

分类号： P641

10710-2009129062



长安大学

硕士学位论文

石羊河流域水文生态特征及治理规划研究

富飞

导师姓名职称	李佩成 教授		
申请学位级别	硕士	学科专业名称	地下水科学与工程
论文提交日期	2012年3月1日	论文答辩日期	2012年6月4日
学位授予单位	长安大学		

**Study on Hydro-eco Characteristic
and Treatment Planning in Shiyang River Basin**

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: FuFei

Supervisor: Prof. Li Peicheng

Chang'an University, Xi'an, China

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：

高飞

2012年6月7日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：

高飞

2012年6月7日

导师签名：

李... (Handwritten signature)

2012年6月7日

本论文得到长安大学水与发展研究院所承担的“教育部、国家外专局高等学校学科创新引智计划（B08039）”的支持，特致谢！

摘要

干旱半干旱地区水资源短缺与生态退化失衡所带来的水文生态问题已成为诸多国家和地区面临的首要问题。石羊河流域作为我国内陆河流域中人口最密集、水资源开发程度最高、用水矛盾最突出的流域之一，其水文生态问题尤为严峻。因此开展对石羊河流域水文生态问题的研究，对于实现流域水资源可持续利用和保护干旱区脆弱的生态环境具有深远的意义。

本论文首次基于水文生态的视角，分析了石羊河流域几千年来水文生态变迁的历史过程；从三水转化的观点出发，分析了流域水资源系统的转化特点，并对流域上游祁连山区的水文生态效应进行了初步研究。

在对流域中下游水文生态效应分析时，为突出农业在流域中的重要地位并基于该流域水文生态的现实特性，着重选取了气温、沙尘暴、降水与蒸发、径流量、地下水位动态、地下水水质、干旱条件下土壤蒸发与含水量关系等水文生态因子为主要分析指标；用基于信息熵的理论方法对流域用水量及用水结构演变过程进行了探讨；以上分析结果为流域农事活动提供了一定借鉴，并对流域调整经济和农业结构提供了决策支持。

最后系统介绍了流域重点治理规划实施以来所取得一系列成就，从三水统观统管的角度并结合当地实际出发，为流域重点治理规划实施过程中的一系列问题提出了相应建议，并展望了流域未来的发展前景。

关键词：水文生态 石羊河流域 流域重点治理规划

Abstract

The problems brought by the shortage of water resources and ecological degradation imbalance in arid and semi-arid areas have become the primary issue in many countries and regions. As the Most populous continental river, the development of water resource in Shiyang river is of the highest degree, and the water use contradiction is the most prominent. Also the eco-hydrological problems is particularly serious. Therefore, carrying out research on eco-hydrological for shiyang river basin has a profound historical significances of realizing the sustainable utilization of water resources and protecting the fragile ecological in semi-arid areas.

The analysis of this paper is based on the perspective of the hydrologic ecology for the first time. From the view of “Sanshui water transformation”, this paper analyzes the characteristics of a river basin water resources transformation system, and studies the eco-hydrology effects of qilian mountain which is located on the upstream of Shiyang river.

In the analysis of eco-hydrological in the middle and lower reaches of river basin, in order to highlight the importance of the agriculture and to be base on the eco - hydrological characteristics, we focus on selected the eco-hydrological factors as the main analytical indicators, which includes temperature, dust storms, precipitation and evaporation, runoff, groundwater dynamics, groundwater quality, soil evaporation under drought conditions moisture content and so on. This paper discussed the evolution of water use and structure of the River Basin based on the theory of information entropy; The above analysis results gives a reference to the agricultural activities in the River Basin and provides decision support to adjust the economic and agricultural structure.

Finally, the paper introduced a series of achievements after implementing the key management planning for the river basin. From the perspective of the theory of “Sanshui water transformation”, also combining the local conditions, this paper proposes some suggestions to solve a series of issues and looks forward to the future of river basin during implementing the key management planning for the river basin .

Keywords: hydro-eco; the Shiyang River basin; the key treatment planning

目录

第一章 综述	1
1.1 研究背景、目的和意义.....	1
1.2 水文生态学国内外研究现状.....	1
1.2.1 水文生态学研究现状.....	1
1.2.2 石羊河流域水文生态方面的研究进展.....	4
1.3 研究的主要内容及技术路线.....	6
第二章 石羊河流域基本概况	8
2.1 自然地理概况.....	8
2.1.1 地理位置与行政区划.....	8
2.1.2 流域地貌概况.....	8
2.1.3 区域地质概况.....	9
2.1.4 区域水文地质条件.....	9
2.1.5 气候.....	9
2.2 社会经济概况.....	10
2.2.1 人口现状.....	10
2.2.2 土地利用现状.....	10
2.2.3 工业生产.....	10
2.2.4 农业生产.....	10
2.3 石羊河流域水资源概况.....	11
2.3.1 河流水系.....	11
2.3.2 降水资源.....	11
2.3.3 冰川资源.....	13
2.3.4 流域水资源.....	14
第三章 历史时期的石羊河流域水文生态变迁	15
3.1 自然水系.....	15
3.2 半自然水系.....	17
3.3 人工水系.....	18
3.4 流域其他水文生态因子初探.....	20
3.5 小结.....	21
第四章 石羊河流域水文生态效应研究	23
4.1 石羊河流域水资源转化特点.....	23
4.1.1 天然水循环条件下的水资源系统转化特点.....	23
4.1.2 基于人工干扰下水循环的水资源系统转化特点.....	24
4.2 石羊河流域祁连山区水文生态效应研究.....	24

4.2.1 祁连山区水文生态环境变化分析.....	25
4.2.2 祁连山区水资源的形成与消耗.....	27
4.2.3 小结.....	27
4.3 流域中下游水文生态效应研究.....	27
4.3.1 流域气温特征研究.....	27
4.3.2 流域特有的气候特征—沙尘暴.....	31
4.3.3 流域降水与蒸发的水文生态效应研究.....	34
4.3.4 流域径流量变化基本特征.....	36
4.3.5 流域下游地下水位动态变化分析.....	42
4.3.6 流域下游地下水水质矿化度分析.....	47
4.3.7 干旱条件下土壤水分和蒸发量关系探究.....	47
4.3.8 流域用水结构演变及探讨.....	48
4.4 小结.....	52
第五章 石羊河流域重点治理规划及未来展望.....	54
5.1 石羊河流域水资源开发利用现状.....	54
5.1.1 现状供水与用水.....	54
5.2 石羊河流域重点治理规划简介及成效.....	55
5.2.1 开源.....	56
5.2.2 节流.....	57
5.2.3 管理.....	59
5.3 石羊河流域综合治理以来的几点建议.....	62
5.3.1 节水型社会的建立.....	62
5.3.2 节水与养水的关系.....	63
5.3.3 实施产业结构调整应注意的问题.....	63
5.3.4 对流域下游民勤生态立县战略的建议.....	63
5.4 流域未来展望.....	63
结论及建议.....	65
结论.....	65
建议.....	66
参考文献.....	68
攻读学位期间取得的研究成果.....	76
致 谢.....	77

第一章 综述

1.1 研究背景、目的和意义

石羊河是河西走廊三大内陆河之一，全流域总面积 4.16 万平方公里，水资源总量约 16.85 亿 m^3 ^[1]，作为河西走廊绿洲带的重要组成部分，分布着诸如武威、金昌、民勤共计 4 市 9 县等多个中小绿洲城市。中游武威绿洲曾是全国主要的商品粮基地之一^[2]；下游民勤盆地位于腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠之间，其在地理和环境梯度上，处于全国荒漠化监控和防治的前沿地带，阻隔了巴丹吉林和腾格里两大沙漠合拢，是中国西北部风沙线上的一座重要“桥头堡”。

在长期的农事生产过程中，特别是自上世纪九十年代以来，石羊河流域形成了“非灌不殖”、“地尽水耕”，即没有灌溉，就没有农业的农业生产格局^[3]。作为我国内陆河流域中人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一，其现状流域水资源开发利用已严重超过其承载能力。位于石羊河下游的民勤盆地，地下水位下降，矿化度上升，天然植被大面积枯萎死亡，土地沙漠化、盐渍化进程加快，水文生态环境的恶化使民勤绿洲沦为全国最大的沙尘暴发源地，民勤绿洲北部，部分群众无法生存，只好撂荒土地，背井离乡，一度沦为“生态难民”^[1]。

石羊河流域极度恶化的生态环境问题引起了党中央、国务院的高度重视和社会各界的广泛关注。温家宝总理多次批示，要求“决不能让民勤成为第二个罗布泊”；因此实施石羊河流域重点治理，逐步恢复和改善流域水文生态环境，是关系到民勤绿洲存亡的长远大计，也是落实党中央提出的科学发展观，实现人与自然和谐相处的必然要求。石羊河流域的生态问题，其要害是水的问题^[4]，而我们过去对石羊河流域的研究只注重考虑局部节水效应，而忽视上下游三水转化关系^[3]，通过认识的深入我们认识到石羊河流域的生态问题是一个以水资源利用为中心形成的上下游紧密联系、人与自然相互影响的系统工程^[3-4]。因此对我们来说，开展对流域水文生态规律的认识，运用“三水”统筹统管，综合调节，“时空”治水，经济治水的治水方略，对于确保石羊河流域重点治理规划的有效实施，具有重要的意义。

1.2 水文生态学国内外研究现状

1.2.1 水文生态学研究现状

近年来,有关水文生态和生态水文的讨论和研究成为学术界的热点问题,甚至作为一些国际会议的主要议题,并且随着人类水事活动对自然影响的加剧,越来越多的问题需要这方面的知识去解决。现在越来越多的文献资料中开始出现“水文生态”或“生态水文”等相关术语,或虽有大量文献没有明确引用以上关键词,但通过其内容仍可界定为水文生态学和生态水文学的研究范畴^[5]。有学者如周德民等认为清楚的区分生态水文学与水文生态学是有必要的,前者立足于水文学,侧重过程研究,生态是水文过程的一个主要影响因子;后者立足于生态学,侧重格局与机理研究,强调生态系统对水文格局、特征及其变化的响应模拟和分析,这两个概念既有密切联系,又有一定区别^[6];赵文智等认为生态水文学与水文生态学的概念是有区别的,并认为前者的概念比后者更宽,在研究内容上包含了水文生态学的范围^[7];而 Dunbar 和 Acrema 认为生态水文学和水文生态学在很大程度上本质是一样的^[8];Kundzewicz 也认为两个术语能够或必须定义为同一学科^[9];夏军等认为,在概念上不必区分生态水文学或水文生态学侧重于哪一个学科,二者应理解为生态学和水文学交叉领域的内容,在实际研究中,可根据问题的需要,来决定研究的侧重点^[10]。

但是,大多对水文生态学和生态水文学的科学研究还是在传统的学科框架下进行的,单独由水文学家或生态学家组成的团队开展研究,而不是由跨学科团队实现^[14]。在国内,李佩成院士最早提出了水文生态学的概念。早在上世纪七八十年代,李教授在考察前苏联咸海和日本的地沉地裂时,就对水文生态问题有了初步的认识,其头脑中对水文生态概念的印象可能还更早。他在1988年《咸海萎缩原因、后果、对策及启示》一文中指出咸海是一个巨大的水体,它对广大的周围地区施加着相应的影响,从而存在了一个以咸海为核心的生态系统和社会经济系统,随着引水灌溉导致咸海因缺少补给水源而萎缩,原有的生态系统遭到摧残,原有的社会经济结构遭到破坏,而为了恢复咸海,企图用阿姆河和锡尔河引水灌溉的办法,则会使咸海流域灌溉土地上新的生态系统和经济系统遭到毁灭。在该文中作者对人类水事活动与自然水体动态之间相互影响的思考,实际上就已蕴含了水文生态的思想,研究者认为这一时期当是水文生态思想在李佩成院士头脑中的萌芽时期。在该文中李院士同时指出,为了恢复原有的生态—经济系统而去破坏一个新的更生气勃勃的生态—经济系统,是不明智的,不现实的^[11-12],同时在这一时期,李佩成院士提出了“人类的水事活动——一般总能形成新的生态系统”这一重要论断,遗憾的是在大干快干的今天,在部分地区,对此我们仍没能引起足够的重视。鉴于现实启示和一个老科学家身上所承担的历史使命感,促使李佩成院士加强了对水文生态的研

研究和人才培养, 时隔几年, 水文生态的思想在李院士的头脑中逐渐明朗。1992年, 其开始指导博士生冯国章同志, 以“水事活动对区域水文生态系统的影响”为论文选题开展研究, 该论文2000年获全国百篇优秀博士论文奖, 该文中明确定义了水文生态系统的概念, 建立了水文生态的系统观与方法论, 在冯国章教授的论文中, 其对水文生态作了这样的定义: “所谓水文生态, 实际上就是水文生态系统, 它是由水文系统和生态系统复合而成的, 集水文循环与生态进化及其共同的自然环境、人工环境于一体的, 具有耗散结构和远离平衡态的、开放的、动态的、非线性的复杂巨系统^[13]”。

进入二十一世纪, 李佩成院士更进一步认识到干旱半干旱地区水文生态与水安全问题的严峻性和迫切性, 同时这一问题也成为国际水土资源与环境科学家关注、有待解决的重大问题。2004~2010年李佩成院士指导张艳博士以“干旱区地下水文生态安全评价信息系统研究”为博士论文选题开展了地下水文生态系统及安全评价方面的研究, 文中提出的关于地下水文生态系统和水文生态安全的概念, 在理论上丰富了水文生态领域的研究内容; 2007~2011年他指导李仕华博士开展了“梯田水文生态及其效应研究”方面的工作。正是这些大量艰苦的、富有前瞻性的前期研究工作, 2008年李佩成院士正式承担了国家外专局“111”项目干旱半干旱地区水文生态与水安全学科创新这一重大国家级研究课题, 该项目汇聚了一批以李院士为首的专家学者, 其在水文水资源、农业水土工程、水文地质、水文地球化学、环境科学与工程、水土保持、地理信息与土地利用、跨国水体法律研究等诸多学科的基础上, 通过室内外研究, 特别是通过“111”项目开展引智交流, 经过几年的努力, 对水文生态与水安全方面的认识日渐清晰。2010年在第二届干旱半干旱地区水文生态及水安全学科创新引智基地国际论坛上, 李佩成院士指出水是涉及第一自然和第二自然的最大自然, 因此, 水便成为生态关系的基石和契机, 成为生态关系的脉络和神经, 自然界出现的一切生态环境问题都与水有关。水文系统的各种变化, 一般总会诱发生态系统的变化, 而生态系统的变化也会引起水文系统的变化, 研究和揭示这些涉水的变化和相互响应机理, 探索其关系的量化方法和调控机制与途径, 便成水文生态与水安全学科的基本内容。

2011年的南方大旱, 从辩证的角度看, 也丰富了水文生态与水安全学科的研究范围, 也是我们认识到水文生态与水安全所带来的问题已不仅仅局限于干旱半干旱地区。同年11月, 经李佩成院士启发并指导的王金凤博士后出站报告《农事活动对灌区水文生态的影响研究》在总结前人的基础上, 得出了较为全面的水文生态学定义, 文中指出: “水文生态学是一门旨在打破学科专业界限, 以跨学科研究理念为指导的, 研究以水为主体

的，受人类活动影响的不同类型、不同层次和不同时空尺度上的生态系统中，水文学物理过程与生态学生物进程相互作用，共同进化的内在机理的学科^[14]”。在该文中，作者强调水文过程与生态系统、社会系统的交互作用，其中的水文要素和生态过程密不可分，他们需打破原有的水文学和生态学的框架，有机地融合在一起。

面对我国干旱半干旱地区水资源日益短缺和生态环境不断恶化失衡的严峻现实，科学界在寻求新的解决办法，然而，单学科的研究很难摆脱其本身的局限性，因而，若局限于单纯地研究干旱半干旱地区的水资源或生态退化失衡问题，都无法满足干旱半干旱地区水安全与生态安全整体调控的现实需求。在此情况下，李佩成院士提出并大力倡导和几乎倾尽半生心血的水文生态系统观及思想和正在建立的水文生态与水安全学科，是在科学界无法解决干旱半干旱地区水资源短缺与生态退化失衡这对孪生问题上，一个富有时代使命感的老科学家对现实问题思考的必然结果，也是其对当下亟需解决的日益严峻的水文生态问题思考的必然产物。由此我们可以看出，李佩成院士水文生态思想从萌芽到提出是来源于实际，经过深思熟虑的，也是其多年研究升华的继承和发展。

1.2.2 石羊河流域水文生态方面的研究进展

石羊河流域作为我国古代农业的发祥地之一，早在两汉时期就得到了大规模的开发，其在文献中多有记载。特别是上世纪九十年代以来，我国学者从各个不同的角度，研究了石羊河流域的一系列问题，虽然其研究的名称或程度各不相同，但从其研究的内容来看，仍没有超出水文生态学的研究范畴。

早在上个世纪60年代，著名地理学家和气象学家竺可桢先生在《向沙漠进军》一文中就指出：在石羊河下游的民勤流动沙丘上植树种草是可以成活的，林木和草类成长以后，沙丘就可以固定下来了^[15]。竺可桢先生曾把民勤当地群众琢磨出来的一种用一个个一米左右的“棋盘”格把沙窝固定下来的压沙方式称之为“民勤模式”，可惜这种“民勤模式”并没有得到大规模的推广。上世纪八九十年代以后，人们把开荒的目光投向了沙漠与盐碱地的交接带，由于没有相关法律文件的制约，民勤盆地在近20年来，地下水位最大下降幅度达到15~16米^[1]。西北师范大学的李并成研究员在河西走廊的历史沙漠化成因方面著作颇丰，其在大量实地工作和研究调查的基础上，认为河西走廊历史时期沙漠化的主因是人们对土地资源的利用不当，与此同时自然因素也有一定作用^[16]；王乃昂等的研究也表明，水资源利用率超过40%是晚近代沙漠化的主要原因^[17]；冯绳武认为石羊河流域下游的民勤盆地伴随着流域水系的变迁，经历了自然水系、半自然水系和人

工水系三个历史时期^[18-19]；也有一些学者从历史学的角度研究了河西走廊和石羊河流域由于历代大开发所带来的环境问题^[20-21]；颀耀文等重建了过去2000年以来民勤绿洲演化过程，复原了典型时期的绿洲分布范围，其研究表明，民勤绿洲的开发始于汉代，繁荣于魏晋，萧条于南北朝至宋元，复兴于明清，鼎盛于当代^[22]。

随着石羊河流域水文生态状况的日益严峻，越来越来的学者在把目光聚焦石羊河流域的同时，在研究方法上也得以百花齐放。王乃昂等以石羊河尾闾青土湖剖面沉积气候记录证实了自6000年以来河西走廊东段湖泊旋回经历了四次湖退和三次湖进过程^[23]；张成君等根据石羊河流域三角城古湖泊剖面有机质碳同位素组成分析，指出流域全新世气候演化主要分为4个主要阶段^[24]；魏晓妹等研究了石羊河流域绿洲农业发展对地表水与地下水转化的影响^[25]；粟晓玲等以石羊河流域为例，进行了流域生态系统服务价值的动态估算，并进行了面向生态的水资源合理配置^[26-27]；徐启云等通过分析流域1951-2006年以来资料后指出，在此56年间石羊河流域气候正常（干或偏旱）长达39年，而相对湿润期只有16年，干旱气候趋于显著^[28]；周自江等通过西北地区东部群发性强沙尘暴序列的建立与分析界定了石羊河流域的民勤是我国的强沙尘暴高发区和发源地之一^[29]；在对沙尘的研究方面学者多是以建国以来的长序列观察为基本资料，主要研究沙尘暴的成因、危害和未来发展趋势等；钱正安、王涛等研究认为中国北方大部分地区（如甘肃民勤与新疆和田）的沙尘暴在减少，但未来可能将进入新一轮沙尘暴活动的活跃期^[30-31]；在对流域径流，降水等方面的研究就更多了，李金标，马金珠对进入中游红崖山水库水量与各影响因素的关系进行分析研究后认为人为因子在水资源变化过程中起主导的负作用大大超过了降水因子的正作用^[32]，与此同时在对出山径流的研究中，结果却表明气候变化对出山口年径流量产生的影响是主导因素，人类活动和下垫面状况的变化因素也不容忽视^[33]；李小玉等运用地学统计学方法，对地下水矿化度的空间结构和变异特征进行了较好的模拟，结果表明民勤地下水矿化度从南到北逐渐增大，北部靠近荒漠远离补给源区的矿化度普遍较高，南部靠近补给源区的矿化度较低^[34]；冯绍元建立了石羊河流域下游地下水位动态的人工神经网络模型，研究表明灌溉面积的扩大及地表来水的减少会使地下水位持续下降，人类活动及地表来水是影响地下水位动态的主要因子^[35]；近年来在石羊河流域研究全面而系统的是中国农业大学的康绍忠教授和他的团队，其与当地水务机构合作建立的“石羊河流域农业与生态节水试验站”在大量实验的基础上，取得了许多有价值的一手资料，其研究改变了过去只注重考虑局部节水效应，忽视上下游三水转化关系，就节水谈节水的状况^[3]。研究内容涉及面很广，在康教授及其团队的研究成

果中涉及人类活动和气候变化对石羊河流域径流的影响与模拟、地表水-土壤水-地下水转化试验与模拟、主要农作物耗水规律、面向生态的流域水资源合理配置模式以及节水型社会建设等若干亟待解决的科技与生产实际问题，并在此基础上计算分析了流域灌溉水利用率和灌溉水生产率的时空分布等一系列问题，构建了石羊河流域水资源开发的水土环境效应综合评价指标体系；开发了基于Visual Basic的石羊河流域水资源管理信息系统，实现了数据的多样化查询和满足不同用户的需求及数据共享^[3]。甘肃省水科院也在石羊河流域研究方面做了不少工作，其对石羊河流域生态环境修复研究中，从石羊河流域祁连山区生态修复及水源涵养功能提升、中部平原区水环境改善和北部平原区水资源支撑等方面的工作，较好的反映了水文生态的内涵，并把3S技术在民勤绿洲水资源管理方面得到了应用与推广^[36]；中科院寒区旱区研究所在石羊河流域方面的研究中也做了许多工作，其中在沙漠化的生物过程及植被恢复机理中对民勤绿洲的植物专门进行了研究，其在中国北方沙漠化过程及其防治研究中对石羊河流域的古绿洲植被覆盖、土地利用、降水、人口变动等进行了系统分析，在降水方面得出了全新世中期，石羊河流域年降水量为293mm，比今天（213mm）高出80mm，约大37.6%的结论^[37]，根据实证研究，他们提出了内陆流域的生态经济耦合发展模式、典型沙漠—绿洲地区的特色产业发展战略，与此同时建立了沙漠化地区可持续发展的评价指标体系^[38]。兰州大学的马金珠教授对石羊河流域研究多年，其在《石羊河流域水环境演化与水资源合理利用》一书中，从石羊河流域的历史环境演变与水系变迁过程、地下水流时空动态特征、水化学演化特征等方面对流域做了深入探讨^[39]。另外甘肃省水利水电勘察设计院作为石羊河流域重点治理规划的具体制定者，其研究成果多为政府决策部门制定方针政策提供一定的依据。

1.3 研究的主要内容及技术路线

本论文结合长安大学“111 学科创新引智计划”——干旱半干旱地区水文生态与水安全创新学科引智基地这个课题，首先探讨了水文生态的国内外研究进展和石羊河流域水文生态研究现状，首次基于水文生态的视角，系统总结了石羊河流域从一个昔日“水天一色”的泽国，到今日罗布泊（罗布泊曾为我国最大的内陆咸水湖，孕育了世界闻名的楼兰文化，由于人类对其自然生态环境的破坏，如今只剩下大面积又尖又硬的盐壳外加无尽的风沙）现象局部凸显的水文生态变迁的历史过程；结合李佩成院士提出的“三水统观统管”思想，分析了流域的水循环，并对祁连山区的水文生态环境变化进行了分析；在对流域中下游水文生态效应进行分析时，鉴于流域特殊的水文生态状况和农事活动是

影响该区水文生态环境的主要方面这一现实，选取了该区温度、沙尘暴、降水、蒸发、径流、地下水位、地下水矿化度、土壤水分等水文生态因子为主要分析指标，用基于信息熵的理论方法对流域用水结构演变进行了分析，最后介绍了石羊河流域重点规划治理以来取得的进展并提出了作者的建议和对未来的展望。

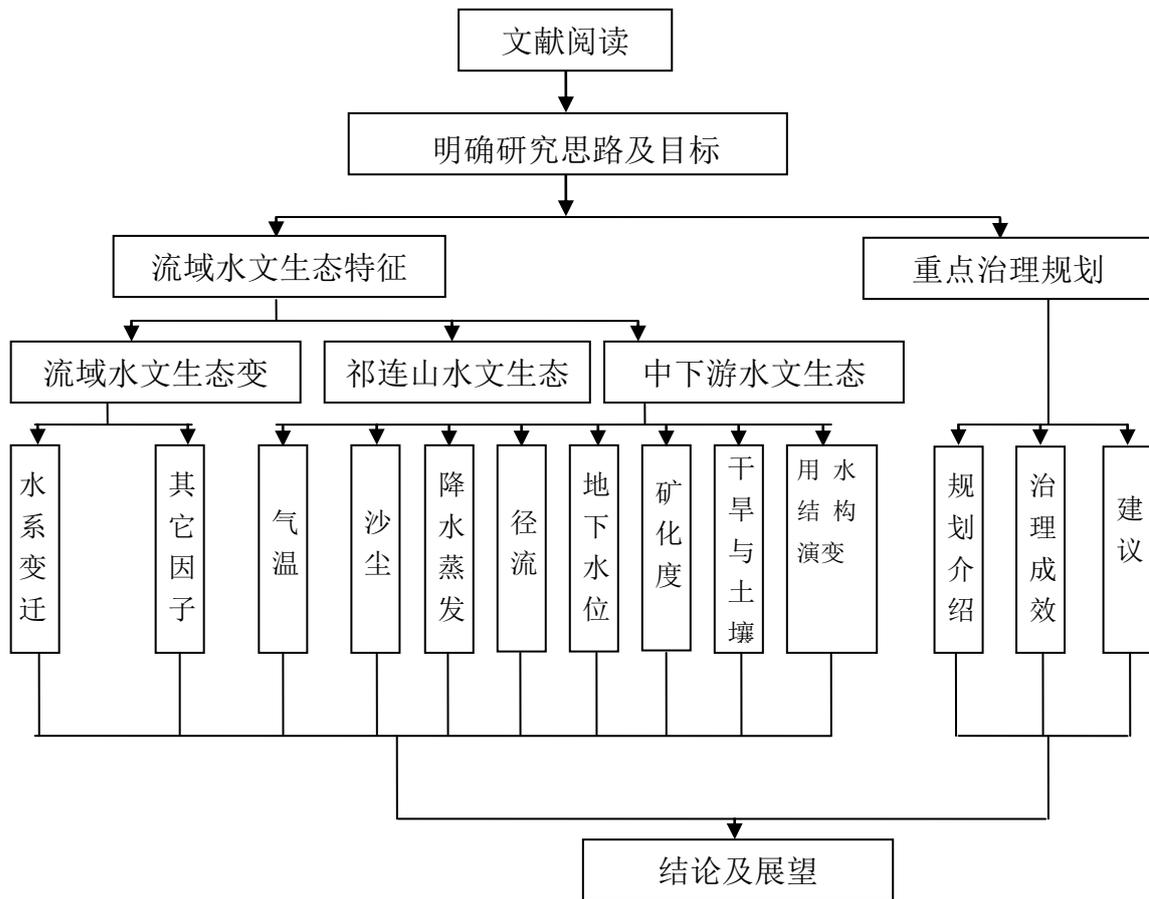


图 1.1 研究路线图及框架

第二章 石羊河流域基本概况

2.1 自然地理概况

2.1.1 地理位置与行政区划

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大内陆河流域之一，位于河西走廊东部，乌鞘岭以西，东经 $104^{\circ}41' \sim 104^{\circ}16'$ ，北纬 $36^{\circ}29' \sim 39^{\circ}27'$ ，西南紧靠青海省，东北与内蒙古自治区接壤，总面积 4.16 万 km^2 ，占甘肃省内陆河流域总面积的 15.4%。流域行政区包括凉州区、古浪县、民勤县全部及天祝县部分，永昌县及金川区全部，张掖市肃南裕固族自治县和山丹县等部分地区^[1]。

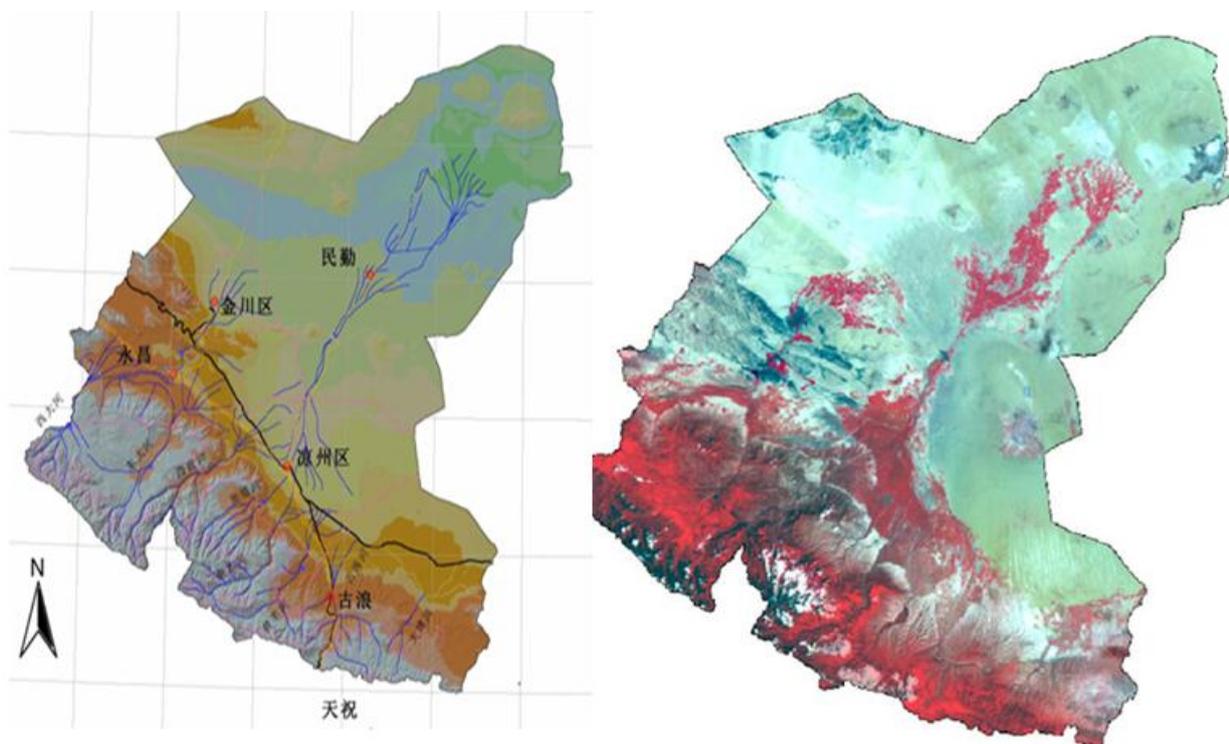


图 2.1 石羊河流域区划及遥感图

2.1.2 流域地貌概况

石羊河流域地处黄土高原、青藏高原和蒙新三大高原的交接带，总体地势南高北低，自南而北可分为南部祁连山地、中部走廊平原区、北部低山丘陵区及荒漠区四大地貌单元^[1,2,4]。

①南部祁连山地，海拔高度约在 2000-5000m；②中部走廊平原区，东西向龙首山东延的余脉韩母山、红崖山、阿拉古山的断续分布，将走廊分为南北两大盆地，南盆地包括大靖、武威、永昌三个盆地，海拔高度约在 1400-2000m，北盆地包括民勤-潮水盆地，

昌宁-金昌盆地；③北山剥蚀丘陵山地，海拔 2000m 左右；④北山之外则是世界上相对高差最大的沙漠——巴丹吉林沙漠。

2.1.3 区域地质概况

本区祁连山区以寒武奥陶系浅变质岩、千枚岩、变火山岩以及花岗岩为主，上古生界、中生界碎屑岩及煤系地层也有广泛的分布。石羊河流域中部和北部平原地带为中、新生界的两个盆地，盆地之间有龙首山东延的余脉（东大山、红崖山、阿拉古山）隔开，这条横亘东西的山地和石羊河流域北面的山地主要由前震旦系、震旦系变质岩组成，北盆地内剥蚀残丘主要出露第四系中、下更新统岩层，白垩系岩层也有零星分布^[40-42]。

2.1.4 区域水文地质条件

根据石羊河流域的地质地貌条件和地下水的赋存形式，本区地下水分为山区裂隙——孔隙水和平原区孔隙水两种类型^[36, 40-41]。

武威盆地、民勤盆地及昌宁盆地巨厚的第四系是孔隙水良好的汇集场所，尤以中上更新统是盆地最为富水的主要含水层系。根据含水层的结构和水动力特征，盆地地下水分为两个亚类型——潜水及微承压水或承压水。

潜水分布于武威盆地南部的洪积带和昌宁盆地，自西向东变浅，微承压水及承压水位于武威盆地北部、昌宁盆地东部及民勤盆地；由潜水区至承压水区，含水层的层次由少增多，单层厚度减少，导水性减弱；武威盆地及昌宁盆地的含水层主要为砂砾卵石及砂砾石，厚度 50~100m，以淡水为主；民勤盆地的含水层主要为砂及砾砂，厚度 20~50m，以微咸——咸水为主；近年来由于大量开采地下水，使本来没有稳定隔水层的承压含水层水力联系更加密切。

2.1.5 气候

石羊河流域深居大陆腹地，属大陆性温带干旱气候，夏季短而炎热、冬季长而寒冷，整体呈现出干旱少雨，蒸发强烈，冬冷夏热，流沙严重的气候特征。受地理位置、地貌差异和大气环流的影响，流域具有明显的空间分异性，自南向北大致划分为南部祁连山高寒半干旱湿润区，中部走廊平原温凉干旱区和北部温暖干旱区，其中民勤北部腾格里沙漠边缘地带年降水量 50mm，年蒸发量 2000~2600mm，流沙严重，为我国四大沙尘暴发源地最为严重区。

值得一提的是，位于流域的古浪、民勤、金昌等地，近年来都受到过强沙尘暴的袭击，这在全国是少有的，其中在 1993 年 5 月 5 日发生在石羊河流域的“55”特大沙尘

暴，似蘑菇云状，宛如原子弹爆炸，以每秒30m以上的速度压境而来^[43]；据灾后调查，此次风力达12级，绿洲边缘的农田，低处最厚被埋达1.5m，而遭人类活动干扰的地面，其风蚀量高达原始戈壁沙漠的10-100倍。

2.2 社会经济概况

2.2.1 人口现状



图 2.2 2010 年 4 月的一次黑风暴来袭(照片提供：民勤县气象局)

流域共涉及 4 市 9 县，是河西内陆地区经济较繁荣的流域。全流域现状（2003 年）总人口 226.89 万人，人口密度 55 人/km²，城镇人口 73.39 万人，农村人口 153.5 万人，城市化率 32.35%^[1,3,39,49]。

2.2.2 土地利用现状

流域耕地面积 591.34 万亩，农田有效灌溉面积 345.82 万亩，基本生态林地灌溉面积 25.26 万亩，农村人口人均农田有效灌溉面积 2.09 亩；大小牲畜 348.61 万（头）只。

2.2.3 工业生产

石羊河流域已形成以金川镍矿为首的稀有金属制造业和以武威为首的食品加工业的工业格局，2005 年全流域工业增加值 117.07 亿元，其中一般工业 115.97 亿元，火电 1.10 亿元。

2.2.4 农业生产

石羊河流域土地资源丰富,光热条件好,农业生产发达,是甘肃省主要粮食生产区。种植粮食作物有小麦、玉米、油料等,畜牧业以家畜为主,表 2.1 列举了 2005 年石羊河流域农业生产现状的部分情况。

表 2.1 2005 年石羊河流域农业生产现状

	播种面积(万亩)			粮食产量 (万 t)	农田有效灌溉 面积(万亩)	农田实灌面积(万亩)			林牧渔面积 (万亩)
	粮食 作物	经济 作物	合计			水浇地	菜田	合计	林果 灌溉
591.34	215.16	144.21	359.37	105.22	345.82	280.26	45.1	325.36	22.81

2.3 石羊河流域水资源概况

2.3.1 河流水系

石羊河发源于祁连山东段,冷龙岭北麓,自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等八条较大河流及多条小沟小河组成(见图 2.3),河流补给来源为山区大气降水和高山冰雪融水,产流面积 1.1 万 km²,多年平均径流量 15.6 亿 m³。河水自南向北流出山后,经过地下水和地表水的一系列转化,最终汇合成为石羊大河,此后河流向北穿过红崖山水库(1958 年修建)后,进入民勤的地表水完全由水库控制,水量全部引入灌区用于农田灌溉^[1, 3, 19, 39, 49, 51]。

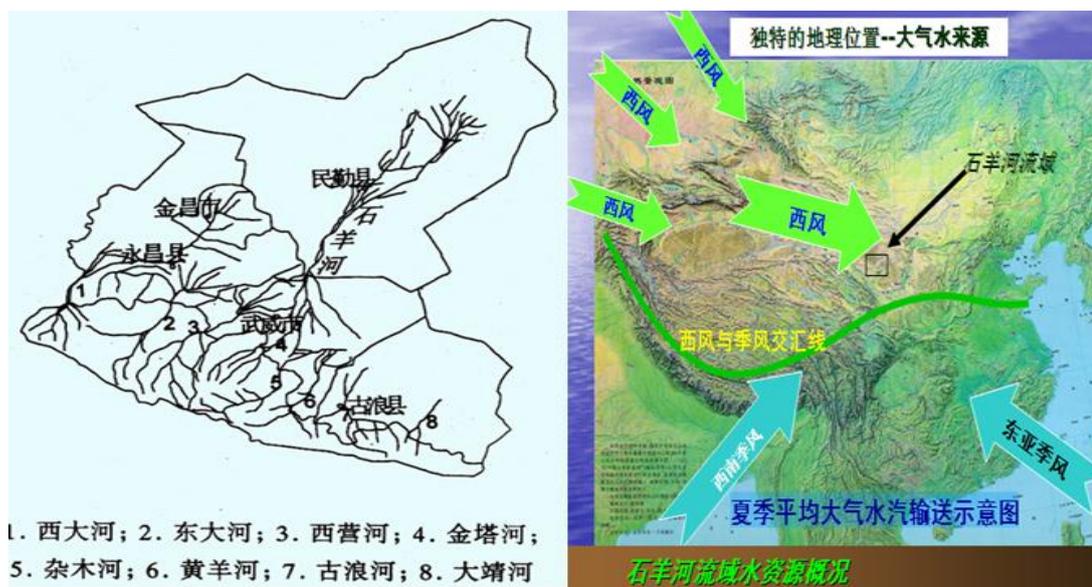


图 2.3 石羊河流域水系和大气水来源图

2.3.2 降水资源

石羊河流域地处中纬地带大陆内部,降水量及其年内分配受来自太平洋上的东亚大

气环流和西南季风与西风的影响，加之气流强弱与地形的变化，使得降水在时空分布上具有一定的特性。

2.3.2.1 降水量空间分布

石羊河流域的降水量在空间上呈现出山区降水充沛，平原区降水稀少的南多北少之态，降水主要集中于祁连山区。南部祁连山区作为石羊河流域的源头，年降水量 300~750mm，中部的走廊平原年降水量为 150~300mm，石羊河尾间的北部荒漠区年降水量小于 150mm；流域从平原到山区，降水量在水文气象条件上具有明显垂直分带性，其一般是随着海拔高度的升高而增加，降水梯度大致为每 100m 在 21.3~52.6mm 范围变化；但在山区遇有马鞍形山脊线，降水量随海拔的变化也会在一定高度上出现反转^[3,39]，见图 2.4。

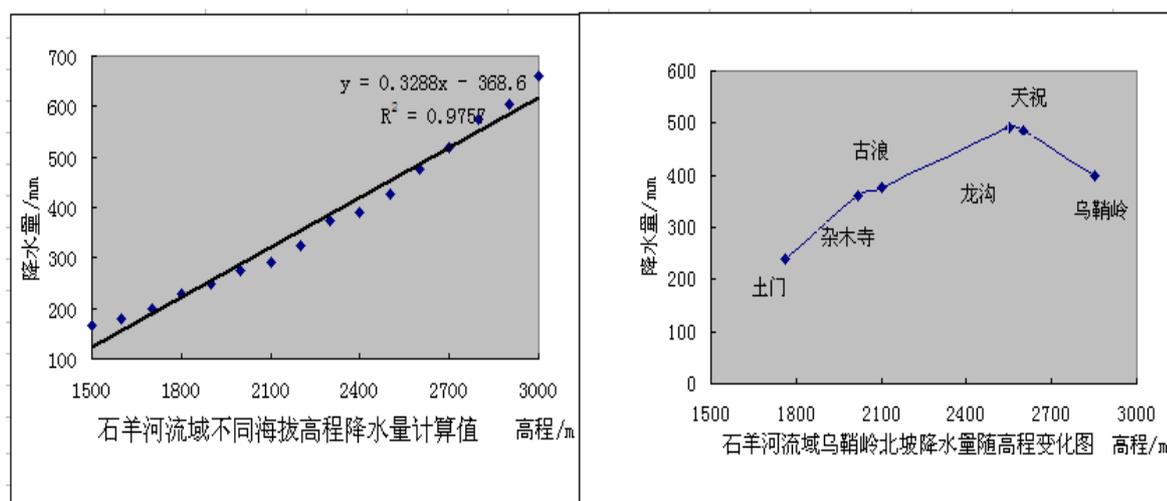


图 2.4 高程与降雨量关系图

2.3.2.2 降水年内分配与年际变化

石羊河流域由于其特殊的地理和气候条件，降水在时间尺度上表现出年内分配不均，多年变化大的特征。有关资料显示^[3]流域多年平均降水量为 244.7mm，降水年内分配不均，连续最大 4 个月(6~9 月)降水量占年降水量的 68.7%，主汛期 7~9 月占 54.4%，以 8 月最多，占 22%。

石羊河流域降水的年际变幅较大，流域年降水量 C_v 值在 0.2~0.4 之间，从西南到东北递减，其中祁连山区的 C_v 最小为 0.2；最大年降水量与最小年降水量的倍比在降水稀少的地区比在降水充沛的山区大，如下游蔡旗站为 2.9 倍，上游山区黄娘娘台站为 1.9 倍。

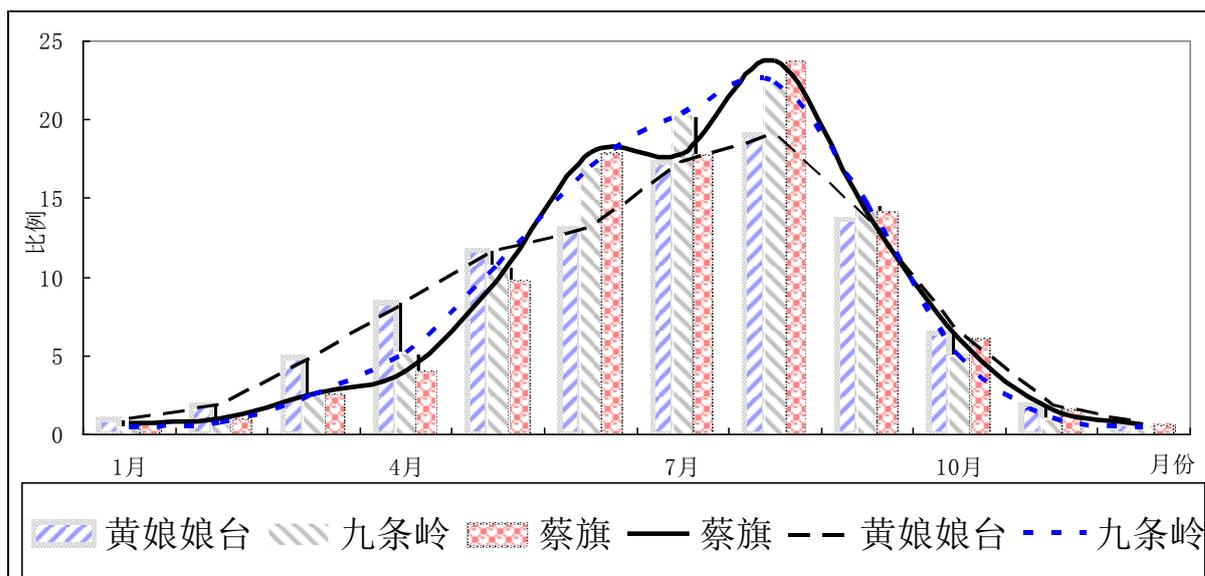


图 2.5 石羊河流域上中下游站多年平均降水量年内分配各月所占比例图

2.3.3 冰川资源

2.3.3.1 冰川的储量及分布

祁连山因其山体高大，山腰多冰川大坂，被誉为“冰源水库”；在海拔2500-3500m之间的坡地构成了祁连山独特的水源涵养林，可以毫不夸张地说河西走廊的生态状况，都与祁连山的生态状况密切相关。在太阳的照射下，祁连山的冰雪融化形成甘肃河西走廊石羊河、黑河、疏勒河三大水系多条内陆河的源头，年径流量达72.6 亿 m^3 ，相当于河西地区142座水库总蓄水量的63倍^[45]。石羊河流域发源于祁连山冷龙岭北坡，有冰川141条，属内陆水系，注入石羊河。近些年来，由于祁连山局部气温上升，导致雪线上升，从1972年到2007年冷龙岭共27条冰川消失，消失冰川总面积为3.76 km^2 ，占1972年冰川面积的3.6%，尤其是石羊河源头的冰川年均退缩16.8m左右^[46]。

2.3.3.2 冰川融水对河流的补给作用

祁连山冰雪融水径流量占到河西内陆河出山河川径流量的14%，就石羊河而言，不同水系冰川补给量的比重也是不同，流域平均冰川补给径流的比重为3.7%，具有高山多年调节水库作用的冰川融水每年从6月开始，7月、8月最大，9月减弱，与流域降水量大致同步。

表2.2是河西三大内陆河冰川补给相关情况，石羊河较之其他两大内陆河，无论是冰川面积还是储量和融水径流，都相差较远，其中祁连山冰川储量 $698.31 \times 10^8 m^3$ ，冰雪年融水约占河西走廊地表水资源的13.8%，相当于河西走廊出山地表水多年平均径流量的

10倍多,是河西走廊名副其实的生命线。

表 2.2 河西走廊干旱区内陆河水系冰川及融水径流情况[47-48]

流域	冰川面积 (km^2)	冰川储量 (10^8m^3)	出山河川径流量 (10^8m^3)	冰雪融水径流量 (10^8m^3)	冰雪融水补给 比重 (%)
石羊河	64.82	21.43	4.5	0.58	4
黑河	420.55	136.7	21.7	2.98	8
疏勒河	849.38	540.19	46.2	6.43	32
合计	1334.75	698.31	72.4	9.99	/

2.3.4 流域水资源

石羊河流域水资源总量 16.61 亿 m^3 , 其中地表水资源量为 15.61 亿 m^3 , 不重复的地下水资源量为 0.99 亿 m^3 。根据甘肃省水利水电勘察设计院对 1956 年~2000 年共 45 年出山径流系列分析, 其中: 大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河和西大河 8 条较大支流多年平均天然径流量 14.55 亿 m^3 , 11 条小沟小河及浅山区多年平均径流量 1.06 亿 m^3 , 产流面积 1.11 万 km^2 , 平原区不产流。

表 2.3 石羊河流域水资源量^[1]

单位: 亿 m^3

地表水资源				地下水资源			水资源 总量
8 条山水河 径流	浅山区年 径流量	小沟小河 径流量	小计	降水入渗 补给	侧向地下水 补给	小计	
14.55	0.58	0.48	15.61	0.43	0.56	0.99	16.61

第三章 历史时期的石羊河流域水文生态变迁

河西走廊石羊河流域是我国内陆河流域中生态环境问题最严重的流域之一，现状流域水资源开发利用已严重超过其承载能力，致使流域生态环境日趋恶化，危害程度和范围日益扩大^[1]。位于石羊河下游的民勤盆地从一个昔日“碧波万顷，水天一色”的泽国，到今日“罗布泊现象”局部凸显的生态难民县，水文生态的变迁和环境的演变不能不令人深思。尤其2000年以来，石羊河流域因其日益严峻的水文生态问题引起了社会各界的高度关注，本文在查阅大量资料和前人工作的基础上，对石羊河流域的水文生态和环境变迁作一初步探究。

石羊河流域水文生态环境的恶化，以民勤为最^[1]。史前时期，在石羊河下游的民勤盆地发育着大片的天然绿洲；公元前121年，西汉王朝将民勤盆地纳入中原王朝，从此农耕文化推广到本区，在此后的2000年中，民勤盆地经历了植被衰退、湖泊萎缩、风沙加剧的历史变化过程^[52-54]；从水文生态的视角来看，民勤盆地近2000年来的绿洲变化，实际上是水文生态变化的结果。前已述及有学者通过重建过去2000年间民勤绿洲的演化过程，复原了典型时期的民勤绿洲分布范围，其研究表明，民勤绿洲的开发自汉代以后，历经繁荣而后萧条，几起几落后至当代达到鼎盛^[53]，这与一些学者^[54-56]研究河西走廊不同历史时期的农业开发对环境的影响所得出的结论大体吻合，这就说明研究石羊河流域的水文生态变迁和环境演变问题，不必仅仅拘泥于该流域，历史同期的河西走廊和甘肃省乃至西北地区水文生态状况亦可作为旁证。

石羊河流域民勤绿洲的水文生态变迁和环境演变伴随着流域水系的变迁，依据自然原因、人类生产活动及其改造自然的程度，大致经历了自然水系、半自然水系和人工水系3个阶段^[18-19]，本文作者基于水文生态的视角，力求通过查阅同一时期该区人类活动的资料，来探究其对当地水文生态的影响。

3.1 自然水系

主要指史前至汉代大规模开发这一阶段。研究得知，6亿年前的古生代时期，整个大西北的许多地区都是沼泽湖海，只是到了古生代之末才有大块的陆地出露。我国最早的地理书《禹贡》记载的11个大湖之中，就有“潞野泽”，它的位置在祁连山以北，石羊河下游。19世纪末，科学家经实地考察，发现在民勤县北部的腾格里沙漠中，古代曾有一个水深25米，面积至少在1.6万平方公里的巨大淡水湖泊；史前自然水系时代的古潞

野泽,在汉以后数百年间逐渐分为互不相连的西海和东海两个湖,并演变为近代的青土湖、白亭海^[54]。有学者考证秦汉以前祁连山中有森林六百万公顷以上^[57],山前坡地是灌木草丛和连片草场,同时这一时期(春秋至西汉前期),这里也是匈奴等少数民族的乐园,他们充分利用河西流域“美水草,宜畜牧”^[58]的良好天然条件,过着逐水草而居的游牧生活,创造了较为发达的畜牧业和原始农业;河西归汉后,匈奴所作“失我祁连山,使我六畜不蕃息”的悲壮之句,在赞河西草原之丰腴的同时,也充分说明当时的河西是匈奴重要的畜牧基地;此后汉政府在此设郡置县、引渠灌溉、驻军屯田,揭开了河西历史上大规模农业开发的序幕^[55-56],经过百年的开发经营,河西在经济结构以及人们生产和生活方式上发生了前所未有的显著化,不仅畜牧兴盛,有“凉州(今武威,石羊河流域中游)之畜为天下饶^[59]”的美誉,而且农业发达,畜牧之饶,谷米之贱^[59],说明古凉州已初步形成了一个宜农宜牧、农牧并举的经济发展格局,有资料显示当时的气候条件较为宜人,水量充沛,河网遍布,随处可以引水濡田^[60]。据施雅风等利用冰芯记录推断,公元0~270年是2000多年以来温度最高的时期,此时罗布泊附近楼兰曾种植石榴,他们据此推测当时气温比今高2℃,降水和径流显然也比现代丰富;但与此同时,有学者根据资料指出,破坏环境与大开发几乎同步,因当地驻军和常驻人口用作薪柴、饲草、烽火等对绿洲边缘之处荒漠植被的砍伐即已开始,并且数量不菲,其中有考证的一次出动戍卒2000人,仅年伐芨(一种当地植被)一项就达6万吨^[61-62],在绿洲边缘进行如此之巨的伐刈,可见人类活动对绿洲的巨大影响。

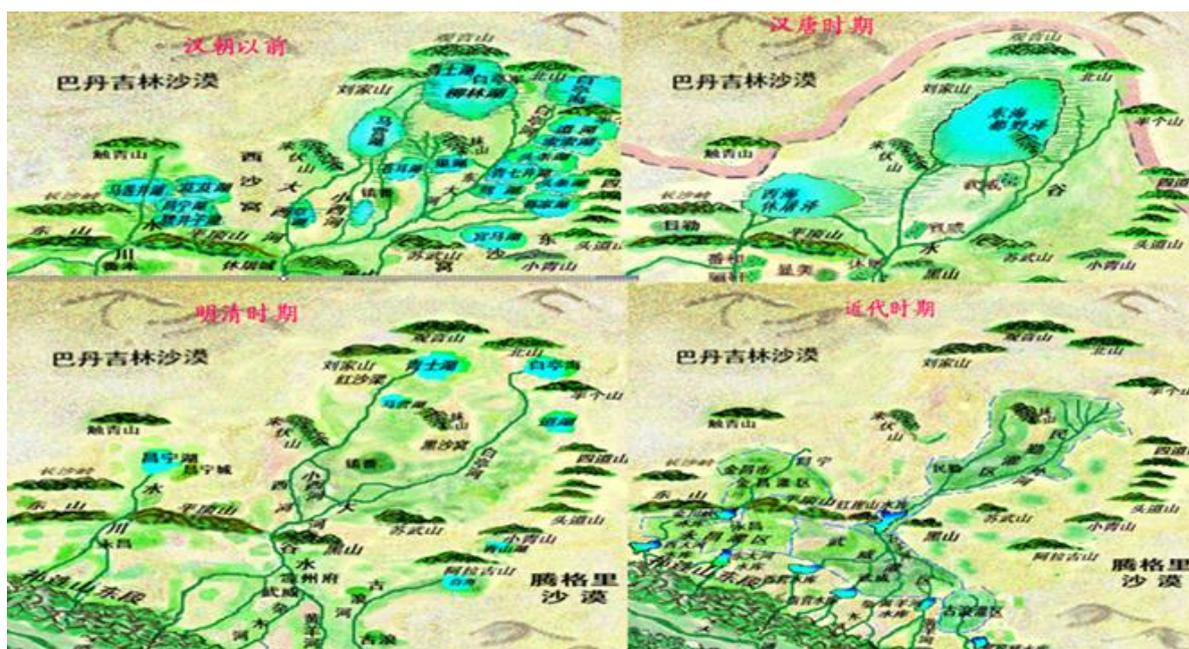


图3.1 复原的历史不同时期流域湖泊变化演变图^[143]

3.2 半自然水系

这一时期大致从西汉初期到清末，半自然水系可分为潠野泽、白亭海二个阶段。

潠野泽时期：距今二千多年前的汉代，潠野泽仍有大片水域，西汉王朝在河西建郡设县，移民开垦后，由于上游引水灌溉，随着流入潠野泽水量的日益减少，潠野泽于是一分为二，东面的叫东海，西面的叫西海，也叫休屠泽。

白亭海时期：到了隋代东海已经萎缩，休屠泽由大变小，出现许多湖滨三角洲^[18, 19, 53]。隋末唐初，由于历代战乱频发，河西又成了“十室九空”，“州县萧条”的荒凉之地，明代再次开垦，规模超过前代，上游堵坝拦水，民勤绿洲开始出现缺水现象。休屠泽因逐渐水浅而毛柳多生，改称柳林湖，随着柳林湖底的逐渐坦露，很快就被分发而来的外地移民划畦开垦了^[62]，到民国初期，昔日泱泱大湖，只剩下一湾芦苇丛生的浅水，湖名改成了青土湖，到了上世纪50年代末，随着红崖山水库对下游民勤来水的全面控制，青土湖彻底干涸了，潠野泽终于走完了它生命的全部历程，消失在茫茫黄沙之中。

自汉后，历尽曹魏，中原一直战乱不休，内地大量人口为避战乱，纷纷迁居河西，从而有力地推动了河西经济社会的发展；北魏统一河西后，以“河西水草善，乃以为牧地”，河西遂成为中原战马及畜产品的供应地^[55]；隋唐是河西历史上的第二个大发展时期，唐前期改片面屯田为农牧并重，这一经营模式，使河西呈现出“农桑兴旺、牛羊被野”^[63]的繁荣景象；有学者考证^[64]“自西汉始至现代，河西移民屯田，从三大内陆河的下中游，逐渐向上游推进，特别是唐天宝年间出现了‘是时中国盛强……桑麻翳野，天下富庶者无如陇右’^[65]的盛世局面”；唐代诗人王建的《凉州行》记“番人旧日不耕犁，相学如今种禾黍”^[66]，充分说明古凉州（今武威）一带生产格局在逐渐由畜牧业向农业转变。但是在这背后，对环境的破坏一直在持续，对于当地一些诸如怪柳、白刺等枝柴的砍伐亦有较多记载^[61]，而这些柴草自古就为当地薪柴的主要来源，据当时的一些官方文书规定，凡占有田地之民户均须向官府交纳柴枝^[61, 67]，以柴草代税上交的这种做法，直到上世纪九十年代依旧在当地某些地区延续。由于对绿洲边缘枝柴、怪柳的砍伐过于严重，以致直接影响到农田的保护和防沙固沙，带来明显的水文生态恶果，作于9世纪中期的《太平颂》为此呼吁：“大家互相努力，营农休取柴怪……”，这表明当时人们对枝柴、怪柳的生态功能已有较清楚的认识，同时也说明生态环境恶化问题已在当地比较严重。安史乱后直至明代，河西民族关系复杂，加之这些民族以游牧方式为主，致使河西大片良田沦为荒地，无复昔之殷富繁华矣^[68]；在明朝时，为防蒙古兵马南下，边将派

兵北出烧原毁草的“烧荒”制度已正式确立^[69],当时的有识之士也看到了这种“烧荒”带来的水文生态恶果,但是由于军事和政治的需要,一切的政策都是为其服务的。明清以来,河西走廊随着农业人口的激增,人地矛盾日益突出,清代乾嘉年间黄羊河上游当地居民开始将防护林逐渐开垦为农地^[70],致使黄羊河水源涵养林遭到破坏,成书1750年左右的《五凉全志》记载了清镇番(民勤县)农民对石羊河“移丘开荒,使河水日细,土沃泽饶,变成往事”的历史过程,河西虽然赢得了“金张掖,银武威”的美誉,但这种片面扩充农业而挤占畜牧业空间的做法,最终导致了数百年后严峻的水文生态恶果。

就人口的角度来看,有专家统计^[64],西汉时河西有人口28万(一说50万),唐代河西人口30万,清代嘉庆年间一度高达280万人,在此之前当地适宜农耕的土地已被开垦殆尽,以张掖为例,由于地瘠民贫,在乾隆年间,清政府已开始多次将张掖、山丹部分居民迁往新疆屯田^[71],这说明河西走廊宜耕之地被开垦完毕的同时,人口也达到了饱和状态。而现在河西人口更是增加到400万人以上,可见人口对生态环境造成的压力是何等的严重。颉耀文等在实地考察并结合遥感等技术上复原了典型朝代民勤绿洲垦殖图,特别需要指出的是清代柳林湖地区的开发,使垦田的范围扩到古终端湖岸边,且规模宏大,进入民国“边疆隙地,莫不光垦”(见图3.2),而上游武威绿洲人口增加更快,土地开垦更为强烈,致使水源短缺,上下游水案纷争时有发生。

明清时期,石羊河流域经过几次大规模的开发,原始的生态环境发生了很大的改观,但较之现在,仍优于甚多。清初下游的镇番县附近山上野狼“每啸聚成群,结阵作恶……”^[72];清中期的雍正时期,湖岸两边依然芦苇繁盛,“芦苇境外最多,治内湖塘,亦卓然成森^[73]”;而在现在看来民勤这样一个干旱地区,在清代关于水患的记载亦不少,1778年秋,镇番因多雨引发大水“两堤之下,几无完区”^[74],在1851年亦有“大河如潮,堤坝崩溃”的记载,这对于一个建国后多年统计资料中年平均降水不超过115mm的干旱县,因多雨降水引发洪水,实属罕见。由此可见,就如今生态难民县的民勤而言,其水文生态的恶化经过了一个长期的历史过程。

3.3 人工水系

清代末年,石羊河进入人工水系时期,尤其是从20世纪50年代以后,各支流相继修建了水库和灌溉渠系,人工渠道代替天然河流,较快地发展了绿洲经济,尤以1958年红崖山水库的建立,完全实现了对下游来水的人工控制,彻底根绝了下游地区的水患,但一如李佩成院士所指出的一样,水利工程是把双刃剑,其在造福于民的同时,亦要防

止他的消极面^[75]。红崖山水库在最大限度的调节上游来水的同时，亦使下游青土湖来水断绝，直至干涸，原有自然水道两岸之树木，得不到补给，纷纷枯萎，很大程度上改变了两岸原有的水文生态景观。

图 3.2 典型朝代民勤绿洲垦殖图^[53]

位于民勤县中下游的收成乡东马岗可以说是解放以来，特别是近二十年来由于无节制抽取地下水导致当地局部水文生态小循环恶化的一个缩影。当地现在也可见约1950年前后修建的排水沟，其功用是在排洪水的同时，主要用于排当地的地下水，以防其潜水位过高，带来盐渍化。在上世纪九十年代末期，当地居民还时常在规定时期进沙漠深处（当地人称之为进马岗）割草，沙漠低洼处芦苇生长茂盛，不足一米汲取的地下水，水质甘甜，人畜可以饮用。在进入二十世纪之后，由于在沙漠边缘大肆开荒种地，导致地下水位下降迅速，马岗芦苇已逐渐死亡，及至2005年左右，这一自解放以来延续50余年的定期进马岗割草活动已经停止了。据当地深入沙漠处牧羊人所述，沙漠边缘处的开荒对沙漠里的环境影响严重，人能很明显的感觉到：在沙漠边缘大肆开荒之前，以往下雨沙漠深处的小沼泽，数日不干，牲畜可以就地饮用，即使没有水，人走在沙漠低洼处，地还很泥泞，需小心翼翼，以防滑倒！牧羊人在沙漠低洼处自挖数米水井，便可就地获取地下水；至大规模开荒种地后，人走入沙漠，干燥感比以前更为强烈，降雨时期基本

形不成小沼泽，梭梭等耐旱性植物也已枯萎死亡！入岗牧羊这一延续数百年的游牧经营方式，也被迫一度中止。值得庆幸的是，石羊河流域重点治理规划的启动，仅沙漠边缘处2007年才开始实施的关井举措，收效可谓立竿见影，作者在2011年入岗的时候，使人难以相信，沼泽已开始成片点缀于沙漠深处，部分沙生植物开始复生，由此可见人类活动对水文生态系统的巨大影响！与此同时，值得注意的是，沙漠边缘处虽然退耕了大片土地，但退耕土地被闲置撂荒，任风沙侵蚀，现象令人堪忧！

3.4流域其他水文生态因子初探

仅就明清以来，关于石羊河流域沙尘频发，亦不乏记载。明洪武（1380年）左右，鞑人至石羊河流域下游青土湖掠盐，就因“飓风迷路，忘其归途”^[76]，可见令大队人马忘其归途的大风，当不亚于今天的特大沙尘暴；正统三年（1438年）镇番县（今民勤县）“飓风狂虐，十一月经旬不息，乔木被折”，另有文献万历十二年（1584年）镇番县“飓风狂虐，延十数日不息，田地埋沙……”^[77]。而据现代气象部门自建国以来的统计记载来看，发生在民勤1993年5月5日的特大沙尘暴瞬间最大风速34米/秒，风力最大达12级，也不过几小时，而上述两次沙尘暴记载，似乎与1993年5月的这次沙尘暴相比，历时更长，危害更大。由此可见该区逐渐沦为我国沙尘暴最大发源地，不仅仅是因为上世纪八九十年代以来人类活动作用的结果。王乃昂等^[23,78]以石羊河尾间青土湖剖面沉积气候记录研究，证实季风边缘区百年以上时间尺度的气候变化，具有暖湿和冷干的阶段性特征；张成君等^[24]根据石羊河流域三角城古湖泊剖面有机质碳同位素组成分析，指出全新世气候演化主要分为4个主要阶段，其中2600年以来距今，正处在干旱期。

表3.1 中国气候变化特征表^[79]

公元前 3000-公元前 1100	第一温暖期（新石器晚期和夏商时期，气候最适宜期）
公元前 1100-公元前 770	第一寒冷期（西周）
公元前 770-公元初	第二温暖期（春秋、战国、秦和西汉，繁盛时期）
公元初-公元 600	第二寒冷期（东汉至南北朝）
公元 600-公元 1000	第三温暖期（隋唐，）
公元 1000-公元 1200	第三寒冷期（两宋、辽金）
公元 1200-公元 1300	第四温暖期（宋末元初）
公元 1400-公元 1900	第四寒冷期（明至清末，明清小冰期）
公元 1900-公元 2010	第四寒冷期第四小冰期后的间冰期

一些学者的研究也表明，流域气候在大的范围上与中国气候特征步调一致，据此作

者推断，该流域在汉、唐时期之所以能带来大的鼎盛开发期，除与中原王朝对该流域的经营和流域在军事上的重要地位外，气候的适宜也为流域的大开发提供了外因。

表3.2 甘肃省公元前193年-公元1949年干旱发生统计表[80]

朝代	时间	干旱发次数（次）	干旱发生间隔年份（年）
汉	公元前 206-公元 220	63	6.8
魏晋南北朝	公元 220-公元 581	61	5.9
隋唐五代	公元 581-公元 960	86	4.4
宋辽金元	公元 960-公元 1368	128	3.2
明	公元 1368-公元 1644	153	1.8
清	公元 1644-公元 1911	199	1.3
民国	公元 1911-公元 1948	32	1.2

河西流域在历史发展时期的另一重要特征便是干旱频发^[126]，由表3.2可见，公元前193年到公元1948年的2141年中，甘肃有记录的干旱事件发生了722次，更有一步的研究指出，在近500年的尺度上，甘肃干旱频率存在100-130年准周期变化特征^[79-80]，具有“三年一小旱，十年一大旱，20年一特旱”的气候特征。在近500年旱灾中，以1640-1641年即崇祯十三年大旱为近500年之最，此次灾情直接导致了大明朝的灭亡；距今最近的一次大旱出现在1929年，范围波及陕、甘、宁、青、内等7个省份，仅甘肃就死亡230万人，占当时甘肃省总人口的42%。由此可见，防旱抗旱确保粮食及水安全是何等重要。

3.5小结

在本文作者看来，一部石羊河流域的开发史，也就是石羊河流域水文生态的变迁史，在这个过程中，实际上是以水为主体的生态系统发生了变化，而发生了变化的生态系统又反过来影响水文系统，如上世纪五十年代在石羊河流域中下游修建的的红崖山水库，其在完全控制下游来水的同时，亦最大程度的改变了2000多年以来下游天然河道的水文系统，并最终导致了石羊河尾闾青土湖的干涸和一系列生态系统的剧烈变化；在大约2005年以前，虽然河道水流为中游水库所控制，但每年下游通过土渠河道输送给下游的季节性下泄水量，对于降水造不成有效补给的民勤盆地，又恰如久旱逢甘霖的补给，长达数百公里的河道两岸之生态景观，草色青绿。近年来，由于石羊河流域重点治理规划的实施，渠道全部采取了衬砌，两岸树木全部枯死，干旱的黄土几乎冒烟，由于水文系统的变化，促使发生了变化的水文系统在极大程度上又开始影响生态系统，受到影响的生态系统如干旱的青土湖，人们为了恢复旧有的生态系统，又开始向青土湖人工注水，这又导致了青土湖周边地下水位过高，土壤盐渍化加剧。但与此同时，我们也应注意到，

石羊河流域关于“多流沙，非灌不殖”的记载，在史书中频繁出现，可见，在大的气候环境下，气候的作用对水文生态的影响不可低估。石羊河流域目前的环境生态现状，以水文生态学“时空”治水的角度来看，也许早在毫无节制毁林开荒的数百年前就已经种下了恶果，这也启示我们在进行今天水事活动的同时，也要兼顾后代的利益。

第四章 石羊河流域水文生态效应研究

水文生态学作为一门旨在打破学科专业界限、以跨学科研究理念为指导的，研究以水为主体的，受人类活动影响的不同类型、不同层次和不同时空尺度上的生态系统中，关于水文学物理过程与生态学生物进程相互作用，共同进化的内在机理的学科^[14]，在李佩成院士水文生态的思想中，系统和循环的思想贯穿于始终。早在上个世纪七十年代，李院士在《认识规律，科学治水》一文中就提出当代科学的治水方略应当是“三水”统观统管，综合调节，“时空”治水，经济治水。在“三水统观统管”中，就是要把自然界的一切水体作为一个不断变化的统一整体加以全面地观察、对待和管理，并在时间和空间上加以综合的蓄调和利用，不要把他们对立和孤立（见图 4.1）。而实际上由于认识和管理等方面的局限性，直到 2007 年，石羊河流域下游的民勤盆地已面临上游来水断流的严峻情况下，《石羊河流域重点治理规划》才得以出台。规划以全面建设节水型社会为主线，按照下游抢救民勤绿洲、中游修复生态环境、上游保护水源的总体思路^[1]，确定了对石羊河流域上中下游兼顾的综合系统思想和限制下游地下水开采，限量中上游地表水使用和增强人工降雨的三水统观统管指导理论。

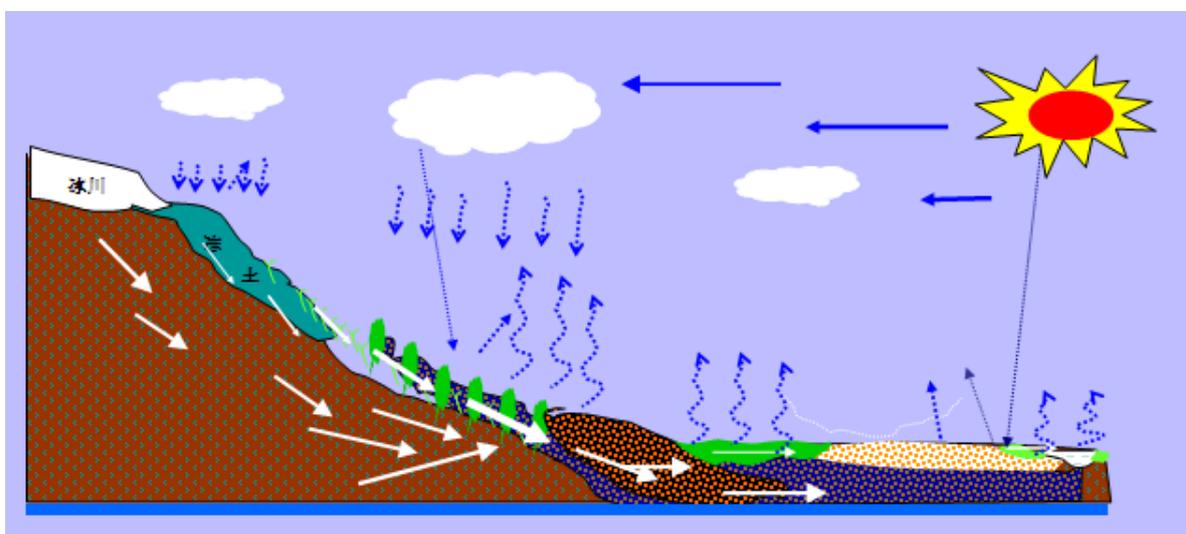


图 4.1 天然条件下石羊河流域水资源转化图

4.1 石羊河流域水资源转化特点

4.1.1 天然水循环条件下的水资源系统转化特点^[1,3]

天然水循环条件下，经山区基岩裂隙排泄通道排泄而来的地下水在河流出山之前几乎全部转化为地表水，自南向北经河道流出山外；出山后的地表水约有一半在流域中部盆地南部山前洪积扇群带渗漏补给地下水，盆地中部从洪积扇群边缘开始，地下水沿浅

切的河槽呈泉水大量溢出，通过河道向下游排泄，河流穿过低山丘陵区进入流域北部的民勤盆地，在此很少出漏泉水，河水一部分渗入洪积、冲积、湖积相的巨厚地层中，一部分消耗于蒸发，最后汇集于民勤北部青土湖。

4.1.2 基于人工干扰下水循环的水资源系统转化特点

流域灌溉农业的发展干预了天然水循环过程。河流在流出山后，基本上全部被水库拦蓄和引入渠道灌溉，引水渠和山水灌区在强透水的洪积扇带，地表水大量渗漏作为地下水，至中游山前洪积扇边缘又出露成泉，在这一过程中，由于人类活动及开采地下水，使转化关系更为复杂，地下水补给量的绝大部分是河川径流的重复，而引泉入渗和井灌回归却又是地下水的重复。各河流汇入石羊河后，穿过下游民勤地区及红崖山水库，地表水完全被水库控制，水量全部被用于农业灌溉，通过渠道、田间入渗再一次转化为地下水，最终耗于田间蒸发。近年来由于石羊河流域重点规划的实施，大多渠系都已采取砖石衬砌，没有衬砌的也在积极筹划当中，但正如李佩成院士在一篇文章中提出的一样，如果渠系全部防渗，同时又采用田间不发生渗漏的灌水技术，地下水将失去补给，试问在烈日炎炎的夏日，抗旱水源从何而来^[82]？同时李院士亦前瞻性的指出，倘若采取这种滴水不漏的灌溉实施，有可能带来灾难性的后果。本文作者根据自己在下游民勤的多年生活经历，亦深刻体会到，当地干渠和较大的支渠在采取防漏措施后，在极大地促进了水源节约的同时，也使渠系两边的树木和草木，大多死亡或濒于枯萎。

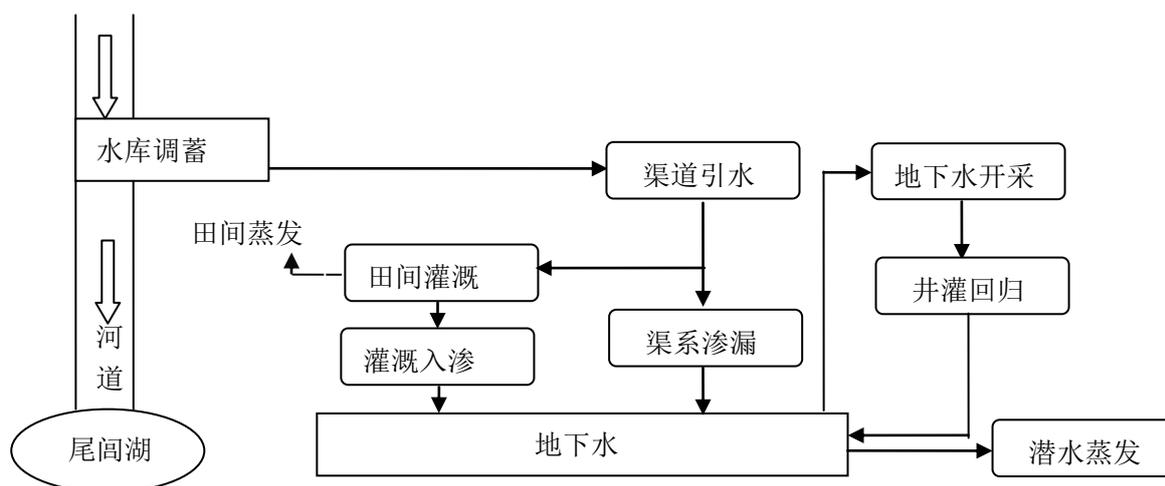


图 4.2 人类干扰下石羊河流域民勤地表水和地下水转化图

4.2 石羊河流域祁连山区水文生态效应研究

石羊河水系发源于祁连山东段冷龙岭北坡，现代冰川分布在海拔 4500m 以上，冰川

总数 141 条, 总面积 64.82km², 冰储量为 21.434 亿 m³。作为河西走廊生命线的祁连山区水文生态系统在截流降水、降水再分配、径流形成以及水资源稳定性方面起着十分重要的作用, 同时, 山区生态系统, 特别是水源涵养林对保持土壤水分和减少因无效蒸发造成的水资源损耗有着不可替代的作用。

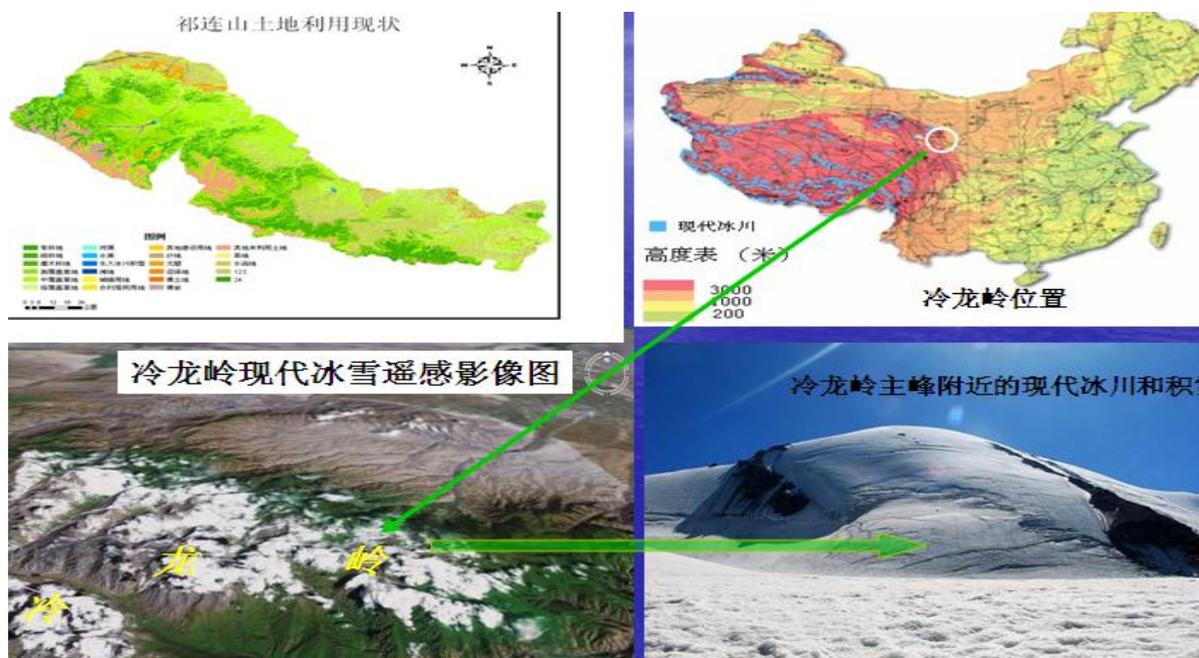


图 4.3 石羊河流域源头冷龙岭图

4.2.1 祁连山区水文生态环境变化分析

4.2.1.1 森林景观在历史时期的动态变化^[3, 36, 39, 85, 86]

祁连山的土壤和植被因气候差异而形成明显的垂直分布带, 就土壤而言, 灰褐土和亚高山灌丛草甸土是森林适宜生长的土壤。山地森林灰褐土分布在海拔 2400—3300m 地带, 是乔木林的主要分布带; 亚高山灌丛草甸土分布在海拔 3300—3900m 地带, 是湿性灌木林的主要分布带。据《河西志》记载, 祁连山在两千年前约有 9000 万亩生长茂密、浓荫遮日的天然森林。

前已述及, 自西汉河西建郡起, 祁连山地区天然植被开始受到破坏。有文献记载, 经营河西的赵充国在向汉宣帝的一篇奏折中说:“臣前部士入山, 伐材木大小六万余枚”, 一次砍伐林木即 6 万余株, 由此可见人类活动对植被的巨大破坏; 唐代由于佛教在河西地区的广泛传播, 大量木材消耗在建寺凿洞上; 及至明清, 随着河西人口的大量增加和大规模农业开发, 祁连山林草的破坏进一步加剧; 从清末至解放前夕, 人为而引起草原、森林着火事件相当频繁, 大片草木毁于火荒; 建国后至七十年代末, 祁连山地区又经历了一次破坏森林的高潮, 疏林、灌木、林地共减少了 41.69 万公顷; 20 世纪 80 年代以

后，由于祁连山国家级自然保护区的设立，森林面积减少得到遏制，森林年平均净增长率约 2.7%。

4.2.1.2 近 20a 祁连山区土地利用动态变化特征

甘肃省水利科学院解译了祁连山 1987-2006 年的遥感图像，如下是典型年的土地利用情况和土地覆盖格局。

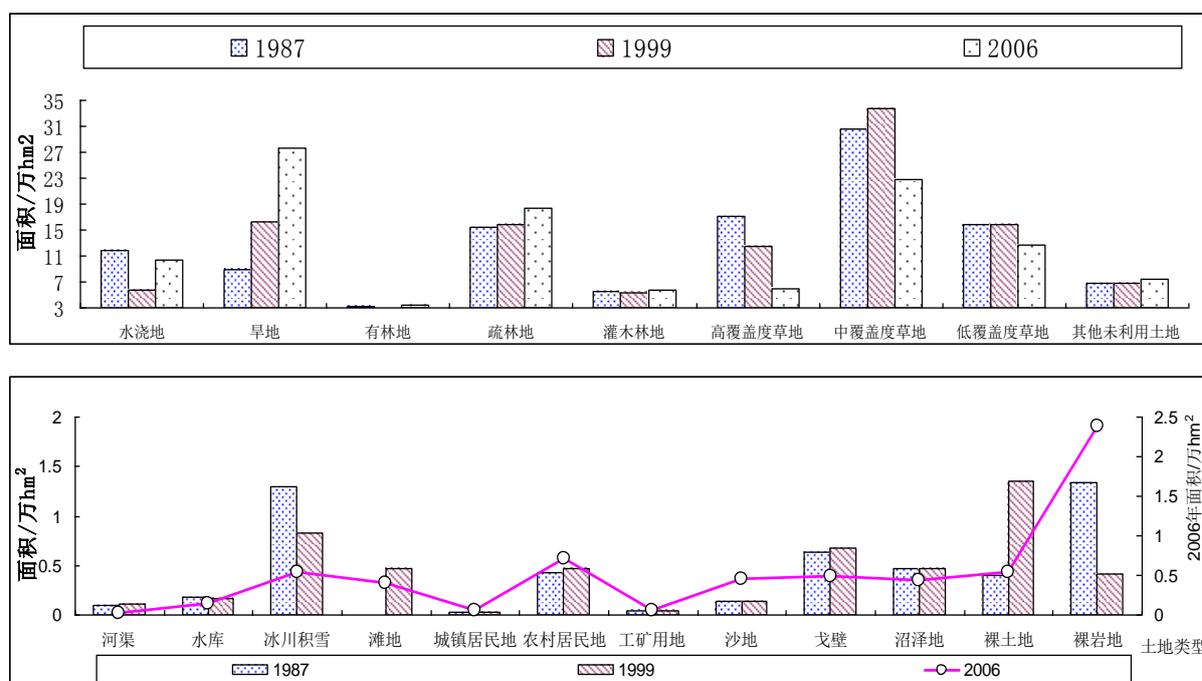


图 4.4 1987、1999 年和 2006 年土地利用变化趋势图

1987~1999 年，受到人类活动和当地气候等因素的影响，祁连山区耕地、林地、城镇、农村居民用地、沙地、戈壁等景观增加；高覆盖度草地、永久性冰川雪地等自然景观面积显著减小，有林地和水库面积略有减少；工矿用地和沼泽地面积维持稳定。自然景观在受天然降水稀少、草原载畜量的逐年提高以及气候变暖等因素的影响下，呈现高覆盖度草甸向低覆盖度草甸退化的趋势，同时在该区由于人类活动不断加强，人文景观逐渐增强。

1999~2006 年疏林地、农村居民用地和裸岩地面积显著增加；高覆盖度草地、永久性冰川雪地、滩地、戈壁呈明显减小趋势；城镇居民用地、工矿用地略有增加，但增加不明显；河渠、水库略有减小。出现这种的主要原因为西部大开发以来的退耕还林政策和祁连山水源涵养林核心区的保护力度加强。

祁连山区生态系统及其景观格局的变化，反映了人类活动强度的增加及其对水文生态系统胁迫的加剧，从而破坏了水文生态系统的正常功能作用，导致了石羊河流域上游

地区水文生态系统的退化。

4.2.2 祁连山区水资源的形成与消耗

祁连山区既是径流的形成区，也是水资源的耗散区，每年夏季消融的高山冰川径流成为众多河流的源头。祁连山地的降水经植被截留、地表径流和壤中流转化后，除部分消耗于蒸发和植被蒸腾外，其余形成降水径流和季节性积雪融水径流，并迅速汇集于河道，同时还有一部分降水和径流在山坡和河谷盆地入渗地下，随地形、地质条件变化出流进入河道。有资料分析了从山区的降水与径流的关系，降水除了形成径流以外，还要满足山地灌木、森林和草场生长的需水需求，其余的水量消耗于山区的蒸发。有研究表明^[36]：祁连山东段石羊河流域上游径流系数为 0.3~0.4，约 40%~50%的降水消耗于蒸发。

4.2.3 小结

祁连山地区自上世纪八十年代即开始封山育林，尤其是石羊河流域重点治理规划实施以后，人们不再把拯救民勤绿洲和保护上游祁连山水源孤立起来，正如李佩成院士在世纪之交的一篇文章中所说的一样，要把保护和营造绿色水库，视为保护和恢复水源的决定性措施加以实现^[83]。我们相信在流域重点治理规划思想的指导下，遵循三水统观统管等一些治水的基本方略，下游民勤盆地一定不会成为第二个“罗布泊”。

4.3 流域中下游水文生态效应研究

正如李佩成院士在第二届国际干旱半干旱地区水文生态与水安全论坛开幕式上所讲的一样：“对水文生态问题我们感知颇多，但却真知甚少。”由于水文生态正处于一个学科建设阶段，本文以石羊河流域为例，选取了该流域一些重要水文生态因子，并对其做了初步量化分析，通过对该区用水结构演变分析，为区域经济结构调整提供了一定依据。通过如下分析，力求能够较全面的反映该流域水文生态问题。

4.3.1 流域气温特征研究

近年来，围绕全球气候变化，特别是变暖问题，在世界范围内展开了激烈讨论，以气候变暖为前提条件的一系列论文纷纷出炉，李佩成院士及其团队，通过对中国大陆22个水文站点近60年（1951-2009年）的年均降水量和年均气温实测数据分析后认为：似乎得不出全球气候一直变暖的结论，作者同时又指出，在近10-20年来多处站点的气温确有增高趋势，但与此同时有些站点却也表现为下降趋势^[87]。就石羊河流域而言，有学者通过分析流域1951-2006年资料后指出，在此56年间石羊河流域气候正常（干或偏旱）长

达39a, 而湿润期只有16a, 干旱气候趋于显著^[88]。

4.3.1.1 流域极端最高气温和年平均最高气温的年际变化

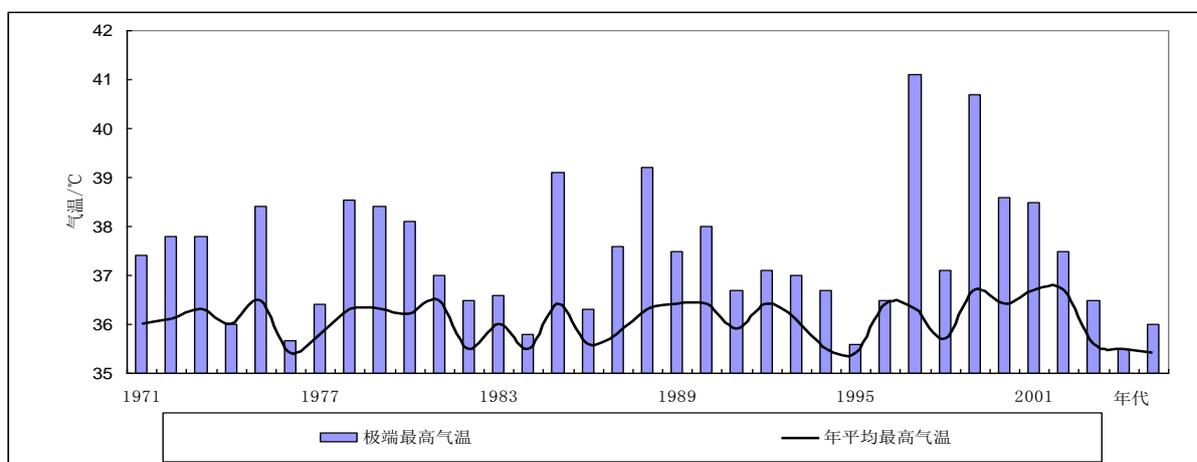


图4.5 1971-2005年石羊河流域(民勤站)高温强度的年际变化

高温作为石羊河流域的一种极端气候条件, 因其在春季易使瓜苗烫死、烫伤, 在夏季易使瓜果晒坏、晒伤, 成为该流域继沙尘暴后又一大灾害性气候。

通过对流域下游(民勤站)高强温度年际变化(图4.5)的分析可以看出, 极端气温在1995年之前相对比较平稳, 1996年之后, 在出现了几次短暂的极端高温后, 呈波动性下降的态势。其中极端最高气温出现在1997年和1999年, 分别达41.1°C和40.7°C; 而相对于极端最高气温, 年平均最高气温则更具统计学意义, 年平均最高气温在统计的年份中, 整体上波动稳定, 高温强度最强的年份是1999年, 达36.8°C, 2001~2002年为次强年, 达36.7°C, 说明世纪之交该区为高温强度最强的时段。

4.3.1.2 流域高温日数累计的年际变化

对农事活动而言, 持续的高温天气将对农业造成致命的危害。从图4.6中可以看出, 民勤的高温日数高于武威甚多, 主要原因在于民勤地势低, 且与巴丹吉林、腾格里沙漠接壤, 沙漠气候显著, 升温快, 干旱少雨, 因此造成了空间上不足百里却高温日数不同的气候格局。由测站资料可以观察到, 两站均表现出上下波动的趋势, 而以民勤站更为明显。在高温天气中尤以1974年、1987年和1999年为3个明显的高峰期, 民勤最多年份(1974年)高温日数达12天, 而同期武威仅为4天, 在35年观测资料中, 民勤高温最少年份(高温累计日数0天)仅2年, 而武威却达9年之多。

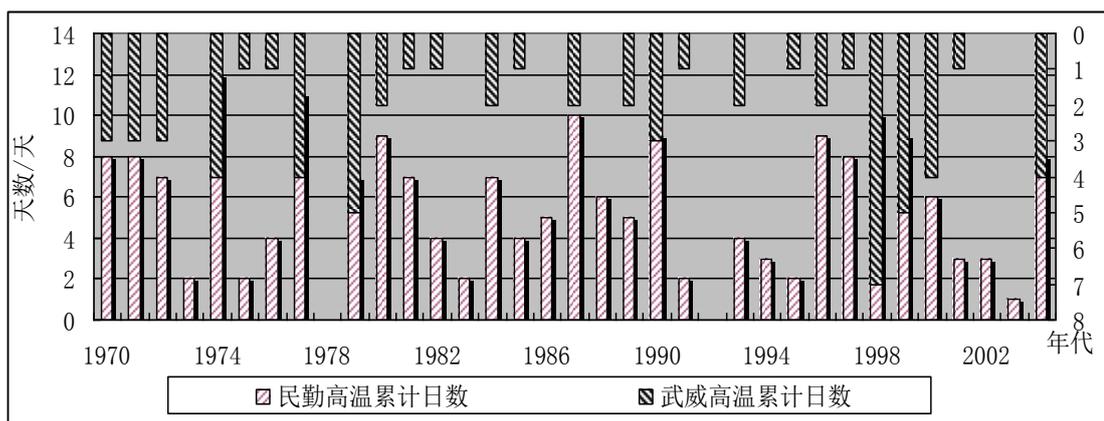


图4.6 1970-2004年流域高温日数累计对比图

4.3.1.3 流域气温趋势和变异分析

(1) 线性倾向分析:一般地, 某个气象站的气象要素时间序列可用一次直线方程或二次曲线方程就可满足^[89], 为分析简明计, 本文采用一次线性方程来描述气温和时间的函数:

$$y = at + b; \quad (4.1)$$

式中 t 为时间; a, b 为经验常数, 可用最小二乘法求得; a 表示气温变化倾向率 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$); a 值的符号反映 y 上升或下降的趋势, a 为正值, 表明是上升趋势, 反之亦然。

(2) 滑动平均趋势性分析:滑动平均法是一种平滑和滤波的数据处理方法, 通过平均方式, 消除统计序列中的随机波动, 用平均值来显示时间序列的变化趋势^[90,91]。数学表达式如下:

$$y_t = \frac{1}{2k+1} \sum_{i=-k}^k x_{t+i} \quad (4.2)$$

式中 x_1, x_2, \dots, x_t 为时间序列; y_t 为 t 点的滑动平均值; k 为单侧平滑时距 (点数), 若 $k=1, 3$, 则 y_t 为3点、5点滑动平均。

(3) 距平及距平累计:距平算法是某一系列数值中的某一个数值与平均值的差, 分正距平和负距平, 其距平图可以比较直观的观察出该值较之长序列均值的波动情况。对于序

列 x_1, x_2, \dots, x_n , 距平 $\hat{x}_t = x_t - \bar{x}$, 其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;

累积距平算法:累积距平^[92] 是一种常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法。对于上述序列, 其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$\hat{y}_t = \sum_{t=1}^t \hat{x}_t \quad (4.3)$$

将 t 个时刻的累积距平全部算出，即可绘出累积距平曲线进行趋势分析。

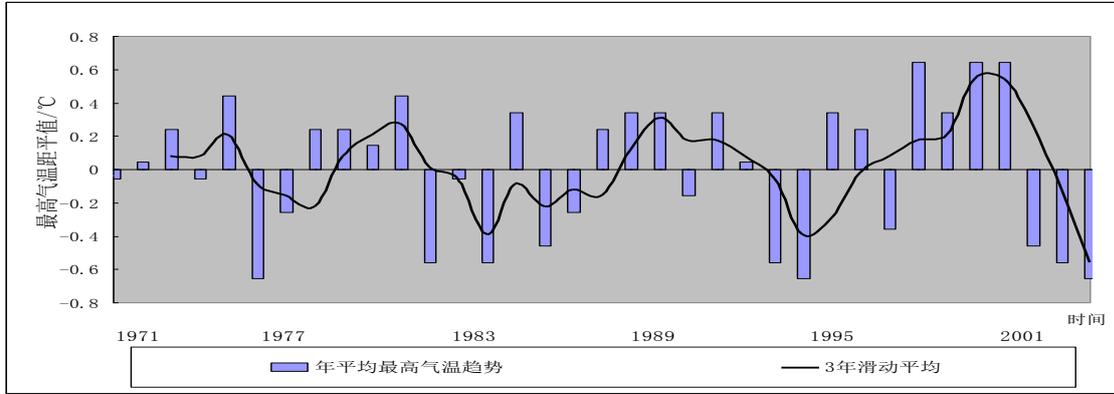


图4.7 1971-2005石羊河流域（民勤）年均最高气温变化趋势及3年滑动平均

图4.7可以看出，近35年来其年平均最高气温在冷暖期来回波动，总体上暖期时间较长。在整个70年代表现为暖冷交替，在80年代以负距平为主，这一时段为较冷时期；在90年代以后，又出现暖-冷-暖交替阶段。从3年滑动平均分析来看，民勤年最高气温变化存在3个相对较大的波峰和波谷，在1995年达到最低值，在2001年达到最高点，这也显示出世纪之交该区最高温度呈现出较大的波动性。

由图4-8可知，1952-2004年，石羊河流域（武威区）在54年来年平均气温整体上升态势较为明显，线性拟合率为 $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($r=0.547 > r_{0.001}=0.465$)。武威气象站在1956-1978年间年平均气温波动幅度偏大，在此期间正负距均皆有，但以负距为最多，50年代温度呈上升趋势，在60年代温度保持基本保持平稳后，70年代温度又开始下降，在70年代后大致经历了暖-冷-暖的变化过程，之后气温逐渐上升，至2001年年平均气温统计量达到正值。该结果同我国西北地区乃至整个北方地区气温上升情况基本一致^[88]。

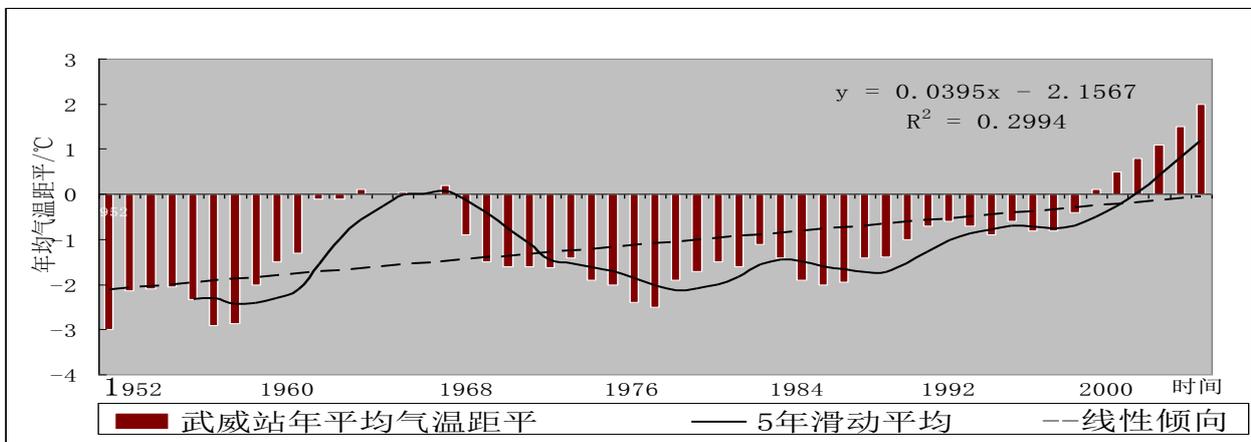


图4.8 1952-2004年石羊河流域（武威站）年均气温距平趋势

4.3.2 流域特有的气候特征—沙尘暴

4.3.2.1 流域沙尘天气基本情况

研究石羊河流域的水文生态，却忽视沙尘暴的存在，这不能不说是对该流域还没有进行深入的了解。沙尘天气是我国北方,特别是西北地区春季较为常见的一种灾害性天气现象，可划分为如下几个等级^[93]，见表 4.1。有资料显示^[94-95]：我国的阿拉善高原，鄂尔多斯高原及河西走廊的大部分地区是强沙尘暴的主要多发区，在统计资料的范围内，民勤成为我国名副其实的最大沙尘暴发源地。石羊河流域作为农业为主的地区，尤其是春夏两季的大风沙暴天气给农业经济的发展带来了严重危害。

表 4.1 沙尘天气分级情况

类型	特征、瞬时极大风速	天空状况	水平能见度
浮尘	无风或平均风速 $\leq 3\text{m/s}$	尘沙浮游在空中	$< 10\text{km}$
扬沙	风将地面尘沙吹起，4—6级	空气相当浑浊	$1\sim 10\text{km}$
沙尘暴	强风将地面尘沙吹起，6—8级	空气很浑浊	$< 1\text{km}$
强沙尘暴	大风将地面尘沙吹起， ≥ 8 级	空气非常浑浊	$< 500\text{m}$
特强沙尘暴	狂风将地面尘沙吹起， ≥ 10 级	空气特别浑浊	$< 50\text{m}$

民勤地区沙尘暴的频繁发生与当地的地表特征和其所处的地理位置密切相关。河西走廊的民勤位于我国寒潮南下必经要道的中心路线上，民勤周边沙漠广泛分布且大多裸露，易形成以沙漠为中心的高温低压区，与西伯利亚向东南方向扩散的冷高压形成明显的气压梯度。沙尘暴的主风向以NW、WNW为主，与该路径上的寒潮方向完全一致。

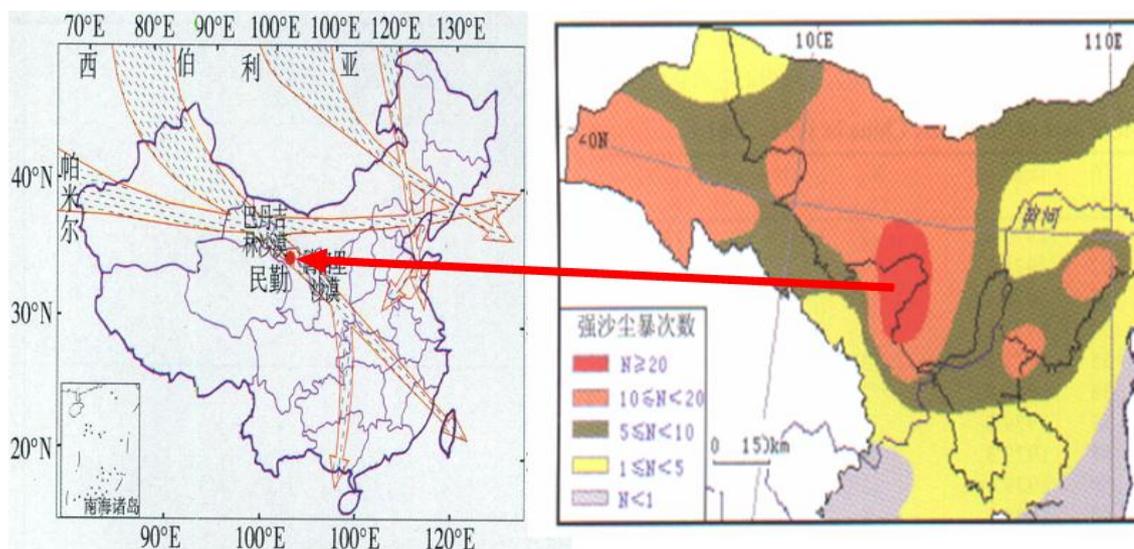


图4.9 1954-2001年群发性沙尘暴的地理分布

4.3.2.2 流域沙尘暴变化分析

4.3.2.2.1 流域多年春季沙尘暴的突变检验

由于沙尘暴对农事活动的影响，以春季为最，且西北地区集中于春季（3-5月）的强沙尘暴占全年沙尘暴总数的78.8%^[94]，因此有必要对站点春季沙尘暴发生频次均值突变进行量化分析。

滑动 t 检验是通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变的一种统计方法，其在水文序列对均值变异类序列检验中效果明显^[96]；对某一时间序列的两段子序列，在假设它们所服从的正态母体方差相等的条件下，如果它们的均值差异（用统计量 t 来度量）超过了一定的显著性水平 α ，则可以认为两均值发生了突变。

对于具有 n 个样本量的时间序列 $(X_i, i=1,2,\dots,n)$ ，选择某一时刻为基准点，基准点前后的两段子序列 X_1, X_2 的样本数分别为 n_1, n_2 （一般取 $n_1 = n_2$ ），两段子序列平均值为 \bar{X}_1 和 \bar{X}_2 ，方差为 s_1 和 s_2 。定义统计量为^[96-97, 101]：
$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$
，其中 $s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ ，

则 t 服从自由度为 $n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。

在显著性水平 $\alpha=0.01, t=3.36$ 下，利用滑动 t 检验法检测了上述敦煌、武威、民勤3站1958-2008年春季沙尘暴发生频率序列。3站点在51年的序列中，春季沙尘暴发生频率在99%的显著性水平上共出现了4次突变，其中在河西走廊西端的敦煌站未检测出均值发生突变，这与沙尘频率趋势图的直观分析基本吻合；均值突变主要存在于走廊中东部的石羊河流域，武威站升高、降低突变均存在，表明沙尘暴发生频率呈波动式变化；就年际变化来看，升高突变年份集中在20世纪60年代末期；降低突变年份主要出现在1983年及2002年前后，说明石羊河流域中上游在上世纪80年代前期及世纪之交，由于种种原因，沙尘暴均值出现过从多到少的跃变；民勤盆地的均值突变不甚明显，其在80年代的均值突变降低和武威大约出现在同一时期。在突变强度方面，总的均值降低突变强度大于升高突变，也说明频率均值大部分呈波动式下降的趋势，这与学术界的一些研究是吻合的^[98]。

表4.2 3站点1958-2008年均值突变点

观测点	均值升高突变点	均值降低突变点
敦煌	无	无
武威	1969/1970	1983/1984, 2002/2003
民勤	无	1987/1988

4.3.2.2.2 沙尘暴时际变化分析

据民勤治沙站的统计显示,在有资料统计的1998-2006年,83%的沙尘暴多发生在白天(8:00-20:00),其中开始于10:00-12:00的沙尘暴(共20次)最多,站统计总数的20%,开始于8:00-10:00以前的(13次),占统计总数的13%,9年间在0:00-6:00,几乎没有出现过沙尘暴,无怪乎当地流传着黄风(沙尘暴)怕日落的谚语。

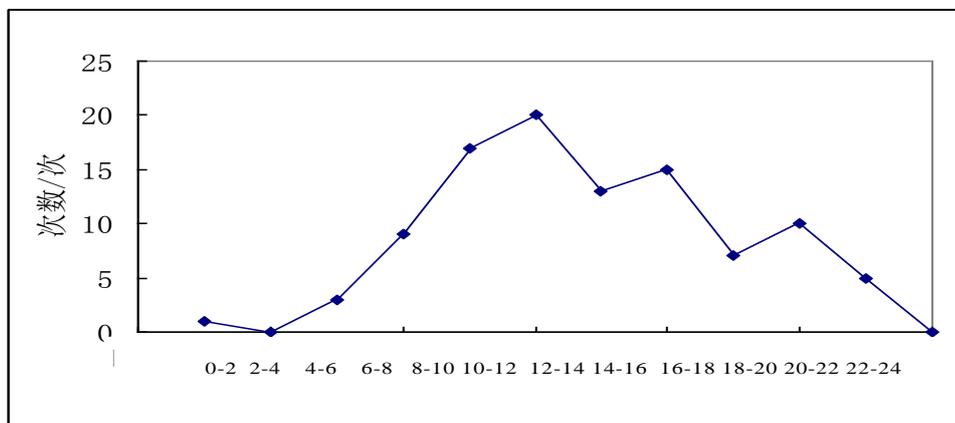


图4.10 1998-2006年民勤沙尘暴发生时间统计图

4.3.2.2.3 沙尘暴与土壤表层湿度的研究初探

造成沙尘暴爆发的原因是多方面的,其形成的天气气候背景、动力热力条件等目前已有较多的研究,笔者以成长的自身体会,认为表层土壤湿度对起沙是有一定影响的。由于本文资料的所限,因此这里只能以武威农技中心 1991-2003 年,13 年春季观测资料为代表,讨论 0~10cm 表层土壤湿度的变化与沙尘暴爆发之间的可能关系。

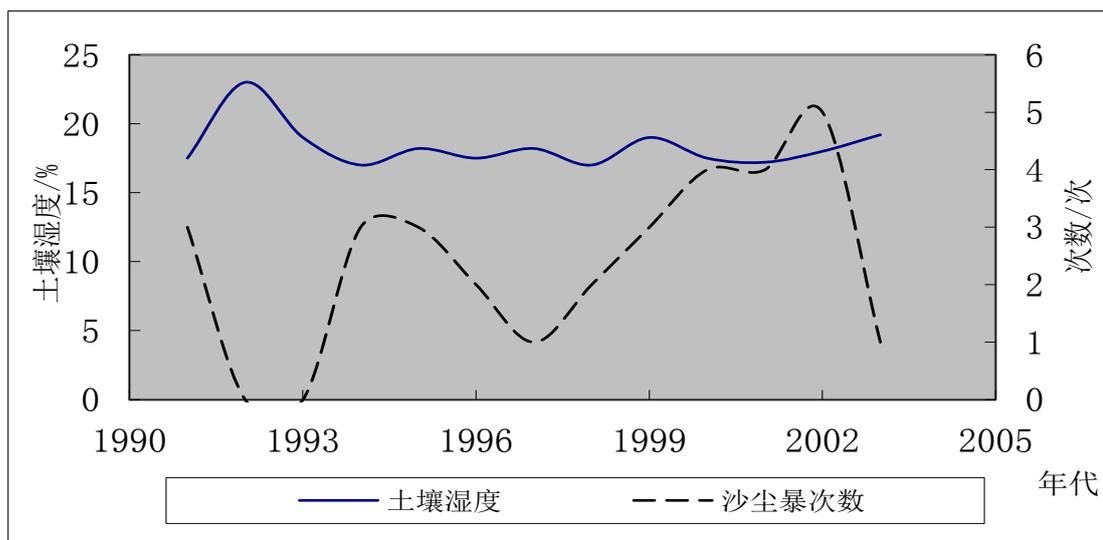


图4.11 春季武威土壤湿度与沙尘出现次数图

由图4-11可知1992~2003 年土壤湿度与沙尘暴的出现次数变化趋势相反,相关系数达到了-0.64,这表明春季雨水越多,土壤湿度相对越大,则该地区沙尘暴爆发的次数

相对越少,这与有关学者对我国东部地区的土壤湿度研究后,所得出的地表水分的减小,使得土壤容易沙化,从而有利于沙尘扬起的结论吻合^[98]。

4.3.3 流域降水与蒸发的水文生态效应研究

4.3.3.1 流域下游降水与蒸发的趋势和变异分析

(1) 差积曲线方法

在分析水循环要素多年变化规律时,常使用差积曲线方法^[100],差积曲线也称距平累积曲线,表达式前已叙及。曲线上一个完整的上升段表示一个丰水期,一个完整的下降段表示一个枯水期。

在1953-2003年近51年的降水资料中,盆地多年平均降雨量为113.3mm,年最大降水量为202mm(1994年),最小降水为38.6mm,降水整体呈上升趋势,线性拟合率为2.4mm/10a(相关系数 $r=0.182$);通过3年滑动平均分析知(见图4.12),降水量在51年间呈波动趋势,整体上出现了5个相对较大的波谷和3次相对较大的波峰,以1970年、1979年,1994年左右为降水最大期;据多年资料显示该区降水主要集中在6-9月,占降水总量的80%,此季度降水多以雷阵雨的形式,对地下水形不成有效补给,对盆地农作物灌溉亦作用不大。在49年的蒸发资料统计中,年平均蒸发量2643.7mm,是降水的20多倍,该区蒸发量变化不甚明显,线性拟合增率为0.98mm/10a,在60年代初期蒸发量相对较大而集中,70年代之后,蒸发量趋于减少,之后呈现出波动变化的趋势,蒸发对地下水矿化度的提高和土壤盐渍化起到了推动作用,盆地下游湖区多盐碱地,只有少量耐碱植被存在。

(2) 秩检验法^[96,102]

秩检验法是通常是将一个序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 分成了 (x_1, x_2, \dots, x_r) $(x_{r+1}, x_{r+2}, \dots, x_n)$ 两个序列,其中序列中样本个数较小者为 n_1 ,较大者为 n_2 , $n_1 < n_2$ 再由 n_1, n_2 ,得出秩统计量 U ;

$$U = \frac{W - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2}{\sqrt{n_1 n_2 (n_1 n_2 + 1)/12}}$$
; 式中 W 为 n_1 中各数值的秩之和,即将原序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 按从小到大

大排序,然后把序列 (x_1, x_2, \dots, x_r) 在原序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 对应的秩相加就可以得到 W 值。 U 服

从标准正态分布,若 $|U| < U_{0.05/2} = 1.96$,表明变异点不显著;否则,表明变异点显著。

(3) 差积曲线—秩检验联合识别法

根据差积曲线和秩检验的特点,差积曲线—秩检验联合识别法的主要过程是:

I) 变异点的初步识别:在差积曲线图上找出差积最大和最小值,然后假设最大值 r_1 和

最小值 r_2 所对应的横坐标为可能是变异点。

II) 变异点的精确识别: 对初步识别得到的变异点 r_1, r_2 , 再利用秩检验法进行精确识别。

以 r_1 得出 U 后, 当 $|U| > U_{0.05/2} = 1.96$ 时, 则该点是序列的变异点, 反之则不是变异点。当 r_1 被检验后, 再继续检验 r_2 。

按照差积曲线-秩检验联合识别法对流域(民勤)蒸发、降水序列进行分析, 结果如图 4.13 所示, 可以看出降水最大值和最小值点分别在 1958 年和 1967 年, 因此可假设 1958 年和 1967 年是变异点, 变异点 1958 年将整个序列分为 1953 年-1958 年和 1959-2003 年两个序列; 变异点 1967 年将序列分为 1953 年-1967 年和 1968 年-2003 年两个序列。通过秩检验法对 1958 年和 1967 年两个变异点进行检验。1958 年的 $U = 3.26 > 1.96$, 表明了 1958 年是降水序列的变异点。同理经检测, 在 95% 的置信度下, 蒸发量的突变不甚显著。检验结果见表 4.3。

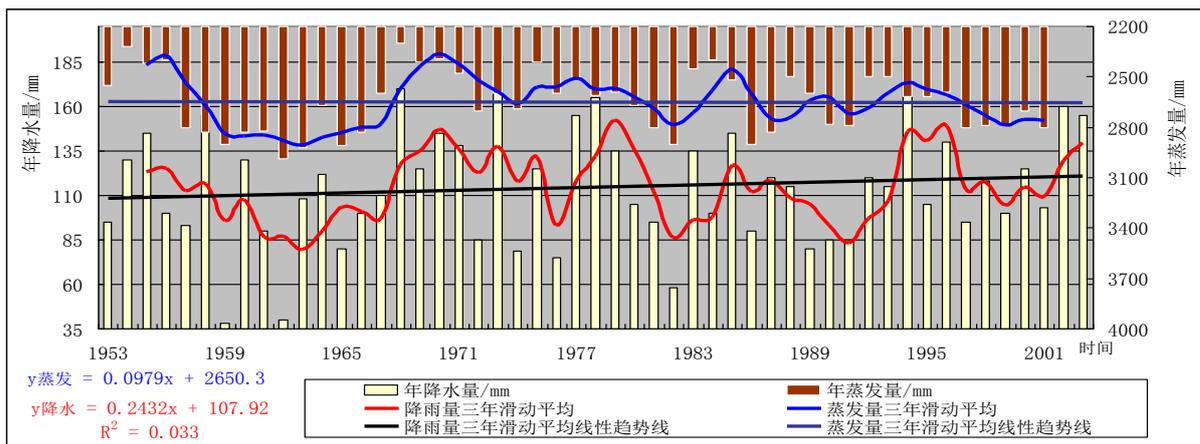


图4.12 民勤盆地1953-2003年蒸发、降水量及三年滑动平均趋势图

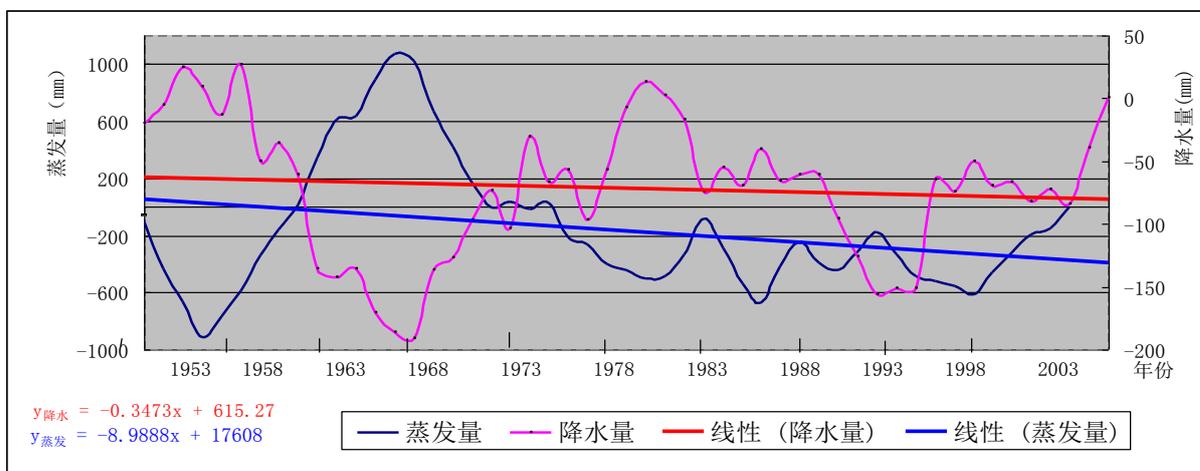


图4.13 石羊河流域(民勤站)蒸发量、降水量差积曲线

由图4.14可知，1953-1958年和1959-2003年两个序列中均值变化较为明显，在1953-1958年前，降水均值为119.17mm，1959-2003年降水年均值为112.55mm，两者相差6.62mm，降幅为5.9%，这对一个多年降水均值为113.3mm的内陆盆地，虽只有不到10mm的降水，但仍对当地水文生态有积极的作用。

表4.3 变异点分析结果

	可能变异点	统计量 U	显著性	是否变异点
降水量	1958 年	3.26	显著	是
	1967 年	0.197	不显著	不是
蒸发量	1966 年	0.6197	不显著	不是
	1956 年	1.68	不显著	不是

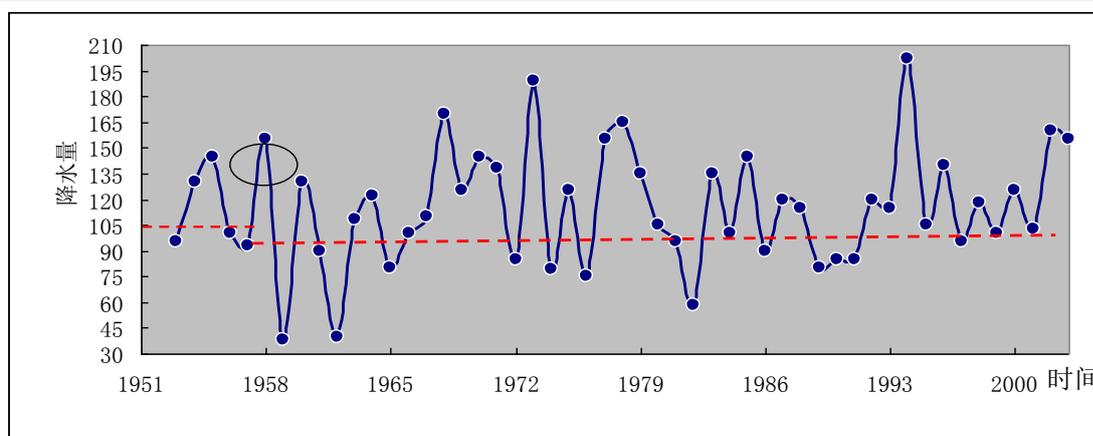


图4.14 石羊河流域（民勤站）年降水量变异点前后均值

4.3.4 流域径流量变化基本特征

4.3.4.1 河西三大内陆河径流量距平百分率趋势分析

根据甘肃省水文水资源勘测局的资料显示，甘肃河西三大内陆河径流量年内分配很不均匀，汛期（5-9月）径流量集中了全年径流量的75%左右，而石羊河则高达80%以上。三大内陆河中由于冬春季节冰雪消融对疏勒河和黑河的补给要多于石羊河，故冬春季石羊河的稳定性最差，而夏末秋初疏勒河的稳定性比黑河和石羊河的要更差一些。据有关资料显示：祁连山高山冰雪消融对河西3条内陆河径流量的补充由西向东减少，疏勒河占到28.5%，黑河占到8.3%，石羊河仅占3.8%^[103]。

表4.4 河西内陆河主要河流各年代年平均径流量(10^8m^3)^[104]

流域名称	河名	站名	年代					
			1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2001-2004
疏勒河	昌马河	昌马堡	24.5	25.9	27.8	29.2	29.7	37.4
黑河	黑河	莺落峡	52.6	45.8	45.6	55.3	49.8	50.2
石羊河	西营河	九条岭	12.1	10.4	10.1	10.6	8.6	10.4

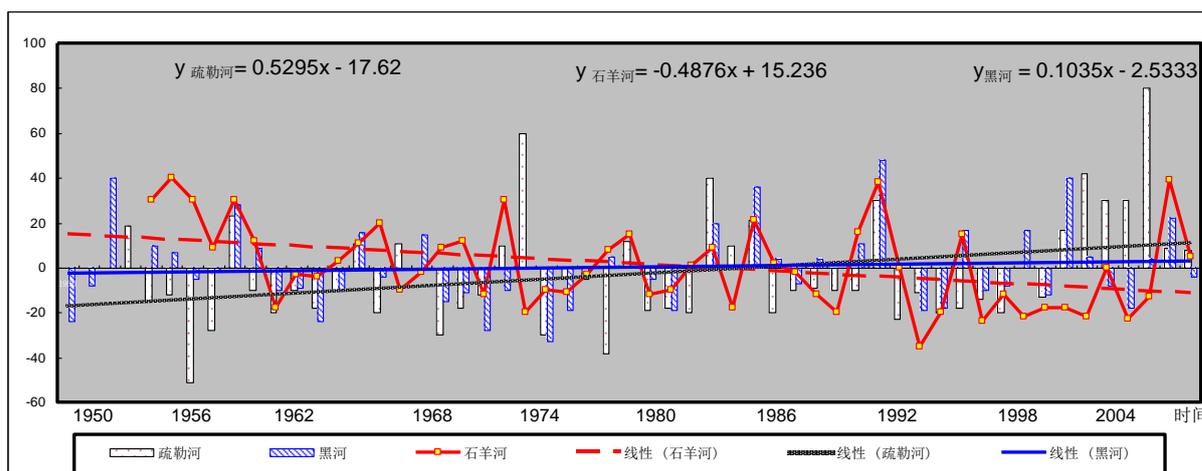


图4.15 河西三大内陆河径流量距平百分率历史趋势图

距平百分率作为反映某一时期序列值与同期平均状态偏离程度的物理量，在气象学上应用广泛。发源于祁连山西段的疏勒河，在1953年-2004年52年来，其出山口水文站年径流量呈较显著的增加趋势，其中年径流量距平百分率递增率为5.3/10a,发源于祁连山中段的黑河，在1950-2004年，55年的出山口水文站年平均径流量较之疏勒河只呈略微增加的趋势，径流量距平百分率为1.04/10a, 而发源于祁连山东段的石羊河，在50年来其出山口九条岭水文站年均径流量却呈显著减少趋势，年径流量距平百分率递减率为4.88/10a。从各年代来看，三大内陆河中疏勒河50年代年径流量最小，之后逐次递增，在2001-2004年平均径流量比90年代增加了26%，黑河流域在上世纪60s和70s，径流量最小，在80年代径流量达到最大后，在短暂的下降后又逐渐回升；石羊河流域在观测年份总体呈下降趋势，其中50s年代径流量最高，之后逐渐降低，90s为最低时期，在此之后21世纪又有了一个短暂的回升。

4.3.4.2 石羊河流域径流的分析

4.3.4.2.1 小波简述^[105-108]

小波分析是上世纪 80 年代发展起来的一种信号时间-尺度分析方法,也称为多分辨率分析,是傅里叶分析发展史上的重大突破^[108], 它的思想来源于伸缩和平移方法,是将一般的函数(信号)表示为规范正交小波基(其中每个基函数对应各自不同的频率)的线性叠加,从而将对原来的函数(在时域和频域)的研究转化为对这个叠加的权系数,即小波变换的研究,其核心内容是小波变换。由于小波分析特别适合将隐含在时间序列中各种随时间变化的周期振荡清楚地显现出来,因而在水文领域得到了广泛应用。

(1)小波函数

小波函数可定义为：设 $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ， $L^2(\mathbf{R})$ 表示平方可积的实数空间，即能量有限的信号空间。若其傅立叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许条件：

$$C_\psi = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (4.4)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数。将小波母函数进行伸缩和平移变换，得到连续小波 $\psi_{a,b}(t)$ 。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbf{R} \text{ 且 } a > 0 \quad (4.5)$$

其中 a 为尺度因子，决定小波周期； b 为平移因子，反映小波在时间上的平移。

不失一般性，小波分析常采用 Morlet 小波作为小波母函数进行小波变换，Morlet 小波的基本形式为：

$$\psi(t) = e^{ict} \left(e^{-\frac{t^2}{2}} - \sqrt{2} e^{-\frac{c^2}{4}} e^{-t^2} \right) \quad (4.6)$$

Morlet 小波函数的伸缩尺度 a 与傅里叶分析中的周期 T 有一一对应关系。

$$T = \left[\frac{4\pi}{c + \sqrt{2+c^2}} \right] a = 1.144a \quad (4.7)$$

将时间域上的所有小波系数的平方积分，即小波方差：

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (4.8)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程称为小波方差图，它反映了波动的能量随尺度的分布，借此可能确定一个时间序列中存在的主要时间尺度，可以用来分析序列变化的主要周期成分。

(2) 小波变换:具有有限能量的函数 $f(t)$ 的连续小波变换定义为：

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4.9)$$

其中 $\bar{\psi}$ 为 ψ 的复共轭函数， $W_f(a,b)$ 称为小波变换系数。在实际应用中，信号 $f(t)$ 通常都为离散序列，为方便处理，相应的小波变换表示为离散小波变换：

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \overline{\psi\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right)} \quad (4.10)$$

(3)小波的分解与重构

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 我们可以将它分解成低频部分 $a1$ 和 高频部分 $d1$, 然后把低频部分 $a1$ 进一步分解, 如此重复就可以得到任意尺度(或分辨率)上的高频部分和低频部分, 对低频成分和高频成分进行分析, 便可以识别水文时间序列的变化特性, 如趋势、随机、周期等。

水文序列低频部分代表着水文序列的趋势, 随着尺度的增加, 时间分辨率降低, 水文序列的这种发展趋势将更加明显, 同时由于序列本身的特性, 只要进行有限尺度的多分辨率分析, 剩余低频系数就可以比较明显地反映水文时间序列的趋势而又不失代表性^[107,109]。

4.3.4.2.2 石羊河流域径流量趋势的小波分析

如前所述, 选用 db3 小波函数, 对石羊河流域 1954-2004 年径流量距平施行 Mallat 算法快速分解, 得到不同尺度下的尺度系数, 将它们分别进行重构, 获得对应尺度下的低频序列, 由于低频序列可以比较明显的反映水文序列的趋势, 故在此尺度下, 我们可以比较明显的看出变量在时间序列下的趋势情况。

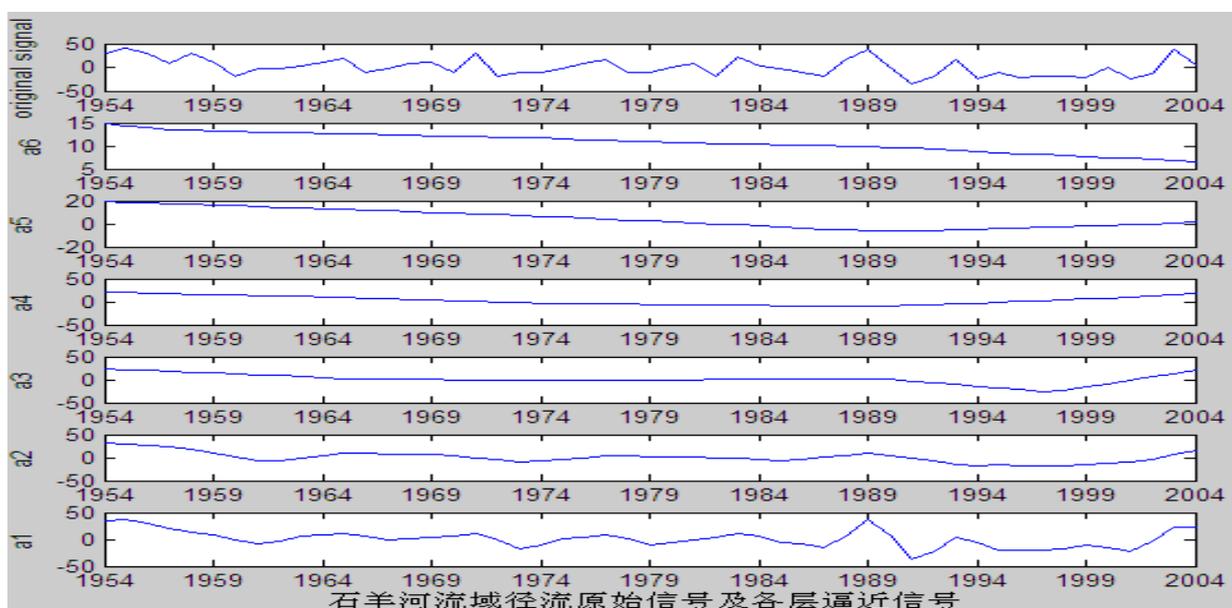


图 4.16 石羊河流域径流量距平原始信号及各层逼近信号

如图 4.16 所示, 原始信号来回波动, 在常规判断下, 无法得出其变化趋势。小波函数当分解到第 5 层时, 径流量在 90 年代以前(1989 年)之前一直呈下降趋势, 90 年代以后变化相对平稳, 无明显趋势; 当分解到第 6 层时, 径流量在整个时段呈现出下降的趋

势，此结论简洁直观，与上文分析吻合的很好。

4.3.4.2.3 石羊河流域径流量突变及周期分析

选用 Morlet 小波，对石羊河流域主要河流西营河九条岭站 1954~2004 年径流距平百分率序列施行小波分解，进行多时间尺度分析。

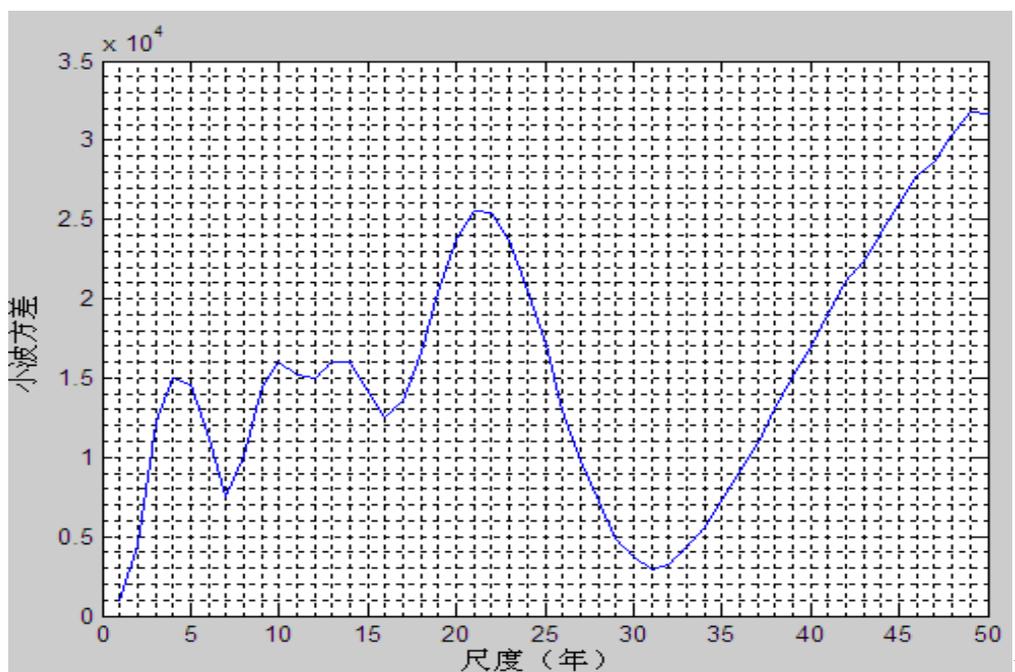


图4.17 九条岭站径流量距平小波方差图

小波方差图 4.17,反映了能量随尺度的分布,可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度,用以反映时间序列的主要周期。图显示了径流量小波方差在 51 年的尺度范围内,存在着以 21 年尺度为第一峰值的主周期,说明石羊河流域径流量在 21 年左右的周期上振荡最强;第二主周期 13 年或 10 年的小波方差相等,可以把他们看做一个周期。在四年尺度上,第三周期已不是很明显了。

由图4.18可知,在21年时间尺度来看,在51年的时间序列中,西营河经历了丰-枯-丰-枯四个历史阶段,在经历了2004年这个相对较丰的时期后,在2010年左右西营河将迎来一个相对较枯的时期,在历史时期内期间径流量在1964年,1978年,1990,2003年发生了突变;在13年的周期尺度上,径流的突变点有6个之多,可以预见在此尺度上未来径流量将由丰向枯转化。4年周期由于已处在第三主周期,其周期振荡已不太强,不过对不同尺度下所对周期的分析均可得出与上述分析相同的结论,这与甘肃省2009年水资源公报上所显示的该河正处在相对偏枯的结论是相符合的^[145]。

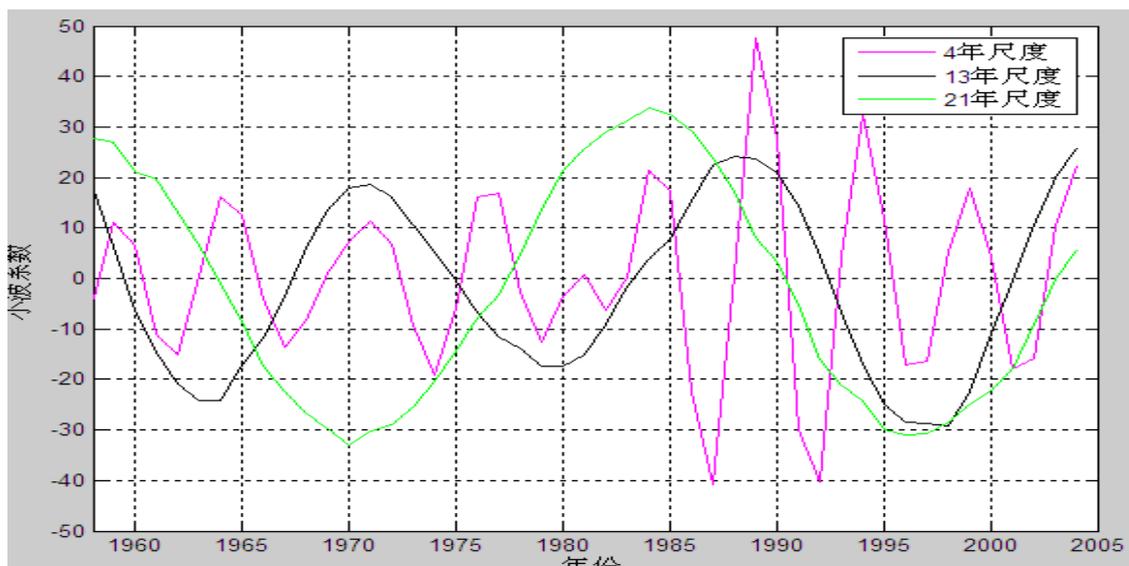


图4.18 九条岭站径流量主周期小波系数变化曲线

不同时间尺度下的小波系数，可以反映系统在该时间尺度的变化特征：正的小波系数对应于偏多期，负的小波系数对应于偏少期，小波系数为零对应着突变点；小波系数绝对值越大，表明该时间尺度变化越显著。从小波系数等值线图 4.19 中也可以看出不同尺度下的丰枯位相结构，据此即可判断径流点变异点出现的年份。在 21 年时间尺度上周期震荡非常显著，年径流量经历了丰-枯-丰-枯四个交替循环；具体表现为：1955~1964 年偏丰，震荡核心不明显；1965~1976 年偏枯，震荡核心为 1970 年；1977~1990 年偏丰，震荡核心为 1984 年；1991~2004 年偏枯，震荡核心为 1997 年，21 年尺度的周期变化表现的非常稳定，具有全域性。从 13 年时间尺度上来看，该河年径流量正处在以 2005 年为振荡核心的偏丰时期。这与有关学者应用 Kandell 秩次相关检验和 R/S 分析对石羊河流域出山口径流的分析是一致的^[110]。

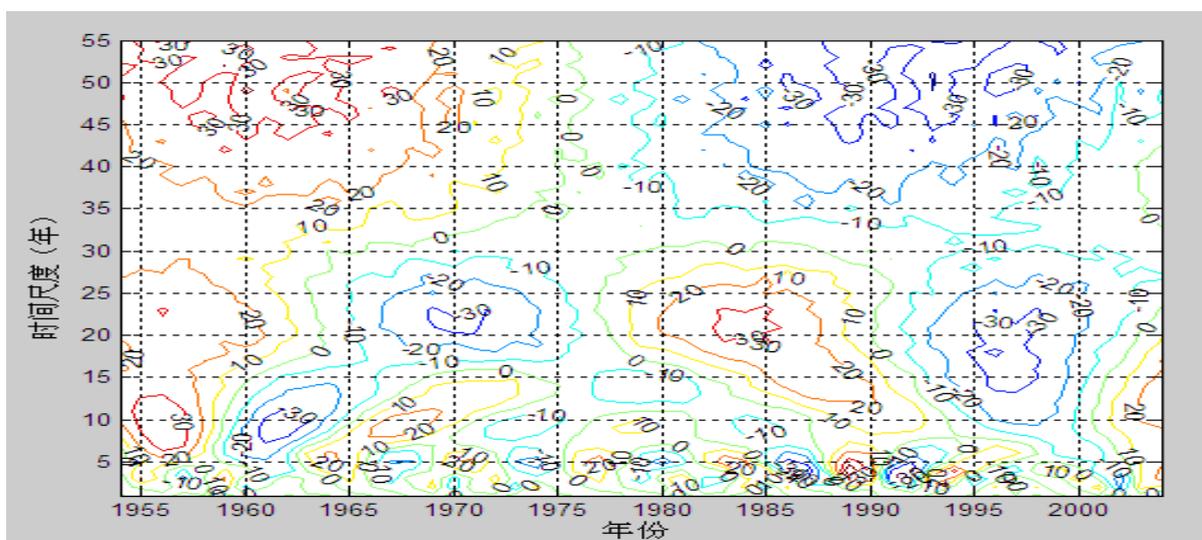


图4.19 九条岭站径流量距平小波系数等值线图

4.3.5 流域下游地下水位动态变化分析

4.3.5.1 年际变化

对于干旱区的下游民勤盆地来说,有限的降水难以对地下水位形成有效补给。本文选取了民勤县 1990~2007 年地下水水位长观资料,分析结果表明绿洲区地下水位普遍呈严重下降趋势。18 年间坝区(民勤县上游,靠近红崖山水库)地下水位累计下降 4.83m,下降速度为 0.27m/a;泉山区(民勤县中下游)下降 10.45m,下降速度为 0.58m/a;湖区(石羊河流域尾闾)下降 23.63m,下降速度为 1.31m/a。

由图 4.20 可以看出,民勤绿洲地下水位正在加速下降中,用水矛盾非常突出,若不采取果断措施(2007 年流域重点治理规划通过),将进一步导致水文生态的恶化。

4.3.5.2 空间变化

由前述分析可知,民勤绿洲地下水位整体下降(图 4.21),但坝区、泉山区、湖区因受地理位置、灌溉方式、种植作物等因素的不同影响,地下水位下降程度各不相同。从空间位置来看,下游湖区地下水位下降幅度最大,泉山区次之,上游坝区相对较小。就其原因,可能是坝区和泉山区距红崖山水库最近,相应得到的地表水补给量也较大,地下水下降变化幅度相对较小;而湖区由于远离红崖山水库,地表水来源非常有限,农业生产主要依靠大量开采地下水,地下水位下降幅度最大。从图 4.22 可以看出,1997 年以前,湖区地下水位虽然已呈现出下降趋势,但下降幅度较小,这主要是由于那时在冬春灌期间还有一定数量的地表水进入湖区,进入湖区的主干渠系尚未完全衬砌,某种程度上对地下水有一定的补给作用,但到了 1997 年以后,由于通过红崖山水库进入湖区的地表水越来越少,为了满足农业灌溉及居民生活用水,不得不大量开采地下水,使地下水得不到河流的有效补给,花了大力气去推进渠系的改造,却没能搞好节水与养水的关系^[111],造成地下水位急剧下降,至 2007 年,湖区部分地区地下水埋深已经接近 30m。

4.3.5.3 地下水位年内变化

图 4.22 为 2007 年绿洲各分区地下水位年内变化趋势。从图中可以看出,井、河水混灌的坝区和泉山区地下水位在年内变化相对稳定,而以井灌为主的湖区地下水位年内变化十分剧烈。每年 3-9 月是主要的灌溉期,湖区由于大量抽取地下水,3 月份开始地下水位大幅度下降,随着 9 月份灌溉期的结束,地下水位开始慢慢回升,至 11 月份已基本接近年初的水位。

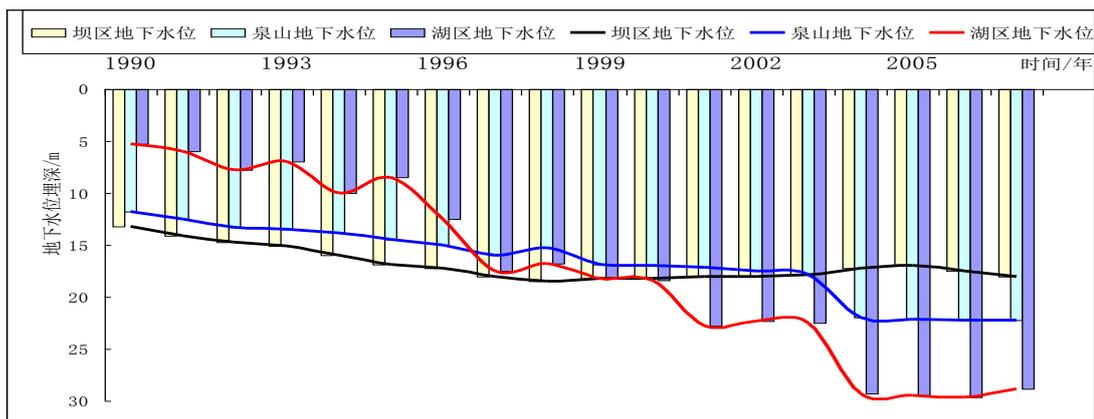


图 4.20 民勤绿洲各区地下水埋深变化图

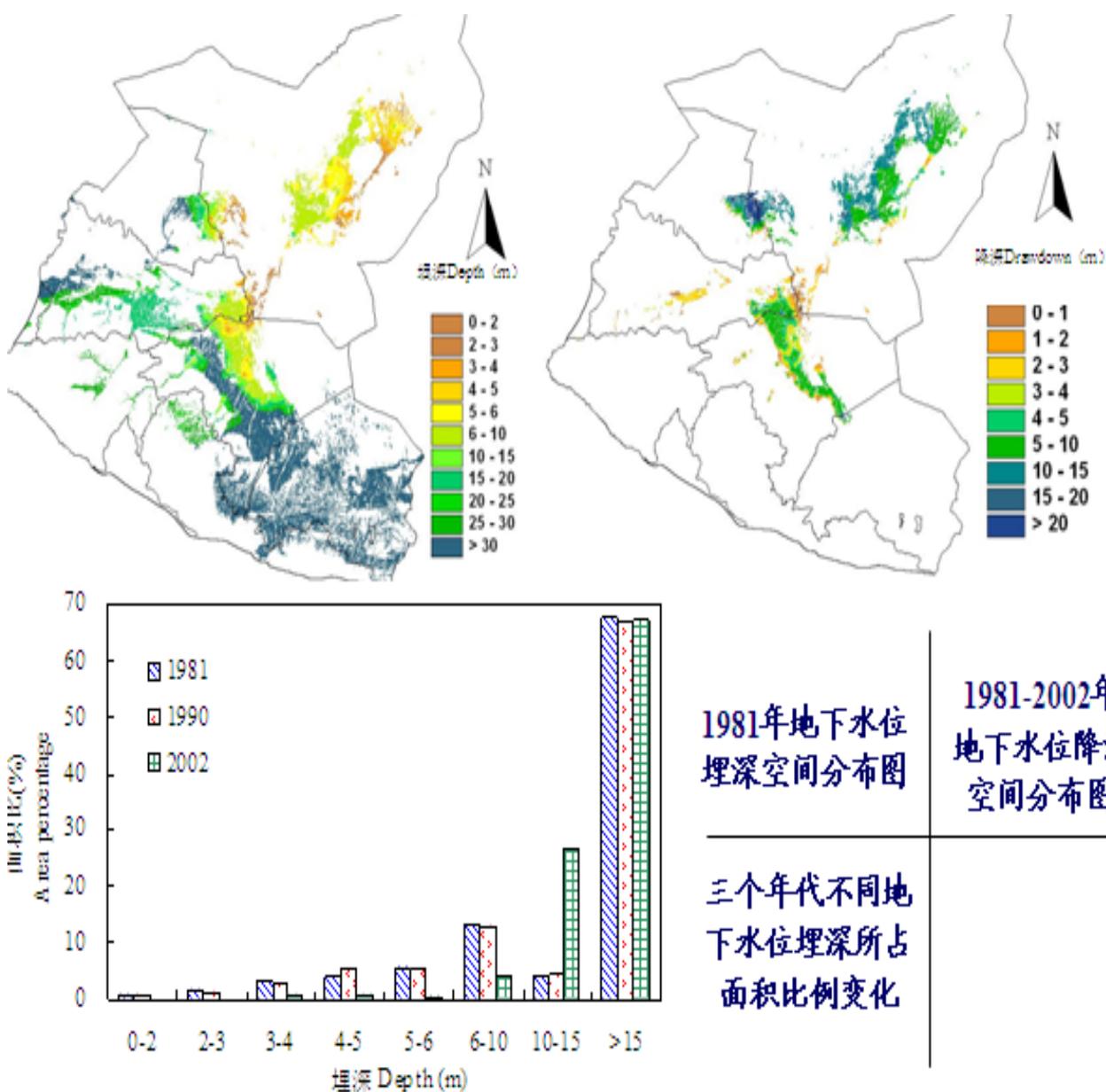


图 4.21 流域典型年地下水埋深空间分布图

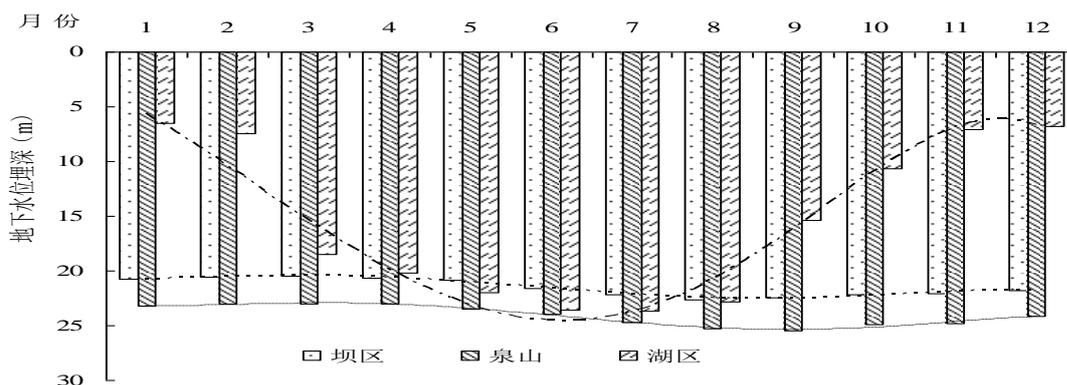


图 4.22 2007 年民勤各分区地下水埋深月变化

通过以上分析看出，民勤绿洲地下水位在时间、空间上的变化特征，呈现出大范围长时间内相似、小区域短时间差异较大的“大同小异”变化趋势。在这里，人类活动作为一种特殊的作用力，极大地加速了该区域水文生态的退化进程，使当地水文生态环境变得极其脆弱，自然生态调控能力几近丧失。在此条件下，如不实施流域重点治理规划，民勤变成第二个“罗布泊”将成为不久的现实。

4.3.5.4 地下水位动态的预测

自1963年前苏联水文地质学家康诺普梁采夫等发表《地下水天然动态及其形成规律》一书以来，不少学者相继认识到，对地下水动态预测是正确认识地下水资源形成及其性质最有效的方法之一。地下水位动态是地下水动态最主要的指标^[112]，本文以1990-2007年民勤盆地地下水位下降最为严重的下游湖区站点资料为例，预测了2007-2012年，湖区地下水下降的严峻态势，充分说明了流域重点治理规划实施的迫切性和必要性。

4.3.5.4.1 灰色模型介绍及应用

灰色系统理论是20世纪80年代由我国学者邓聚龙教授提出，用来解决信息不完备系统复杂问题的一种数学方法。水资源系统可以当作灰色系统看待^[113]，最常用的描述灰色系统模型的数学模型为“GM(1,1)”，GM(1,1)指1阶、1个变量的线性常微分方程模型。它在径流预报、灾变预测中有不少应用实例。运用灰色GM(1,1)模型对数据进行灰色预测时，对样本量数据的多少和样本有无规律都无要求，且计算量小而方便，更不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况^[115-116]，因此该方法具有广泛的实用价值。地下水位变化作为一个典型的灰色系统问题，用灰色GM(1,1)模型能较好反映地下水位的变化特性^[114]。

4.3.5.4.2 灰色GM(1,1)预测模型及步骤

(1) GM(1,1)模型原理

灰色理论所涉及的主要工作之一是用离散数列建立微分方程的动态模型,通过所建立的模型,可以对下一时刻的所有数据进行预测,由于原始时间序列的随机性和无序性,人们很难直接从原始数据中找到某种内在的规律,因此在建立灰色预测模型之前,通常需要对原始时间序列进行数据处理^[115-116],灰色系统中常用的数据处理方式有累加和累减。

(2) 灰色预测模型GM(1,1) 的建立

根据数据的特点,结合灰色理论中的相关原理,可以建立不同形式的灰色模型GM(1,n) (n = 1, 2, ..., N) 等模型,其中n 表示模型中变量的个数。本文主要讨论灰色预测模型GM(1,1)(累加)的建立过程^[114-117]。

I) 设所需预测系统中的某项指标的原始数据数列: $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$

II) 对原始数据作一次累加生成(1 - AGO)生成新数据列 $x^{(1)}$ 即: $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, 式中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n ;$$

III) 则GM(1,1) 模型相应的微分方程为 $\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u$ 式中, a, u 为参数;

IV) 设 $\hat{\alpha}$ 为待估参数向量, $\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$, 构造矩阵 Y_n 和 B , 即分别为

$$Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

V) 利用最小二乘法求解系数 $\hat{\alpha}$, $\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$

VI) 求解GM(1,1) 方程,得到其对应的时间响应函数,即为GM(1,1) 预测模型解

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a}$$

VII) 对一次累加生成数列的预测值进行一次累减生成(1 - AGO), 得到原始数据的还原

$$\text{预测值: } \hat{x}^{(0)}(t+1) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t), t = 1, 2, \dots, n, \hat{x}^{(0)} = 0$$

VIII) 模型的精度检验

灰色模型的精度检验一般常有预测值与真值之间的残差值和相对误差检验, 后验差检验、关联度检验。

残差值: $\xi(t) = x^{(0)}(t) - \hat{x}^{(0)}(t)$; 相对误差: $q(t) = \xi(t) / x^{(0)}(t) * 100\%$; 平均相对误差: $\xi' = \frac{1}{n-1} \sum_{t=2}^n |q(t)|$;

精度: $p = (1 - \xi') * 100\%$

后验差检验: $S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [x^{(0)}(t) - \bar{x}]^2$; $S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [\xi(t) - \bar{\xi}]^2$, 后验比 $C = S_2 / S_1$, 本次预测仅用前述

两种方法进行精度检验, 不对关联度进行分析。

表4.5 模型检验分类表^[116,118]

	相对误差 q	精度 p	后验比 C
一级 (好)	$q < 1\%$	$p > 99\%$	$C \leq 0.35$
二级 (合格)	$1\% < q < 5\%$	$99\% > p > 95\%$	$0.35 < C \leq 0.5$
三级 (勉强)	$5\% < q < 10\%$	$90\% < p < 95\%$	$0.5 < C \leq 0.65$
四级 (不合格)	$q > 20\%$	$p < 80\%$	$0.65 < C$

IX) 如果通过残差、后验差检验, 则可以用所建的模型进行预测, 否则, 要进行残差修正。

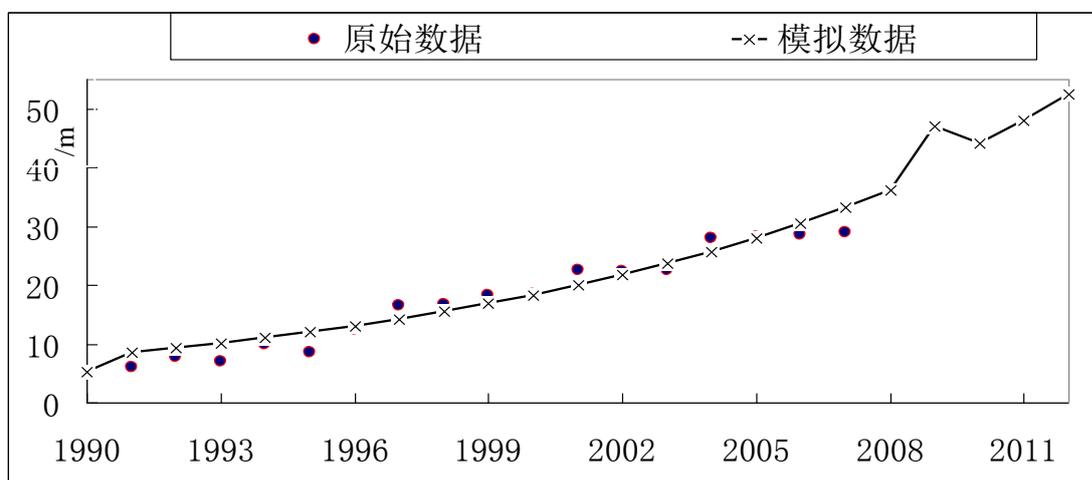


图4.23 GM(1,1)模拟数据与原始数据拟合情况

本次预测以民勤水文生态最为严峻的盆地下游湖区站点1990- 2007年地下水位观测资料为例, 在MATLAB7.0平台上, 实现了GM(1,1) 算法, 通过计算真实值和预测值之间的残差和相对误差, 验证了该算法的有效性, 进一步预测了在不实施流域综合治理的情况下2007 - 2012年的地下水埋深情况。

由图4.23可知, 原始数据和预测数据达到了较好的拟合, 其中逐年相对误差最大的年份(1993年)不超过15%, 精度为90%, 后验比为0.246, 后验比作为精度检验的重要指标, 据定义可知, 其越小表明尽管原始数据很离散, 而模型所得的计算值与实际值相差并不大^[116]。对比精度检验图表, 可知模型的拟合相对较好。若由2007年以前的情况下任其自然发展, 不采取有效措施, 该井点在2012年左右, 地下水位埋深将达到50m, 这势必将威胁到下游人畜的饮水问题。

表4.6 原值和预测值的残差值、相对误差（部分）

时间（年）	$x^{(0)}$	$\hat{x}^{(0)}$	$\xi^{(0)}$	q
1999	18.2	16.825	1.375	0.076
2000	18.38	18.314	0.066	0.004
2001	22.6	19.935	2.665	0.118
2002	22.3	21.7	0.6	0.027
2003	22.5	23.621	-1.1207	-0.0498
2004	27.9	25.712	2.188	0.078
2005	28.2	27.987	0.213	0.008
2006	28.5	30.465	-1.9646	-0.0689
2007	28.87	33.161	-4.2912	-0.1486

4.3.6 流域下游地下水水质矿化度分析

流域水文生态恶化的一个突出表现就是民勤绿洲北部，因地下水矿化度太高，人畜无法饮用，当地群众只好撂荒土地，背井离乡，沦为“生态难民”。

图 4.24 为 1998-2007 年民勤绿洲地下水矿化度在 10 年内的变化趋势图。从图中看出，民勤绿洲地下水矿化度普遍呈上升趋势，但从南到北上升程度各不相同。南部坝区处在绿洲上游，地表淡水较多，地下水的水质较好，矿化度相对稳定；泉山区地处绿洲中部，矿化度上升幅度要略大于坝区；北部湖区由于地处下游，属石羊河的尾间，坝区、泉山区地下水最终均汇集于此，大量盐分被运移至此，矿化度升高幅度最大。总体来看，民勤绿洲地下水矿化度也随地形及水力坡度呈现出由南向北逐渐升高的变化趋势。

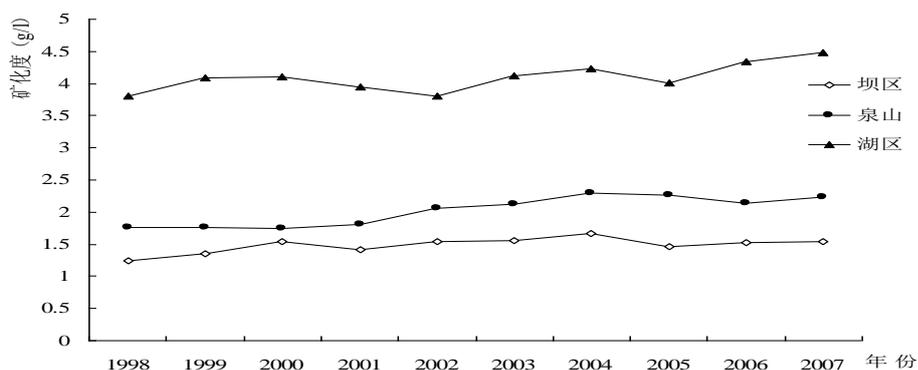


图 4.24 1998-2007 年民勤盆地地下水水质变化趋势

4.3.7 干旱条件下土壤水分和蒸发量关系探究

近年来干旱所呈现出的一些新特点引起了多方的高度关注,在 2011 年西安召开的“防旱抗旱确保粮食及农村供水安全战略”高层研讨会开幕式上,李佩成院士系统总结了当代中国的干旱和旱灾所表现出的新特征,并特别指出,干旱是水文生态系统中一个重要指标,对于干旱,倘若措施不当,干旱就会变成旱灾^[124-125]。石羊河流域地处内陆腹

地，流域下游的多年降水量不足 120mm，从降水量上来划分，是典型的干旱区。同时该流域又属于灌区农业，没有灌溉就没有农业。由于在农作物生育期间始终存在着不定期的灌溉，难以模拟自然干旱条件下作物蒸发与土壤水分的关系，故选择在石羊河流域作物休闲期内（不再灌溉）测定土壤含水量变化动态与水分蒸发现律。民勤绿洲区内夏作物休闲期长达 7 个月（8 月上旬~次年 3 月），秋作物休闲期也达 6 个月之久（10 月上旬~次年 3 月下旬），在农田休闲期，由于该区气候干燥，降水量少，大风天气频繁，土面蒸散发是该区域农田水分的主要消耗途径之一，因此可以较好的探究出自然状态下二者的关系。

本次测定以 2008 年夏秋休闲期裸地为实测对象，历史同期西南、西北大旱，甘肃河东、河西普遍受旱，采样点为流域下游民勤大滩乡，数据来源于民勤农技试验站。从图 4.25 和 4.26 可以看出，当表层土壤含水率介于 10%~14% 时，土壤蒸发量随土壤含水率增加而增大的速率较小；当表层土壤含水率介于 14%~19% 之间时，土壤蒸发量又随土壤含水率的增加而迅速增大；当表层土壤含水率大于 19% 时，土壤蒸发量随土壤含水率的增加基本上呈直线变化。更进一步的分析表明^[36]，该区表层土壤含水率介于 10%~19% 时，主要受制于土壤湿度和其他因素的控制；当表层土壤重量含水率低于 10% 时，裸间土壤蒸发强度下降趋势减小，主要是土壤水分受到土壤颗粒吸附力的影响。

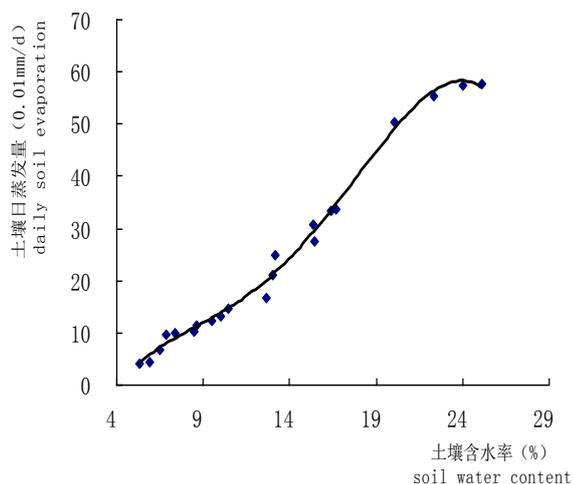


图 4.25 夏季休闲期土壤蒸发与 0~20cm 土壤含水率相关关系（2008 年 9 月）

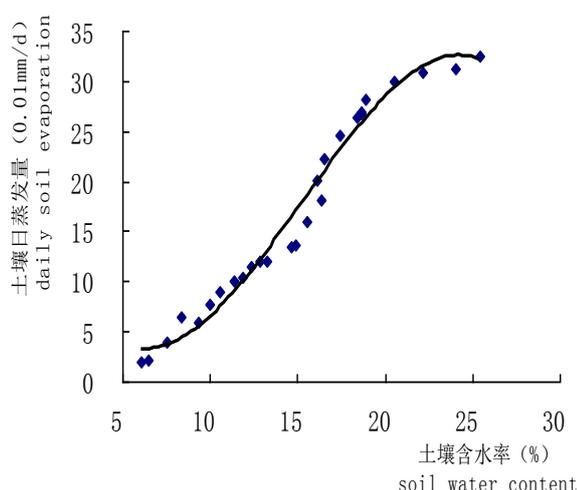


图 4.26 冬季休闲期土壤蒸发与 0~20cm 土壤含水率相关关系（2008 年 11 月）

4.3.8 流域用水结构演变及探讨

4.3.8.1 流域用水结构多年变化

4.3.8.1.1流域用水用量的变化

各个部门用水量的变化受到各种因素的影响，用水结构的演变是社会经济、自然因素共同作用的结果^[128]。据甘肃省水资源公报的资料显示^[129]，1994年以来，石羊河流域总用水量维持在26.5亿 m^3 左右，2005年以后有所增加，增加幅度不大，2006年为27.79亿 m^3 。农业用水在1995年达到最大值，经短暂的回落1998年以后农业用水维持相对稳定；工业用水随着工业发展逐年提高，在1997年,1998年达到用水高峰，98年之后由于节水措施的改进呈现下降趋势；生活用水随着人口的增加而逐渐上升，对于生态用水由于该区在统计公报中在2003年之前把其统计在生活用水里面，在2003年之后，才作为一个单独的用水用户予以统计。

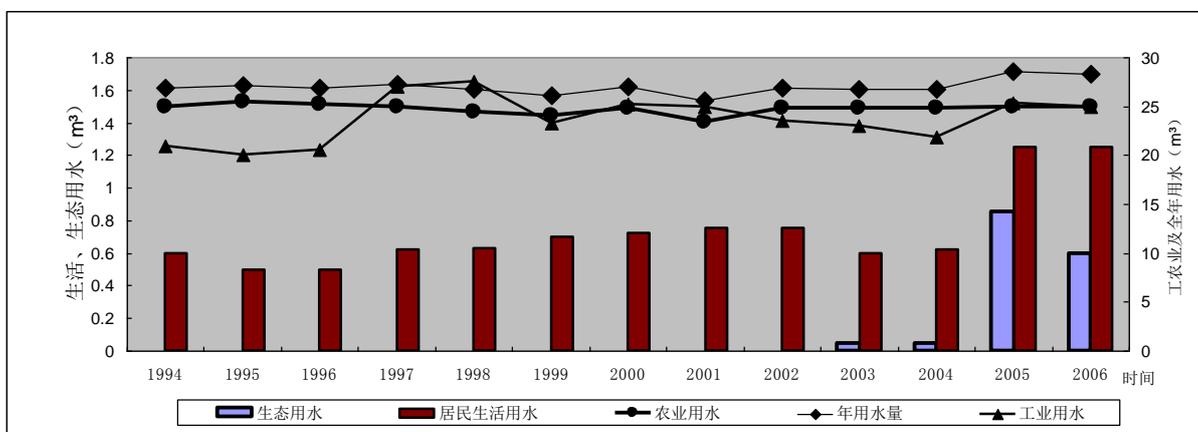


图4.27 石羊河流域各部门用水量变化图

4.3.8.1.2流域用水结构的变化

由图4.28可很明显的看出，在1994年以来，农业用水的比例呈下降趋势，上世纪90年代在92%左右，随着关井压田政策的逐渐实施，2006年用水比例下降到88%；工业用水在1997,1998年维持在一个较高水平，均值在6%左右，之后由于节水措施的使用，呈逐渐下降的趋势；生活用水在2005年以前，长期维持在一个相对稳定的水平，近年来由于生活水平的提高，已开始呈上升趋势。

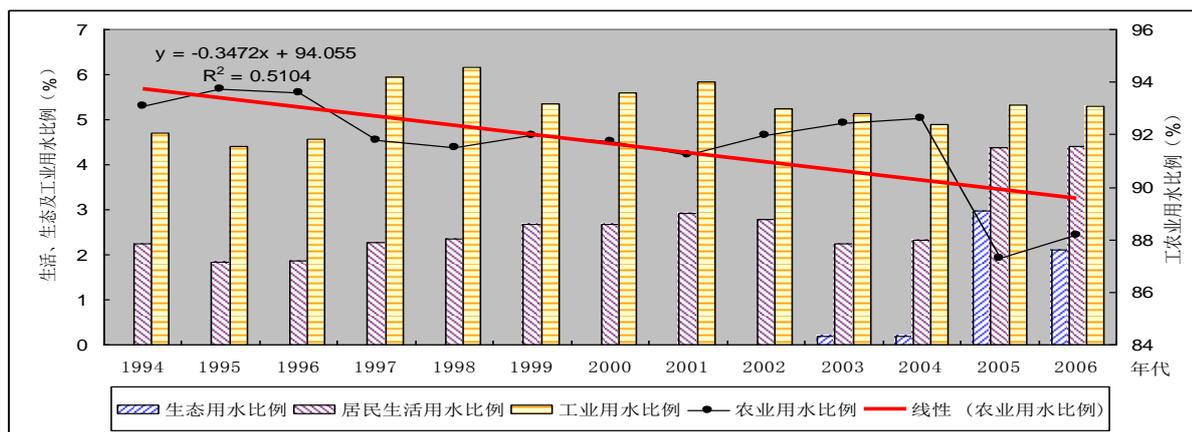


图4.28 流域不同部门用水比例年际变化图

4.3.8.2 基于信息熵的用水结构演变分析

4.3.8.2.1 信息熵的概念及其含义

“熵”作为描述自发过程不可逆性的状态函数，其最初的概念是借助于物体间的热量传递来定义的。1948年, Shannon将熵的概念引入了信息论, 用以描述系统的不确定性、稳定程度和信息量^[130]。当系统可能处于不同状态, 每种状态出现的概率为 $p_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 时, 该系统的熵定义为:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^m p(x_i) \log p(x_i), \quad (4.11)$$

式中 $H(x)$ 为系统信息熵; $p(x_i)$ 为系统处于第 i 种状态的概率。公式4.11被称为 Shannon 公式, 用其定义的熵为广义熵或泛熵, 可以用来描述任何体系或物质运动的无序度和混乱度。

4.3.8.2.2 信息熵在水资源系统中的引入^[131-134,136]

用水结构是水资源功能随时间分异的结果, 毫无疑问, 系统结构决定着系统功能。在某一地区, 随着时间的推移, 水资源系统在多方因素的综合作用下, 不断发生着结构的演替和变化, 因此科学预测水资源系统的演化规律, 探求更加合理的水资源结构利用模式, 使水资源的最佳功能得到最大发挥, 就显得更为重要。

设在一定时间尺度内, 水资源系统总用水量为 Q , 每种用水部门的用水量为 (q_1, q_2, \dots, q_n) , 每个状态的相应概率为 (p_1, p_2, \dots, p_n) , 则水资源系统结构的信息熵可定义为:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, \text{ 其中 } p_i = \frac{q_i}{Q} \quad (4.12)$$

式中 H 为用水系统结构信息熵, 单位为 nat。由于不同时间尺度内所包含的水资源利

用类型各不相同 不同时间尺度内用不同 n 计算出的水资源利用结构信息熵便不具可比性, 因此把水资源利用类型考虑到信息熵的计算过程, 从而引入均衡度 J , 则有

$$J = H/H_m = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i / \ln n, \text{ 其中 } H_m = \ln n; \quad (4.13)$$

式中 H_m 为用水系统最大信息熵, 表示用水系统结构最无序; J 为均衡度, 显然 J 的取值为 $0 \sim 1$, J 越大表示水资源系统结构越复杂, 稳定性和均衡性越强, 水资源开发利用更具合理性。

4.3.8.2.3 结构演化判别方法

由信息熵与系统均衡度之间的联系我们可知, 水资源系统可向恶性、良性不同方向演化, 可用下式来检验水资源系统的演化趋势, 即:

$$\Delta S = S(t+1) - S(t); \quad (4.14)$$

式中 ΔS 为时段 t 系统与外界物能交换所引起的熵变; $S(t)$ 为 t 时段的初态熵; $S(t+1)$ 为系统第 t 时段的末态熵;

当 $\Delta S > 0$ 表示系统演化是熵增过程, 无序度加大, 系统由非平衡态向平衡态转化;

$\Delta S = 0$ 表示系统无实质变化, 系统熵不变;

$\Delta S < 0$ 表示系统演化是熵减过程, 无序度减小, 系统由平衡态向非平衡态转化。

4.3.8.2.4 石羊河流域用水结构演变的熵分析

利用前述方法, 对石羊河流域 1994-2006 年水资源开发利用状况进行分析。由表 4.7 可以看出在 13 年的时间里, 信息熵由 1994 的 0.295 增长到 2005 年的 0.37nat, 虽然在 13 年间有短暂的下降, 但整体呈上升趋势, 线性拟合增长率为 0.14/10a(相关系数为 $r = 0.73 > r_{0.001} = 0.465$), 这说明石羊河流域的用水系统在向加速无序的方向发展; 用水系统的均衡度在 13 年来大致经历了 3 个不同的发展阶段, 在上世纪 90 年代中期, 系统均衡度为 90 年代最低值, 这说明 90 年代中期水资源开发不尽合理, 系统不够稳定; 在世纪之交, 均衡度有一短暂的回升, 这可能与工业节水, 农业用水减少有关; 2004 年中下游的红崖山水库干涸见底, 这一时期均衡度达历史最低值, 这说明流域水资源系统已开始恶化, 同时熵变值为负, 说明系统在由平衡态向非平衡态转化; 2005 年以来, 系统均衡度逐渐增加, 显示了流域用水结构正在趋于合理, 系统稳定性逐渐增强。

表 4.7 石羊河流域 1994-2006 年水系统信息熵、均衡度、熵变值计算结果

年份	信息熵	均衡度	熵变值	年份	信息熵	均衡度	熵变值
1994	0.295232	0.268732	/	2001	0.321372	0.321372	+
1995	0.271654	0.24727	-	2002	0.3011	0.3011	-
1996	0.277106	0.252232	+	2003	0.232313	0.232313	-
1997	0.332695	0.302832	+	2004	0.229143	0.229143	-
1998	0.341326	0.310689	+	2005	0.372608	0.372608	+
1999	0.331105	0.301384	-	2006	0.350309	0.350309	-
2000	0.33673	0.306505	+				

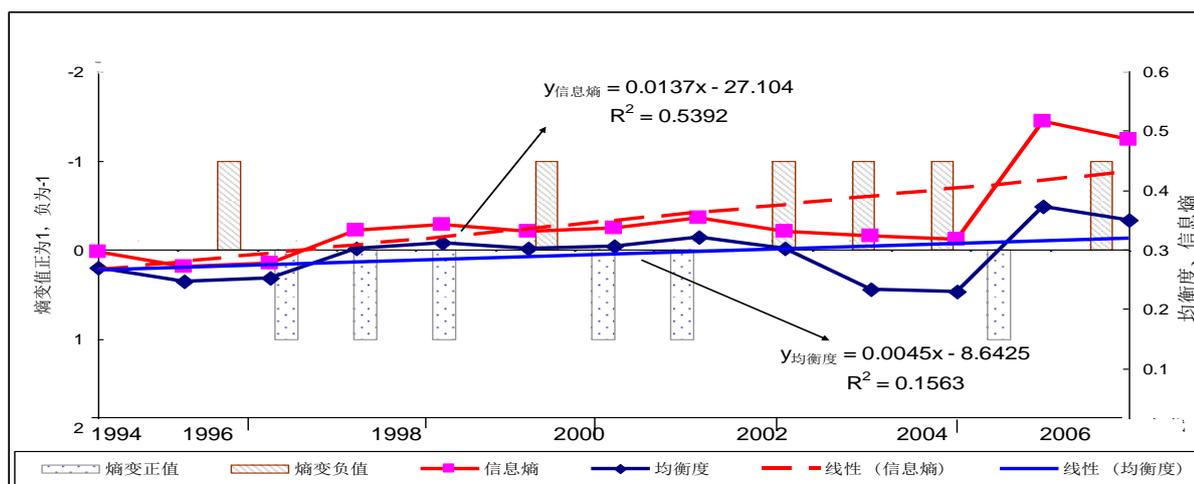


图 4.29 石羊河流域 1994-2006 年用水系统信息熵、均衡度、熵变图

4.4 小结

以上着重选取了气温、沙尘暴、降水与蒸发、径流量、地下水位动态、地下水水质、干旱条件下土壤蒸发与含水量关系等水文生态因子为主要分析指标；用基于信息熵的理论方法对流域用水量及用水结构演变过程进行了探讨，但是我们也应看到，鉴于本文作者时间和精力所限，在本文中只研究了李佩成院士水文生态系统构思中的一小部分，鉴于当地的实际情况，就水文生态因子而言，本文的研究还应当涉及到人工生态系统中诸如树木、林果、牧草、植被等指标，天然生态系统中荒漠、动物、地形等的研究。正如李佩成院士在 2010 年第二届国际干旱半干旱地区水文生态与水安全论坛开幕式上指出的一样：水作为涉及第一自然和第二自然的最大自然，其水文系统的各种变化，一般总会诱发生态系统的变化，而生态系统的变化也会引起水文系统的变化，研究和揭示这些涉水的变化和相互响应机理，探索其关系的量化方法和调控机制，便成为水文生态与水安全学科的基本内容^[135]。同时李院士又指出对水文生态问题人们感觉强烈而真知缺少。就石羊河流域而言，已有不少学者做了很多工作，但总体上来说，对于水文生态效

益的综合定量化研究和评价，系统分析和研究人类的涉水活动对当地水文生态的定量研究目前尚处在探索阶段。按照李佩成院士水文生态系统的构想，本文的研究可以纳入绿洲水文生态系统的范畴，因此我们要保护和恢复绿洲水文生态系统，就必须保护和复壮水文系统，要破解绿洲生态的兴衰问题，其要害就在于抓住水文生态系统的动态变化^[137]。我们坚信，只要按照上述思路，石羊河流域必将走出一条人与自然和谐共处的新路子。

第五章 石羊河流域重点治理规划及未来展望

石羊河流域的生态问题，其要害是水的问题^[4]。在上世纪 50 年代，石羊河上游进入红崖山水库断面平均年径流量为 4.6 亿 m³，而到 90 年代，年平均径流量已不足 1.5 亿 m³，平均每年减少约 0.1 亿 m³^[140]，2005 年来水仅为 0.61 亿 m³，达历史记录以来最低值，其中以 2004 年夏红崖山水库干涸见底为标志，自明清以来就高悬的水文生态警钟，终于愤怒地敲响。2007 年 12 月，石羊河流域重点治理规划开始全面实施，截止 2010 年 10 月，红崖山入库蔡旗断面过水量达到 2.5051 亿 m³，这是自 1987 年以来，下游民勤盆地首次流进 2.5 亿 m³ 生命之水，这也标志着石羊河流域重点治理近期规划（2010 年）目标已经实现^[138-141]。

5.1 石羊河流域水资源开发利用现状

5.1.1 现状供水与用水

5.1.1.1 现状供水^[145]

表 5.1 2009 年甘肃省流域分区供水量单位：亿 m³

流域名称	地表水源供水量					地下水供水量	其他水源供水量	总供水量
	蓄水	引水	提水	跨流域调水量	小计	浅层水	小计	
疏勒河	11.5059	4.919	0	/	16.4249	2.8997	0	19.3246
黑河	8.3327	14.2116	0.0297	/	22.574	6.5739	0.1211	29.269
石羊河	12.3082	3.6931	0.0209	0.984	17.0062	7.9686	0.1134	25.0882
合计	32.1468	22.8237	0.0506	0.984	56.0051	17.4422	0.2345	73.6818

表 5.2 石羊河流域 2003 年实际供水量统计表 单位：亿 m³

市（县）	地表水供水量				地下水供水量	其他供水	总计
	蓄水	引水	提水	小计			
金昌市	3.9	0.3	0	4.2	2.95	0.08	7.23
武威市	6.99	2.94	0	9.93	11.52	0.09	21.54
其中：民勤县	0.64	0.47	0	1.11	6.65	0	7.82
总计	10.89	3.24	0	14.13	14.47	0.17	28.77
比例（%）	37.85	11.26	0	49.11	50.3	0.59	100

以武威市为例，2010 年，武威市水权配置总量 16.12 亿 m³，比治理前的 2006 年实际用水量减少了 7.14 亿 m³，其中农业灌溉用水量减少了 8.84 亿 m³，地下水开采量也由治理前的 11.05 亿 m³ 削减到了 4.94 亿 m³。根据民勤蔡旗水文站监测，至 2011 年 12 月

31日,经石羊河上游流进民勤盆地的蔡旗断面过水量达到27960万 m^3 ,较去年同期26170万 m^3 增加了6.8%;2011年民勤盆地地下水开采量为8869万 m^3 ,超额完成了石羊河流域重点治理规划确定的年度约束性目标;当年民勤红崖山水库向下游盆地尾闾青土湖下泄生态水量1800万 m^3 ,实际入湖1260万 m^3 ,在青土湖人工形成季节性水域面积10平方公里,向湖区生态林下泄水量360万 m^3 ,灌溉荒漠生态林1.17万亩。以规划前2003年资料显示^[3],流域武威、金昌二市总供水量28.77亿 m^3 ,其中蓄水工程10.89亿 m^3 ,占总供水量的37.85%,现状蓄水、引水、地下水供水比例约为38:11:50,以蓄水工程和地下水工程为主。在流域综合治理的2009年,全流域总供水量25.0882亿 m^3 ,其中蓄水工程12.3082亿 m^3 ,占流域总供水量的49.1%,引水工程3.6931 m^3 ,占流域总供水量的14.7%,提水工程0.0209 m^3 ,跨流域调水近1亿 m^3 ,占到了流域总供水量的4%^[3,140-146]。

5.1.1.2 现状用水

表 5.3 2003 石羊河流域实际用水量统计表 单位: 亿 m^3

市(县)	城镇生活	农田灌溉	林草	农村生活	工业	总计
金昌市	0.16	5.86	0.17	0.1	0.94	7.23
武威市	0.3	18.99	1.13	0.5	0.62	21.54
其中:民勤县	0.03	6.87	0.76	0.09	0.07	7.82
总计	0.46	24.85	1.3	0.6	1.56	28.77

2009年全流域总用水量25.48亿 m^3 ,其中工业用水量1.58亿 m^3 ,占总用水量的6.2%,较2003年上升了0.8个百分点,这主要是由于该区工业快速发展的结果;农田灌溉用水量21.68亿 m^3 ,占总用水量的85%,较2003年下降了12.8%;2003年,全流域总用水量28.77亿 m^3 ,其中工业用水量1.56亿 m^3 ,占总用水量的5.4%;农田灌溉用水量24.85亿 m^3 ,占86.4%(见表5.3),其中民勤县农田灌溉用水明显偏高,用水结构不合理。

表 5.4 2009 年石羊河流域用水量统计表单位: 亿 m^3

市(县)	农业灌溉	林牧渔畜	工业	城镇公共	居民生活	生态环境	总用水量	
							合计	地下水
金昌市	4.8739	0.2620	0.8443	0.0595	0.1603	0.1345	6.3345	1.0091
武威市	16.8061	0.3196	0.7400	0.1150	0.4800	0.6829	19.1436	7.0091
合计	21.68	0.5816	1.5843	0.1745	0.6403	0.8174	25.4781	8.0186

5.2 石羊河流域重点治理规划简介及成效

2007年,石羊河流域重点治理规划开始实施^[140,142,144],其总体布局为:上游地区,

继续保护和建设祁连山水源涵养林区;中下游地区,强化节水,加大产业结构特别是农业种植结构调整力度,提高用水效率;减少用水总量;修建专用输水渠;减少地下水开采,逐步恢复地下水位;建立健全合理的水价形成机制,全面推进节水型社会建设;加快灌区节水改造,完善用水计量设施。按照规划的布局,结合流域近年来综合治理的具体实施情况,流域对水资源利用方面可归结为:开源、节流加管理。

5.2.1 开源

为增加流域水资源来水量,目前流域从事节源的水事活动主要有以下几方面:

5.2.1.1 跨流域调水

由甘肃省景泰川电力提灌工程管理局承担的景电二期延伸向民勤调水工程是民勤县水资源配置保障工程之一,工程自2000年9月建成运行至2011年底,共向民勤调水5.8461亿 m^3 ,为重点治理近期目标全面实现起到了至关重要的作用;“引大济西”工程从青海省境内的大通河提水,穿越祁连山冷龙岭进入金昌市西大河水库,工程引水总长39.4公里,年引水量2.5亿 m^3 (金昌1.35亿 m^3 、民勤1.0亿 m^3 、山丹0.15亿 m^3);“引疏济金”工程从青海省门源县的硫磺沟引水,最后进入金昌市金川峡水库,一期工程已于2003年通水,设计年引水量0.4亿 m^3 ,二期工程从大通河干流引水到引疏渠首,投资估算21.8亿元,目前尚在规划中。

5.2.1.2 人工增雨^[144]

2010年7月1日,甘肃省气象局批准了《武威市人工影响天气作业基地建设实施方案》,目前,石羊河流域已建成火箭增雨点37个,高炮增雨点15个,增雨作业车6辆,标准化炮点8个,自动气象站65个。作业点分布在祁连山区黄羊河、金塔河、西营河等三大干流水系上游,覆盖面积达5000 km^2 。

5.2.1.3 涵养水源

祁连山拥有57.96万 hm^2 水源涵养林,对保护冰川、改善环境、涵养水源起着重要作用,被誉为河西地区的“生命线”。《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》将祁连山水源涵养区生态保护和综合治理作为第12个生态保护和修复重点工程。为了保护祁连山地区水文生态,甘、青两省发起了“十二五”重点科研项目“祁连山地区生态治理技术研究及示范”,2011年底已通过科技部的可行性论证。石羊河流域上游在无地表水和地下水可用的地方,充分利用降水,在房前屋后、场院就近修水窖,蓄积雨水;

在雨水高效利用方面，流域探索出了一些高效集雨节灌模式，如 W 型覆盖集雨补灌高效种植技术、日光温室膜面集雨节灌施肥一体化技术、全膜覆盖双垄面集雨沟播栽培技术。

5.2.2 节流

5.2.2.1 农业种植结构调整

流域坚持以水定规模、以水调结构。以民勤县为例，2010 年全县亩用水 400 方以下、产值 2000 元以上的低耗水高效益作物面积达 40.11 万亩，占配水面积的 64.1%。截至 2010 年，武威市农业在三大产业中所占比例已由 2006 年的 28% 下调到 23%；经济作物种植比例由 2006 年的 24% 上升到 33%。按照规划确定的农田配水面积，武威市农业配水面积减少 64.25 万亩，累计关闭农业灌溉机井 3318 眼，减少农业用水量 8.84 亿 m^3 。

5.2.2.2 建立现代高效节水模式

为提高水资源利用效率与效益，流域逐渐建立了现代高效节水模式，其流程图归纳如图 5.3^[144]。

5.2.2.2.1 渠系节水改造, 田间工程配套

以降低单位面积灌溉定额为重点，流域中下游大力发展渠系防渗技术，以民勤县为例，截止 2010 年，全县累计完成田间节水面积 59.75 万亩，占目标任务的 100%。其中渠灌 25.97 万亩，管灌 5.55 万亩，大田滴灌 22.85 万亩，温室滴灌 5.38 万亩。全面推广以膜下滴灌、全膜垄作、地膜再利用免耕等大田节水技术面积达 42 万亩，常规技术和高新技术节水面积占总播面积的 90% 以上。

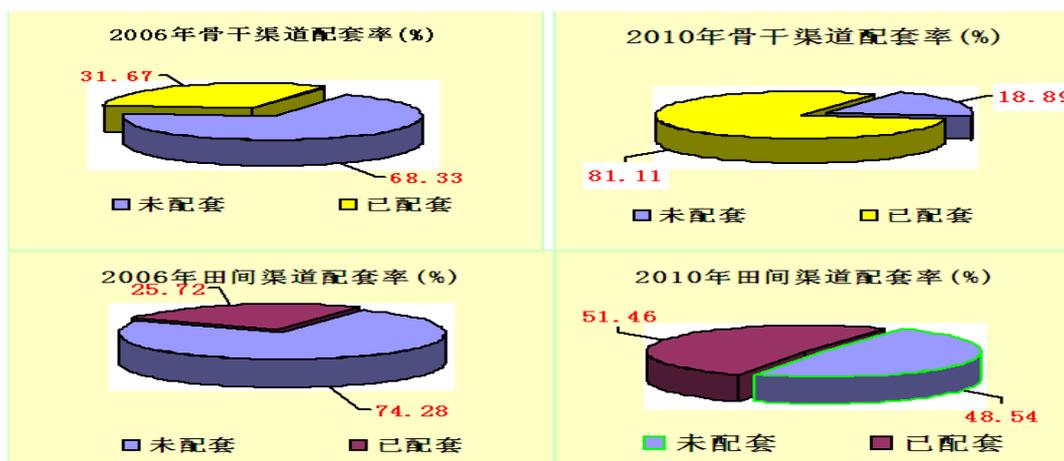


图 5.1 流域重点治理规划实施以来民勤县渠道、田间工程配套情况

以民勤县为例，通过项目实施，骨干渠道配套率由 2006 年的 31.67% 提高到 2010 年的 88.11%；田间渠道配套率由 2006 年的 25.72% 提高到 2010 年的 51.46%；灌区渠系水利用系数由 0.42 提高到 0.614。

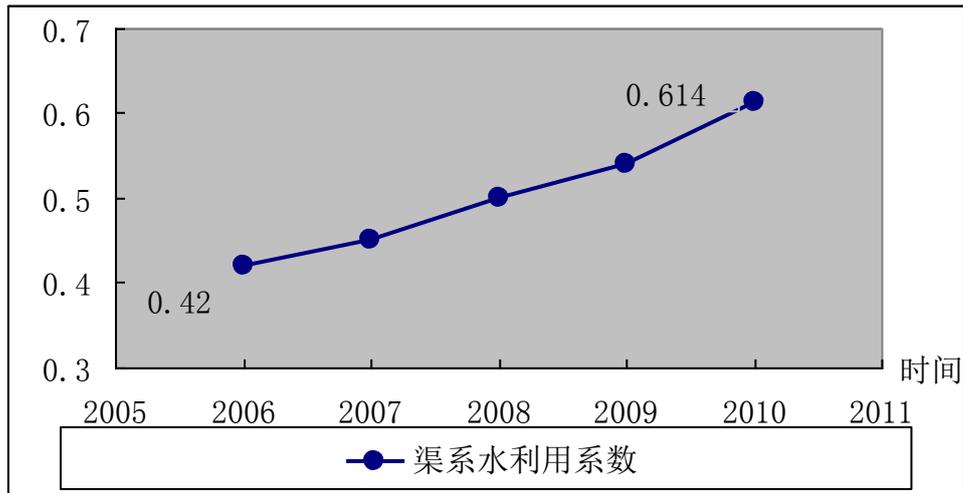


图 5.2 石羊河流域(民勤)渠系水利用系数变化图

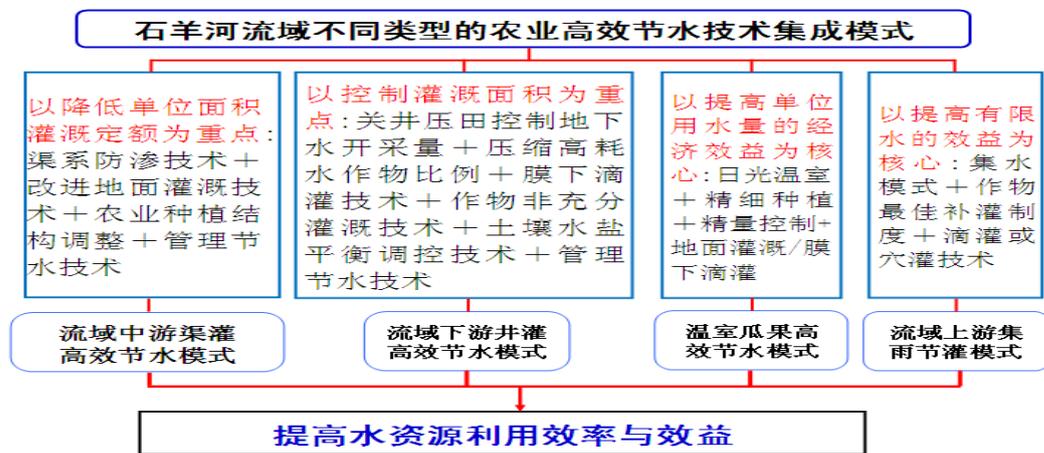


图 5.3 流域现代高效节水模式集成图

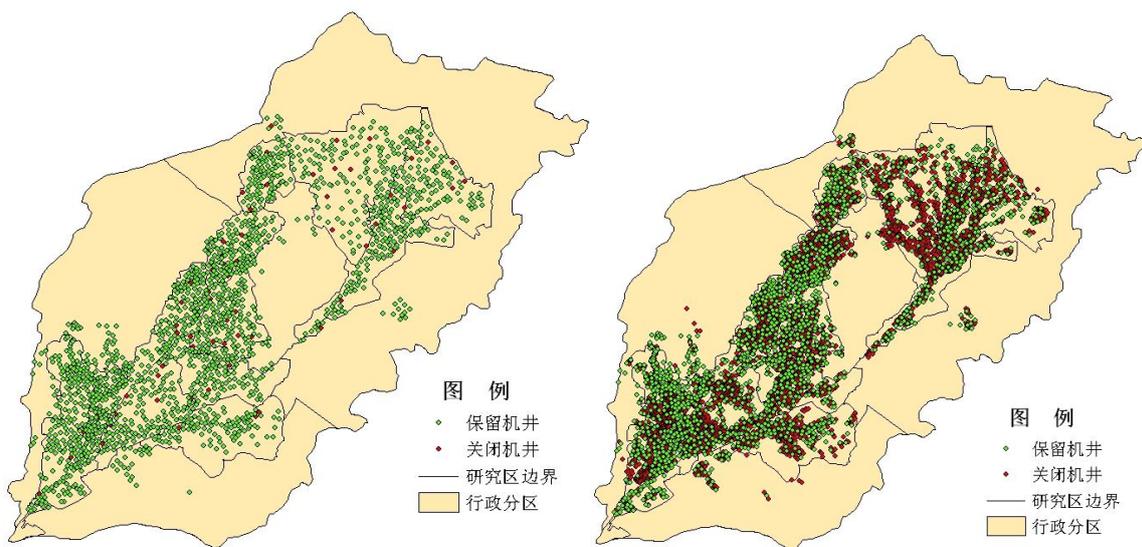


图 5.4 石羊河流域民勤县 2010、2015 年保留机井分布图[36]

5.2.2.2.2 对地下水开采的控制

以控制灌溉面积为重点，流域实施关井压田控制地下水，截止 2010 底，民勤县累计关闭机井 3000 眼，按甘肃省水利科学院的研究方案，到 2015 年再压缩 1691 眼，其中坝区 506 眼，泉山区 785 眼，湖区 400 眼，才符合民勤水文生态系统的良性发展需求，见图 5.4。

5.2.2.2.3 农业经营方式的改变

以提高单位用水量的经济效益为核心，流域逐步由粗放式的农业经营模式向精耕细作模式转化。如民勤县提出的实施“2311”计划：即户均 2 座棚、3 亩特色经济林、人均 1 亩大田节水作物，人均收入达到 1 万元；截止 2010 年全县已累计发展酿酒葡萄 1.945 万亩，红枣 7.9 万亩；与此同时，民勤县配水面积由规划前 2007 年的 106.52 万亩压缩至 62.53 万亩，压缩了 41.3%，其灌溉定额从 585 方/亩降低至 415 方/亩，降低了 29.1%，用水效益从原来 2.86 元/方提高至 7.05 元/方，提高了 147%。按照民勤县发展规划，力争“十二五”末累计建成日光温室 6 万亩、养殖暖棚 7 万亩、酿造葡萄 10 万亩、红枣 10 万亩、枸杞 2 万亩，实现“2311”计划的目标，农业用水总量控制在 2.46 亿方以内。

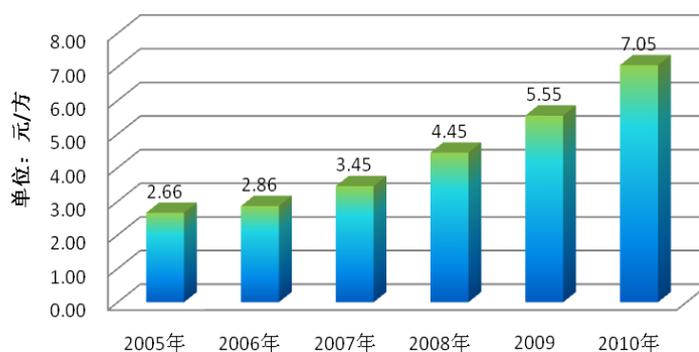


图 5.5 民勤县 2005-2010 年种植业单方水效益变化图

5.2.2.2.4 新型灌溉技术的推广

以提高有限水的效益为核心，流域开始发展集水模式，研究作物最佳补灌制度及滴灌和穴灌技术，并逐渐开始推广。

5.2.3 管理

5.2.3.1 实施严格的水权控制

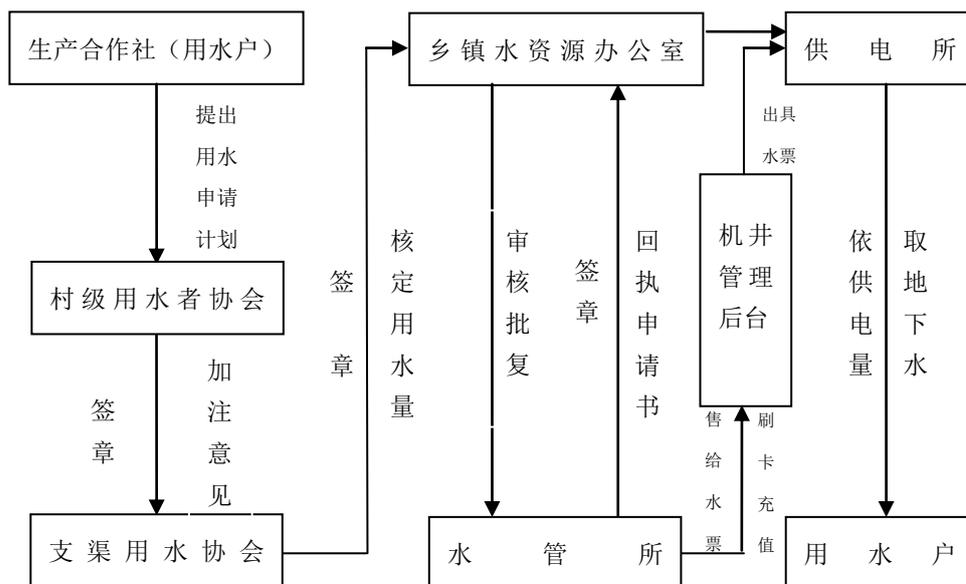


图 5.6 水票运行示意图

2007 年，武威市开始水权水价制度改革，先定总量，再定生活用水、农业用水、工业用水、生态用水的比例，再将农业用水层层分配到户，颁发水权证书，农户凭水权证到用水者协会购买水票浇地，实施以电控水的新思路。流域安装地下水智能化计量控制设备，探索水资源信息化管理方式，引入预决算和审计概念，实行水资源的精细化管理和严格的过程性控制，水资源管理工作走在了全国前列，走出了一条“以水定规模，以水定产业，以水布局经济社会发展”的新路子。

以下游民勤盆地为例，在地下水计量设施安装方面，共安装完成地下水计量设施 8025 套，全县所有地下水取水井全部实行了计量控制，刷卡取水。同时在民勤县，一些水资源信息化管理试点工作也已开始，建立完善了远程遥控关机、水电量数据传输、适时监控等水资源信息化管理功能。

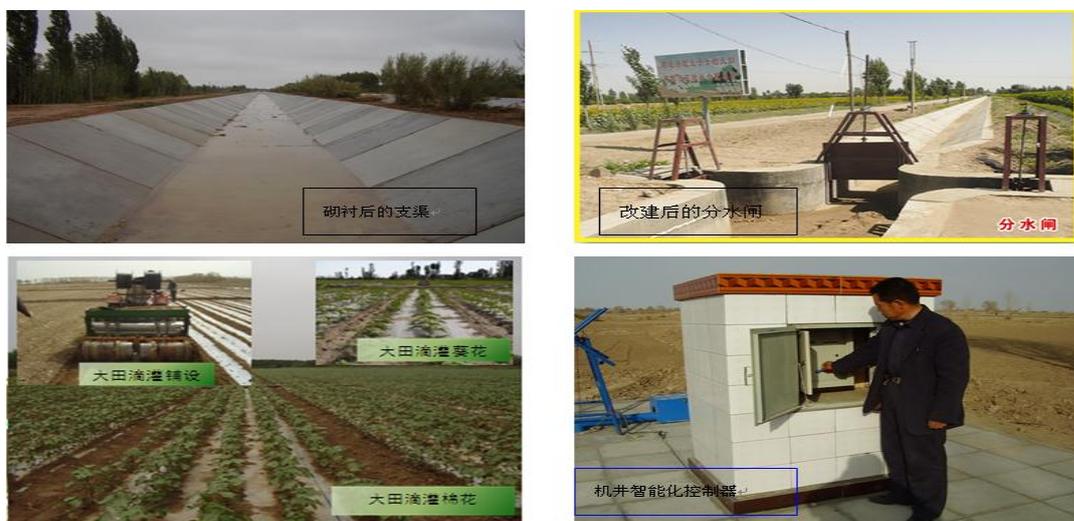


图 5.7 石羊河流域综合治理规划实施后的几个缩影

5.2.3.2 水权控制制度对流域水文生态的影响



图 5.8 流域重点治理规划实施以来局部地区水文生态状况得到好转

在上述多方治理之下，民勤盆地地下水开采量逐步稳定下降，来自民勤水务局的资料显示，民勤地下水开采量从 2005 年的 5.17 亿 m^3 下降至 2011 年的 0.8869 亿 m^3 ，下降幅度达到 83%；民勤县蔡旗断面来水量从 2005 年的 1.063 亿 m^3 ，在 2010 年达到流域重点治理规划目标的 2.5 亿 m^3 之后，2011 年达到 2.796 亿 m^3 ；民勤县水权总量从 2006 年的 7.44 亿 m^3 下降至 2010 年的 3.51 亿 m^3 ，缩减了一半的水量；在此基础上，流域地下水位降幅减缓，局部地区地下水位得到了上升。

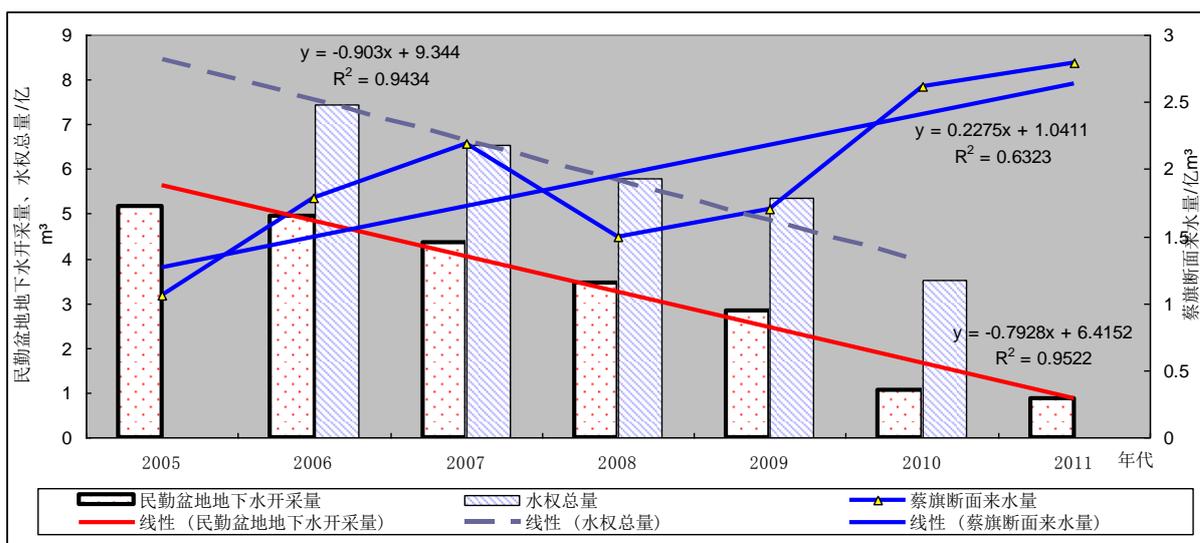


图 5.9 民勤盆地地下水开采量、蔡旗断面来水量及全县水权总量

2011年,民勤红崖山水库向青土湖下泄生态水量 1800 万 m³,实际入湖 1260 万 m³,在青土湖人工形成季节性水域面积 10 平方公里。

5.2.3.3 下游沙漠化治理探索出新路子

防沙治沙需要全民总动员,民勤群众自创的麦草方格压沙法已得到了世界治沙界的认可。近年来,民勤县又探索出了“国家有投入、科技作支撑、农民有收益”的防沙治沙长效机制,使越来越多的人参与到了治沙的队伍当中。从 2006 年开始,民勤县开始实施将治沙区域分成标段向社会公开招标的市场机制,林场负责技术指导和工程管理,压沙队按日付给工人工钱,林业局则在验收合格后再向压沙队支付资金。压沙队已由 2006 年的 10 多支增加到了 2011 年的 74 支,2006 -2011 年民勤县累计完成人工造林 30.79 万亩,实施封沙造林育草 15 万亩,压沙 16.52 万亩,有效阻止了两大沙漠合围之态。

5.3 石羊河流域综合治理以来的几点建议

石羊河流域水文生态问题在引起党中央和国务院高度重视的同时,学术界和社会各界亦把目光纷纷投向流域,近年来研究石羊河流域更是成为热门课题之一。本人结合自己多年的切身感悟,对流域的未来发展提出一点自己的建议。

5.3.1 节水型社会的建立

早在上个世纪八九十年代,李佩成院士就高瞻性的提出了干旱半干旱地区水资源可持续供给的原则和节水型社会的建立^[148],李教授明确指出所谓节水型社会就是:社会成员改变了不珍惜水的传统观念,改变了浪费水的传统认识,改变了污染水的不良习惯,深入认识到水的重要性和珍贵性。在上世纪90年代,李院士从更深层次提出了建立节水型社会的主要措施,提出了“三水统观统管、综合调节”等治水方略。直到2007年,石羊河流域才确立了《节水型社会建设实施方案》等规范性文件,正式提出了建设节水型社会的目标。本文作者结合自己在流域的生活经历,十分赞成李佩成教授提出的全社会成员对水的认识是建立节水型社会关键的这一论断^[147]。一份来自武威治沙研究所的调查显示:在需要利用降水才能从事其农业生产的流域上游,其居民调查中80%的人认为水资源不够用,然而在水资源相对短缺的下游地区,只因有井水灌溉,中下游甚至有64%的人认为水资源够用!这种想法是非常可怕的,因有井水的支持而导致人们认为水资源够用,也就使人认为有井即有水,虽然流域的用水管理取得了一些成效,但公众的节水意识尚未得到根本扭转。

李佩成院士在《建立节水型社会是摆脱水荒困境的最佳选择》一文中指出，要建立节水型社会，不要把灌溉绝对化，拒绝在灌区采用旱农技术，会使农民放弃和遗忘抗旱任务，产生靠水习性，从而造成不必要的扩大用水^[148]。石羊河流域属于灌区农业，应加强对农作物合理灌溉制度的推广，在下游地区，农民的普遍观点是降水再大，对农业亦无用处，对于充分利用降水不够重视，未能真正做到“三水统观统管”联合运用。

5.3.2 节水与养水的关系

石羊河流域重点治理规划中重要的一项就是灌区节水改造工程的大力推广，截止目前，石羊河流域的干渠和支渠基本上实现了衬砌，其在大量节水的同时，地下水得不到有效补给，沿河植被纷纷死亡，重视节水而忽视了养水。正如李佩成院士在《论自流灌区的节水与养水》一文中指出的一样，受灌溉渗漏涵养的地下水是重要的抗旱水源，在此类灌区任何技术措施，包括节水技术的运用，都不应该伤害水资源的必要涵养^[149]，尤其在流域综合治理的现在，是否渠道全部采用衬砌就是总体效益最大，也值得商榷。

5.3.3 实施产业结构调整应注意的问题

重点治理的根本措施是加强水资源的配置和管理，切实转变用水观念和发展模式，通过大力调整产业结构，特别是农业种植结构，改变传统的耕作习惯，提高用水效率和效益。可以说调整产业结构已成为石羊河流域综合治理的必然，而且在流域各个地方已作为一项落实到基层领导的责任在抓。在石羊河流域，以温棚种植为例，通过作者对温棚种植户的跟踪调查发现，当地农户因对温棚种植经济效益及作物销路顾虑重重而对温棚种植产生抵触情绪，甚至一些温棚在种植几年后即开始撂荒的现象多有发生。据此作者建议政府在积极引导农户改变产业结构的同时，也应积极搭建各种销售渠道，确保农户的利益不受到损害。

5.3.4 对流域下游民勤生态立县战略的建议

对民勤县而言，作者认为做好“治沙”这篇大文章和“节水”文章同样重要。应认真实施以治理风沙源为重点的“锁边工程”，抓好多个风口的治理；应坚持“外治风沙、内建林网，因地制宜发展经济林”的思路，分类施治、梯次推进；按照渠、路、林、田、宅相配套的要求，使全县有条件的地段和路段全部得到绿化；加紧探索适合本区不同地段的新品种，特别应加快在碱大水苦的湖区等地方推广红柳等耐盐碱植物的步伐。

5.4 流域未来展望

前景一：中国西部最大的高效节水生态蔬菜基地

据报道，以色列南方的内盖夫沙漠年降水不足 200mm，以色列耗资 1.5 亿美元，历时 11 年，建成了 145 公里长的“北水南调”输水工程，从根本上保证了以色列成为欧洲“冬季厨房”的用水之需。现在，已有万余公顷的绿洲点缀其间，农民收入从过去的年 170 美元增加到 10000 美元，仅占以色列国土面积 6% 的荒漠，但其新鲜水果、蔬菜出口占到以色列全国出口总量的一半，花卉出口占到 12%。

石羊河流域的民勤绿洲被认为是甘肃省沙产业发展的理想地区，土地辽阔，光热资源丰富，开发潜力极大。但“十地九沙、非灌不殖”的生态属性决定了开发利用沙漠资源同样需要基本的生态、生产、生活用水。流域在大力实施生态蔬菜基地的同时，一旦形成产业规模，其前景不可估量。

前景二：中国西部有影响的节水型生态特区

为实现流域下游民勤县节水型生态特区的建立，可以以生态补偿为基础，鼓励民间大力发展林牧业，以种多少树，即补多少钱等激励手段激励起全民种草种树的新高潮；政府出资组建压沙队、种树队等生态工种，通过政府出资，民间集资等多种方式，探索干旱区经济发展和环境保护的新模式；提高植被覆盖率，彻底改变沙尘暴频发的恶劣水文生态环境；在流域上游，应大力发展高原无公害养殖业，推动荒漠绿洲区草畜产业的发展。

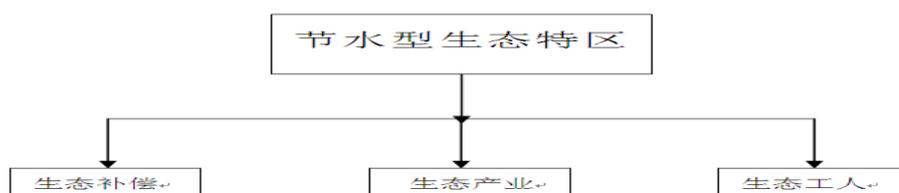


图 5.10 节水型生态特区建设示意图

前景三：西部干旱内陆河流域节水型社会的典范

流域在遵循水循环、水平衡及三水转化规律的同时，努力探索并在逐步建立着人水和谐完善的水权制度；探索着提高防风固沙体系功能，遏制沙漠化发展的新模式。相信石羊河流域在探索前进的同时，必将走出一条富有石羊河特色的西部干旱内陆地区节水型社会新模式。

结论及建议

结论:

石羊河流域以农业经济为核心, 83%以上的农业经济集中在绿洲区域, 这种典型的绿洲经济格局形成了更加紧密的水资源与生态环境之间的关系, 同时, 由于人为的介入, 对水资源产生了巨大影响, 进而导致了水文生态环境的变化。本研究针对石羊河流域水文生态问题, 依托长安大学水与发展研究所承担的“教育部、国家外专局高等学校学科创新引智计划项目(B08039)”, 开展了对石羊河流域水文生态主要因子、流域三水转化循环、水资源用水结构演变的研究, 从而为流域实现水资源合理开发、调整农业结构等提供了决策支持。论文主要研究成果如下:

(1) 在水文生态理论研究方面, 有如下研究成果:

系统的阐述了水文生态最新的国内外研究状况, 总结了水文生态学由产生到逐渐成熟的历史过程, 概述了水文生态在石羊河流域的研究进展和研究内容, 本文的研究, 从地域上来说, 进一步丰富了水文生态学的研究范围; 将流域诸如沙尘暴等一些流域特有的指标因子纳入水文生态学的研究范畴, 扩大了水文生态学的研究内容。

(2) 在对石羊河流域的水文生态研究方面有如下研究成果:

本论文在查阅大量前人资料的基础上, 首次基于水文生态的视角, 分析了石羊河流域下游从昔日一个“碧波万顷, 水天一色”的泽国到今日罗布泊现象局部突显的生态难民县, 其几千年来水文生态变迁的历史过程。通过对历史时期的流域水文生态变迁分析, 作者认为: 石羊河流域的沙化和水文生态环境等变化, 人为是一重要因素, 但也不可过分夸大, 石羊河流域关于“多流沙, 非灌不殖”的记载在史书中频繁出现, 可见, 在大的气候变化下, 气候的变迁对水文生态的影响不可低估。

从三水统观统管的角度出发, 分析了石羊河流域在天然和人工干预下的水资源系统转化特点, 从三水转化的观点出发, 作者指出: 倘若全流域采取渠道衬砌等这些滴水不漏的灌溉实施, 鉴于当地降水形不成对地下水的有效补给, 渠系两边的树木和草木, 大多死亡或濒于枯萎, 这种灌溉方式是否合理, 值得商榷!

在分析流域上游祁连山水文生态系统时, 着重分析了祁连山森林和土地利用的动态变化特征, 在上述分析流域水循环的基础上, 特别分析了祁连山区水循环过程中水资源的形成和消耗过程, 认为把拯救民勤绿洲和保护上游祁连山水源不应孤立起来。

在对流域中下游水文生态效应分析时，着重选取了气温、沙尘暴、降水与蒸发、径流量、地下水位动态、地下水水质、干旱条件下土壤含水量、流域用水量及用水结构演变等众多指标来全面考察流域水文生态情况，力求反映流域水文生态的一个或几个方面。值得指出的是：本文在对气温的分析中，在从以往单就分析平均气温变化趋势的基础上，选取了对流域农事活动影响更为深远的高温日数累计和最高气温等指标来分析，得出了相应指标在不同年代的变化趋势；以往对流域的研究很少关注流域特有的气候特征—沙尘暴，本文采用滑动 t 检验法等对流域春季沙尘暴发生频次均值突变进行了量化分析，得出了流域沙尘暴目前在呈波动式下降趋势的结论，之后在多年统计的基础上，分析了沙尘暴突发的时际特征；采用差积曲线—秩检验联合识别法得出了 1958 年是流域降水变化的一个突变点，而蒸发则相对稳定，变化不甚显著；通过对比分析河西三大内陆河年径流量发现，石羊河年径流量距平百分率在以 4.88/10a 的速度递减，通过对石羊河流域主要河流西营河 1954~2004 年径流资料的小波分析发现，在 51 年的时间序列中，从 21 年的时间尺度来看，该河经历了丰-枯-丰-枯四个历史阶段；对流域下游民勤盆地地下水位的时空变化分布进行了分析，用灰色模型预测了流域倘若不实施重点治理规划，在 2012 年下游湖区地下水位观测井点埋深将达到 50m；从基于信息熵的理论出发，分析了用水结构演变过程，得出了自 2005 年以来，流域水系统均衡度逐渐增加，显示了流域用水结构正在趋于合理，系统稳定性在逐渐增强。最后系统介绍了流域重点治理规划实施以来所取得一系列成就，从三水统观统管的角度并结合当地实际出发，为流域重点治理规划实施过程中的一系列问题提出了相应建议，并展望了流域未来的发展前景。

建议

(1) 加强全流域三水统观统管，推进石羊河流域水文生态恢复工程

水文生态恢复是石羊河流域综合治理规划的核心内容之一，也是流域水文生态研究的最终目的。根据“三水统观统管、时空治水”的治水方略，作者认为石羊河流域水文生态建设的重点区域应主要包括：（1）上游祁连山区水源涵养林草建设保护区，主要分布在南部祁连山区，包括肃南部分地区，区内重点启动的工程应包括草地治理工程、水源涵养林建设保护工程和生态移民工程；（2）中游水环境改善和水文生态修复保护区，区内重点启动的工程应包括污水资源化、节水社会建设、退耕还林工程；（3）下游绿洲抢救恢复保护区，具体工程应包括民勤绿洲高效节水示范区、人工防护林网建设、荒漠

区防风固沙林网建设、人工压沙工程建设、饲草饲料基地建设和生态移民工程等。

石羊河流域生态恢复的主要途径包括两方面：一是在发挥生态系统的自我修复功能，如围栏封育、生态移民等措施的同时加强人工干预，如植树种草等，加快水文小循环的建设；二是生态系统修复所需水分条件的人工调控和保障，如下游地区民勤水资源的人工调控和流域水权制度的完善及应用。

（2）完善流域用水计量和水情监测网站

水权的分配与管理需要依托一套基础设施体系，其中很重要的就是用水计量和动态监测设施。石羊河流域监测体系分别由各县水务管理机构负责实施，建议将其统一交由石羊河流域管理机构负责规划和监测，在流域不同站点建立动态观测网点，以便通过统一规划，针对流域不同区域的水资源应用和地下水开采情况，采用不同的调度方法，决定使用地下水还是地表水。同时目前用水计量措施和水情监测网主要分布在绿洲区，建议向荒漠区适度发展，促使生态需水保障措施得到顺利实施。

（3）节水型社会的建立

除却农业用水，就生活用水而言，农民自己打井汲取人畜用水的方式仍普遍存在。建议加大农村安全供水工程的推进，取缔农户的自用水井，采取定期统一送水的模式，减少对生活用水的浪费；在工业用水方面，加大对工业用水大户的改造力度；全流域实施水权梯度价格制度，针对不同的阶段采取不同的水价，以价格杠杆促进节水型社会的建立。

参考文献

第一章:

- [1] 甘肃省水利厅, 甘肃省发展和改革委员会. 甘肃省石羊河流域重点治理规划[R]. 2007, 8
- [2] 李泽红, 董锁成. 武威绿洲农业开发对民勤绿洲来水量的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 86-91
- [3] 康绍忠, 粟晓玲, 杜太生等. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式—以甘肃石羊河流域为例[M]. 北京: 中国水利水电出版社. 2009, 6
- [4] 陆浩. 关于石羊河流域综合治理的思考[J]. 资源环境与发展, 2007, 1
- [5] 宫辉力, 周德民, 张明祥. 基于生态响应的水文生态学模型研究进展与趋势评价[J]. 自然科学进展, 2009, 19(9): 889-895.
- [6] 周德民, 宫辉力. 湿地水文生态学模型理论初探[J]. 生态学杂志, 2007b, 26(1): 108-114
- [7] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(2): 1851-1857
- [8] Dunbar M. J, Acreman M. C. Applied hydro-ecological sciences for the twenty-first century [A]. Acreman M. C., Hydro-Ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology [M] (IAHS Publication no. 266). Wallingford: IAHS Press, 2001: 1-17.
- [9] Kundzewicz Z. W. Ecohydrology—seeking consensus on interpretation of the notion [J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47: 799-804.
- [10] 夏军, 丰华丽, 谈戈等. 生态水文学—概念、框架和体系[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 4-10.
- [11] 李佩成. 论咸海萎缩问题及其对国土开发治理中水事活动的启示[J]. 国土开发与整治, 1993, 3(4): 53-60.
- [12] 李佩成. 莫让“咸海事件”在西部重演[J]. 西部大开发, 2003, (3): 1.
- [13] 冯国章. 水事活动对区域水文生态系统的影响及其对策研究[D]. 陕西杨凌: 西北农业大学, 1998.
- [14] 王金凤. 农事活动对灌区水文生态的影响研究[R], 长安大学博士后出站报告. 2011, 11
- [15] 竺可桢. 向沙漠进军. 人民日报[N]. 1962, 1
- [16] 李并成. 河西走廊历史时期沙漠化研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 2003, 3
- [17] 王乃昂, 程弘毅, 李育. 石羊河与黑河下游湖泊变迁—气候变化和人类活动的影响[J]. 中国地理学会百年庆典学术论文集, 2009, 10
- [18] 冯绳武. 民勤绿洲的水系演变[J] 地理学报, 1963, 29(3): 241-249
- [19] 冯绳武. 甘肃河西水系的特征和演变[J]. 兰州大学学报, 1981, 17(1): 125-129
- [20] 党瑜. 历史时期河西走廊农业开发及其对生态环境的影响[J]. 中国历史地理论丛, 2011, 16(2):

114 - 126

- [21] 闫廷亮. 历史时期河西走廊环境资源保护述略[J]. 古今农业, 2009(3),40-45
- [22] 颀耀文, 陈发虎. 近2000年来民勤盆地绿洲的空间变化[J]. 地理学报, 2004,59 (5): 667-670
- [23] 王乃昂, 李吉均. 河西走廊东段湖泊旋回及其古气候意义[J]. 湖泊科学, 1999,11 (3): 225-230
- [24] 张成君, 陈发虎, 施祺. 西北干旱区全新世气候变化的湖泊有机碳同位素记录-以石羊河流域三角城为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000,20(4): 93-97.
- [25] 魏晓妹, 康绍忠, 粟晓玲, 等. 石羊河流域绿洲农业发展对地表水与地下水转化的影响[J]. 农业工程学报, 2005,21(5):38-41
- [26] 粟晓玲, 康绍忠, 佟玲. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法与应用. 生态学报[J], 2006, 26 (6) : 2012-2018
- [27] 粟晓玲, 康绍忠. 干旱区面向生态的水资源合理配置模型与应用源合理配置模型与应用[J]. 水利学报, 2008, 39 (9): 111-116
- [28] 徐启运, 郭慧, 尹宪志. 10 ka BP来石羊河流域气候演变特征分析[J]. 冰川冻土, 2007,29 (4): 617-625
- [29] 周自江, 王锡稳, 西北地区东部群发性强沙尘暴序列的建立与分析[J]. 地理学报, 2002,7,57(4), 437-442
- [30] 李栋梁, 王涛, 钟海玲. 中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J]. 中沙沙漠, 2004,24 (3): 376-379
- [31] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2004, 22 (2): 106-111
- [32] 李金标, 马金珠. 石羊河流域近50a来气候变化与人类活动对水资源的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008,22(2):75-80.
- [33] 丁贞玉, 马金珠. 石羊河流域出山口径流特征及其与山区气候变化相关关系分析[J]. 资源科学. 2007,3(29):53-57.
- [34] 李小玉, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异[J]. 地理学报, 2005, 60 (2) : 319-327.
- [35] 冯绍元, 霍再林, 康绍忠, 陈绍军干旱内陆区自然-人工条件下地下水位动态的ANN模型[J]. 水利学报, 2007,38 (7) :873-878
- [36] 中国水利学会, 甘肃省水利科学研究院, 加拿大土木工程学会. 石羊河流域生态环境修复研究与示范[R], 2010, 8

参考文献

[37] 中科院寒区旱区环境与工程研究所. 中国北方沙漠化过程及其防治研究历史时期沙漠化过程研究[R], 2005, 8

[38] 王涛等, 沙漠化综合防治战略与优化模式[R], 2005, 8

[39] 马金珠, 朱中华, 于保静. 石羊河流域水环境演化与水资源合理利用[M], 兰州: 兰州大学出版社, 2005

第二章:

[40] 范锡鹏. 河西走廊主要含水层系地下水的运动与交替[J]. 甘肃地质, 1983, 103-115.

[41] 马金珠, 魏红. 民勤地下水资源开发引起的生态与环境问题[J]. 干旱区研究2003, 20(4): 262-265.

[42] 俄有浩. 民勤盆地地下水时空动态及其对生态环境变化影响过程的GIS辅助模拟[D]. 博士学位论文, 兰州大学, 2005年.

[43] 1993年“5·5风暴” [N], 中国气象影视信息网, 2006, 4

[44] 臧烜德. 石羊河流域生物多样性调查[J]. 现代农业科学, 2009, 16(6): 141-142

[45] 竇宪. 正在远去的祁连山冰川[J]. 绿色中国, 2006, (4): 34-39

[46] 曹泊, 潘保田. 1972-2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2) 242-247

[47] 李世明, 程国栋, 李元红, 等. 河西走廊水资源合理利用与生态环境保护[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002

[48] 郭良才, 岳平. 河西走廊干旱区的水资源分布及循环过程[J]. 干旱地区农业研究, 2011(29), 157-162

[49] 丁贞玉. 石羊河流域及腾格里沙漠地下水补给过程及演化规律[D]. 兰州大学, 2010, 5

[50] 王杰. 石羊河流域近二十年生态环境质量演变[D]. 兰州大学, 2009, 5

[51] 李宗礼. 民勤地下水持续超采地区开采量优化分析[A]. 中国西北荒漠区持续农业与沙漠综合治理国际学术论文集[C]. 兰州, 兰州大学出版社, 1998, 205-211.

第三章:

[52] 颜耀文, 王乃昂, 陈发虎. 历史时期民勤绿洲空间分布重建[J]. 土地变化科学与生态建设学术研讨会论文集, 2004 年

[53] 颜耀文, 陈发虎. 近2000年来民勤盆地绿洲的空间变化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 667-670

[54] 王乃昂, 赵强, 胡刚. 近2ka河西走廊及毗邻地区沙漠化[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1), 95-100

[55] 闫廷亮, 历史时期河西走廊环境资源保护述略[J], 古今农业, 2009(3), 40-45.

- [56]党瑜.历史时期河西走廊农业开发及其对生态环境的影响[J].中国历史地理丛, 2001,16(2), 114 -126
- [57]王涛.论秦汉时期人类不合理开发是导致西北生态环境变迁的重要性因素[D].郑州大学硕士论文,2003,5.
- [58]《史记》，卷110《匈奴列传》，中华书局,1982年，第2908页。
- [59]《汉书》卷28《地理志下》
- [60]民勤县水利志编纂委员会,《民勤县水利志》，兰州大学出版社，1994
- [61]李并成.河西走廊历史时期绿洲边缘荒漠植被破坏考[J].中国历史地理论丛, 2003, 18 (4) 124 -133
- [62]李并成.猪野泽及其历史变迁考[J].地理学报,1993,48(1):55-60
- [63]《资治通鉴》卷207，长安元年十一月条
- [64]吴晓军.河西走廊内陆河流域生态环境的历史变迁[J].兰州大学学报(社会科学版) 2008,28 (4) :46-49
- [65]资治通鉴，卷216
- [66]全唐诗，卷298
- [67]李并成.河西走廊历史时期沙漠化研究[M]科学出版社，2002,12
- [68]《文献通考》，卷322，《輿地考八》
- [69]陆宁,马建民.明代宁夏镇烧荒考[J],宁夏社会科学,2009,3:104-109
- [70]甘肃省档案馆编.清末甘肃奏折.遵札查勘南山林木并提讯番汉头目各情形酌拟办法折
- [71]甘州府志·国朝辑略，卷3 [M]
- [72]《镇番遗事历鉴》卷六，圣祖康熙十六年丁卯，220页
- [73]《镇番遗事历鉴》卷七，世祖雍正十三年乙亥，227页
- [74]《镇番遗事历鉴》卷八，高宗乾隆四十三年戊戌，329页
- [75]李佩成.关于落实2011年中央一号文件的几点建议.2011，呈送中央有关领导内部文件.
- [76]《镇番遗事历鉴》卷一，明太祖洪武十六年癸亥，4页
- [77]《镇番遗事历鉴》卷一，英宗正统三年戊午，17页
- [78]王乃昂,李吉均,曹继秀,等.青土湖近6000年来沉积气候记录研究—兼论四、五世纪气候回暖[J].地理科学, 1999, 19 (2):119-124
- [79]徐国昌.中国干旱半干旱区气候变化[M].北京：气象出版社，1997
- [80]丁文广,刘敏.甘肃历史时期干旱饥荒和虫害相关研究及应对策略建议[J].干旱区资源与环境,2011, 25(3):113-117

第四章:

- [81]李佩成. 论水文生态学的建立及其历史使命[R].西安, 长安大学水与发展研究院, 2011
- [82]李佩成,冯国璋.论干旱半干旱地区水资源可持续供给原则及节水型社会的建立[J].干旱地区农业研究,1996,15(2):1-7.
- [83]李佩成.试论人类水事活动的新思维[J].中国工程科学,2000,2 (2), No2
- [84]魏晓妹,康绍忠,粟晓玲,等.石羊河流域绿洲农业发展对地表水与地下水转化的影响[J].农业工程学报, 2005,21(5):38-41
- [85]王宗太.中国冰川目录—祁连山区[M].兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981
- [86]曹泊,潘保田,高红山,等.1972-2007 年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J].冰川冻土,2010,32(2):242-248
- [87]李佩成,郭曼,王丽霞,等.近60年来中国大陆降水、气温动态及其相互关系的初步研究[J],中国工程科学2011,13(4),29-35
- [88]徐启运,郭慧.10 ka BP 来石羊河流域气候演变特征分析[J].冰川冻土, 2007, 29 (4) :617 -625
- [89] 中国气象局.中国气候与环境演变[M].北京:气象出版社, 2006
- [90]刘宇峰,孙虎,原志华,1960年至2007年汾河流域气温年际和季节性变化特征分析[J]. 资源科学, 2011 ,33 (3), 489 - 495.
- [91]王文胜,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [92]魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M] . 1999.北京:气象出版社,49~53.
- [93]牛若芸,田翠英,毕宝贵.沙尘暴天气等级、气象标准汇编[S].2005-2006,北京气象出版社, 2008,25-31
- [94]周自江,王锡稳.西北地区东部群发性强沙尘暴序列的建立与分析[J].地理学报,2002,7,57(4),437-442
- [95]郑广芬,冯建民,赵光平.中国西北地区东部沙尘暴区划研究[J].自然资源学报, 2010, 10, 25 (10): 1676-1686
- [96]雷红富,谢平,陈广才.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J],水电能源科学,2007, 25 (4), 36-40;
- [97]刘萱,张文煜,贾东于.河西走廊沙尘暴50a频率突变检测分析[J].中国沙漠,2011, 31 (6): 1579 - 1584
- [98] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠, 2002,22(2):106-111.
- [99]马国柱,魏和林.中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J].气象学报,2000, 58 (3) : 278~286.

- [100]沈冰,黄领梅,阮本清,等.和田绿洲水循环要素变化特征[J].水利学报,2003,(5):78-83.
- [101]汪荣鑫.数理统计[M].西安:西安交通大学出版社,2006.
- [102]邹悦,张勃,戴声佩,等.黑河流域莺落峡站水文过程变异点的识别与分析[J].资源科学,2011,33(7):1264-1270
- [103]冯建英,李栋梁.甘肃省河西内陆河流量长期变化特征[J].气候与环境研究,2001,5(4):192-196
- [104]冯建英,陆登荣,赵映东.河西内陆河径流量变化及其与气候变化的关系[J].中国气象学会2008年年会干旱与减灾——第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集,2008,11
- [105]崔锦泰,程正兴.小波分析导论[M].西安:西安交通大学出版社,1995,第1版:2-28
- [106]邱海军,曹明明,曾彬.基于小波分析的西安降水时间序列的变化特征[J].中国农业气象,2011,32(1):23-27
- [107]张学真,梁俊峰,胡安焱,人类活动对黑河水文工程的分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(10):98-102
- [108]孙然好,潘保田,牛最荣,等.河西走廊近年来地表水资源时间序列的小波分析[J].干旱区地理,2005,28(4):455-459.
- [109]孟彩霞.基于不同方法的和田绿洲水循环要素变化特征分析[D].西安:西安理工大学水文学及水资源工程系,2006
- [110]张晓伟,沈冰,莫淑红,等.石羊河流域出山口径流演变特征[J].干旱区地理,2008,31(6):836-841
- [111]李佩成.论自流灌区的节水与养水[J].灌溉排水,2000,19(1):12-15
- [112]陈葆仁,洪再吉.地下水动态及其预测[M].北京:科学出版社,1988.
- [113]王文,马骏.若干水文预报方法综述[J].水利水电科学进展.2005.25(1):56-60
- [114]杨婷,魏晓妹,胡国杰等,灰色BP神经网络模型在民勤盆地地下水埋深动态预测中的应用[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):204-208
- [115]邓聚龙.灰色预测与决策[M].武汉:华中工学院出版社,1986:214-313.
- [116]刘思峰,谢乃明.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社
- [117]罗晓玲,周建新,王玉兰.基于GM(1,1)模型在高等学校招生人数预测中的应用研究——以四川省普通高校为例[J].贵州大学学报:自然科学版,2008,25(4):342-345.
- [118]李福琴.灰色模型的稳定性和建模精度研究[D].武汉理工大学,2006,11
- [119]李纪人,刘德平.水文时间序列模型及预报方法[M].河海大学出版社,1991
- [120]王文胜,丁晶,金菊良.随机水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [121]工程水文与水利计算[M].北京:中国农业出版社,2005.

- [122] 中国水利学会, 甘肃省水利科学研究院, 加拿大土木工程学会. 石羊河流域生态环境修复研究与示范[R], 2010, 8
- [123] 李佩成.论干旱半干旱地区水资源可持续供给原则及节水型社会的建立[J].干旱地区农业研究, 1996,15(2):1-7
- [124]李佩成.防旱抗旱确保粮食及农村供水安全战略研讨会开幕词[R].西安:长安大学水与发展研究院,2011
- [125]李佩成.试论干旱[J].干旱半干旱地区农业研究.1984 (2) :4-17
- [126]杨封科,高世铭,何宝林.防旱抗旱确保粮食及农村供水安全战略研讨会 [R]. 西安: 长安大学水与发展研究院, 2011
- [127]尹宪志.甘肃省近 50 年干旱灾情研究[J].干旱区研究, 2005,22 (1): 120-124
- [128]汪党献, 王浩.国民经济行业用水特性分析与评价[J].水力学报, 2005, 36 (2): 167-173
- [129]甘肃省水利厅,1991-2004年甘肃省水资源公报[R].1992-2005
- [130]李建华,傅立.现代系统科学与管理[M] .北京:科学技术文献出版,1996.
- [131]畅建霞,黄强,王义民,等.基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究 [J] .水利学报, 2002(11) : 107-112.
- [132]刘燕,胡安焱,邓亚芝.基于信息熵的用水系统结构演化研究西北农林科技大学学报[J]. 2006, 34 (6):141-144
- [133]王栋.信息熵在水系统中的应用研究综述[J].水文,2001,21(2):9-14.
- [134]耿海青,古树忠.基于信息熵的城市居民家庭能源消费结构演变分析—以无锡市为例[J], 自然资源学报, 2004.3:257~262
- [135]李佩成.第二届干旱半干旱地区水文生态与水安全国际学术论坛[R].西安:长安大学,2010
- [136] 康绍忠, 粟晓玲, 杜太生等. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式—以甘肃石羊河流域为例[M]. 北京: 中国水利水电出版社. 2009, 6
- [137]李佩成.论水文生态学的建立及其历史使命[J].灌溉排水学报, 2012,31 (1): 1-4

第五章:

- [138]甘肃省水利厅,2005年甘肃省水资源公报[R].2005
- [139] 李泽红, 董锁成. 武威绿洲农业开发对民勤绿洲来水量的影响[J]. 资源科学, 2011, 33 (1): 86-91
- [140]甘肃省水利厅,甘肃省发展和改革委员会,石羊河流域重点治理规划[R].2007,8

- [141]民勤政府网. 2011 年度石羊河流域重点治理两大约束性目标全面完成[EB/OL].
<http://www.minqin.gansu.gov.cn/Item/29471.aspx>, 2012-1-4
- [142]石羊河流域综合治理网[EB/OL]. <http://www.gs.xinhuanet.com/syhzl/zlzl.htm>
- [143]李宗礼.石羊河流域水资源概况[R].武威, 2009,8
- [144]康绍忠, 佟玲. 河西地区干旱规律与抗旱减灾对策[R]. 西安: 长安大学水与发展研究院, 2011
- [145]甘肃省水利厅,2007-2010年甘肃省水资源公报[R].2007-2010.
- [146]黄河网. 自流井、芦苇荡、 湿地—来自石羊河流域重点治理的报告[EB/OL].
http://www.yellowriver.gov.cn/xwzx/lylw/201111/t20111124_110693.html. 2011. 11
- [147]李佩成, 冯国璋. 论干旱半干旱地区水资源可持续供给原则及节水型社会的建立[J]. 干旱地区农业研究. 1996, 15(2):1-7
- [148]李佩成. 建立节水型社会是摆脱水荒困境的最佳选择[N]. 人民日报, 1997-7-11 (10)
- [149]李佩成. 论自流灌区的节水与养水[J]. 灌溉排水, 2000,19(1):12-15

攻读学位期间取得的研究成果

一、发表的学术论文：

- [1]富飞,贾志峰,朱红艳. 基于宽容约束的多目标水资源优化配置[J]. 水资源与水工程学报, 2011, (2): 77-81.
- [2]富飞,贾志峰. 库车河铜场水库工程水文计算[J].华北水利水电学院学报, 2011, 32 (1): 9-13.
- [3]富飞,贾志峰. 基于正交设计的旱区棉花膜下滴灌最优化探究[J]. 地下水, 2011, 33(2): 89-92.
- [4]贾志峰,富飞.水库兴利调节及调洪计算的程序设计与应用[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(12): 1415-1418.
- [5]贾志峰,富飞. 森林资源数据库统计程序的设计与应用[J]. 林业建设, 2010,(6): 26-29.
- [6]贾志峰,富飞.投放重物封堵溃口试验探究[J]. 长江科学院报, 2011,28(9):25-29.

二、参加的科研项目：

- [1]教育部、国家外专局高等学校学科创新引智计划(“111”)项目(项目编号: B08039)
- [2]西北不同生态地域山川秀美试验示范建设(项目编号: 2002BA901A43)
- [3]陕西省扩大“八水绕长安”规模化功能研究(项目编号: 2010KRM119)
- [4]中国工程院国务院咨询项目——国家防旱抗旱项目战略研究(项目编号: 37)

致谢

几经修改，论文终于定稿，抚案深思，内心颇不宁静。就论文本身而言，在我刚读研的时候，导师李佩成院士便为我选定了论文的题目，及至后来资料的收集、论文的修改，无不凝聚着导师辛勤的汗水。今日论文虽算“勉强过关”，但于内心之深处，仍觉得对不起导师的教导和培养，因为三年以来，无论是生活之余，工作之间，导师在论文的思路还是细节方面，都曾多次对我予以引导，给我鼓励，因此没能做出一篇令自己十分满意的毕业论文，对自己而言，心中是颇为不安的。三年来，导师的高风亮节，令人敬仰，让我看到了一个老科学家在学术、对人生、看世界万物真正意义上的一种高尚境界和积极的人生态度。更令我感动的是，导师已七十有七，其对工作、人生依旧进行着孜孜不倦的探索，我想导师这一份对工作、对人生的态度，足以令我等毫不懈怠，并受用一生。在论文完成之际，我谨向导师李佩成院士和师母初杨瑞老师致以最衷心的感谢和最诚挚的敬意，并祝二老健康长寿！

在论文的调研和资料收集过程中，得到了甘肃省水利科学院雒天峰师兄、武威农技中心土肥站曾爱国站长、甘肃省农业科学院包兴国老师、中国农业大学康绍忠教授和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所李宗礼高工的大力支持，再次向他们表示衷心的感谢！论文的部分资料来源于甘肃省水利科学院、甘肃省水利水电勘察设计研究院、石羊河流域农业与生态节水试验站、武威农技中心试验站、民勤水务局、石羊河流域管理局等，在此一并表示感谢。

感谢硕士三年来水与发展研究院的李启磊、易秀、刘秀花、杨生堂、贺军奇、贺屹、刘昭、徐斌、刘燕、姜凌、张燕、王丽霞、周璐红、王金凤、潘红霞等老师和闫卫疆、郑飞敏等同志在学习、生活和工作中给予的帮助！感谢长安大学七年来为我传道授业的各位老师，在此谢谢你们！

感谢郭曼、乔长录、郝少英、茯苓、付恒阳、谢炳辉、徐春燕、徐策玉、李文斌、姚阿漫等各位同门，特别是贾志峰、朱红艳二位博士，正是因为有以上各位老师、同门，使我的研究生生活、学习得到了诸多的快乐和回忆。

最后，我要深深的感谢我的父母和家人，感谢他们这么多年来为我学业上的付出和理解！

富飞

2012年4月7日于古城西安