

分类号 F323

密级

UDC

编号 10736

西北师范大学
硕士学位论文

武威市水足迹及其与影响因子间
的动态关系分析

研究生姓名：王文静

指导教师姓名、职称：石培基 教授

专业名称：人文地理学

研究方向：城市与区域发展研究

二〇一三年五月

硕士学位论文

M.D. Thesis

武威市水足迹及其与影响因子间的动态关
系分析

The analysis of the dynamic relationship between the
water footprint and impact factors of Wuwei

王文静

WANG Wenjing

西北师范大学

Northwest Normal University

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 前 言	1
1.1 选题背景	1
1.2 选题目的及意义	1
1.21 研究目的	1
1.22 研究意义	2
2 国内外研究综述	3
2.1 国内外虚拟水研究综述	3
2.2 国内外水足迹研究综述	3
2.3 相关计量模型研究综述	5
3 研究内容及思路	7
3.1 研究内容	7
3.2 指标选取及研究方法	7
3.2.1 评价指标体系的选取	7
3.2.2 水足迹的研究方法	8
3.2.3 动物产品虚拟水含量计算	9
3.2.4 工业产品虚拟水含量计算	11
3.2.5 消费结构多样性模型	12
3.2.6 水资源利用效率	12
3.2.7 城市化水平	12
3.2.8 检验模型	12
3.3 技术路线	14
4 研究区域概况及水资源问题	16
4.1 研究区地理位置	16
4.2 自然环境概况	16
4.3 水资源状况	17
4.3.1 水资源总量	18
4.3.2 水资源利用现状	18
4.4 经济状况	19

4.5 主要的生态问题	20
5 武威市水足迹及与影响因子分析.....	22
5.1 武威市水足迹的计算.....	22
5.1.1 单位农产品虚拟水含量的计算.....	22
5.1.2 农产品虚拟水消费量的计算.....	23
5.1.3 其他用水量的计算.....	25
5.2 武威市水足迹分析	25
5.3 虚拟水消费多样性指数变化特征	27
5.4 水资源利用效率变化特征	29
5.5 武威市城市化水平.....	30
6 武威市水足迹与影响因子的关系.....	31
6.1 水足迹与各指标间的平稳性检验	31
6.2 水足迹与各指标间的协整关系检验.....	33
6.3 误差修正模型	35
6.4 格兰杰因果检验	36
6.4.1 人均水足迹与水足迹强度的格兰杰因果关系.....	36
6.4.2 人均水足迹与城市化水平的格兰杰因果关系.....	37
6.4.3 人均水足迹与居民虚拟水消费多样性指数的格兰杰因果关系.....	37
7 结论	38
7.1 武威市虚拟水及水足迹研究总结	38
7.2 武威市水足迹与影响因子关系分析过程总结	38
7.3 武威市水资源可持续利用战略	39
8 问题与展望.....	41
参考文献	43
致 谢	48

摘 要

武威市是我国水资源开发程度最高的地区之一，地处我国内陆腹地，远离海洋，南依祁连山、北接腾格里沙漠，气候干燥、降水稀少、植被稀疏，水资源形成条件差，对气候变化及人类活动的干扰表现出较强的脆弱性，是典型的干旱区水资源脆弱带，其水资源状况易在外界作用下由一种形态滑向另一种形态，敏感性和易变性较强。近两千年来在全球气候变化和人类活动的双重影响下，水资源环境逐步恶化，尤其近 50 年来，引发了水资源短缺、水土流失、河川断流、冰川雪线萎缩等一系列水资源环境恶化的问题。特别是中下游地区，地下水位下降，土地盐碱化，沙漠化程度加剧，地表植被大片枯死，天然绿洲不断缩小，沙尘暴危害加重，水生态系统的自我调节能力和对自然灾害的抗干扰能力下降。人水矛盾日益加剧，水资源匮乏已经成为制约武威市经济发展最主要的因素。要改变这一严酷的现实，必须首先深刻认识人类活动对水资源系统的影响，从人类对水资源的消费入手，以水足迹的概念来反应区域人类消费对水资源的真实占有情况，通过水足迹的影响因素来研究最为有效的节水途径，为干旱地区科学的评估水足迹及水资源管理和决策提供科学依据。

基于水足迹的概念，运用水足迹的计算方法，首先计算和分析了 1995-2009 年武威市水足迹以及水足迹的相关影响因子；然后根据动态计量经济学的方法，对水足迹及其影响因子间的关系进行了长期的动态均衡分析和短期的波动分析；最后对水足迹及其影响因子间的关系进行了格兰杰因果检验。结果表明：武威市城乡居民的水足迹、水足迹强度、城市化水平以及城乡居民虚拟水消费多样性指数在 1995-2009 年呈现上升或者下降的趋势，通过协整检验、误差修正模型及格兰杰检验，发现武威市水足迹与其影响因子之间存在着长期均衡关系、短期波动关系及格兰杰因果关系，其中水足迹强度在长期和短期范围内存在负影响，城市化水平和城乡居民虚拟水消费多样性指数存在着正影响。诸多影响因子中，城乡居民虚拟水消费多样性指数的影响尤为突出，而城乡居民虚拟水消费多样性指数的影响主要体现在农村居民的膳食结构上。在水资源的科学管理过程当中，应将城乡居民对水资源消费结构的变量作为重点考虑进去。

关键词：水足迹；水足迹强度；城市化水平；虚拟水消费指数；协整模型；误差修正模型；格兰杰因果检验

Abstract

The city of the wuwei is the one of the highest water resources development of area basin in China, deep in the hinterland of the China, away from the ocean, water resources condition is poor, the change of climate and human activity disturbances show some vulnerability, which is typical fragile of water resources in arid region, change form a morphology slide into another form by outside force easily, sensitivity and variability. In the past two thousand years, water resources environment deteriorated gradually under the dual impact of climate change and human activities, especially in the last fifty years, led to the shortage of water resources, soil erosion, shrinking glaciers, rivers flow and a series of water resources environmental problems. Especially the region of the downstream, large tracts of dead vegetation, natural oasis is contractible ceaseless, desertification land area expands increasingly, sandstorm hazard increases, water ecosystem self-regulation and the anti-interference ability has been descend. The contradiction between people and water has been deteriorate, lack of water resource has become the most main factor which is restrict economic development of Wuwei. To change the harsh reality, first we should recognize The impact of human activities on the water resources system, From the human to the consumption of water resources, With the concept of water footprint to reflect the regional human consumption occupies actual situation of water resources, The influence factors of water footprint to study the most effective water saving way, For the scientific assessment of the water footprint and water resources management in arid regions and provide a scientific basis for decision-making.

Based on the concept of water footprint and the water footprint calculate method. At first, calculation and analysis of the 1995-2009 Wuwei water footprint and water footprint related influence factors; according to the dynamic econometric method. We analyzed the water footprint and impact factors of the relations which is the long-term dynamic equilibrium and short-term fluctuation; At last, analyzed the relations of granger causality test between the water footprint and impact factors. The results show that the water footprint of urban and rural residents, water footprint intensity, the level of urbanization and virtual water consumption index of urban and

rural residents shows the tendency of rise or fall in 1995-2009; Through the cointegration test, error correction model test and the granger test, Found the water footprint and its influence factor, there is existed a long-term equilibrium relationship and short-term fluctuation relationship and granger causality. The intensity of water footprint within the scope of the long-term and short-term exist negative impact, Urbanization and urban and rural residents' virtual water consumption index of positive influences. In many impact factors, especially the influence to virtual water is Virtual water consumption index of urban and rural residents, and the influence of urban and rural residents' consumption index mainly reflects on the dietary structure of rural residents. During the scientific management of water resources, we should analysis urban and rural residents' consumption structure of the variable as a key consideration.

Key words: water footprint; Water footprint intensity; the level of urbanization; virtual water consumption index; cointegration model; error correction model; granger causality test

1 前 言

1.1 选题背景

水是人类及一切生物赖以生存和发展的重要物质基础,也是维持一个国家和地区社会经济可持续发展的重要条件和不可替代的宝贵自然资源。随着社会经济的不断发展和人口规模的持续增长,人类对水资源的消耗强度日益加大,随之所产生的水资源匮乏问题已经成为制约人类社会发展的主要因素之一。因此,对一个国家和地区水足迹及影响水足迹变化因素的研究已经成为预测和缓解区域水资源压力的重要决策依据。

武威市地处我国内陆腹地,南依祁连山,北接腾格里沙漠,气候干燥、降水稀少、植被稀疏,属于典型的干旱生态脆弱区。近年来,又受到全球气候以及人类活动的影响,使得南部祁连山植被退化、冰川雪线退缩,北部地下水位下降、土地盐碱化、沙漠化程度加剧,水生态系统的自我调节能力和对自然灾害的抗干扰能力下降。人水矛盾日益加剧,水资源匮乏已经成为制约武威市经济发展的最主要因素之一,寻找高效的节水途径已刻不容缓。传统的仅从供给的角度来分析水资源短缺的途径存在着运费高昂和远距离输送等安全弊端,解决区域性水资源短缺问题必须要有新思想、新举措。虚拟水及水足迹概念的提出为缓解和解决区域水资源短缺提供了一种新思路。本文在计算和分析武威市水足迹的基础上,进一步探讨水足迹与各影响因素之间的关系,为今后武威市水资源管理提供理论参考依据。

1.2 选题目的及意义

1.2.1 研究目的

在上述研究背景的基础上,本文的研究目的主要包括以下几个方面:(1)通过分析武威市水足迹的消费特点,以相关文献为基础,明晰武威市水足迹及相关指标体系的内涵及选取原则,构建较为完善的水足迹及相关指标核算依据体系。

(2)以水足迹理论及计算为基础,对武威市 1995 -2009 年水足迹、水资源利用效率、城乡居民虚拟水消费多样性指数以及人口城市化水平等指标进行综合评价。直观反映 16 年间武威市水足迹及相关指标的状况和变化趋势。(3)以上述计算结果为基础,运用动态计量经济学的分析方法对水足迹、水资源利用效率、

城乡居民虚拟水消费多样性指数以及人口城市化水平等指标之间的长期关系进行了分析,并从实证的角度研究了水足迹与其他指标在共同趋势或均衡关系情况下的因果关系和短期波动。例如:居民虚拟水消费多样性指数变化 $X\%$, 人均水足迹消费量变化 $Y\%$ 。(4) 结合本案例的分析结果,提出水资源管理及消费的相应措施,来缓解区域水资源系统的压力。

1.22 研究意义

传统的水足迹研究一般是以水足迹的计算为基础,对于时间序列的回归分析也只能反映变量之间的静态关系。本文以水足迹及相关指标的计算为基础,运用动态计量经济学中的单位根检验模型和协整分析模型,研究诸变量之间是否保持一种长期稳定的动态均衡关系,在此基础上通过建立误差修正模型 (Error Correction Model) 以及格兰杰因果关系模型来研究共同趋势或者均衡关系情况下变量间的短期波动效应和因果关系。较为准确地得出缓解区域水资源紧缺的最优方案,为区域的水资源安全提供研究思路 and 模式。

2 国内外研究综述

2.1 国内外虚拟水研究综述

虚拟水概念是由 Tony Allan^[1-4]在 20 世纪 90 年代提出来的,此后经过近十年的时间,科学界才认识到虚拟水概念对平衡地区和全球水资源安全的重要性。2002 年 12 月在荷兰 Delft 举行了一次关于虚拟水的国际会议,2003 年 3 月在日本召开的“第三届世界水论坛”上对虚拟水贸易进行了专题讨论以及 2003 年 8 月在瑞典召开的水问题会议都对虚拟水进行了专题讨论,世界水委会也将虚拟水列为 2003-2004 年的重要提议。虚拟水已经成为水科学领域的研究热点和相关水问题研究的创新领域。基于虚拟水的概念和内涵,国外一些科研工作者提出了农业和畜牧产品虚拟水含量的计算模型,并由此计算出农业产品和畜牧产品的虚拟水含量。在此基础上绘制了农业和畜牧业的全球虚拟水贸易图,并对全球的虚拟水贸易提出了建设性意见。例如,Chapagain 和 Hoekstra^[5-8]提出的研究不同产品生产树的方法,Zimmer 和 Renault^[9]提出基于对不同产品类型进行区分的计算方法,他们将农产品分为初级产品、加工产品、转化产品、副产品、低耗水或不耗水等 6 种主要类型,农业产品虚拟水含量具体的计算过程根据不同的产品分类而有所差异。据估算,生产 1kg 粮食需要 1000-2000kg 水资源,生产 1kg 的奶酪、牛肉、咖啡、茶叶则分别需要 5000-5500kg、16000-19600kg、22450kg、16000kg 水资源。

虚拟水概念被引入我国后,很多学者:如徐中民、王新华、张志强、龙爱华、李新文、方卫华^[10-14]等分别对虚拟水的理论、方法和计算模型进行了系统的介绍。并利用虚拟水计算方法计算了我国西北四省、中部各省等一些地区的农业产品及畜牧产品的虚拟水含量,推广了虚拟水在农业系统中的应用。项学敏^[15]等人提出了一个工业产品虚拟水的计算方法,并计算出石油制品中的虚拟水含量。

2.2 国内外水足迹研究综述

目前全球水资源供求矛盾日显尖锐,缺水已经成为制约社会经济发展的重要因素。水资源短缺的现状和它的不可替代性使各国学者纷纷研究新的方法来缓解这一问题。2002 年,荷兰学者 Hoekstra^[6-8]在生态足迹和虚拟水的基础上提出了水足迹的概念,将如何解决全球缺水问题的研究扩展到了新的领域,并从消费的

角度衡量人类对水资源系统的真实占用,建立了水资源利用与人类消费模式的联系,同时将水问题拓展到了社会经济领域,是当前测度人类活动对水资源系统影响的最好指标。目前国外的研究主要在某一地区或某一种产品的水足迹计算、不同区域间水足迹异同分析和评价比较、水足迹的影响因素(如农产品虚拟水消费结构)的分析研究、水资源安全和粮食安全及生态系统的关系问题。

表 2-1 国外水足迹研究的代表性著作及研究内容

代表性著作	发表时间	作者	研究内容及成果
Virtual water: an introduction	2003	Chapagain Hoekstra	在生态足迹和虚拟水的基础上提出了水足迹的概念,并对多国水足迹进行了计算和评价。
Water footprints of nations	2004	Chapagain Hoekstra	对世界各国的水足迹进行了计算,得出全球人均水足迹最高的国家是美国,为 2480 立方米每年,希腊、西班牙、意大利分居二三四位,中国人均水足迹为 700 立方米每年,相对较低。差别主要由消耗产品的数量、消费结构、水资源利用率和自然资源禀赋决定的。
Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern	2006	Chapagain Hoekstra	对比分析了中国、美国、日本、印度的水足迹,研究了人类消费模式对水足迹的影响。
The water footprints of India	2007	Kampman	计算了 1995-2001 年印度水足迹,同时对水足迹构成进行了分析,指出印度最大的虚拟水贸易流是从北部到南部。

我国水足迹的研究相对于国外较晚,关于水足迹的研究相对较少。目前国内学者的研究主要集中在介绍水足迹的概念及对国家和区域水足迹的计算上。如龙爱华^[16-18]等人引用了水足迹的概念和计算方法,运用产品虚拟水的核算方法计算了 2000 年甘肃省虚拟水消费和水足迹以及 2000 年西部四省区的水足迹;初步应用水足迹的理论解决我国水资源安全和粮食安全及生态环境的问题,如王新华^[19-21]等人在分析 2000 年中国各省水足迹的基础上,探讨了几条降低水足迹和缓解水资源压力的新途径;人类消费模式对水足迹的影响问题,如马静^[22]等人在计算我国人均水足迹的基础上,分析居民消费结构对水足迹有着非常显著的影响;引入动态计量经济学方法来分析水资源利用效率与水足迹等指标的关系,如

张燕、徐建华^[23]等人在计算新疆水足迹的基础上，得出新疆水资源利用效率与水足迹等指标之间构成一个相互影响的动态系统，且水资源利用效率不高与水足迹等指标间存在长期稳定的关系。运用水资源利用评价研究来分析区域水资源问题，如戚瑞、耿涌^[24-25]等通过构建区域水足迹结构、效益、生态安全以及可持续性指标体系对水资源利用情况进行评价。研究文献见表 2

表 2-2 国内水足迹的代表性文章及研究内容

代表性文章	发表时间	作者	主要研究内容
西北四省 2000 年的水足迹	2003	龙爱华等	引用了虚拟水概念，介绍了产品虚拟水的计算方法，分析了 2000 年西北四省的水足迹，真实地衡量了社会经济系统对水资源的消费利用状况。
甘肃省 2003 年的水足迹评价	2005	王新华、徐中民等	引入了水足迹的概念和计算方法及其相关评价指标，计算分析了 2003 年甘肃省水足迹，得出甘肃省水资源的高消费对生态环境造成了巨大的压力。
中国 2000 年水足迹的初步计算分析	2005	王新华、徐中民等	引入了水足迹的概念、计算了全国各省的水足迹，得出西北省份水足迹较大，东南省份较小，探讨了降低水足迹以缓解水资源压力的几条途径。
甘肃省水足迹与消费模式分析	2005	龙爱华、张志强等	从产品消费模式的角度来分析水足迹，分析了 1989-2003 年甘肃省的水足迹的变化，结果表明改善居民消费结构和营养水平有利于降低水资源系统的压力。
中国区域水足迹的计算	2005	马静、汪党献等	计算了中国各区域主要农产品的虚拟水含量，通过分析区域的农产品生产和消费关系，计算了我国国际和国内区域间虚拟水的流量以及相应的水足迹，得出 1999 年北方地区向南方地区输送虚拟水达 52 亿立方米，保障了我国的粮食安全。
西北干旱区新疆水足迹及利用效率动态评估	2008	张燕、徐建华等	运用动态计量经济学的方法对水资源利用效率与水足迹等指标之间的长期关系进行了分析，结果表明水资源利用效率不高与城乡居民消费结构以及水足迹之间存在一种长期稳定的关系。
基于水足迹理论的区域水资源利用评价	2011	戚瑞、耿涌等	以大连市为例，通过构建区域水足迹结构、效益、生态安全以及可持续性指标体系对水资源利用情况进行评价。结果表明该评价方法简便直观、合理可行。

2.3 相关计量模型研究综述

从 20 世纪 70 年代起，宏观经济变量的非平稳问题越来越引起人们的关注。这是因为传统的建模技术都是建立在“平稳的经济时间序列”的基础之上，这是一种理想状况下的假设，目的是为了使问题简单化，但由于现实中的经济变量均呈现非平稳特征，如果采用经典的回归分析方法来分析具有共同趋势的非平稳时间序列，就会产生伪回归。例如：中国的 GDP 增长较快与印度的人口增长较快，

这两个时间序列有着共同的趋势,如果把这两个时间变量用经典的方法来建立一个模型的话,会产生伪回归,它们实际上是没有任何关系的。从而导致对经济变量间的关系的预测失败。而协整理论的出现正好弥补了这一平稳假设的不足。协整的概念最初是由 Granger^[26]提出来的,后来 Granger 和 Engle^[27]在 1987 年的合作论文中进行了严谨的证明,并提出了操作性的框架。协整理论基于对时间序列的平稳性检验,通常用迪基-富勒(DF)^[28]法以及增广的迪基-富勒(ADF)^[29]法来对时间序列的平稳性进行检验。此方法是由 Dickey-Fuller 与 1979 年提出的。1987 年 Engle 和 Granger^[30]正式提出协整的概念,将其表述为两个或几个经济变量的时间序列,在长期有可能分岔,但经过若干时期的调整,他们似乎又返回原有的运行轨道,并提出了格兰杰定理,证明了两个或者两个以上一阶非平稳序列之间如果存在协整关系,则这些序列之间一定存在误差修正模型,反之亦然。1988-1992 年 Johansen 发表了四篇关于向量自回归模型中检验协整向量并建立向量误差修正模型(VEC)的论文,完善了协整理论。

协整理论的研究在国内也受到了学者们的关注,一些专著和文章对协整理论进行了介绍和探讨,并在经济模型中得到了广泛的应用。如:由张晓桐和马薇编写的《协整理论与应用》^[31],对协整分析的理论体系以及实际应用进行了详细的介绍;由张世英等人编写的《协整理论与波动模型-金融时间序列分析及应用》^[32],论述了协整理论的波动原理、方法和实际应用等;王海鹏^[33]等人以电力行业为例,运用协整分析方法,对中国能源消费与经济增长间协整关系和因果关系进行了实证研究,研究表明中国能源消费与经济增长之间存在着协整关系;赵健^[34]等人通过协整分析方法和格兰杰因果检验法以及误差修正模型揭示了上海 R&D 投入与经济增长之间的协整关系;吴玉鸣^[35]等运用协整模型对广西区域资源利用效率与生态安全状况诸指标之间的长期关系进行了协整分析,得出变量之间存在着一种不安全的长期稳定的关系;吴林海^[36]运用时间序列动态均衡分析方法,通过对中国 1991-2005 年间 R&D 投入与经济增长的有关数据变量进行了协整分析,揭示了我国 R&D 与经济增长的动态均衡关系;李艳梅^[37]对 1978-2005 年中国城市化进程与重工业发展之间的动态相关性进行了分析,结果发现二者之间存在长期稳定的均衡关系。

3 研究内容及思路

3.1 研究内容

具体内容包括：

(1) 引入了虚拟水的概念，简要介绍了虚拟水的计算方法。以武威市为例，计算分析了 1995-2010 年武威市虚拟水消费量、水足迹总量、人均水足迹、水资源利用效率、城镇居民虚拟水消费多样性指数与农村居民虚拟水消费多样性指数等指标的整体特征及变化特征。

(2) 对水足迹与其他指标进行单位根检验，分析各时间序列的平稳性，为之后的协整分析做好准备工作。

(3) 在单位根检验的基础上，对武威市水足迹与其他指标进行协整分析，验证水足迹变化是否与其他变量之间存在长期均衡（稳定）的关系。

(4) 建立误差修正模型，分析影响水足迹的相关因素对水足迹的短期波动效应。

(5) 运用格兰杰检验模型分析水足迹与水资源利用效率、城市化水平、城镇居民虚拟水消费指数与农村居民虚拟水消费指数等指标之间是否存在格兰杰因果关系。

(6) 根据以上的研究结果，提出相应的解决方案。

3.2 指标选取及研究方法

3.2.1 评价指标体系的选取

本文选取单位质量产品虚拟水含量、城镇居民虚拟水消费量、农村居民虚拟水消费量、水足迹总量、人均水足迹、水足迹强度、城镇居民虚拟水消费多样性指数及农村居民虚拟水消费多样性指数(城乡居民虚拟水消费多样性指数)共计 9 项指标来评价武威市水足迹状况。由于虚拟水的消费占水足迹的绝大部分，准确的计算单位产品虚拟水含量是正确计算水足迹的前提和基础。因此依据武威市调研的实际情况、武威市统计年鉴中居民主要消费品数量以及相关研究中主要消费品种类的选取，本文选取大米、面粉、鲜菜、植物用油、猪肉、牛羊肉、鲜蛋、鱼虾类、水果、乳类、副食类、酒类共计 12 项指标来计算和分析武威市居民虚拟水消费量及虚拟水消费多样性指数。在上述的基础上，选取人均水足迹、水足迹强度、城市化水平、城镇居民虚拟水消费多样性指数及农村居民虚拟水消费多

样性指数(城乡居民虚拟水消费多样性指数)6 项指标来分析人均水足迹与其他指标之间是否存在格兰杰因果关系、长期的均衡关系和短期波动影响。

3.2.2 水足迹的研究方法

水足迹的计算方法有两种：一种方法是自上而下的方法，一个区域的水足迹等于区域内水资源利用量加上流域该区域的虚拟水流量，再减去流出该区域的虚拟水流量，用公式表达为：

$$Waterfootprint = WU + NVWI \quad (3-1)$$

1 式中 WU 为区域内用水量； $NVWI$ 为虚拟水净进口量。使用公式 3-1 计算区域的水足迹需要详细的产品流入流出数据，由于本文选取的数据年份较多，市级之间的贸易数据较难获得，限制了上述方法的使用。所以我们选择另外一种较为简单的计算方法，从产品和服务的消费量着手，即：

$$Waterfootprint = DU + \sum_1^n P_i \times VWP_i \quad (3-2)$$

其中 DU 为生活用水量； P_i 为第 i 种产品的消费量； VWP_i 为第 i 种产品单位虚拟水含量。在 3-2 式的计算中，考虑到工业产品的种类过于复杂，实际耗水量低的特点，在计算的过程中通常被忽略。所以农产品及动物产品的虚拟水含量就成了本文水足迹计算的重点。单位农产品虚拟水含量由单位面积的产量除以作物生育期需水量获得。计算公式分别如下：

$$V_{cn} = \frac{W_{cn}}{Y_{cn}} = \frac{\sum ET_a}{Y_{cn}} \quad (3-3)$$

其中， V_{cn} 为区域 n 中作物 c 单位质量的虚拟水含量， W_{cn} 为作物 c 生长总需水量， Y_{cn} 为区域 n 中作物 c 的产量， ET_a 为整个作物生长期内积累的蒸散量，计算公式为：

$$ET_a = k_c \times ET_0 \quad (3-4)$$

3-4 式中， k_c 为作物系数， ET_0 为下垫面蒸散量，由联合国粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼 (Penman-Monteith) ^[38-40] 公式计算出来，其中影响 ET_0 的气候因参数包括温度、相对湿度、日照时间、风速以及降水量等。图 3-1 为农作物虚拟水计算流程图。

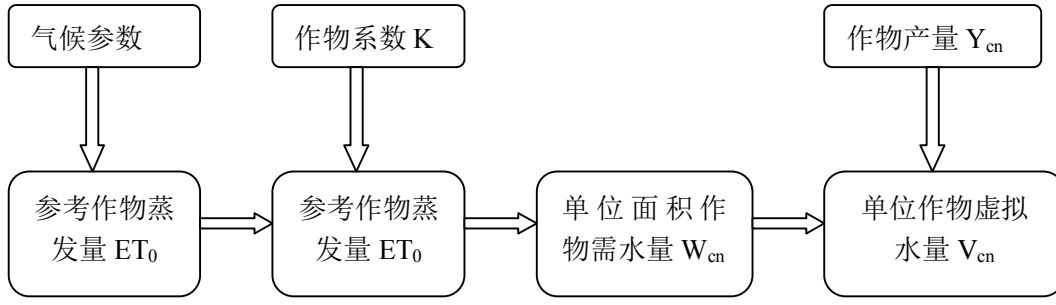


图 3-1 农作物虚拟水计算流程图

3.2.3 动物产品虚拟水含量计算

动物产品虚拟水含量的计算包括动物生长的整个过程中饲料的虚拟水含量、饮用水、清洁用水以及加工用水等，其中动物饲料的虚拟水含量根据不同饲料作物的构成比例进行加权计算，饲料作物的虚拟水含量按照标准彭曼公式计算。计算公式如下：

$$VWC_a[e,a] = VWC_{feed}[e,a] + VWC_{drink}[e,a] + VWC_{serv}[e,a] \quad (3-5)$$

式中， $VWC_a[e,a]$ 为出口地区 e 的动物 a 的虚拟水含量(m^3/t)； $VWC_{feed}[e,a]$ 、 $VWC_{drink}[e,a]$ 和 $VWC_{serv}[e,a]$ 分别为饲料用水、饮用水和服务水(m^3/t)。 $VWC_{feed}[e,a]$ 有两部分组成：分别为各种饲料中含有的虚拟水量和搅拌饲料所需要的水量，其中饲料用水由标准彭曼（Penman-Monteith）公式计算出来。因此动物一生中摄取食物中的虚拟水含量的计算公式为：

$$VWC_{feed}[e,a] = \frac{\int_{birth}^{slaughter} \{q_{mixing}[e,a] + \sum_{c=1}^{n_c} SWD[e,c] \times C[e,a,c]\} dt}{W_a[e,a]} \quad (3-6)$$

其中 $q_{mixing}[e,a]$ 为 e 区域 a 种动物饲料用于搅拌所需的水量($m^3 day^{-1}$)； $C[e,a,c]$ 为 e 区域 a 种动物摄取作物 c 的量($ton day^{-1}$)； $SWD[e,c]$ 为 e 区域作物 c 的虚拟水含量($m^3 t^{-1}$)； $W_a[e,a]$ 为 e 区域 a 种动物饲养期末的平均体重(t^{-1})。

VWC_{drink} 为动物一生饮用水总量，计算机公式为：

$$VWC_{drink}[e,a] = \int_{birth}^{slaughter} q_a[e,a]dt / W_a[e,a] \quad (3-7)$$

其中： $q_a[e,a]$ 为 e 区域 a 种动物日常饮水量($m^3 day^{-1}$)。

VWC_{serv} 为动物一生中用于洗澡、清洗畜棚的水以及其他相关服务的用水总量。

$$VWC_{serv}[e,a] = \int_{birth}^{slaughter} q_{serv}[e,a]dt / W_a[e,a] \quad (3-8)$$

式中： q_{serv} 为 e 区域 a 种动物日常服务用水量($m^3 day^{-1}$)。

不同动物产品的虚拟水含量计算要将活动物的虚拟水含量在动物产品间进行分配。直接由活动物提供的动物产品称为第一类动物产品，如，牛奶、猪肉、牛肉、羊肉、皮毛等。其虚拟水含量包括活动物虚拟水和为得到各种第一类动物产品加工所需要的水资源量。每吨活动物生产第一类产品所需要的水量计算公式如下：

$$PWR[e,a] = Q_{proc}[e,a] / W_a[e,a] \quad (3-9)$$

$PWR[e,a]$ 为 e 区域 a 种动物第一类产品的虚拟水含量($m^3 ton^{-1}$)， $Q_{proc}[e,a]$ 为 e 区域 a 种动物的第一类产品需要的水量(m^3)。

为在不同的第一类产品间分配活动物的虚拟水含量和加工需水，引进产品比例和价值比例。以产品重量比例的方式分配给第一类产品的计算公式如下：

$$pf[e,p] = W_p[e,p] / W_a[e,a] \quad (3-10)$$

式中： $pf[e,p]$ 为 e 区域 a 种动物的第一类产品 p 的重量比例； $W_p[e,p]$ 为 e 区域 a 种动物的第一类产品 p 的重量； $W_a[e,a]$ 为 e 区域 a 种动物的重量。

以价值比例的方式分配给第一类产品的计算公式如下：

$$vf[e,p] = \left[\frac{v[p] \times pf[e,p]}{\sum (v[p] \times pf[e,p])} \right] \quad (3-11)$$

其中： $vf[e, p]$ 为 e 区域 a 种动物的第一类产品 p 的价值比例，它是第一类产品 p 的市场价值与动物第一类产品总市场价值比例。如：动物屠宰后，其皮毛还有可能用于皮革制造业，那么活动物体的虚拟水含量则按照价值比例分配给屠宰后的畜体和皮毛部分。因此，第一类产品 p 的虚拟水含量可计算为：

$$VWC_p[e, p] = (VWC_a[e, a] + PWR[e, a]) \times vf[e, p] / pf[e, p] \quad (3-12)$$

第二类动物产品的虚拟水含量由第一类动物产品的虚拟水和加工用水构成，产品间虚拟水分配可以采用与第一类动物类似的产品比例和价值比例方法进行分配。同理可以计算第三、四类动物产品的虚拟水分配。图 3-2 为动物产品虚拟水计算流程图：

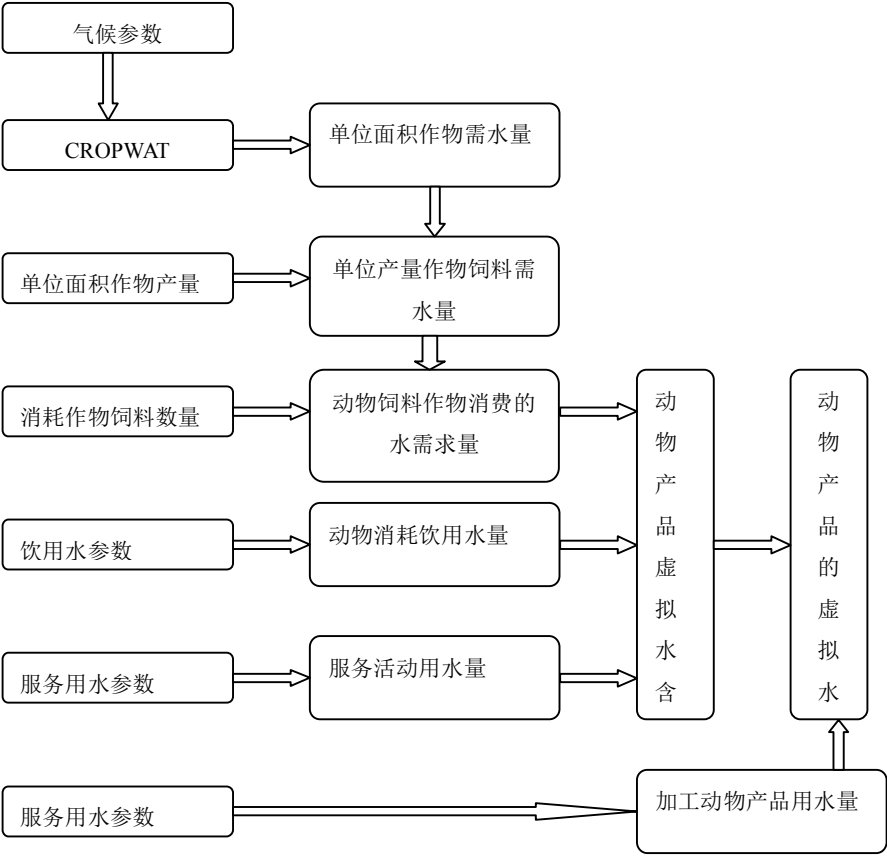


图 3-2 动物产品的虚拟水含量计算流程图

3.2.4 工业产品虚拟水含量计算

工业生产流程复杂，工业产品种类繁多，目前关于虚拟水的计算还主要集中在农作物产品的虚拟水计算上，对工业产品虚拟水含量的研究目前处于探索阶段。由于工业用水占社会水资源消耗量的比重较小，因此本文将工业产品虚拟水消耗量没有计算在内。

3.2.5 消费结构多样性模型

生态系统的多样性已经成为了生物学和生态学的研究热点之一,从进化的角度来看,经济系统和生态系统存在类质同像的现象,因此,多样性也可用于居民消费结构与水资源利用(虚拟水消费量)之间关系的研究。借鉴经济系统多样性指数的研究,将虚拟水消费多样性与虚拟水消费数量关系用 Shannon-Weaver 来测量。如 3-13 式:

$$H = - \sum_{i=1}^n SP_i \ln SP_i \quad (3-13)$$

其中: H 为居民虚拟水消费的多样性, SP_i 为第 i 种虚拟水占虚拟水消费总量的百分比,本文选取的居民主要消费品包括粮食、鲜菜、植物用油、猪肉、牛羊肉、鲜蛋、鱼虾、瓜果、乳类及酒类等。3-13 式中 H 值越大,则表示虚拟水消费的多样性越高,而虚拟水消费多样性越高的充分条件是各种食物的虚拟水消费分配越接近平等,因此食物消费的多样性高低反映了居民消费水平的高低。

3.2.6 水资源利用效率

水资源利用效率是衡量一个国家或区域生态安全的重要指标,通常我们用水足迹强度来表示水资源利用率水平,即区域水足迹总量与国内生产总值(GDP)的商值,水足迹强度越大,表明单位 GDP 所消耗的水资源量越高,即水资源利用效率越低。

3.2.7 城市化水平

城市化发展有多种指标可供选择,如非农业人口比重、第二产业比重、第三产业比重及人均 GDP 等,但是考虑到本文研究对象以及格兰杰模型中有关信息集的合理定义,本文只采用人口城市化水平来分析是否与水足迹有着因果关系。

3.2.8 检验模型

① 单位根检验模型

单位根检验是由 Fuller 和 Dickey 最先介绍,为了进行单位根检验,通常选用 ADF 检验(Augment Dickey-Fuller Test)的模型为:

$$\Delta y_t = c + \delta_t + \gamma y_{t-1} + \sum_{i=1}^k \xi \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3-14)$$

式中: y_t 为 t 时期的变量值; $\Delta y_{t-1} = y_{t-1} - y_{t-2}$ 表示一阶差分; ε_t 为白噪声。

设临界值为 σ (通常选取 1%、5%或 10%), 那么对于任何检验的 T 值, 如果 $T > \sigma$, 则表明拒绝原假设, 说明时间序列是非平稳的, 如果分平稳序列只需经过 d 次差分就变为平稳序列, 则称该序列是 $I(d)$ 的; 反之, 如果 $T < \sigma$, 则表明拒绝原假设, 表明时间序列是平稳的。

②Johansen 协整检验模型

协整检验的目的是解决一组非平稳序列的线性组合是否具有稳定的均衡关系, 这种有效的检验方法由 Johansen 和 Juselius 于 1990 年提出, 被称为 Johansen 协整检验。基本思想为: 如果两个或者两个以上时间序列变量是不平稳的, 但是他们的同阶差分是平稳的, 则这些非平稳时间序列变量存在长期的协整关系。当然在计量经济理论中, 时间序列数据一般都是不平稳的, 而不平稳的时间序列, 不能直接对其进行协整检验。本文选用 Johansen 极大似然法对时间变量进行协整检验。考虑一个 P 阶 VAR (Vector Auto Regression, 向量自回归) 过程:

$$Y_t = A_1 Y_{t-1} + \dots + A_p Y_{t-p} + B X_t + \varepsilon_t \quad (3-15)$$

式中, Y_t 为 k 维非平稳 $I(1)$ 序列, X_t 为 d 维确定性变量, ε_t 为扰动变量, 将(3-15)式变换为:

$$\nabla Y_t = \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \nabla Y_{t-i} + \Pi Y_{t-1} + B X_t + \varepsilon_t \quad (3-16)$$

其中: $\Pi = \sum_{i=1}^p A_i - I_m$, $\Gamma_i = -\sum_{j=i+1}^p A_j$ 。

由 Granger 定理得: 若系数矩阵 Π 的秩 $r < k$, 则必定存在两个秩为 k 和 $k \times x$ 的矩阵 α 、 β , 使得 $\Pi = \alpha\beta^T$ 且 $\beta^T Y_t$ 平稳。 r 是协整方程的个数, β 的协整向量。对系数矩阵 Π 进行协整似然比(LR)检验, 其假设检验为: H_0 : 至多有 r 个协整关系, H_1 : 有 m 个协整关系。检验的统计量轨迹为:

$$Q_r = -T \sum_{i=r+1}^m \log(1 + \lambda_i) \quad (3-17)$$

式 3-17 中 T 表示观测期综述, λ_i 表示大小排在第 i 位的特征值。

② 误差修正模型

误差修正模型 (Error Correction Model, ECM) 是一种具有特定形式的计量经济模型, 它可将变量的长期趋势行为与短期变化相关联, 从而探讨变量之间的短期波动效应。根据格兰杰定理, 一组具有协整关系的变量一定有误差修正模

型的形式，因此，本文通过建立误差修正模型来研究各变量之间关系的短期动态调整。

③ 格兰杰检验模型

格兰杰（1987）指出，如果变量之间是协整的，则至少存在一个方向上的格兰杰原因。格兰杰因果关系检验的基本思路是：设 $Y_t = y_t$ ， $X_t = x_t$ 为两个随机时间序列，并令 $Y_t = y_{t-s}$ ， $s \geq 0$ ， $X_t = x_{t-s}$ ， $s \geq 0$ 分别表示他们到时刻 t 的整个时间序列。若用 Y_{t-1} 和 X_{t-1} 预测 Y_t 比仅用 Y_{t-1} 预测 Y_t 更加准确，则认为 X 对 Y 具有因果关系，或者称 X 引起 Y ，反之亦然。若用 Y_{t-1} 和 X_t 预测 Y_t 比用 Y_{t-1} 和 X_{t-1} 预测 Y_t 更加准确，则认为 X 对 Y 的因果关系是及时的，反之亦然。变量之间的格兰杰因果检验过程借助于 Eviews 6.0 完成。检验结果包括不同显著性水平下，变量之间的因果关系及因果关系单向性和双向性。

3.3 技术路线

本文的技术路线是：以武威市为研究对象，在计算和分析武威市水足迹的基础上，构建水足迹影响因素的指标体系，分别对人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、城镇居民虚拟水消费指数和农村居民虚拟水消费指数之间的长期均衡关系、因果关系以及短期变化进行分析，最后得出相应的节水路径及措施。

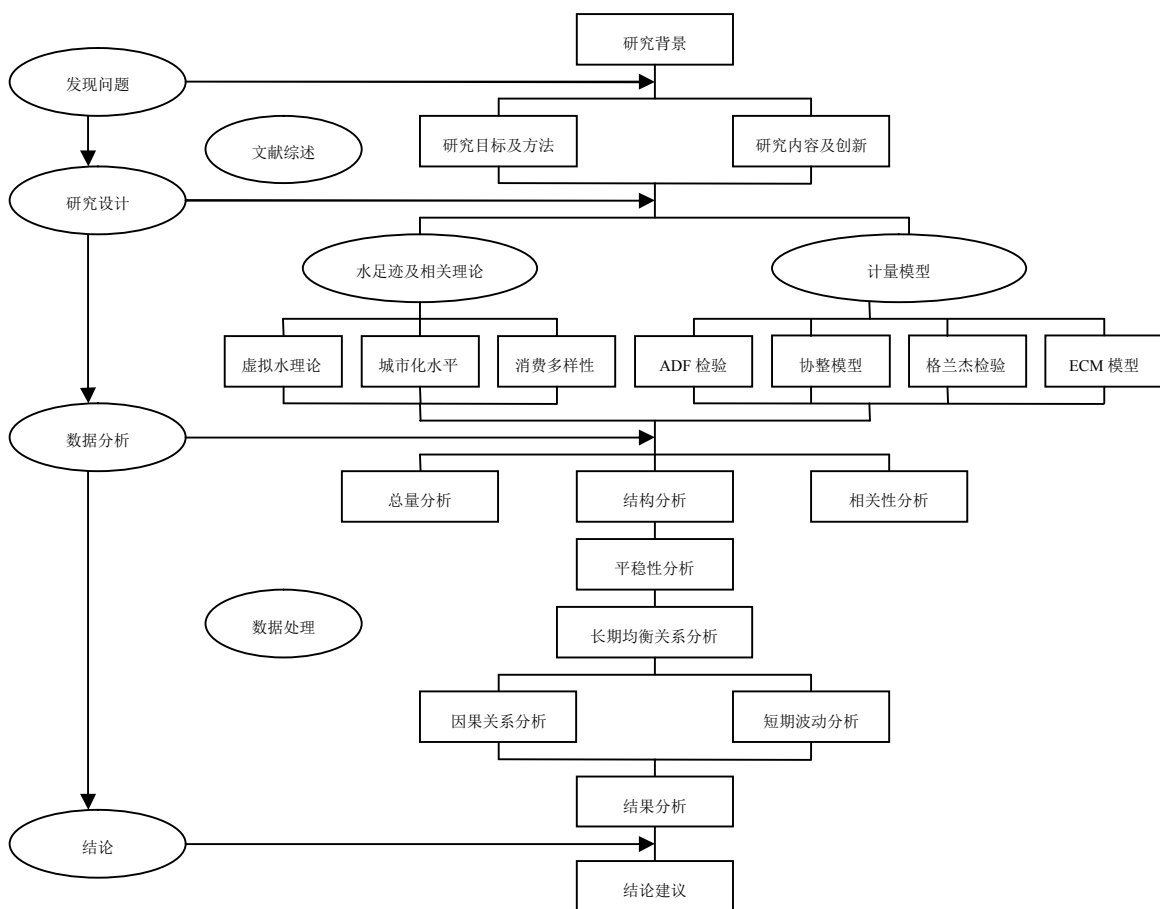


图 3-3 本文研究框架图

4 研究区域概况及水资源问题

4.1 研究区地理位置

武威市位于甘肃省中部、河西走廊东端，地处黄土、青藏、蒙新三大高原交汇地带，位于北纬 $36^{\circ}29'-39^{\circ}27'$ 、东经 $101^{\circ}49'-104^{\circ}16'$ 之间，东临兰州、白银，西通金昌、张掖，南依祁连山，北街腾格里沙漠，总面积 33249 km^2 ，南北长 326 km ，东西宽 204 km 。故称凉州，曾是历史上著名的“丝绸之路”。是自东进入河西走廊和新疆的东大门。全区辖凉州区、古浪县、民勤县和天祝县，包括 115 个乡镇，1127 个村。

4.2 自然环境概况

武威市深居大陆腹地，属大陆性温带干旱气候，太阳辐射强，日照充足，夏季短而炎热，冬季长而寒冷，温差大，降水稀少，蒸发强烈，空气干燥。其地势南高北低，由西南向东北倾斜，海拔介于 $1020\text{ m} - 4874\text{ m}$ 之间，相对高差约为 3854 m ，形成明显的三个地理带：

① 南部祁连山区：海拔 $2000\text{ m} - 4872\text{ m}$ ，高寒阴湿， 4000 m 以上终年积雪， 4000 m 以下有森林、草原覆盖，年降水量 $310\text{ mm} - 522\text{ mm}$ 之间，平均气温零度以下，无霜期约 100 d 左右， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温小于 1500°C ；无明显夏季。相对湿度约 58% ，在海拔 $1600\text{ m} - 2300\text{ m}$ 的地区，气候冷凉，是山农业向牧林业过渡的地带，虽然热量不足，但气候条件适于林、草生长，是河西地区重要的牧业和林业基地。

② 中部绿洲灌溉区：属温带干旱区。冬春季多风，气候温冷、夏季炎热，冬季酷寒，夏短冬长。本区光热资源丰富，夏季气温在 $24.2^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C}$ 之间，昼夜温差较大。全年日照 3000 h ，年太阳总辐射收入为 502.4 KJ/cm^2 至 628 KJ/cm^2 。降水量 $102\text{ mm} - 200\text{ mm}$ ，蒸发量 2000 mm 以上。

③ 北部干旱区：属干旱荒漠气候，气候温冷，光热资源更加丰富，但干旱程度加剧，年降水量 $52\text{ mm} - 185\text{ mm}$ ，蒸发量 3000 mm 。年平均气温为 $8^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 45% 左右，气候总体表现为：太阳辐射强，日照充足，夏季短而炎热，冬季长而严寒，春秋表现不明显，年、日温差较大，降水少，蒸发量大。

表 4-1 武威市气象统计资料

	南部	中部	北部
年平均气温(°C)	<0	6~8	8~10
相对湿度(%)	46~58	45	30~45
年平均降水量(mm)	310~522	102~200	52~185
年蒸发量(mm)	>800	>2000	>3000
日照时数(h)	2550~2700	2700~3000	>3000

4.3 水资源状况

武威市地处河西走廊东端，以乌鞘岭为分水岭，形成黄河流域和石羊河流域两个水系。石羊河流域整个地势南高北低，由西南向东北方向倾斜，南部祁连山地区为该流域水资源的主要产流区。黄河流域地势北高南低，山川相间，由南向北依次是大通河、玛雅雪山、金强河、毛毛山等。黄河流域的大通河、金强河缺少调蓄工程，河水绝大部分流出境外。除天祝县主要位于黄河流域以外，其他地区大部分属于石羊河流域。境内主要利用的是石羊河流域的西营河、南营河、杂木河、黄羊河、大靖河、古浪河的水资源。这六条河年径流量总计 11.44 亿 m³，是武威绿洲赖以生存的重要保障。

表 4-2 武威市水资源状况

单位：亿 m³

河流		地 表 水 资 源		地下水	水 资 源 总 量	
		多年平均	P=50%	资源	多年平均	P=50%
全区合计		14.297	13.912	0.640	14.937	14.552
石 羊 河 流 域	小计	10.602	10.376	0.610	11.212	10.986
	六条山水河	10.045	9.875			
	大靖河	0.130	0.119			
	古浪河	0.764	0.733			
	黄羊河	1.466	1.443			
	杂木河	2.459	2.407			
	金塔河	1.406	1.384			
	西营河	3.820	3.789			
	小沟小河	0.319	0.287			
	浅山区	0.238	0.214			
黄 河 流 域	小计	3.695	3.536	0.030	3.725	3.566
	大通河	1.910	1.810			
	金强河	1.700	1.650			
	新堡子沙河	0.850	0.760			

4.3.1 水资源总量

水资源总量为河流径流量与不重复的地下水量之和。武威市多年平均水资源总量(见表 4-2)为 14.397 亿 m^3 ，其中地表水为 14.297 亿 m^3 ，地下水 0.640 亿 m^3 。黄河流域自产水资源总量为 3.725 亿 m^3 ，其中地表水资源量为 3.695 亿 m^3 ，地下水资源量为 0.030 亿 m^3 ，石羊河流域自产水资源总量为 11.212 亿 m^3 ，其中地表水资源量为 10.602 亿 m^3 ，地下水资源量为 0.610 亿 m^3 。

4.3.2 水资源利用现状

武威市国民经济部门用水分为农田灌溉、林木灌溉、工业用水、城镇公共用水、居民生活用水以及生态环境用水。2008 年，用水总量为 20.665 亿 m^3 ，其中农业灌溉用水 18.090 亿 m^3 ，林木灌溉用水 0.1416 亿 m^3 ，工业用水 0.7062 亿 m^3 ，城镇公共用水 0.1134 亿 m^3 ，居民生活用水 0.9367 亿 m^3 ，生态环境用水 0.3244 亿 m^3 。流域内农业是用水大户(详情见表 4-3)。

表 4-3 2003-2008 武威市实际用水统计表^[41] 单位：亿 m^3

年份	农田灌溉	林草灌溉	工业用水	城镇公共用水	居民生活用水	生态环境用水	总用水量
2003	17.8208	0.1172	0.5489	0.9613	0.5496	0.0782	20.0760
2004	18.7099	0.1210	0.5047	0.1089	0.5135	0.8750	20.8330
2005	17.4515	0.1279	0.7385	0.1012	0.8749	0.8358	20.1298
2006	17.5335	0.1410	0.7242	0.1048	0.8936	0.6400	20.0371
2007	18.4090	0.1402	0.6825	0.1101	0.9004	0.6697	20.9119
2008	19.0900	0.1416	0.7062	0.1134	0.9367	0.6764	21.6643

武威市各经济部门总用水量为 20 亿 m^3 左右，多年可供水资源量却不到 15 亿 m^3 ，地下水超采达 5 亿 m^3 ，缺水度达 33%，由于水资源严重不足，导致大量开采地下水，使地下水位不断下降，部分区域已形成漏斗区并还在扩大，漏斗区主要分布在武威盆地武南镇、黄羊镇、民勤盆地大滩。最大降落漏斗分布在武威盆地，东、西部各一处漏斗区域，东部以凉州区、武南镇、黄羊镇为漏斗中心区，包括长城、吴家井、黄杨、河东、武难和清源等乡镇。漏斗周边水位埋深在 3.36 m - 66.95 m 之间，漏斗中心水位埋深 68.14 m。民勤盆地由于地下水水位的下降形成大滩、双茨科漏斗，漏斗周边水位埋深在 3.8 m - 27.96 m 之间，最深可达 40 m。全县地下水位的平均下降速度达 0.5 m/a - 1.0 m/a。古浪县地下水位下降明显的区域位于土门镇的永丰滩和黄花滩一带，属武威盆地东部漏斗的一部分，地下水位年降幅为 2.25 m。由于上游对水资源的过度汲取以及降水

稀少的原因，再加之该区域长期大量开采地下水用以灌溉，反复蒸发导致地下水盐分浓度不断升高，不仅不能继续灌溉而且也无法被人畜饮用。水质的恶化进一步加剧了水资源匮乏的问题，

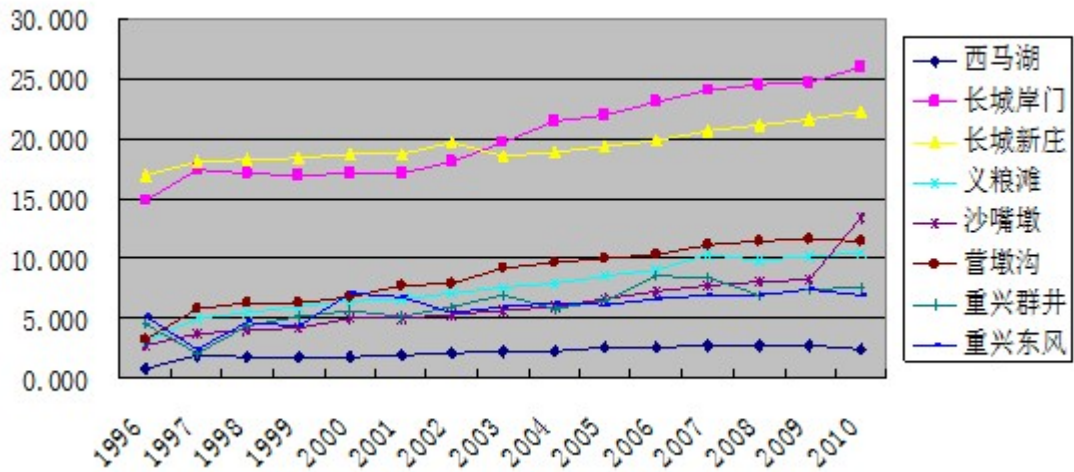


图 4-1 武威市各县区地下水位埋深

由于高矿水的灌溉，使的土地盐碱化的面积由 26 万亩扩大到 40 万亩，占耕地总面积的 64%，同时由于地下水质的恶化，已有 3 万多人、8 万多头牲畜饮水面临危机，超过 18 万人达不到饮水安全标准^[42]。北部湖区的生态状况已濒于崩溃，“罗布泊”景象已局部显现，部分居民不得不移居他乡，沦为生态难民^[43]。由于统筹考虑水资源禀赋不够，近 30 年来，武威市扩大良田种植规模，发展商品粮基地。这种灌溉面积的增大是建立在对自然资源特别是水资源的过度开采的基础上，农业灌溉占用了大量的水资源，造成流域上游与下游之间、国民经济各部门之间的用水矛盾十分突出。

4.4 经济状况

据统计，2010 年武威市生产总值为 272.85 亿元，按可比价格计算，比上年增长 13.1%。其中第一产业实现增加值 67 亿元，第二产业实现增加值 115.53 亿元，第三产业实现增加值 90.32 亿元。武威市常住人口为 181.5 万人，其中凉州区的人口为 101.03 万人，民勤县的人口为 24.13 万人，古浪县的人口为 28.87 万人，天祝县人口为 17.48 万人。

当前，流域内已基本形成以凉州区中心城市的发展格局，城镇人口主要集中在

在凉州区。全市人口增长速度过快，绿洲承载人口已达每平方公里 300 人以上，对于干旱内陆地区来说，人口密度已相当高。其中，从事种植业生产的人口约占总人口的 77%，第一产业负担人口所占比重大。武威市是以农业发展为主的地区，是河西内陆河流域经济较繁荣的流域。交通方便，兰新铁路和甘新公路横穿流域东西，公路四通八达，基本形成完善的交通运输网。

4.5 主要的生态问题

(1) 相对于经济发展及人口，水资源总量少

武威市是我国西北人均水资源最少的地区之一，人均水资源不到 750 m^3 ，水资源承载压力巨大。由于流域的地形特点，地表水与地下水多次转化，重复利用率相对较高。2000 年水资源开发利用程度为 172%，远高于黑河(112%)、塔里木河流域(74.5%)。相对于人口规模、经济发展水平、流域内产业结构，水资源匮乏，供需矛盾突出。万元 GDP 用水量约 3014 m^3 ，万元工业产值取水定额 153 m^3 ，工业用水重复率 49%，农业灌溉净定额 $371 \text{ m}^3/\text{亩}$ ，灌溉水利用系数 0.52，社会经济的发展受到水资源总量巨大约束。

(2) 水资源区域变化明显、地下水下降、水环境恶化

随着耕地面积的急剧扩大和城市规模的扩张，水资源利用结构及区域分配发生了较大的变化。首先是上游水源涵养林区的大量开荒，耕地剧增。如皇城水库以上部分的开荒，使西大河出山径流减少。其次，中游地区绿洲扩展，用水量剧增，造成下游地区水资源量骤减。中下游水资源比从 50 年代 1:0.62 下降到 90 年代初 1:0.15，90 年代后期仅为 1:0.12。第三，普遍开采地下水，迫使地下水位下降。特别是下游地区由于来水减少被迫超采地下水，剥夺了周围地区植被的用水，造成植被的枯死。仅民勤县地下水的超采量达到 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，流域内农业用水占到总用水量的 93% 以上。第四，常规节水技术的应用使地下水补给量减少，泉水溢出带北移。以前靠泉水灌溉的耕地大多被井水灌溉代替。第五，中游地区工业的发展，排入河道的废水增加。红崖山水库中化学耗氧量等指标严重超标，鱼类生产受到影响。第六，民勤湖区由于地下水的多次重复利用，水的矿化度增大，浅层水已经不能饮用。

(3) 林草覆盖率降低，水保、防风能力下降

上游地区由于人口的增加和人类活动的影响，森林下限已经达到 2700 m。除 20 世纪 80 年代以来祁连山水源涵养林保护区内森林面积有所增加外，其他外

围地区的过牧、开荒、盗伐、开矿、挖药等大大降低了林草的覆盖率，水土流失面积增加，水库淤积加快。

中下游地区人工防风林大面积枯死。地下水位的下降，使中游部分地区及民勤大面积的人工林枯死，生态防护能力下降。

绿洲与荒漠过渡带大面积开荒或人为破坏，防风固沙能力降低。绿洲与荒漠过渡带是维护绿洲稳定的重要组成部分，开荒则使绿洲失去了保护层，同时，增加了用水量，加速了地下水位的下降。沙生灌木的破坏，削弱了固沙能力。

(4) 风沙危害及其它灾害增加

在民勤北部及绿洲与荒漠过渡地带，植被覆盖度的降低，地表失去了保护层，使这一区域成为沙尘暴发生的源区，沙化面积增加，风沙危害骤增。

林草覆盖度的降低及土地利用结构的变化，诱发区域气温的变化，干旱、大风、沙尘暴、低温霜冻、毁灭性病虫害、暴雨等不确定的灾害频发。

5 武威市水足迹及与影响因子分析

5.1 武威市水足迹的计算

运用水足迹计算模型，武威市水足迹的主要研究为农业产品虚拟水，以及生态环境用水和城市公共用水。所需数据来源于联合国粮农组织数据库中中国区域的部分；民勤、乌鞘岭、武威气象监测站中的气象数据；《甘肃省农村抽样调查报告》、《武威市统计年鉴》、《甘肃省水利年鉴》、《石羊河水资源公报》等。

5.1.1 单位农产品虚拟水含量的计算

单位农业产品虚拟水含量与其生产过程中的许多因素有关，如产品生产的气候条件、生产方法、产地、用水效率以及中间产品用水量的计算方法等。本文在计算不同水平年的作物需水时，采用联合国粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼公式以及软件 `corpwat8.0`，根据不同水平年的播种情况分别进行面积加权，最后根据各水平年单位面积产量和加工转换率获得单位农产品的虚拟水的含量计算出不同作物的需水量。本文农产品中有关于畜产品虚拟水含量的计算采用 Hoekstra 和 Chapagain 等人对世界 100 多个国家的单位畜产品包含的虚拟水计算中有关中国部分的估算平均值^[44-46]。武威市主要农作物虚拟水含量计算结果见表 5-1。在这里特别需要强调的一点是，在这部分计算中，相对于虚拟水而言，产品中的实体水总是被忽略的，如水果类中本身含有的实体水等。

从表 5-1 中可以看出，各类农业产品的虚拟水含量存在着较大的区别，直接原因来源于各种农作物单位面积耗水量的差异和产量的差异，也与各种农作物的产品类型有一定的关系。本文涉及到的农作物包括：粮食(小麦、玉米、土豆)、油料作物、蔬菜、水果、棉花、烟叶等。从计算结果中我们可以看到蔬菜类农作物由于单位面积产量比其它农作物大的多，且转化率为 1，故其单位质量虚拟水含量最少，年均为 $0.131 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，粮食类和水果类次之，其虚拟水年均值分别为 $2.315 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $1.626 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，再次是烟叶，虚拟水年均值为 $4.370 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，而植物油和棉花由于产量较低，单位质量虚拟水含量较大，年均值分别为 $7.580 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $9.581 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

表 5-1 1995-2009 年武威市农作物及副食虚拟水含量变化情况 单位：m³/kg

年份	粮食	植物油	蔬菜	酒类	水果	棉花	烟叶	食糖
1995	2.533	10.283	0.131	3.917	2.159	12.728	5.270	1.859
1996	2.392	8.915	0.132	2.991	2.059	10.240	4.090	1.626
1997	2.671	8.915	0.134	3.291	1.895	10.240	4.454	1.640
1998	2.421	7.879	0.140	2.777	1.637	8.890	3.840	1.614
1999	2.396	6.398	0.138	2.994	1.701	11.648	4.588	1.717
2000	2.630	6.194	0.135	3.288	1.376	9.776	5.052	1.805
2001	2.360	7.566	0.102	2.949	1.439	9.326	4.914	1.596
2002	2.227	6.426	0.143	2.784	1.329	9.436	5.438	1.571
2003	2.121	6.615	0.124	2.651	1.344	9.785	3.911	1.663
2004	2.149	6.422	0.122	2.846	1.524	9.188	4.744	1.635
2005	2.083	6.278	0.119	2.437	1.227	8.874	4.288	1.616
2006	2.243	6.118	0.185	2.678	1.996	8.433	3.995	1.540
2007	2.371	5.926	0.136	2.447	1.547	8.887	3.649	1.579
2008	2.125	6.047	0.117	2.401	1.738	8.275	3.377	1.537
2009	2.007	5.888	0.107	2.227	1.425	7.995	3.933	1.488

动物产品虚拟水含量见表 5-2。由表 5-2 可知，动物产品单位质量虚拟水含量最高的是牛肉和羊肉。分别为 19.990 m³/kg 和 18.005 m³/kg，其次是蛋类和鱼虾类，分别为 5.651 m³/kg 和 5.000 m³/kg，再次是猪肉，单位产品虚拟水含量为 3.561 m³/kg，最后是奶类，单位产品虚拟水含量为 1.000 m³/kg。考虑到武威市居民肉食消费中猪肉的消费量最大，且牛羊肉的单位产品虚拟水含量最高，所以猪、牛、羊肉的虚拟水消费量最高，其次为蛋类、鱼虾类和奶类。

表 5-2 1995-2009 年武威市动物产品虚拟水含量 单位：m³/kg

猪肉	牛肉	羊肉	蛋类	鱼虾类	奶类
3.561	19.990	18.005	5.651	5.000	1.000

15 年间，武威市粮食生产的用水量一直占有最大的比例，尽管粮食相比较于动物产品的单位质量虚拟水含量较低，但由于产量很高，且在所有农产品中需水量也较大。粮食作为一种日常生活食品，其需求量巨大是造成种植面积大的原因，适当压缩粮食的种植面积，根据武威市水资源实际状况，减少本地粮食出口，可以减少武威市水资源的消耗。

5.1.2 农产品虚拟水消费量的计算

根据单位农产品虚拟水含量和相关统计数据，计算得到武威市 1995-2009 年主要农产品虚拟水消费量列于表 5-3 和表 5-4，由表 5-3 和图 5-3 可知，

1995-2009 年武威市城镇居民对农产品虚拟水的消费量呈现出逐年缓慢下降的趋势,其虚拟水消费量由 1995 年的 $802.505 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$, 下降到了 2009 年的 $741.134 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$, 年平均下降 0.51%, 主要是由于粮食、水果等农产品虚拟水消费量的下降所致。

5-3 1995-2009 年武威市城镇居民虚拟水消费状况 单位: $\text{m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$

	粮食	植物油	蔬菜	酒类	水果	肉类	鲜蛋	奶	虚拟水消费量
1995	324.872	85.582	38.749	15.858	163.162	111.991	45.152	17.139	802.505
1996	313.149	80.256	38.806	12.782	159.068	124.732	47.665	18.363	794.821
1997	309.633	80.498	37.315	13.732	139.670	107.947	48.009	19.876	756.680
1998	298.541	77.909	38.591	12.520	127.634	142.606	55.696	23.069	776.566
1999	306.082	64.851	37.642	13.584	127.593	138.734	57.217	25.341	771.044
2000	291.941	57.163	37.103	14.503	104.414	150.282	60.585	28.214	744.205
2001	278.650	67.035	34.079	16.652	102.613	148.732	57.909	31.710	737.380
2002	273.487	71.283	42.865	13.432	117.341	166.633	58.671	36.230	779.942
2003	261.638	63.195	41.700	13.576	117.703	172.164	58.160	47.303	775.439
2004	256.330	68.437	39.789	14.787	110.764	163.270	54.208	43.985	751.570
2005	248.637	63.409	38.656	12.573	103.481	182.640	62.731	48.332	760.459
2006	249.786	65.798	46.610	12.500	146.709	176.779	57.674	43.061	798.917
2007	234.630	70.896	40.369	13.728	117.180	169.855	52.667	48.860	748.185
2008	229.508	81.555	48.995	10.356	122.991	156.698	56.872	43.954	750.929
2009	218.911	81.197	47.384	11.414	108.551	164.192	63.582	45.903	741.134

从各类食品虚拟水消费量中可以看出,随着生活水平的提高,武威市城镇居民对粮食和水果的虚拟水消费量明显减少,分别由 1995 年内的 $324.872 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 和 $163.162 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 下降为 2009 年的 $218.911 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 和 $108.551 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$, 年均降幅分别为 2.17%和 2.23%, 对肉类、蛋类、乳制品的消费量呈现一定的增长,分别由 1995 年的 $111.990 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 、 $45.152 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 和 $17.139 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 增加到了 2009 年的 $164.192 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 、 $63.582 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 和 $45.903 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$, 年均增幅分别为 3.11%、2.72%和 11.19%。

由表 5-4 可知,武威市 1995-2009 年农村居民对农产品的虚拟水消费量除个别年份增加之外,其余年份均减少,总体趋势保持缓慢减少的趋势。15 年间人均虚拟水消费量由 $775.854 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$ 减少到了 $672.728 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{a}$, 年均降幅为 0.89%。其原因主要是武威市农村居民对粮食消费量的下降所致,除粮食与植物油的消费量出现下降之外,其余食品虚拟水的消费量均呈上升的趋势,由于粮食虚拟水消费量的快速减少,虽然其余食品消费量有所增加,但虚拟水消费总量仍呈现缓慢

下降的趋势。

5-4 1995-2009 年武威市农村居民虚拟水消费状况 单位：m³/人·a

	粮食	植物油	蔬菜	酒类	水果	肉类	鲜蛋	奶	虚拟水消费量
1995	547.261	43.131	15.284	5.326	66.623	61.740	26.384	10.105	775.854
1996	512.039	43.897	15.495	9.586	67.564	66.679	27.162	10.117	752.539
1997	512.052	45.212	14.883	8.286	64.775	63.236	26.972	10.175	745.591
1998	482.823	47.323	16.120	8.737	65.013	70.549	28.229	10.330	729.123
1999	472.206	42.392	16.636	8.899	65.223	77.187	29.388	10.574	722.505
2000	467.718	41.849	16.265	9.435	63.620	69.637	29.182	10.268	707.974
2001	417.915	49.308	14.159	12.205	69.301	72.813	33.750	10.568	680.020
2002	457.650	50.648	17.022	11.284	65.110	89.944	32.844	10.875	735.377
2003	434.254	43.681	16.125	9.025	64.748	103.203	32.440	11.039	714.514
2004	416.496	42.498	16.053	10.443	64.095	98.723	30.167	11.237	689.712
2005	409.902	32.523	16.188	11.817	65.311	124.119	29.322	11.352	700.533
2006	428.788	31.083	17.987	13.037	75.172	115.610	29.136	11.857	722.671
2007	385.495	30.841	16.072	13.812	67.362	124.892	28.989	10.290	677.753
2008	372.387	34.926	16.212	16.729	80.581	123.679	32.829	12.490	689.833
2009	348.979	38.502	15.858	20.568	77.665	121.954	36.583	12.619	672.728

由表 5-3 和表 5-4 可知，城镇居民农产品虚拟水消费量明显高于农村居民虚拟水消费量，平均每年比农村居民高出 52.07m³/a，城乡居民食品虚拟水消费量逐渐拉大，由 1995 年的 26.651 m³/a 增加到了 2009 年的 68.406m³/a。其主要原因是农村居民对肉类、蛋类、乳制品、蔬菜类及植物油的消费水平低于城镇居民。

5.1.3 其他用水量的计算

工业产品虚拟水是指在工业产品生产和加工过程中所消耗的水量^[43]。根据《工业用水分类及定义》C(J19-87)中的有关规定，工业企业用水量是指工业企业完成全部生产过程所需要的各种水量的总和。它包括间接冷却水量、工艺用水量、锅炉用水量和生活用水量。除此以外，工厂中还有消防用水量^[17]。又由于工业产品种类过多，生产工序较为复杂，其产品虚拟水含量的计算只停留在石油等少数产品之上，再加之武威市以农业生产为主，工业产品所占比例不大，故本文将工业产品虚拟水没有计算在内，城市公共用水和生态、生活用水的数据来自武威市水利年鉴。

5.2 武威市水足迹分析

武威市全社会水资源足迹总量稳定在 17.547 亿 m³/a-14.907 亿 m³/a，总体呈

现出缓慢下降的趋势。造成这种变化的主要原因是居民虚拟水消费量的下降。人均水资源足迹从 1995 年的 962.113 m^3 减少到 2009 年的 777.101m^3 ，15 年间减少了 185.012m^3 ，呈较快减少的趋势。而在居民水足迹总量中又以农村居民的虚拟水消费量为主，这是因为农村居民人口数量远远大于城市居民的人口数量，所以全市人均水足迹的变化主要取决于农村居民虚拟水消费量的变化。

表 5-5 1995-2009 年武威市水资源足迹相关指标测算表

年份	城镇居民虚拟水消 费量 单位 m^3/a	农村居民虚拟水消 费量 单位 m^3/a	总水足迹 亿 m^3/a	人均水足迹 单位 m^3/a	水足迹强度 $\text{m}^3/\text{元}$
1995	802.505	775.854	17.547	962.113	0.514
1996	794.821	752.539	17.019	927.739	0.420
1997	786.680	745.591	16.888	916.284	0.359
1998	776.566	729.123	16.641	893.106	0.312
1999	761.044	722.505	16.408	876.773	0.278
2000	744.205	707.974	16.125	857.238	0.240
2001	737.380	680.020	15.542	821.344	0.212
2002	769.942	735.377	16.221	860.759	0.195
2003	775.439	714.514	15.834	837.702	0.159
2004	751.570	689.712	15.245	806.168	0.125
2005	760.459	700.533	15.451	815.830	0.121
2006	798.917	722.671	15.945	841.319	0.115
2007	748.185	679.753	15.088	793.419	0.096
2008	750.929	689.833	15.241	797.370	0.087
2009	741.134	672.728	14.907	777.101	0.077

从表 5-5 和图 5-1 中可知，在水足迹的单元构成中，虚拟水的消费量占有着较大的份额，城乡居民虚拟水消费量占到水足迹总量的 80%以上，而食品消费虚拟水量又是重中之重。因此，食品消费的种类、数量、以及单位产品虚拟水的含量等因素对水足迹有着很大的影响。人均水足迹的变化趋势与城乡居民虚拟水消费量的变化趋势基本一致。

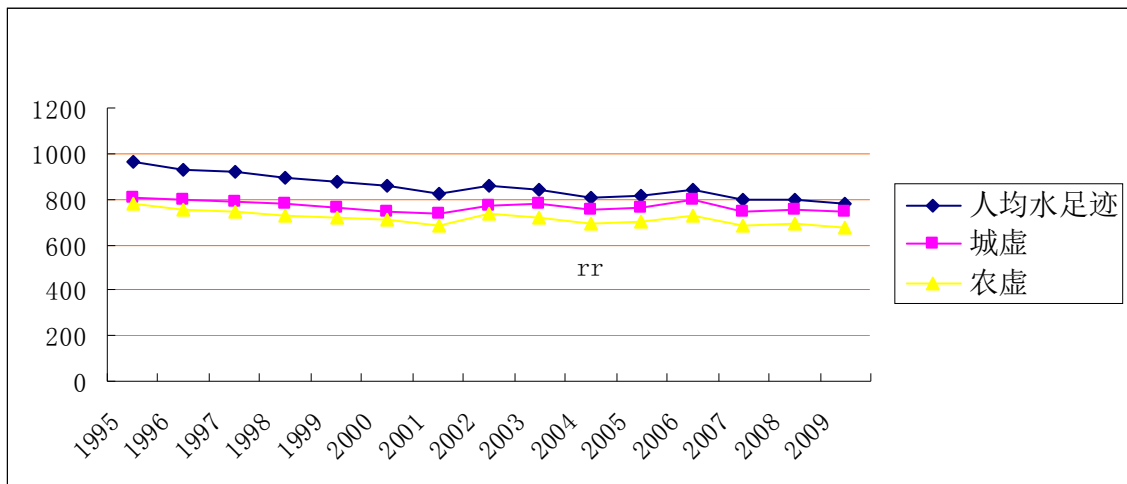


图 5-1 1995-2009 年武威市水足迹及虚拟水变化趋势 单位：m³/a

5.3 虚拟水消费多样性指数变化特征

生态系统的多样性是近年来生物学和生态研究的热点问题之一。Tilam^[47]研究牧草地生态系统时发现了多样性与生产能力和有限资源的利用效率之间存在着明显的正相关关系。Ulanowicz 认为多样性与发展能力有关^[48]。从进化论的角度来看，经济系统和生态系统存在着类质同象的现象。因此，多样性的方法可用于消费结构与水资源利用(虚拟水消费量)之间的研究。采用经济系统多样性指数研究^[49-50]借鉴 Shannon-Weaver 公式来计算虚拟水消费多样性与虚拟水消费数量的关系。由图 5-2 可知，武威市 1995 -2009 年城镇居民与农村居民虚拟水消费多样性指数均成上升的趋势（除个别年份出现反常）。

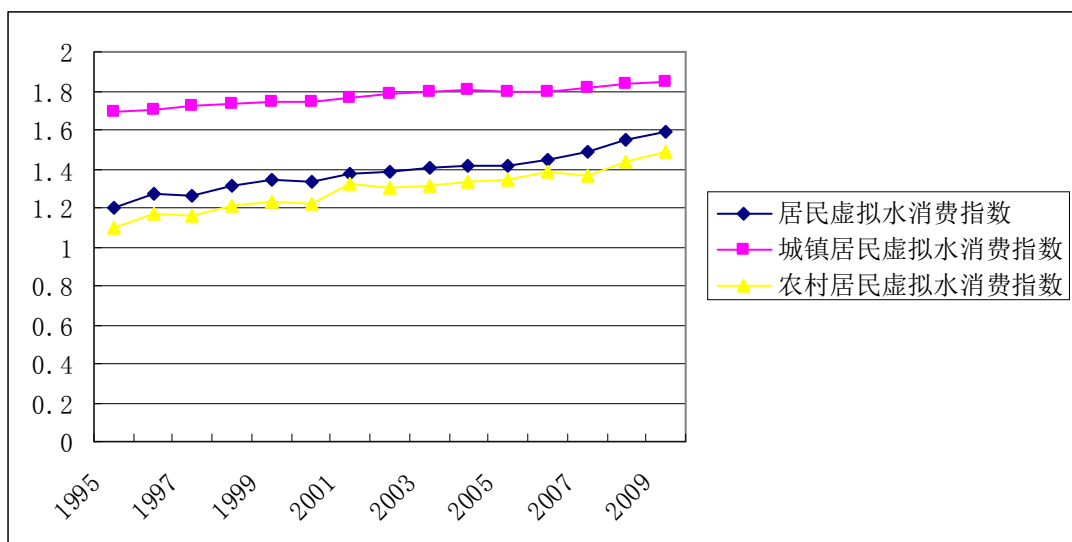


图 5-2 1995-2009 年武威市居民虚拟水消费指数

随着居民消费性支出的增加和消费观念的改变,居民对粮食等少数物类产品的虚拟水消费量降低,而对动物类产品和副食类产品及部分作物类产品虚拟水的消费量增加(如图 5-3,5-4),使居民饮食单一化的结构得到改善,消费品呈分散化趋势发展。将城镇居民与农村居民虚拟水消费多样性指数相比较而言,武威市城镇居民虚拟水消费多样性指数明显高于农村居民,其增长趋势较为稳定,15 年间增幅为 10.13%。食品消费的多样化程度较高,而农村居民的食品消费的单一化结构虽然有了较快的改变,但是由于起始年份其多样性水平处于较低的水平阶段,食品消费的多样化程度仍然较低,农村居民单一的虚拟水消费结构主要受经济收入的影响,对合理的膳食结构搭配未加以重视^[51-52]。直到 2009 年,武威市城镇居民虚拟水消费比例中,粮食类虚拟水消费比例最大,占虚拟水消费总量的 30%以上,其次为肉类,占虚拟水消费总量的 22.15%,其他食品虚拟水消费量占总量的 48.31%。消费结构趋于分散化。而农村居民虚拟水消费比例中粮食虚拟水的消费仍然占据着绝对的比例,占虚拟水消费总量的 51.88%,其次是肉类虚拟水的消费,占总量的 18.13%,其余食品虚拟水的消费总和占到总量的 29.99%,消费结构比较单一(如图: 5-5,5-6)。这是因为在本文研究的起始年份,城镇居民虚拟水消费多样性相对于农村居民已处于较高水平,粮食等少数作物类产品的虚拟水消耗量在 15 年间呈缓慢减少的趋势,其他产品的虚拟水消费不论从种类上还是从所占的比例上变化都不大。而农村居民由于长期收入偏低,导致起始年份对作物类产品虚拟水的消耗量偏高,但随着农村居民消费性支出的增加和消费观念的改变,农村居民的消费结构得到了很大的改善,占总消费量比例最大的作物类产品的消费呈现较快的下降趋势,食用油、肉、蛋、奶类及副食等产

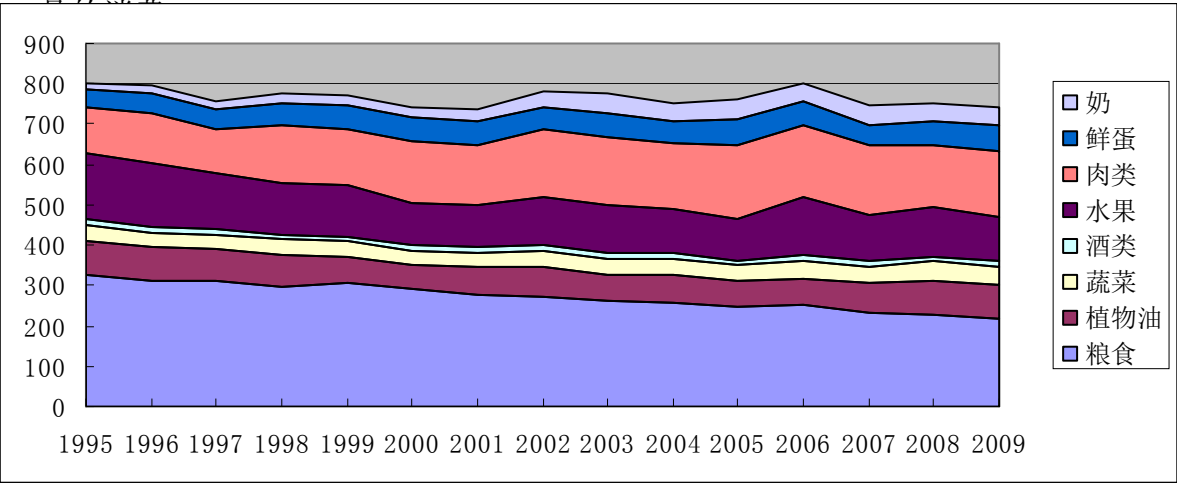
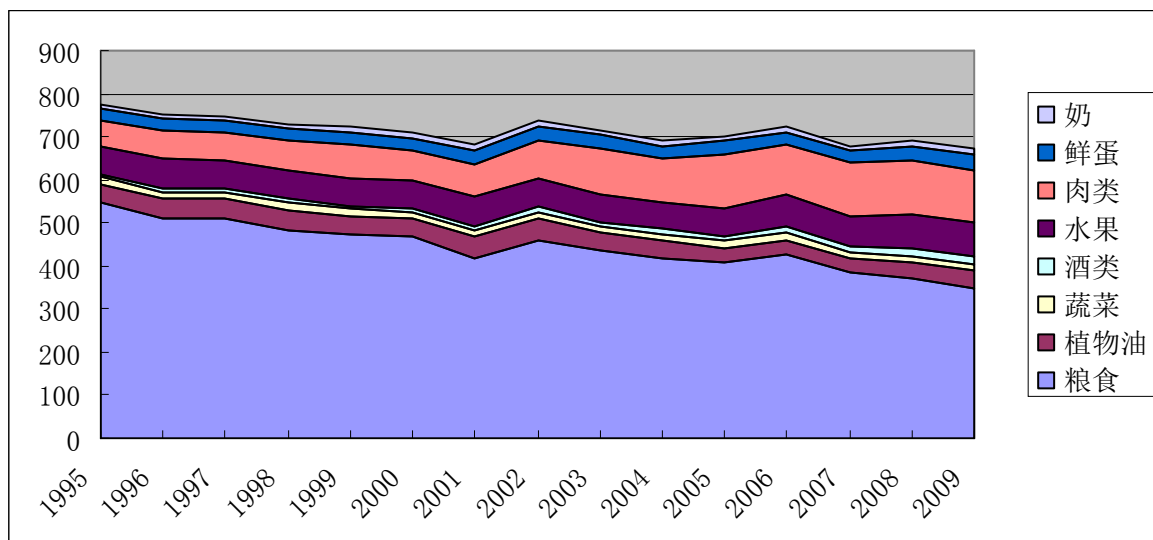


图 5-3 1995-2009 年武威市城镇居民虚拟水消费状况



从数量上和种类上都有了一定的增加,从而使得农村居民虚拟水消费指数有了较快的增长,15年间增加了 0.655,涨幅为 52.23%。

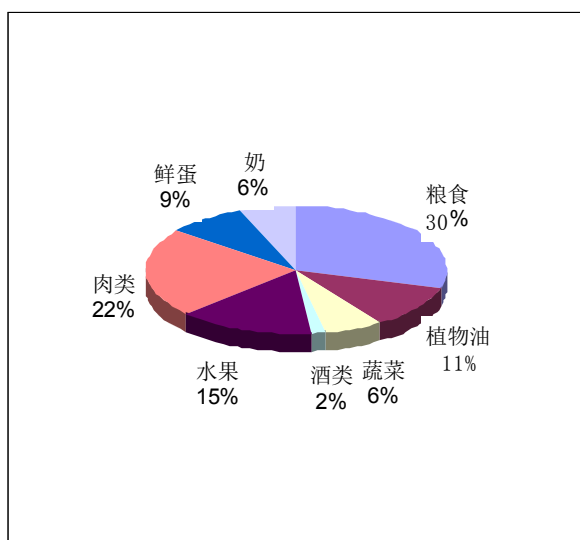


图 5-5 2009 年武威市城镇居民虚拟水消费比例

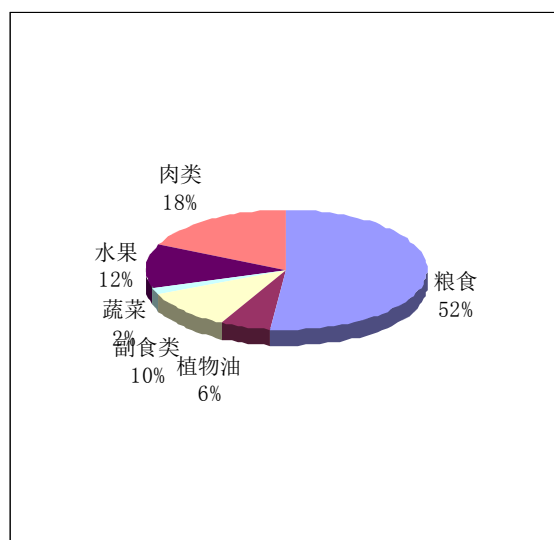


图 5-6 2009 年武威市农村居民虚拟水消费比例

5.4 水资源利用效率变化特征

水足迹强度指标用来反映地区水资源利用效率,由区域内水足迹总量除以国内生产总值(GDP)得到,水足迹强度能体现出消耗单位水资源所产生的经济价值,水足迹强度越大,说明单位 GDP 水足迹的消耗量越高。研究表明:武威市

水足迹强度由 1995 年的 $0.514 \text{ m}^3/\text{元}$ 下降到 2009 年的 $0.077 \text{ m}^3/\text{元}$ ，降幅为 85.19%，呈明显下降趋势。说明武威市水资源利用效率有了明显的提高，但由于武威市资源禀赋较差，经济发展水平及生产力水平较低，水资源利用效率还将有较大的提升空间。

5.5 武威市城市化水平

城市化水平，又叫城市化率，是衡量城市化发展程度的数量指标。目前用于反映城市化水平最常用的指标是人口的城市化率，即总人口中城镇人口所占的比重。研究表明：武威市城市化率从 1995-2009 年一直保持增长的态势，但总体变化不大，处于低速城市化地区^[53]。其城市化水平从 1995 年的 13.4% 增加到 2009 年的 17.4%，增幅为 29.85%，相对于全国城市化水平，武威市城市化水平较低，城市化发展较慢。

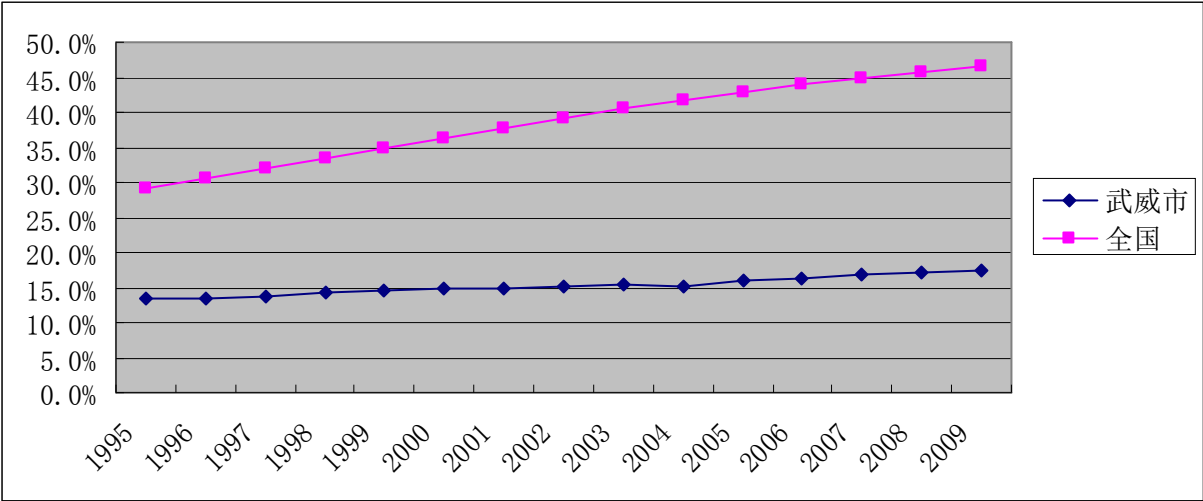


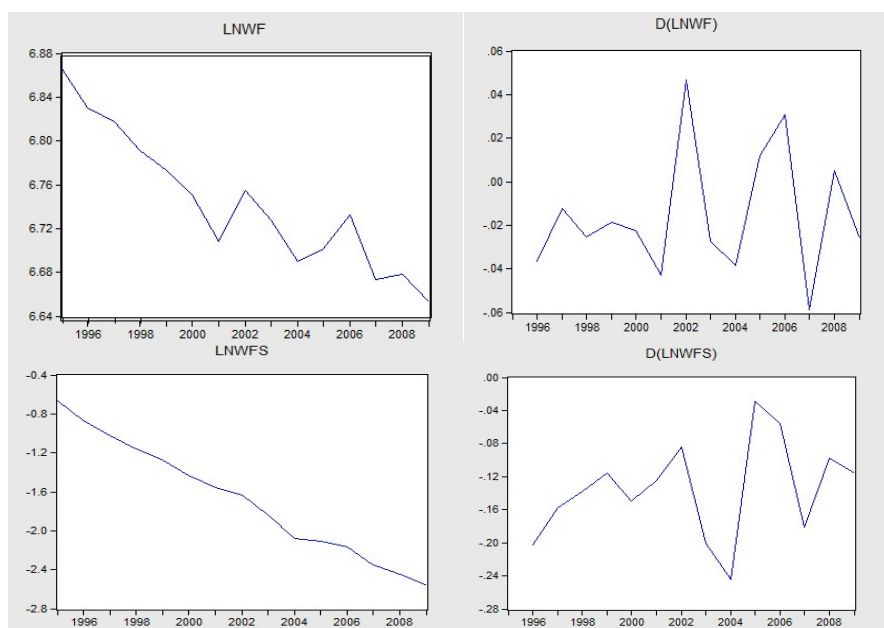
图 5-7 武威市及全国人口城市化水平变化趋势

6 武威市水足迹与影响因子的关系

本文选取的水足迹影响因子的诸多指标包括：水足迹强度、城市化水平、城镇居民虚拟水消费多样性指数以及农村居民虚拟水消费多样性指数，由于城镇居民虚拟水消费多样性指数以及农村居民虚拟水消费多样性指数对水足迹的影响不仅与其膳食结构有关，而且也受城镇居民与农村居民人口数量及比例的影响，所占权重必然不同，因此必须将权重带来的影响考虑进去。故本文在分析居民食品消费结构对水足迹长期影响与短期影响的过程当中，将城镇居民虚拟水消费多样性指数和农村居民虚拟水消费多样性指数合并为居民虚拟水消费多样性指数来讨论居民膳食结构对水足迹长期影响与短期影响。

6.1 水足迹与各指标间的平稳性检验

为了消除数据中存在的异方差和数据的剧烈波动，分别对人均水足迹、水足迹强度、城市化水平、城镇居民虚拟水消费多样性指数、农村居民虚拟水消费多样性指数及居民虚拟水消费多样性指数六个变量取自然对数，记为： LnWF 、 LnWFS 、 LnUL 、 LnUC 、 LnRC 及 LnC 。协整检验的第一步就是对时间序列平稳性的检验，本文采用 ADF 检验方法，对变量进行单位根检验来判断时间序列的平稳性，分析过程借助 *evIEWS6.0* 完成。从图 6-1 至 6-10 可以看出， LnWF 和 LnWFS 呈现出下降趋势， LnUL 、 LnUC 、 LnRC 及 LnC 呈现出上升的趋势，应选取包含线性时间趋势项和常数项的检验方程。检验结果见表 6-1， LnWF 、 LnWFS 、



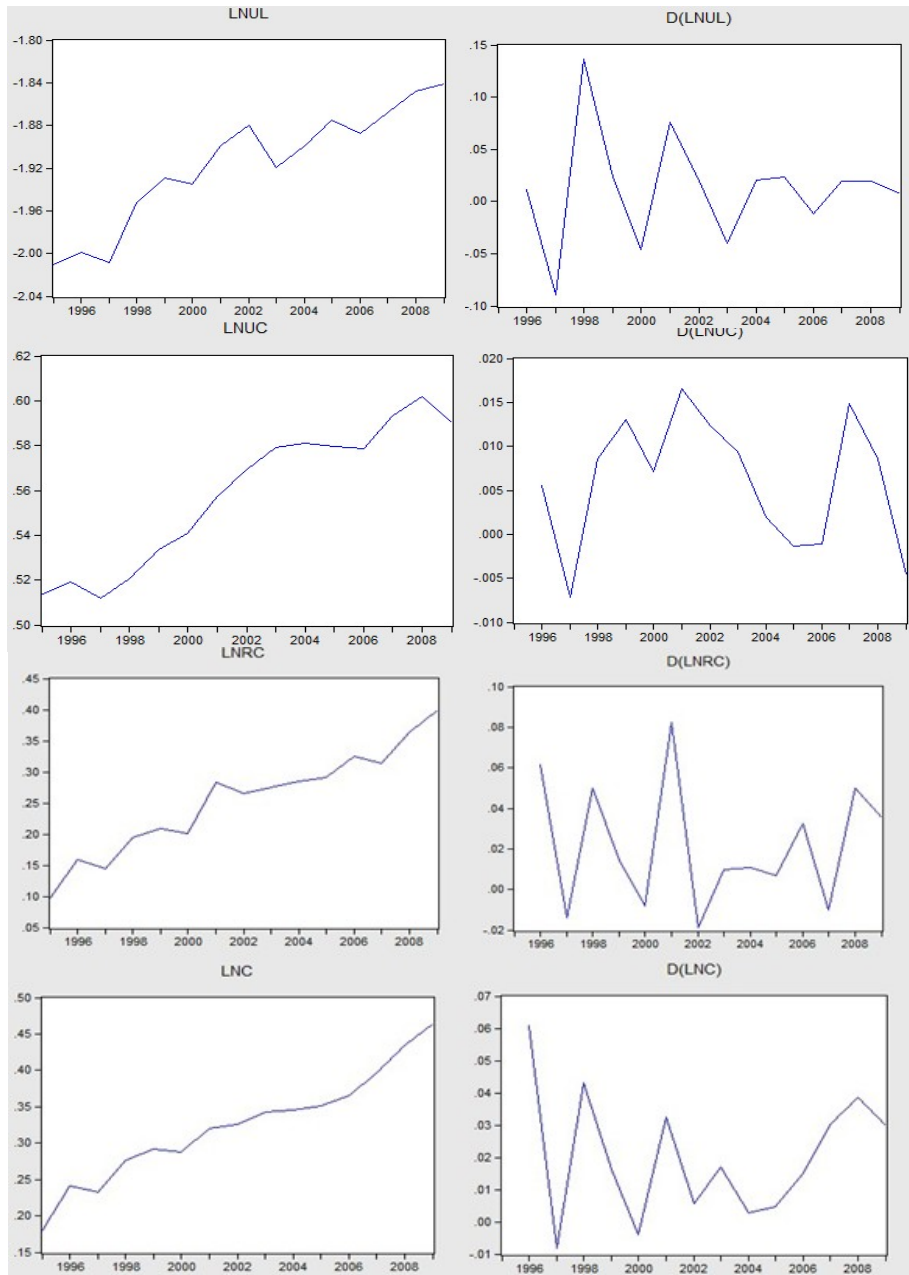


图 6-1 至 6-10 LnWF、LnWFS、LnUL、LnUC、LnRC 及 LnC 序列和差分序列图

LnUL、LnUC、LnRC 及 LnC 的 ADF 检验值均大于显著性水平为 0.05 时的临界值，所以不能拒绝原假设。序列 LnWF、LnWFS、LnUL、LnUC、LnRC 及 LnC 是不平稳的。因此分别对序列 LnWF、LnWFS、LnUL、LnUC、LnRC 及 LnC 进行一阶差分，得到 ILnWF、ILnWFS、ILnUL、ILnUC、ILnRC 及 ILnC。由图 6-1，6-10 可知，ILnWF、ILnWFS、ILnUL、ILnUC、ILnRC 和 ILnC，选取方程类型为不包含时间趋势项和常数项的检验方程，检验结果见表 6-1

表 6-1 时间序列变量的 ADF 检验

变量	检验统计量	5%临界值	结论
LnWF	-2.4944	-3.829	非平稳
LnWFS	-2.8220	-3.829	非平稳
LnUL	-2.7938	-3.875	非平稳
LnUC	-2.2877	-3.7912	非平稳
LnRC	-2.0601	-3.829	非平稳
LnC	-0.7020	-3.829	非平稳
ILnWF	-2.5376	-1.9740	平稳
ILnWFS	-4.5547	-3.1449	平稳
ILnUL	-4.3229	-3.1199	平稳
ILnUC	-3.7401	-3.1199	平稳
ILnRC	-3.6905	-3.1449	平稳
ILnC	-3.1108	-1.974	平稳

注：**表示在 5%的显著水平上拒绝原假设。

ILnWF、ILnWFS、ILnUL、ILnUC、ILnRC 及 ILnC 的检验值均小于显著性水平为 0.05 时的临界值，所以可以拒绝原假设。序列 ILnWF、ILnWFS、ILnUL、ILnUC、ILnRC 及 ILnC 是平稳的。

综上所述，单位根检验的结果表明非平稳序列 LnWF、ILnWFS、LnUL、LnUC、LnRC 和 LnC 在经过一阶差分后平稳，所以 LnWF、LnWFS、LnUL、LnUC、LnRC 及 LnC 均为一阶单整，即：IILnWF-I(1)、IILnWFS-I(1)、IILnUL-I(1)、IILnUC-I(1)、IILnRC-I(1) 及 IILnC-I(1)。

6.2 水足迹与各指标间的协整关系检验

单位根检验的结果表明时间序列，是非平稳序列且一阶差分平稳，现检验变量 LnWF、LnWFS、LnUL、LnUC、LnRC 及 LnC 之间是否存在协整关系。

所谓协整关系即是变量之间可能存在的某种平稳的线性组合，这种线性组合反应了变量之间的长期稳定的关系^[54-59]。本文选用 Johansen 极大似然法对 1995-2009 年武威市水资源足迹与水资源强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数（城镇居民虚拟水消费指数、农村居民虚拟水消费多样性指数）的协整关系进行检验。协整检验的结果如表 6-2。其中列出了最大特征值统计量和 T 统计量，表明在 5%的显著水平下武威市水足迹与武威市水资源强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数（城镇居民虚拟水消费指数、农村居民虚拟水消费多

样性指数)之间只存在一个协整关系。换句话说,人均水足迹与水资源利用效率、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数之间存在着长期稳定的关系(均衡关系)。

表 6-2 武威市水资源利用效率协整检验表

变量	协整方程个数假定	特征值	T 统计量	5%临界值
LnWF 与 LnWFS	无	0.3379**	6.3204	15.4947
	至多一个	0.0712	0.9604	3.8415
LnWF 与 LnUL	无	0.6361**	13.1620	15.4947
	至多一个	0.0015	0.0200	3.8415
LnWF 与 LnUC	无	0.5327**	10.7018	15.4947
	至多一个	0.0605	0.8106	3.8415
LnWF 与 LnRC	无	0.6250**	12.8098	15.4947
	至多一个	0.0044	0.0573	3.8415
LnWF 与 LnC	无	0.7277**	18.6419	15.4947
	至多一个	0.1248	1.7325	3.8415

注: **表示在 5%的显著水平上拒绝原假设 H0

以武威市人均水足迹为因变量,以水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数为自变量,从而得到人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数的长期均衡方程如表 6-3:

表 6-3 水足迹与其影响因素的协整回归模型

序号	协整回归模型	R2	D-W 值	F-statistic
1	$\text{LnWF}=6.9133+0.0996\text{LnWFS}+\varepsilon_1$	0.9080	1.6440	38.7384
2	$\text{LnWF}=5.4180-0.7044\text{LnUL}+\varepsilon_2$	0.8565	1.7449	33.1256
3	$\text{LnWF}=6.9983-0.7792\text{LnC}+\varepsilon_3$	0.8903	1.6827	32.3711

回归结果显示,方程调整后的可决系数 R2 在 0.85 以上,模型的拟合优度、t 检验都较好,不存在自相关,统计学检验有意义。同时从武威市人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数长期均衡关系的模型结果可以看出,1995-2009 年武威市水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费指数与人均水足迹的弹性分别为 0.0996、-0.7044 和-0.7792。即水足迹强度减少 1%,人均水足迹减少 0.0996%;城市化水平提高 1%,人均水足迹减少 0.7044%;居

民虚拟水消费指数提高 1%，人均水足迹减少 0.7792%，又由表 5-5 可知，15 年来，武威市城镇居民人均虚拟水消费量减少了 61.371m^3 ，农村居民人均虚拟水消费量减少了 103.126m^3 ，即在相同的水足迹强度以及城市化水平下，农村居民的虚拟水消费量下降的效果更加明显，其原因为农村居民虚拟水消费多样性指数变化较大所致。虽然人均水资源足迹与水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数（城镇居民虚拟水消费多样性指数以及农村居民虚拟水消费多样性指数）存在长期均衡关系，但在短期内由于受到外界干扰，其短期关系可能是不均衡的，因此必须对这种短期波动进行修正。误差修正模型可以将变量间的长期关系和短期关系相关联。由表 6-4 可知，模型 1-3 为所求的误差修正模型，表明在短期内各影响因素人均水足迹的影响方式和程度，ECM 项是误差修正项，反映了变量在短期波动过程中偏离长期均衡关系的程度，其系数的大小反映了偏离长期均衡关系的调整力度。

6.3 误差修正模型

由于人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数（城镇居民虚拟水消费多样性指数和农村居民虚拟水消费多样性指数）存在着长期均衡关系，故将人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数之间的误差修正模型建立如表 6-4：

表 6-4 水足迹与其影响因素的误差修正模型

序号	误差修正模型	R2	D-W 值	F-statistic
1	$ILnWF=-0.0056+0.0425ILnWFS-0.1232ECM$	0.6776	2.2610	11.5615
2	$ILnWF=-0.1098-0.2579ILnUL-1.6291ECM$	0.6287	2.0804	9.3129
3	$ILnWF=-0.0092-0.3602ILnC-1.159718ECM$	0.7020	2.0250	12.9542

可见，在短期内，水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费指数对水足迹的方向相同而作用力的大小不同：

(1) 水足迹强度对人均水足迹存在正影响，水足迹强度减少 1 个百分点，将导致人均水足迹减少 0.0425%。其短期作用相对于长期作用的影响较小，主要是因为水资源利用效率在短期内的提高并不显著，其影响作用主要体现在长期。

(2) 城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数对人均水足迹存在负影响，即城市化水平和居民虚拟水消费多样性指数分别提高 1 个百分点，水资源强度分别减少 0.2579%、0.3602%。其中，城市化水平与居民虚拟水消费多样性指数对人均水足迹的短期作用均小于长期作用。这是因为短期内武威市城市化水平以及居民虚拟水消费结构发展较慢所致。

(3) 在对水足迹与其影响因子的协整分析及误差修正当中，无论是短期作用还是长期作用，对水足迹影响最大的因素均为居民虚拟水消费多样性指数，可以看出，居民对水资源的消费才是决定人均水足迹大小的最主要因素之一，科学的膳食结构以及良好的节水观念对水资源的节约有着重大的影响。

6.4 格兰杰因果检验

6.4.1 人均水足迹与水足迹强度的格兰杰因果关系

如表 6-5 可知在 1% 的显著性水平上，水足迹强度不是人均水足迹的格兰杰原因的的概率值为 0.0088，即在置信度为 99.12% 的水平上，水足迹强度直接影响着人均水足迹的变化。相比之下，人均水足迹不是水足迹强度的格兰杰原因的概

表 6-5 武威市水资源足迹与其影响因素的格兰杰因果关系检验

零假设 H0	F-statistic	P 值
$\text{LnWF} \rightarrow \text{LnWFS}$ (人均水足迹不是水足迹强度的格兰杰原因)	10.0893	0.9886
$\text{LnWFS} \rightarrow \text{LnWF}$ (水足迹强度不是人均水足迹的格兰杰原因)	0.0002*	0.0088
$\text{LnWF} \rightarrow \text{LnUL}$ (人均水足迹不是城市化水平的格兰杰原因)	2.1752	0.1683
$\text{LnUL} \rightarrow \text{LnWF}$ (城市化水平不是人均水足迹的格兰杰原因)	9.5035**	0.0104
$\text{LnWF} \rightarrow \text{LnUC}$ (人均水足迹不是城市居民虚拟水消费指数的格兰杰原因)	0.5589	0.4704
$\text{LnUC} \rightarrow \text{LnWF}$ (城市居民虚拟水消费指数不是人均水足迹的格兰杰原因)	18.1747*	0.0013
$\text{LnWF} \rightarrow \text{LnRC}$ (人均水足迹不是农村居民虚拟水消费指数的格兰杰原因)	1.1227	0.312
$\text{LnRC} \rightarrow \text{LnWF}$ (农村居民虚拟水消费指数不是人均水足迹的格兰杰原因)	11.1807*	0.0065
$\text{LnWF} - \text{LnC}$ (人均水足迹不是居民虚拟水消费指数的格兰杰原因)	0.2015	0.6602
$\text{LnC} - \text{LnWF}$ (居民虚拟水消费指数不是人均水足迹的格兰杰原因)	7.4809*	0.0194

注：拒绝*，表示在 1% 的显著性水平上拒绝，拒绝**，表示在 5% 的显著性水平上拒绝，拒绝***，表示在 10% 的显著性水平上拒绝。

率值为 0.9886，从而接受原假设。主要原因是随着社会生产力的提高，各个生产部门的用水效率有了一定的提高，使产品在生产过程中的用水量减少，导致单位产品的虚拟水含量也随之减少，进而对人均水资源足迹产生影响。人均水足迹不是水足迹强度的格兰杰原因也符合前因后果的客观事实。

6.4.2 人均水足迹与城市化水平的格兰杰因果关系

据表 6-5 的数据显示，在 5% 的置信度水平上，城市化水平是引起人均水足迹变化的格兰杰原因的置信度水平为 98.96%，城市化水平是引起人均水足迹变化的格兰杰原因较为显著。武威市作为甘肃省的农业大市，城市化水平相比较于全国平均水平而言处于较低水平。随着城市化水平的提高，武威市各产业部门的用水效率有所提高，将使得单位产品虚拟水的含量降低，从而导致武威市人均水足迹有所减少。总体来看，城市化水平的提高是引起人均水足迹减少的格兰杰原因。根据表 6-5 又知，人均水足迹不是城市化水平的格兰杰原因的概率值为 0.1683，在 10% 的显著性水平上不能拒绝原假设，所以人均水足迹不是城市化水平的格兰杰原因，同样符合前因后果的客观事实。

6.4.3 人均水足迹与居民虚拟水消费多样性指数的格兰杰因果关系

城市居民虚拟水消费多样性指数不是人均水足迹的格兰杰原因与农村居民虚拟水消费多样性指数不是人均水足迹的格兰杰原因的原假设的概率值为 0.0013 和 0.0065，它们的置信水平分别为 0.9987% 和 0.9935%，置信水平依然较高。一般来说，随着社会经济的发展，人民的生活水平有了很大的提高，从而人们对生活品的消费数量、种类、消费品的比例都有了一定的改变。由图 5-2 和图 5-3 可知，1995-2009 年武威市居民主要食品虚拟水的消费总量有了一定的减少，消费品虚拟水所占的比例趋向于平均化、分散化。主要原因是 1995-2009 年以来，武威市居民对于粮食等农作物产品的消费量减少，而对肉类、副食类、乳类及部分农产品等的消费量上升所致。这种消费模式的改善，调整了武威市居民对各种食品虚拟水消费量中的比例，从而直接影响了人均水足迹的变化，由表 6-3 和表 6-4 可知，居民虚拟水消费多样性指数的提高，对人均水足迹的减少有着正影响。对于人均水足迹不是城市居民虚拟水消费多样性指数的格兰杰原因及人均水足迹不是农村居民虚拟水消费多样性指数的格兰杰原因的假设而言，原假设的概率分别为 0.4704 和 0.3120，它们的置信度水平分别为 0.5296% 和 0.6880%，远低于 90% 的置信度水平，故不能拒绝原假设，所以人均水足迹不是城市居民虚拟水消费多样性指数的格兰杰原因及人均水足迹不是农村居民虚拟水消费多样性指数的格兰杰原因的假设成立，符合前因后果的客观事实。

7 结论

7.1 武威市虚拟水及水足迹研究总结

水足迹作为一个综合的指标,解释了一个国家和地区的需水总量,可以粗略地衡量人类消费对水资源的影响^[60]。通过计算分析表明武威市 1995-2009 年的人均水足迹为 $962.113 \text{ m}^3/\text{a}$ — $771.101 \text{ m}^3/\text{a}$,其中虚拟水的消费量在水足迹各成分中的比例最大,占据水足迹总量的 80%以上,而虚拟水的消费又以食品消费为主,其中主要包括粮食、蔬菜、水果等农产品的消费,猪肉、牛肉、羊肉、鱼虾、鲜蛋等肉类产品的消费以及乳类和副食类的消费。1995-2009 年间,城镇居民虚拟水消费量与农村居民虚拟水消费量分别在 $802.505 \text{ m}^3/\text{a}$ - $741.134 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $775.854 \text{ m}^3/\text{a}$ - $672.728 \text{ m}^3/\text{a}$ 范围内,其中粮食、蔬菜、水果等农产品虚拟水的消费所占比例较大,总体呈快速下降的趋势;肉类产品虚拟水的消费量占据第二,呈逐年上升的趋势;最后为乳类和副食类产品虚拟水的消费量,亦呈逐年上升的趋势。但从总体来看,人均水足迹与居民虚拟水消费量均呈下降的趋势,主要原因单一食品的消费量快速下降以及单位农产品虚拟水含量的减少所造成的(水资源利用效率的提高)。

7.2 武威市水足迹与影响因子关系分析过程总结

本文将水足迹理论和动态计量经济学的方法结合起来,对武威市人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、城乡居民虚拟水消费指数进行了定量的计算和动态均衡分析。通过分析得出,武威市人均水足迹与水足迹强度、城市化水平、城乡居民虚拟水消费多样性指数都是非平稳的,其人均水足迹与其他四者之间均存在长期的均衡关系和短期的波动关系。武威市水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数与人均水资源足迹的长期均衡方程中,其影响因素的弹性指数分别变化 0.0996、-0.7044 及 -0.7792。也就是说,影响因素每变化一个单位,人均水足迹分别变化 0.0996%、0.7044% 及 0.7792%。而武威市水足迹强度、城市化水平、居民虚拟水消费多样性指数与人均水资源足迹的短期模型中,其影响因素的弹性指数分别变化 0.0425、-0.2579 及 -0.3602,即影响因素每变化一个单位,人均水足迹分别变化 0.0425%、0.2579% 及 0.3602%。其中,水足迹强度在短期和长期之内均对人均水足迹产生正影响,其长期的影响大于短期的影响,说明长期范围内,水足迹强度的减小可以更好地减少人均水足迹。而城市化水平及居民

虚拟水消费多样性指数对人均水资源足迹产生负影响,其长期影响均大于短期影响,说明长期范围内,城市化水平的增加以及居民虚拟水消费结构的变化可以更为有效地减少人均水足迹。在长期和短期范围内,均以居民虚拟水消费指数对人均水足迹影响最大,其次为城市化水平,最后为水足迹强度。可以看出,居民对水资源的消费是决定人均水足迹大小的主要因素,科学的膳食结构以及良好的节水观念对水资源的节约有着重大的影响。

7.3 武威市水资源可持续利用战略

人类消费是水资源开发利用的直接驱动力,减少人类的水足迹对于缓解日益增加的水资源紧缺压力具有重要的作用。减少水足迹有多种途径:

① 推进节水型农业发展

发展节水型农业是实现水资源可持续利用的重要途径,即提高水分生产率,用更少的水生产同样多的产品^[62-63]。目前,武威市大部农田仍采用落后的地面灌溉技术,农业用水大部分来自蓄水工程的积蓄水,田间灌溉方式都是自流灌溉及大水漫灌,跑漏水严重,灌溉水利用率低,导致水资源的严重浪费。推进节水型农业的发展,加快水资源合理利用,必须要采取切实有效的措施。第一,完善灌区水利工程建设,加紧改造和维修老化的渠道,硬化土渠以防渗漏,减少缩水损失,提高渠道水的利用系数,使灌溉水的作用得到最大限度的发挥。第二,针对武威市地形地貌,结合经济发展条件,确定一套适合武威市的高效节水技术。根据不同作物的需水特性,推广不同的地面节水灌溉技术。第三,积极推进农业产业现代化进程,加快农业节水技术。在实行规模化生产的农场,可逐步推进喷灌和微灌技术。如规模化种植的果树林可推广喷灌技术,而规模化生产的蔬菜种植可逐步推广微灌技术^[62]。

②改善居民消费模式,转变居民消费观念

从居民虚拟水消费的角度进行分析,由于各类食品的单位虚拟水含量相差较大,因此,可以通过改变居民食物消费结构的方式来缓解水资源压力。人类消费是水资源开发利用的直接驱动力,为了缓解区域水资源压力,从居民虚拟水的消费方面进行考虑具有重要的现实意义。提高居民的生活水平,改变居民特别是农村居民食物消费模式单一的结构,提高居民消费结构多样性,缓解单一消费结构对水资源造成压力的状态。此外,还可通过虚拟水战略,从水分生产率较高的国

家及区域进口水密集型产品，优化水资源配置，提高区域的水资源利用率，较好的缓解水资源紧缺地区的水资源压力^[64-67]。

③加强宣传教育，树立全民保护水资源意识

1995-2009 年以来，武威市社会经济发展迅速，人们生活水平得到了较大改善和提高，与此相伴随的是，水资源消费量的逐年增加，生活污水造成的水资源污染问题已经成为经济社会发展的主要制约因素。因此，应充分利用广播、电视、报刊等各种舆论工具进行广泛宣传教育，建立各级领导干部及全民共同参与的机制，从而不断提高人们的水资源保护意识，进一步增强人们保护水资源的自觉性和主动性，最终形成全民珍惜水资源、保护水资源的良好社会氛围。

8 问题与展望

由于虚拟水的概念出现仅 20 年左右的时间，不能期望已经建立完备的研究方法和共享的数据，水足迹的概念出现才使十多年，该领域的大部分研究仍然不够完善，大多数研究都集中在农作物产品的虚拟计算及其区域间的水贸易之上，虚拟水贸易节水量和虚拟水储量等方面的研究正在不断深入，虚拟水、水足迹测算与消费、人口、富裕程度和技术等因素相结合探讨人类生产活动对环境影响，的研究也较少^[68-71]。而本文的水资源足迹计算也只是一种粗略保守的估计，结论也有待进一步改进。此外，在计算虚拟水消费方面，由于受限于统计资料等问题，考虑的产品类型有限且较粗略，工业产品虚拟水消费、单位动物产品虚拟水含量等等采用了估计和参考已有研究成果的方法，消费模式与水资源足迹的关系分析仅仅考虑了居民日常生活消费的主要产品类型^[17]。

为使水足迹研究更加科学、更加实用，以促进水足迹在解决我国水问题、保障国家和区域水资源安全方面发挥实际作用，需要从以下几个方面开展水足迹研究工作。

第一，细化产品虚拟水含量研究。确定不同产品在不同地区的虚拟水含量，揭示不同地区、不同产品或服务虚拟水的区域差异，加强对工业产品的虚拟水含量研究。

第二，区域虚拟水贸易研究。全球的水短缺的矛盾，应当鼓励干旱地区或国家进行虚拟水贸易。通过研究区域虚拟水贸易状态，描述不同区域间虚拟水流动格局，并将虚拟水理论与比较优势理论相结合，增强虚拟水的经济、政策关联性，为不同的地区制定科学合理的虚拟水战略，为实现水资源可持续利用提供科学依据和决策支持。

第三，生态环境需水研究。由于生态环境需水研究的复杂性，目前区域水足迹研究尚未考虑生态环境需水。因此，需在以后的研究中，考虑人类活动对水质的影响，把生态环境需水纳入水足迹帐户，以便客观真实的反映人类生产生活对水资源的消耗。

第四，水足迹影响因子研究。由于水足迹的影响因素很多，一般从区域水资源利用效率、居民消费模式等方面出发，从水足迹强度及居民虚拟水消费指数的角度研究其影响因子对水资源系统的影响状况。从消费角度探讨区域水资源可持

续管理，对于区域生产的优化安排和区域水资源系统压力的缓解，将具有更明确的科学和政策涵义。

综上所述，通过“水足迹”的概念向人们说明虚拟水的含义有助于提高人们对水的忧患意识，也有助于倡导节水的消费模式。水足迹的研究必将在世界各国迅速开展。

参考文献

- [1] Allan J A. Virtual water: A long term solution for water short Middle Eastern economies? 1997 British Association Festival of Science, University of Leeds, September 1997.
- [2] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions [A]. In: Rogers, p. Lydon, p. Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses [C]. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1994. 65-100.
- [3] Allan J A. Virtual water: a strategic resource. Global solutions to region deficits [J]. Ground Water, 1998,36(4): 545-546.
- [4] Allan J A. Fortunately There are Substitutes for Water Otherwise Our Hydro-political Futures Would be Impossible [M]. prioritise for Water Resources Allocation and Management, London: ODA, 1993:13-26.
- [5] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products[A]. In: Hoekstra A Y edited, Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade(No. 12) [C]. Netherlands: IHE Delft, 2003.49-76.
- [6] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. 2006, 60(1): 186-203.
- [7] Hoekstra A Y, Chapagain A K. The water footprints of Morocco and the Netherlands [C]. Value of Water Research Report Series: No. 21. Delft, the Netherlands: IHE, 2006: 1-30.
- [8] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations[A]. In: Value of Water Research Report Series No 16[C]. Netherlands: IHE Delft, 2004.1-80.
- [9] Zimmer D and Renault D, Virtual Water in Food production and Global Trade: Review of methodological Issues and Preliminary Results. In: Hoekstra, A. Y. (ED.), Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual, Research Report Series No. 12. IHE Delft, The Netherlands.2003.
- [10] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 861-869.

- [11] 王新华. 中部四省虚拟水贸易初步研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(9):30-33.
- [12] 王新华. 消费模式变化对虚拟水消费的影响[J]. 中国农村水利水电, 2006, (2):32-34.
- [13] 李新文, 陈强强. 国内外虚拟水研究的发展动向评述[J]. 开发研究, 2005(2):110-114.
- [14] 方卫华. 基于虚拟水概念的若干问题探讨[J]. 广西水利水电, 2005(2):2-4.
- [15] 项学敏, 周笑白, 周集体. 工业产品虚拟水含量计算方法研究. 2006(2): 179-184.
- [16] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 甘肃省 2000 年水足迹的初步估算[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 123-129.
- [17] 龙爱华, 张志强, 徐中民. 甘肃省水足迹与消费模式分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 419-425.
- [18] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省区 2000 年的水足迹[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 692-700.
- [19] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6):774-780.
- [20] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 909-915.
- [21] 龙爱华, 徐中民, 王新华, 等. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3358-3365.
- [22] 马静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的计算[J]. 资源科学, 2005, 27(5):96-100.
- [23] 张燕, 徐建华, 吕光辉. 西北干旱区新疆水足迹及利用效率动态评估[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 775-780.
- [24] 耿涌, 戚瑞, 张攀. 基于水足迹的流域生态补偿标准模型研究[J]. 中国人口资源与环境, 2009, 16(6): 11-16.
- [25] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 486-495.
- [26] 高铁梅. 计量经济学分析方法与建模—EViews 应用与实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [27] Dickey D A, Fuller W A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. Journal of the American Statistical Association, 1979, 74:427-431.
- [28] Dickey D A, Fuller W A. Estimators for autoregressive time series with a unit root[J], Journal of the American Statistical Association 74, 1979:427-431.

- [29] Dickey D A, Fuller W A. Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with unit Hoot[J]. *Econometrics* 49,1981:355-367.
- [30] Granger C.W. J. Some properties of time series data and their use in econometric model specification[J], *Journal of Econometrics* 16,1981:121-130.
- [31] 马薇, 张晓桐等. 协整理论与应用[M], 天津: 南开大学出版社, 2004. 2
- [32] 张世英等. 协整理论与波动模型—金融时间序列分析及应用[M], 北京: 清华大学出版社, 2004. 9
- [33] 王海鹏等. 中国能源消费经济增长间协整关系和因果关系的实证研究—以电力行业为例[J], *生产力研究*, 2005. 3: 159-160.
- [34] 赵健等. 山东省对外贸易与经济增长关系实证分析[J], *山东财政学院学报*, 2006. 3:34-27.
- [35] 吴玉鸣, 张燕. 西南岩溶区关系生态安全及资源利用效率[J]. *生态学报*, 2007, 27, (1): 242-249.
- [36] 吴林海, 杜文献. 中国 R&D 投入与经济增长的关系—基于 1991-2005 年间中国科技统计数据协整分析. *科学管理研究*, 2008, 26 (2): 89-90.
- [37] 李艳梅, 张蕾. 中国城市化发展与重工业扩张的协整分析. *经济地理*, 2008, 28, (2): 201-204.
- [38] Allen R G, Pereira L S, Raes D Smith M. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements[A]. FAO irrigation and drainage paper 56[C]. Rome, 1998, Chaoter2-4.
- [39] 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. *水利学报*, 2002, 16 (3) :50-54.
- [40] 刘钰, L. S. Pereora. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. *农业工程学报*, 2000, 16 (5) 26-30.
- [41] 武威市水文检测局. 石羊河水资源公报. 2002-2008.
- [42] 甘肃年鉴. 中国统计出版社, 2009
- [43] 水利部南京水文研究所. 甘肃民勤地区水资源合理利用与生态环境治理研究[Z]. 南京: 水利部南京水文研究所.
- [44] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [A], Value of water Research Report Series No. 11[C]. Netherlands, Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2003.
- [45] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations[A]. Value of Water Research Report Series No. 16[C]. Netherlands, Delfr: UNESCO-IHE Institute for

Water Education, 2004: 1-80.

- [46] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products[A]. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[C]. IHE Delft, 2003: 18-46.
- [47] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 718-720.
- [48] Ulanowicz R E. Growth and Development. Ecosystems Phenomenology[M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [49] Xu Zhong min, Cheng Guo dong, Chen Dong jin, et al. Economic diversity, development capacity and sustainable development of China[J]. Ecological economics, 2002, 40(3): 369-378.
- [50] 徐中民, 张志强, 程国栋. 生态经济学理论方法与应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社. 2003, 90-92.
- [51] 田颖, 朱俊林. 湖北省城乡消费结构变化对虚拟水消费的影响[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2008, 30(3): 313-316.
- [52] 尚海洋, 徐中民, 王思远. 不同消费模式下虚拟水消费比较[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(4): 50-54.
- [53] 薛俊飞, 邱道持. 西南大学学报[J]. 2000 年以来中国城市化水平的空间分异研究——以市域为单元的分析. 2011, 33(10): 136-142.
- [54] 吴林海, 杜文献. 中国 R&D 投入与经济增长的关系——基于 1991-2005 年间中国科技统计数据协整分析. 科学管理研究, 2008, 26(2): 89-90.
- [55] 吴郁玲, 冯忠奎, 周勇, 等. 耕地集约利用影响因素的斜整分析[J]. 中国人口资源与环境, 2011, 21(11): 67-72.
- [56] 李艳梅, 张蕾. 中国城市化发展与重工业扩张的协整分析. 经济地理, 2008, 28, (2): 201-204.
- [57] 吴玉鸣, 张燕. 西南岩溶区关系生态安全及资源利用效率[J]. 生态学报, 2007, 27, (1): 242-249.
- [58] 孟浩, 周立, 何建昆. 自然科学基金投入与科技论文产出的斜整分析[J]. 科学学研究, 2007, 25(6): 1147-1151.
- [59] 翁翎燕, 文继, 等. 城市土地集约利用与经济增长协整分析及因果关系检验[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 72-75.
- [60] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2005, 26, (6), 909-915

- [61] 李明, 长春市 1994-2004 年水足迹研究[D]. [硕士学位论文]. 长春. 东北师范大学, 2007.
- [62] 谭秀娟, 重庆市直辖以来水足迹研究[D]. [硕士学位论文]. 重庆. 西南大学, 2010.
- [63] 陈鹏, 基于水足迹的天津市农业产业分析[D]. [硕士学位论文]. 天津. 天津理工大学, 2011.
- [64] 程国栋. 虚拟水—中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊. 2003, (4), 260-265.
- [65] 尚海洋, 徐中民. 民勤县虚拟水及虚拟水战略研究[J]. 生态经济研究. 2008, (6), 48-52.
- [66] 孙才志, 陈丽新, 刘玉玉. 中国省级间农产品虚拟水流动适宜性评价[J]. 地理研究. 2011, 30(4): 612-621.
- [67] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论方法与西北 4 省虚拟水实证研究[J]. 地球科学进展. 2004, (4): 577-584.
- [68] Hoekstra A. Y, Chapagain A. K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water resources management, 2007, 21(1): 35-48.
- [69] Oki T, Sato M. Virtual water trade to Japan and in the world [A]. Virtual Water Trade :Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade [C]. IHE Delft, 2003.
- [70] 王新华, 张志强, 龙爱华. 虚拟水研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 27-30.
- [71] 焦文献, 徐中民, 尚海洋. 基于 ImPACT 等式的人类活动环境影响分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 743-754.

致 谢

行文至此，我的毕业论文已接近尾声；岁月如梭，我三年的研究生时光也即将敲响结束的钟声。离别在即，站在人生的又一个转折点上，心中难免思绪万千，一种感恩之情油然而生。

生我者父母。感谢生我养我，含辛茹苦的父母。是你们，为我的学习创造了条件；是你们，一如既往的站在我的身后默默的支持着我。没有你们就不会有我的今天。谢谢你们，我的父亲母亲！

育我成才者老师。感谢我的指导老师石培基教授，这篇论文是在石老师的悉心指导与鼓励下完成的。石老师渊博的学识、严谨的治学态度、精益求精的工作作风和诲人不倦的高尚师德，都将深深地感染和激励着我。石老师不仅在学业上给我以悉心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向石老师致以诚挚的感谢！

感谢地环学院为我们提供良好的实验室学习环境及学习氛围，这里要特别感谢徐中民老师、张志斌老师、白永平老师、张勃老师、王录仓老师、赵雪雁老师、潘竞虎老师、马忠老师、雒占福老师、赵锐锋老师、魏伟老师、周俊菊老师、白燕老师等各位老师在我学业及生活上的指导。

感谢宫继萍师姐对我的帮助，感谢张胜武师兄、张学斌师兄、高小琛师姐、吴燕芳师姐、李丽娜师姐等对我学习生活的帮助照顾。感谢同级好友李康兴、董永康、李德发、李博、王祖静、王红、唐佳琪、陈颖、金淑婷、赵峥、黄硕、王培震大家一起学习生活，互相帮助，共同进步；感谢刘海猛、杨志国、付静、焦贝贝、何娟娟、王昱力、杨勃、刘娜、孙慧慧、陈莉、周永伟等师弟师妹对我的帮助。感谢地环院的所有同学，是大家共同营造了一个和谐进步的学习环境，使我轻松、愉快的度过三年研究生生活。

感谢好友李康兴，李德发，李博、董永康、张小君，感谢郑晖同学，每当我最无助、最需要帮助的时候，一直陪在我身边，促使我不断成长、前进。

本文在写作过程中也参阅了大量的文献及资料，借鉴了其中的某些观点，在此向这些文献资料的作者表示衷心的感谢！最后，感谢对论文提出宝贵意见的所有老师和同学，感谢所有参与论文评审、答辩的各位老师及专家！

王文静

2013年5月于西北师大