资源消耗的变化，以此来测算出甘肃省水资源回弹效应。

在静态模拟中，提高各部门生产用水效率能够促进甘肃省经济发展，提高了各经济主体的收入、增加了进出口总量以及甘肃省生产总值，并且用水效率越高，对经济的正向作用越明显，但生产用水效率提高的同时，生活用水量、生态用水量出现了增加的情况，最后根据各部门水资源消耗变化量测算出了水资源回弹效应，发现用水效率越高，回弹效应越大。

敏感性分析是为了检验参数设定对模型结果可靠性的影响，本文通过改变弹性参数的数值，发现弹性参数值变化对模型运行结果没有产生较大影响，则该模型稳定性较高。

由于用水效率提高 5%更符合甘肃省目前的节水状况，所以本章只讨论生产用水效率提高 5%后的变动情况。模拟出 2018—2028 年期间提高甘肃省生产用水效率时对经济主体的提升有持续性强化效应，各部门回弹效应呈上升的趋势。

6 结论与建议

6.1 主要结论

本文以 2017 年甘肃省投入产出表为依据编制 SAM 表作为数据基础，构建了静态、动态 CGE 模型，将所有生产部门的用水效率依次提高 1%，5%，10%，根据效率提高前后用水量的变化情况来测算出甘肃省的水资源回弹效应，并分析了提高效率所带来的经济效应和回弹效应。

通过以上处理与分析，得出的主要研究结论如下：

(1) 生产用水效率提高对促进部门生产和宏观经济发展有激励作用，生产用水效率提高后，由于生产者在相同条件下生产同样的产品所需的成本减少，提高企业利润率，扩大产品占有率，促进经济发展，即对 GDP、政府收入、企业收入、居民收入、进口总量、出口总量产生积极影响，使得农业、制造业等高耗水行业产出增加，减少了各部门的用水量，而造成生态用水量和生活用水量的增加。

(2) 效率提高同时也会降低产品的单位成本与价格，引致产品需求和消费增长，从而引发更多的水资源消耗，最终导致用水效率提高所节约的水资源被额外的水资源消耗部分抵消。当生产用水效率提高时，甘肃省除水的生产和供应业外，其它部门均存在不同程度的回弹效应，制造业存在的回弹效应最大，用水效率提高所带来的节水效果，超过一半被抵消。其它部门都属于部分回弹情况，节水政策部分有效。随着用水效率的提高，各部门的水资源回弹效应也在增加。导致甘肃省具有水资源回弹效应的原因可能为：首先各生产部门推动了技术进步提高了用水效率，其次，经济的高速发展需要消耗大量的水资源。生产部门为达到节约用水的目的，利用提高用水效率的方法来降低水资源消耗量，但通过经济系统运行，在宏观经济层面表现出生产水密集型产品增加，水资源投入量上升的情况，导致甘肃省逐步形成了经济高耗水的特征。总之提高用水效率的政策不能完全达到节水的目标，预期节水量被新增的水资源需求所抵消。

(3) 从长期来看，用水效率的提高对各经济主体的提升有持续性强化效

应。各部门的产出水平都随着生产用水效率的提高而出现不同程度的增长，其增长速度从快到慢依次为制造业，水的生产和供应业、农业、燃气的生产和供应业、采矿业、服务业、建筑业。各部门水资源消耗量的增长速度从快到慢依次为制造业、农业、采矿业、水的生产和供应业、燃气的生产和供应业、服务业、建筑业。生活用水、生态用水也逐年增加。用水效率导致的经济增长，高耗水部门的产品竞争力提高以及耗水产品出口的增长，会进一步刺激了宏观经济层面对水资源的需求，由此水资源回弹效应呈现出逐年增加的趋势。

上述讨论反映出提高用水效率只实现了部分节水效果，但其促进了各经济主体的收入，刺激了甘肃省经济发展。

6.2 建议

甘肃省正在加速工业化进程，特点是水资源的快速消耗。随着经济的迅速发展，对水资源的需求显著增加，预示着未来几十年内甘肃将面临严峻的节水挑战。研究表明，甘肃目前主要依靠提升水使用效率来节水。这种策略在一定程度上取得了效果，但许多潜在的节水机会尚未被充分利用，因此还有很大的节约空间。仅仅依赖提升用水效率的方法来节水，只能解决部分问题。因此，水资源的回弹效应实际存在，提示我们不能仅依靠提升用水效率来达成节水目标或解决水短缺问题。我们不应忽视回弹效应在制定节水政策时的影响。相反，我们需要采取一系列支持政策来控制回弹效应，确保通过提高用水效率获得的节水潜力得到最大化利用。

（一）根据研究显示，甘肃省的一些水密集型行业未能达到预期的水节约目标，存在一定的回弹效应。因此，甘肃不能仅仅依赖提高用水效率来达成节水目的和解决水资源短缺。在设计节水计划时，必须考虑到用水的回弹效应。制定政策时应考虑地区特性，实施精确的措施，并在执行不同政策时注意减少它们之间的负面作用，以优化政策效果。要严格执行水资源的开发和利用控制措施，提升用水效率。在建立了涵盖流域、省、市、县三级行政区的取水总量控制指标体系之后，需要加强节水的强制性指标管理，同时实行水资源总量和强度的双重控制，以提升用水效率。

（二）农业领域应成为节水工作的重点。我们需要深入挖掘旱作农业的发

展潜力，广泛推广高效的节水技术。同时，应加速建设省级水网，以逐步克服区域性的水短缺问题。强化灌区的现代化改造，持续优化农业生产环境。积极发展节水型农业，推动高效节水技术的应用，加快科技创新和资源整合，提升农业水资源的综合利用效率。确立健全的节水投资保障机制，充分发挥政府和市场在节水工作中的作用。为了创新水利管理体制，应该建立一个由县、站、镇到村的直线型管理模式，以增强农业节水的内在动力。必须实施严格的约束措施，全面执行最严格的水资源管理政策，对区域和流域的水使用总量及效率进行控制。应实施农业灌溉水的定期和定量管理，合理控制农业水使用量。同时，需要加强监管，实现用水的动态管理和精细化管理，有效提升水资源的使用效益。

（三）提升用水效率已经积极促进了甘肃省制造业的产出增长。作为甘肃经济发展的核心，如甘肃省酒钢集团、金川集团、白银有色集团、兰州石化以及天水电工电气和河西走廊的新能源装备制造基地等主要企业，应该淘汰落后的生产能力。这些企业需要注重提升创新能力，改善节水技术和生产工艺，根据自身资源特点加强水资源管理。积极推行废水再利用和高耗水工艺的替代，提高用水效率，从而促进产业的绿色和高质量发展。

（四）要控制水资源的总体消耗，需要从个体层面入手，改善每个人的用水习惯。通过加强节水教育和宣传，激发大众的节水动力，提高社会的节水意识。应鼓励大家采取节约用水的行为，推广使用节水设备。家庭应主动更换和使用节水型设施，转变高消耗的用水习惯，合理使用水资源，促进节水型的生活和生产方式。建立和完善梯度水价等定价机制，以引导和促进社会各界节水。在建设新城、改造老城区和发展市政基础设施中，应推广再生水网络、透水路面和雨水回收设施。在覆盖有再生水管网的地区，工业生产、园林灌溉、景观水体、湖泊补水、道路清洁、汽车洗涤、公厕冲洗、建筑施工和冷却系统等用水，都应使用符合标准的再生水。提高居民节水意识对减少服务业水回弹效应至关重要。

6.3 展望与不足

本文对问题的分析还需完善，以下是论文中存在的不足：

(1) 虽然 CGE 模型在经济领域得到了广泛的应用, 但不可避免模拟所得到的结果与现实情况存在一定的差距。(2) 由于投入产出表每五年更新一次, 目前最新的数据为 2017 年, 即本文利用《甘肃投入产出表 2017》编制了社会核算矩阵, 所以在静态模拟中, 只能对 2017 年甘肃省水资源回弹效应进行测算。(3) 本文模型中所涉及到的参数是通过参考其他学者的研究得到的, 在社会核算矩阵的编制过程中, 各部门数据的统计口径不同, 并且在平衡矩阵过程中难免存在误差。

因此, 未来研究中, 可采用 2022 年的投入产出表, 对甘肃省的水资源回弹效应进行测算。

参考文献

- [1] Borenstein S. A microeconomic framework for evaluating energy efficiency rebound and some implications[J]. *The Energy Journal*, 2015, 36(1):9-16
- [2] Broberg T, Berg C, Samakovlis E. The economy-wide rebound effect from improved energy efficiency in Swedish industries—A general equilibrium analysis[J]. *Energy policy*, 2015, 83: 26-37.
- [3] Brookes L. The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution[J]. *Energy policy*, 1990, 18(2): 199-201.
- [4] 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.
- [5] Fei R, Xie M, Wei X, et al. Has the water rights system reform restrained the water rebound effect? Empirical analysis from China's agricultural sector[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 246: 106690.
- [6] Freire-González J. Does water efficiency reduce water consumption? The economy-wide water rebound effect[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(6): 2191-2202.
- [7] Glomsrød S, Taoyuan W. Coal cleaning: a viable strategy for reduced carbon emissions and improved environment in China?[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(4): 525-542.
- [8] Haas R, Biermayr P. The rebound effect for space heating Empirical evidence from Austria[J]. *Energy policy*, 2000, 28(6-7): 403-410.
- [9] Hens H, Parijs W, Deurinck M. Energy consumption for heating and rebound effects[J]. *Energy and buildings*, 2010, 42(1): 105-110.
- [10] Hong S H, Oreszczyn T, Ridley I, et al. The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings[J]. *Energy and buildings*, 2006, 38(10): 1171-1181.

- [11]Hymel K M, Small K A. The rebound effect for automobile travel: asymmetric response to price changes and novel features of the 2000s[J]. *Energy Economics*, 2015, 49: 93-103.
- [12]Jevons W S. The coal question: Can Britain survive[J]. First published in, 1865, 719.
- [13]Khazzoom J D. Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances[J]. *The energy journal*, 1980, 1(4).
- [14]Liang Q M, Fan Y, Wei Y M. The effect of energy end-use efficiency improvement on China's energy use and CO₂ emissions: a CGE model-based analysis[J]. *Energy Efficiency*, 2009, 2: 243-262.
- [15]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.
- [16]Saunders H D.,2000a. A view from the macro side: rebound, backfire, and Khazzoom-Brookes[J]. *Energy policy*, 2000, 28(6-7): 439-449.
- [17]Saunders H D.,2000b Does predicted rebound depend on distinguishing between energy and energy services?[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(6-7): 497-500.
- [18]Saunders H D. Fuel conserving (and using) production functions[J]. *Energy Economics*, 2008, 30(5): 2184-2235.
- [19]Scheierling S M, Young R A, Cardon G E. Public subsidies for water - conserving irrigation investments: Hydrologic, agronomic, and economic assessment[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(3).
- [20]Sears L, Caparelli J, Lee C, et al. Jevons' paradox and efficient irrigation technology[J]. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1590.
- [21]Song J, Guo Y, Wu P, et al. The agricultural water rebound effect in China[J]. *Ecological Economics*, 2018, 146: 497-506.
- [22]Stapleton L, Sorrell S, Schwanen T. Estimating direct rebound effects for personal automotive travel in Great Britain[J]. *Energy Economics*, 2016, 54: 313-325.

- [23] Thomas B A, Azevedo I L. Estimating direct and indirect rebound effects for US households with input-output analysis Part 1: Theoretical framework[J]. Ecological Economics, 2013, 86: 199-210.
- [24] Ward F A, Pulido-Velazquez M. Water conservation in irrigation can increase water use[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(47): 18215-18220.
- [25] Xu Q, Song W, Zhang Y. Forecast and optimal allocation of production, living and ecology water consumption in Zhangye, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2016, 96: 16-25.
- [26] Yu X, Moreno-Cruz J, Crittenden J C. Regional energy rebound effect: The impact of economy-wide and sector level energy efficiency improvement in Georgia, USA[J]. Energy policy, 2015, 87: 250-259.
- [27] Zhou Y, Li J, Wei W, et al. Analysis of the economy-wide rebound effect of water efficiency improvement in China based on a multi-sectoral computable general equilibrium analysis[J]. Water, 2021, 13(21): 2963.
- [28] 查冬兰,周德群.基于CGE模型的中国能源效率回弹效应研究[J].数量经济技术经济研究,2010,27(12):39-53+66.
- [29] 陈杰,许朗,吴东立.华北平原节水技术、灌溉用水量反弹效应与地区异质性——基于Malmquist和LMDI指数分析[J].自然资源学报,2022,37(08):2181-2194.
- [30] 陈星.水污染物减排经济影响解析与技术途径优化研究[D].清华大学,2017.
- [31] 陈雯.中国水污染治理的动态CGE模型构建与政策评估研究[D].湖南大学,2012.
- [32] 邓光耀.中国多区域水资源CGE模型的构建及其应用[J].统计与决策,2020,36(14):157-161.
- [33] 邓光耀,韩君,张忠杰.中国各省水资源利用效率的测算及回弹效应研究[J].软科学,2017,31(01):15-19.
- [34] 黄凤羽,黄晶.我国水资源税的负担原则与CGE估算[J].税务研究,2016,(05):47-53.

- [35] 李海鹏,李卓,张俊飏.中国农业能源回弹效应的形成机制、时空演变及影响因素[J].中国人口·资源与环境,2022,32(10):24-34.
- [36] 李昌彦,王慧敏,佟金萍等.基于CGE模型的水资源政策模拟分析——以江西省为例[J].资源科学,2014,36(01):84-93.
- [37] 李敏,刘春学,李春雪等.云南省水资源政策效应模拟及预测研究[J].地域研究与开发,2020,39(01):133-138.
- [38] 李元龙,陆文聪.生产部门提高能源效率的宏观能耗回弹分析[J].中国人口·资源与环境,2011,21(11):44-49.
- [39] 刘宗项.能源回弹效应机理与测算研究[D].河南财经政法大学,2019.
- [40] 庞军,龚亚珍,石媛昌等.中国的能源回弹效应及其对实现“十三五”节能目标的影响[J].中国环境科学,2018,38(05):1979-1989.
- [41] 尚杰,魏东方,吉雪强.技术进步、农业用水效率与回弹效应——基于我国粮食主产区面板数据的实证研究[J].生态经济,2020,36(11):94-100.
- [42] 史海春,康旺儒,马小蕾等.提升甘肃水资源保护及综合利用水平的对策研究[J].发展,2021(03):20-25.
- [43] 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(09):1765-1772.
- [44] 王克强,邓光耀,刘红梅.基于多区域 CGE 模型的中国农业用水效率和水资源税政策模拟研究[J].财经研究,2015,41(03):40-52+144.
- [45] 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,(06):81-89.
- [46] 吴正,田贵良,胡雨灿.基于开放式水资源嵌入型CGE模型的税改政策经济影响与节水效应[J].资源科学,2021,43(11):2264-2276.
- [47] 夏军,黄浩.海河流域水污染及水资源短缺对经济发展的影响[J].资源科学,2006(02):2-7.
- [48] 信春华,郭凤琪.中国水资源税制体系政策效应模拟——基于动态CGE模型的分析[J].中国人口·资源与环境,2023,33(08):166-179.
- [49] 许莹莹,崔正星.中国工业用水回弹效应的测算[J].统计与决策,2021,37(03):121-124.

- [50] 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(09):1808-1820.
- [51] 杨慧慧,王喜刚.基于投入产出法的能源回弹效应测算与风险评价[J].统计与决策,2019,35(20):20-24.
- [52] 严冬,周建中.水价改革及其相关因素的一般均衡分析[J].水利学报,2010,41(10):1220-1227.
- [53] 原毅军,苗颖,谢荣辉.基于环境CGE模型的水污染税政策绩效评估[J].科技与管理,2016,18(03):6-11.
- [54] 曲永馥,康健,林希晨等.基于CGE模型的我国西北地区农业水价政策研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(12):160-171.
- [55] 崔琦,贺玲,彭桥,陈浩.基于CGE模型的京津冀地区差异化水价政策分析[J].经济与管理,2019,33(05):11-19.
- [56] 赵永,王劲峰.经济分析CGE模型与应用[M].北京:中国经济出版社,2008.
- [57] 张欣.可计算一般均衡模型的基本原理与编程[M].格致出版社,2010.
- [58] 郑洋.甘肃省非常规水资源开发利用分析[J].甘肃水利水电技术,2022,58(08):8-10+32.
- [59] 周芳,马中.基于CGE模型的水价改革影响研究——以重庆市为例[J].中国地质大学学报(社会科学版),2014,14(01):47-54+140.
- [60] 周焯华,杨俊,张林华等.CGE模型的求解方法、原理和存在问题[J].重庆大学学报(自然科学版),2002(03):142-145.
- [61] 钟方雷,郭爱君,王康等.水资源CGE模型的构建及其应用[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):194-197

致谢

在我整个硕士研究生学习过程中，邓光耀老师丰富的知识储备和严谨的学术态度让我佩服，在学术上给了我很多指导和启示，让我在这三年中有了很多收获。

此外，我还要向师门的其他老师和同学们致以最诚挚的谢意。他们的学识广博和严谨的治学态度，为我提供了宝贵的学习机会和经验分享。在与他们的交流和合作中，我不仅获得了学术上的启迪和提高，也收获了珍贵的友谊和人生经历。

我还要感谢我的家人和朋友们。他们的爱与支持，给我提供了精神上的依托和力量。他们的鼓励和信任让我始终保持信心，坚定地追寻自己的学术理想。他们在我艰难时刻的支持和激励，让我坚持不懈地奋斗，努力追求卓越。

衷心感谢邓光耀导师、师门的老师和同学们、家人和朋友们，以及所有支持我的人们！你们对我学术道路上的帮助和鞭策是我前进的动力，我将永远铭记于心！

附录

表 1 描述性宏观 SAM 表

	活动	商品	劳动	资本	生产用水	居民	企业	政府	储蓄—投资—存货	外地区	国外	合计
活动		总产出										总产出
商品	中间投入					居民消费		政府消费	资本形成	调出	出口	总需求
劳动	劳动报酬											劳动要素收入
资本	投资收益											资本要素收入
生产用水	资源价值											水资源收入
居民												居民总收入
企业												企业总收入
政府	生产税净额											财政收入
储蓄—投资—存 货												总储蓄
外地区												外地区收入
国外												国外总收入