

分类号 _____
U D C _____

密级 公 开
编号 10741



硕 士 学 位 论 文

论文题目 甘肃省水资源承载力评价研究

研 究 生 姓 名: 许程程

指导教师姓名、职称: 王永瑜 教授

学 科、专 业 名 称: 应用经济学 统计学

研 究 方 向: 经济与社会统计

提 交 日 期: 2021年6月6日

独创性声明

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

学位论文作者签名：许程程 签字日期：2021.6.6

导师签名：张新 签字日期：2021-6-6

关于论文使用授权的说明

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

- 1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
- 2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名：许程程 签字日期：2021.6.6

导师签名：张新 签字日期：2021-6-6

Research on Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Gansu Province

Candidate: Xu Chengcheng

Supervisor: Wang Yongyu

摘 要

水是人类赖以生存和发展的不可替代的自然资源。水资源承载力的状态是人与水资源关系的一种反映,水资源承载力的评价研究对于有效应对各方压力和可能发生的危险具有重要意义。随着甘肃省人口规模的增大和社会经济的发展,水资源匮乏、水资源安全及水环境恶化已成为制约甘肃省可持续发展的重要问题,因此,对甘肃省的水资源承载力进行评价和研究具有现实意义。

本文以甘肃省各市(州)为切入点,基于 2009-2018 年的面板数据,建立“水资源—社会—经济—生态环境”四维水资源承载力评价指标体系,运用熵权法计算各维度中具体指标的动态权重,结合 TOPSIS 法对甘肃省 14 个市(州)的水资源承载力进行定量评价并对评价结果进行等级划分,从空间和时间两个角度比较分析各地区水资源承载力的优势与不足,运用障碍度模型对 2018 年影响甘肃省各地区水资源承载力的主要障碍因子进行分析,得到以下结论:

1. 甘肃省水资源承载力整体呈上升发展趋势

2018 年甘肃省 14 个市(州)中处于Ⅲ级水平的地区相对 2009 年增加 1 个,处于Ⅴ级水平的地区数保持不变,处于Ⅳ级水平的地区数减少 1 个。

2. 甘肃省各市(州)的水资源承载力水平差异较大

2009 年甘肃省 14 个市(州)的水资源承载力空间差异度为评价年间最小值 0.322,2016 年表现为评价年间最大值 0.408。2018 年水资源承载力主要表现为兰州市、嘉峪关市和临夏州间差异较大。

3. 甘肃省各市(州)的水资源承载力变动情况不一且制约因素不同

2009-2018 年各市(州)水资源承载力的综合评价结果波动情况不一,且在不同年份受到各维度中具体指标的影响程度不同。2018 年甘肃省水资源承载力提升面临的障碍因素主要有水资源维度中的人均水资源量和人均供水量等;社会维度中的人口密度和人口自然增长率等;经济维度中的人均 GDP 和经济密度;生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力等,但各地区所需改进的侧重方面又有所不同。

最后,本文基于实证分析结果和现实发展情况,对甘肃省如何在水资源、社会、经济和生态环境四个方面做出改进以提高水资源承载力提出相关对策建议。

关键词: 甘肃省 水资源承载力 TOPSIS 障碍度模型

Abstract

Water is an irreplaceable natural resource for human survival and development. The state of water resources carrying capacity is a reflection of the relationship between people and water resources, the evaluation and research of water resources carrying capacity is of great significance for effectively coping with the pressures and possible dangers of all parties. With the increase in the population size and the development of social economy, the deficient of water resources, the safety of water resources and the deterioration of the water environment have become important issues restricting the sustainable development of Gansu Province. Therefore, it is of practical significance to evaluate and study water resources carrying capacity.

The article takes the cities (prefectures) of Gansu Province as the starting point and bases on the panel data from 2009 to 2018, establishing a four-dimensional water resource carrying capacity evaluation index system for water resources-society-economy-ecological environment, and uses the entropy method to calculate the dynamic weights of specific indicators in each dimension, combines with the TOPSIS method to quantitatively evaluate the water resources carrying capacity of 14 cities (prefectures) in Gansu Province and classifies the evaluation results, analyzing the advantages and shortcomings of water resources carrying capacity in various regions from the perspectives of space and time, and uses the obstacle degree model to analyze the main obstacle factors that affect the water resources carrying capacity of various regions in

Gansu Province in 2018, getting the following conclusions:

1. The overall water resources carrying capacity of Gansu Province is on the rise.

In 2018, among the 14 cities (prefectures) of Gansu Province, the number of regions at level III increased by one compared to 2009, the number of regions at level V remained unchanged, and the number of regions at level IV decreased by one.

2. The level of water resources carrying capacity varies greatly among cities (prefectures) in Gansu Province.

In 2009, the spatial difference of water resources carrying capacity of the 14 cities (prefectures) of Gansu Province was the minimum value of 0.322 during the evaluation year, and in 2016 it was the maximum value of 0.408. In 2018, it was mainly manifested in the large differences between Lanzhou City, Jia yuguan City and Linxia Prefecture.

3. The changes in the water resources carrying capacity of the cities (prefectures) in Gansu Province and the restrictive factors are different.

The fluctuations of the comprehensive evaluation results of the water resources carrying capacity of each city (state) from 2009 to 2018 were different, and the degree of influence of specific indicators in each dimension was different in different years. In 2018, the obstacles to the improvement of the water resources carrying capacity of Gansu Province are mainly the per capita water resources and water supply in the water resources dimension; the

population density and natural population growth rate in the social dimension; the per capita GDP and economic density in the economic dimension; the daily treatment capacity of urban sewage treatment plants in the ecological environment dimension and so on, but the focus of improvement in each region is different.

Finally, basing on the results of empirical analysis and the actual development situation, this article proposes relevant countermeasures and suggestions on how to improve the water resources, society, economy and ecological environment in Gansu Province in order to increase the water resources carrying capacity.

Keywords : Gansu province; Water resources carrying capacity; TOPSIS; Obstacle degree model

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景和研究意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	3
1.2.3 文献述评.....	5
1.3 研究内容与研究方法.....	5
1.3.1 研究内容.....	5
1.3.2 研究方法.....	8
1.3.3 创新点.....	8
2 概念界定与理论基础	9
2.1 水资源承载力研究的理论基础.....	9
2.1.1 资源稀缺理论.....	9
2.1.2 可持续发展理论.....	9
2.1.3 自然—社会二元模式下水文循环理论.....	10
2.1.4 水资源“量、质、域、流”理论.....	10
2.2 相关概念界定.....	11
2.2.1 承载力的概念.....	11
2.2.2 水资源承载力的概念.....	11
2.3 水资源承载力研究的方法论基础.....	11
3 甘肃省各地区发展现状分析	13
3.1 水资源现状.....	13
3.2 社会发展现状.....	15
3.3 经济发展现状.....	15
3.4 生态环境现状.....	16

4 甘肃省水资源承载力综合评价分析	18
4.1 评价指标体系的建立.....	18
4.1.1 构建指标体系原则.....	18
4.1.2 “水资源—社会—经济—生态环境”四维评价指标体系.....	18
4.1.3 指标解释.....	20
4.2 水资源承载力等级划分.....	21
4.3 基于熵权—TOPSIS 法的甘肃省水资源承载力综合评价分析.....	22
4.3.1 数据的预处理.....	22
4.3.2 熵权法.....	22
4.3.3 TOPSIS 法.....	24
4.4 水资源承载力评价结果分析.....	26
4.4.1 空间角度分析.....	26
4.4.2 时间角度分析.....	29
5 甘肃省水资源承载力障碍因子分析	38
5.1 障碍因子诊断模型.....	38
5.2 障碍因子分析.....	39
6 结论及对策建议	41
6.1 主要结论.....	41
6.2 甘肃省水资源承载力提升策略.....	43
参考文献	46
致 谢	50

1 绪论

1.1 研究背景和研究意义

1.1.1 研究背景

二十世纪中叶以来,社会经济飞速发展,科学技术突飞猛进,人类对自然的干预能力远超预期。人类获取巨大的物质财富加速了世界文明的演化进程^[1]。但是,通过过度消耗和滥用自然资源、破坏我们赖以生存的生态环境如此方式得到的物质财富和现代文明,必将造成人与自然关系的高度紧张,“可持续发展”战略应运而生。改革开放以来,党中央、国务院高度重视中国的可持续发展。1994年3月,国务院常务会议通过《中国21世纪议程》,确定实施可持续发展战略。2007年10月,党的十七大首次提出建设生态文明,强调要“基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式”。2017年10月,习近平总书记在十九大报告中明确指出“必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念”。2020年5月,全国政府工作报告中指出要加强污水、垃圾处置设施建设,实施重要生态系统保护和修复重大工程,促进生态文明建设。

人类社会的发展与进步,都来自自然资源的供给和物质转换。水是自然环境的重要组成部分,是维系人类生存与发展的最基本条件之一,人类文明的盛衰变迁无不与水密切相关^[2]。地球上可为人类利用的淡水仅有不到1%,中国人均淡水资源仅占世界的四分之一,已被联合国列为贫水国家。水资源不仅是维系自然生态环境和社会发展的基础性资源,而且是一种战略性的经济资源,是一个国家综合国力的有机组成部分。党的十八届三中全会指出“要建立资源环境承载能力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”。2014年3月,习近平总书记提出要把水环境承载能力和水生态作为刚性约束,贯彻落实到改革发展稳定的各项工作中。党的十九大强调水利发展中存在的水资源、水环境、水生态、水灾害问题需要统筹解决。近年来,“以水定产,以水定发展”,即水资源承载力(water resources carrying capacity)研究,作为可持续发展研究和水资源安全战略研究中的基础课题,已引起学术界和政府相关部门的高度重视,“国家水资源承载力评价与战略配置”项目于2016年立项实施。

甘肃省位于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇地带,地域狭长,地貌

呈山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁交错分布，大部分地区干旱少雨，生态环境脆弱。水资源主要分属黄河、长江、内陆河 3 个流域，2018 年全省自产地表水资源量 345.63 亿立方米，地下水资源量 167.29 亿立方米；全省入境水资源量 396.94 亿立方米，出境水资源量 624.35 亿立方米；人均水资源量 1345.68 立方米^①，水资源情况不容乐观。随着人口的增加和社会经济的高速发展，水环境承受的压力逐渐增大。2019 年 8 月习近平总书记在甘肃调研考察时指出“保护母亲河是事关中华民族伟大复兴和永续发展的千秋大计”，要求甘肃首先担负起黄河上游生态修复、水土保持和污染防治的重任，兰州要在保持黄河水体健康方面先发力、带好头。

1.1.2 研究意义

1.理论意义

本文在理清水资源承载力的内涵和相关理论基础，构建了甘肃省水资源承载力评价指标体系，对甘肃省的水资源承载力进行了综合评价分析和障碍因子分析，研究过程对于解决目前甘肃省面临的水资源匮乏、水资源安全、水环境恶化及可持续发展问题具有重要理论意义。

2.现实意义

水资源是人类生存必不可少的基础性自然资源，是维持一个地区生态服务功能、保障社会经济可持续发展的关键要素。2020 年我国实现全面脱贫和全面建成小康社会后，甘肃省作为西部欠发达地区，如何在水资源约束条件下继续促进国民经济和生态文明的可持续发展，对于接下来实现建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国这一目标具有重要意义。甘肃省水资源承载力的评价研究不仅对于其实现可持续发展具有重要意义，而且对于黄河上游的生态修复、水土保持和防治污染也具有现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

水资源承载力研究是继土地资源承载力研究之后的主要研究内容。国外关于水资源承载力的单项研究成果较少，一般将其理解为天然水资源数量的开发利用极限，往往使

^①国际公认人均水资源量低于 1000 立方米为重度缺水等级。

用“可利用水量(water availability)、水资源供需比(ratio of water supply to water demand)”等概念进行表述。Falkenmark 等(1998 年)采用“可利用水量”从政策定位和人类适应性角度来研究如何应对水安全问题^[3]。Harris 等(1999 年)在研究农业生产区域的耕地承载力时将水资源作为了重要影响因素^[4]。Rjisberman(2000 年)把承载力作为城市水资源安全保障的衡量标准应用于水资源的评价和管理研究中^[5]。Olli Varis 等(2001 年)从工业化速度、粮食增长需求和环境退化程度等方面对处于不同发展状况地区的水环境承载能力进行了研究^[6]。Milano 等(2013 年)采用“水资源供需比”概念对埃布罗河流域水资源能够满足现状与未来需求的能力进行了评估^[7]。Mianabadi 等(2015 年)在研究跨流域水资源的优化配置时应用了加权破产理论^[8]。Ait-Aoudia 等(2016 年)基于供需要素确定了阿尔及尔水资源能够支撑的最大人口数^[9]。Atzori 等(2016 年)将净水足迹应用到动物产品中,开展了一种新的估算水资源配置方法的初步研究^{[10][11]}。

1.2.2 国内研究现状

国内有关水资源承载力的研究始于 1989 年我国新疆水资源软科学课题研究组对于水资源环境承载力概念的提出,认为水资源环境承载力是指水资源的可开发利用量,在满足维护生态环境用水要求后,所能支撑的工农业最大产值和人口数量^[12]。此后,国内学者开始对水资源承载力进行研究,关于水资源承载力概念、评价指标体系和评价方法的研究进展进行如下综述:

1.水资源承载力概念研究进展

关于水资源承载力的概念理解可以归纳为三种观点,一种是水资源开发规模论;二是水资源承载最大人口论;三是水资源支持持续发展能力理论。

(1) 水资源开发规模论

许有鹏(1993 年)认为水资源承载力是指水资源的最大开发容量,即水资源能够最大程度地供给一定条件下工农业生产、人民生活 and 生态环境保护等用水的能力^[13]。冯尚友等(1997 年)^[14],张鑫等(2001 年)^[15]均持有该观点。

(2) 水资源承载最大人口论

阮本青等(1998 年)认为水资源承载力是在未来不同的时间尺度上,在保证正常的社会文化准则物质生活条件下,一定区域的自身水资源量用直接或间接方式所表现的资源能够持续供养的人口数量^[16]。姚治君(2002 年)^[17],封志明(2014 年)^[18],王浩(2004 年)^[19]、

赵恩国(2015年)^[20]等均持有水资源承载最大人口论观点。

(3) 水资源支持持续发展能力论

施雅凤等(1992年)认为水资源承载力是指某一地区的水资源,在一定社会历史和科学技术发展阶段,在不破坏社会和生态系统时,最大可承载容纳的农业、工业、城市规模和人口的能力,是一个随着社会、经济、科学技术发展而变化的综合目标^[21]。左其亭等(2005年)认为城市水资源承载力是指特定的城市区在一定时段内,水资源能够维系生态系统良性循环和支撑社会经济发展的最大规模^[22]。许新宜(1997年)^[23]、贾嵘(1998年)^[24]、惠泱河(2001年)^[25]、夏军(2002年)^[26]、程国栋(2002年)^[27]、龙腾锐(2003年)^[28]、黄林楠(2008年)^[29]、王建华(2017年)^[30]、李云玲(2017年)^[31]、何刚(2019年)^[32]、刘志明(2019年)^[33]等均支持水资源支持持续发展能力论。

2. 水资源承载力评价指标体系研究进展

惠泱河等(2001年)从社会经济承载能力、承载人口能力、水环境容量、可供水量和需水量五方面设置67项指标建立了水资源评价指标体系^[25]。陈洋波等(2004年)提出了由水资源驱动力、压力、状态、影响和响应五类指标构成的综合评价指标体系,并对深圳市的水资源承载力进行了评价分析^[34]。袁鹰等(2006年)构建了包括水资源承载主体的水资源系统、承载客体的社会经济系统及生态环境系统、水资源合理配置下的主客体耦合三个方面的水资源承载能力评价指标体系,并对海南省的水资源承载力进行了评价分析^[35]。王建华等(2017年)从水量、水质、水域空间和水流状态四个维度构建了水资源承载力评价指标体系^[36]。金菊良等(2018年)建立了不同承载标准下的区域水资源承载力评价模型并应用其对陕西省的水资源承载力进行计算^[37]。左其亭等(2020年)构建了涵盖水资源、生态环境、经济社会三个准则层的评价指标体系并对黄河流域九省区的水资源承载力进行了综合评价^[38]。

3. 水资源承载力评价方法研究进展

水资源承载力的评价方法日趋多样化。周亮广等(2006年)运用主成分分析法对喀斯特地区水资源承载力的动态变化进行了研究^[39]。刘树锋等(2007年)在对惠州市的水资源承载力进行研究时建立了基于神经网络的水资源承载力耦合模型^[40]。胡吉敏(2008年)采用多层可变模糊综合评价方法对大连市的水资源承载力进行了研究^[41]。马峰等(2012年)在测算石家庄市的水资源承载力时采用了投影寻踪方法^[42]。张军等(2012年)采用生态足迹法研究了疏勒河流域水资源承载力与生态赤字^[43]。李辉等(2018年)利用集对分析

理论中的联系数方法对安徽省水资源的承载状况进行了评价^[44]。孙国营等(2019年)通过主客观组合赋权法和基于三支决策改进的 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)模型对芜湖市 2006-2015 年水资源承载力进行了评价^[45]。

1.2.3 文献述评

综上所述,关于水资源承载力的研究已呈系统性,进入深化发展阶段。学者们对水资源承载力概念的理解逐渐深入,且水资源支持持续发展能力论更符合当前水资源、社会、经济和生态环境的发展现状,更符合可持续发展理论,具有现实和长远意义。众多学者对不同城市、区域或流域间的水资源承载力进行了不同程度的研究,但从目前研究成果来看仍存在以下不足:

1.关于水资源承载力的评价指标体系尚未形成统一完善的标准,较为全面的是涵盖水资源、社会、经济及生态环境的四维评价指标体系,但选取指标时未充分考虑到水资源维度和其他维度间的循环及联动关系,还有部分学者从水文环境角度建立水资源包括水量、水质、水域及水流的评价指标体系等。

2.关于水资源承载力的评价方法存在改进空间。大多数学者采用某种评价方法对构建的指标体系进行综合评价,但未能充分考虑到指标权重的客观性及变动性对评价结果可能产生的不同影响。

3.关于水资源承载力的研究区域需要细化。目前研究主要集中在省域,但并未对各市的水资源承载力进行细化研究,而仅对某地级市的水资源承载力进行研究可能存在忽略地貌因素、地表及地下水资源区域循环等问题。

1.3 研究内容与研究方法

1.3.1 研究内容

根据已有文献进行梳理的结果并结合甘肃省发展现状,本文以 2009-2018 年甘肃省各市(州)的水资源承载力为研究对象,构建“水资源—社会—经济—生态环境”四维水资源承载力评价指标体系,设定这四个方面对于甘肃省水资源承载力的评价来说同等重要,选取涵盖水资源量、质、域、流四方面的具体指标,利用熵权法赋予评价指标体系中各维度的具体指标动态权重,选用 TOPSIS 法对甘肃省 14 个市(州)的水资源承

承载力进行综合评价分析并进行等级划分。运用障碍度模型对 2018 年甘肃省各市（州）的水资源承载力评价结果进行障碍因子诊断分析，依据实证研究结果提出促进甘肃省水资源承载力提高的对策建议。

第一章，绪论。主要阐述该选题的研究背景和研究意义，梳理了国内外学者关于水资源承载力的研究成果，重点从国内学者关于水资源承载力的概念内涵、评价指标体系和评价方法方面进行综述。

第二章，理论基础与概念界定。整理归纳出支撑本文研究有关水资源承载力的理论基础，确定水资源承载力的研究内涵和研究方法。

第三章，甘肃省现状分析。主要包括对甘肃省水资源、社会、经济和生态环境各方面的发展现状进行描述性统计分析。

第四章，甘肃省水资源承载力综合评价分析。从水资源自身、社会、经济和生态环境四个维度出发，建立涵盖水资源水量、水质、水域和水流四个方面的甘肃省水资源承载力评价指标体系；采用客观赋权法中的熵权法确定各项具体指标的动态权重，结合 TOPSIS 法对 2009-2018 年甘肃省 14 个市（州）的水资源承载力进行综合评价；根据评价结果和等距法将水资源承载力划分严重超载、轻度超载、濒临超载、适度和盈余五个等级，分别从空间和时间角度比较分析甘肃省各市（州）水资源承载力的优势与不足。

第五章，甘肃省水资源承载力障碍因子分析。运用障碍度模型对 2018 年影响甘肃省各市（州）水资源承载力的主要因子进行分析。

第六章，结论及对策建议。根据实证研究结果和现实发展状况对甘肃省如何在水资源、社会、经济和生态环境各方面做出改进以提高水资源承载力提出相关对策建议。

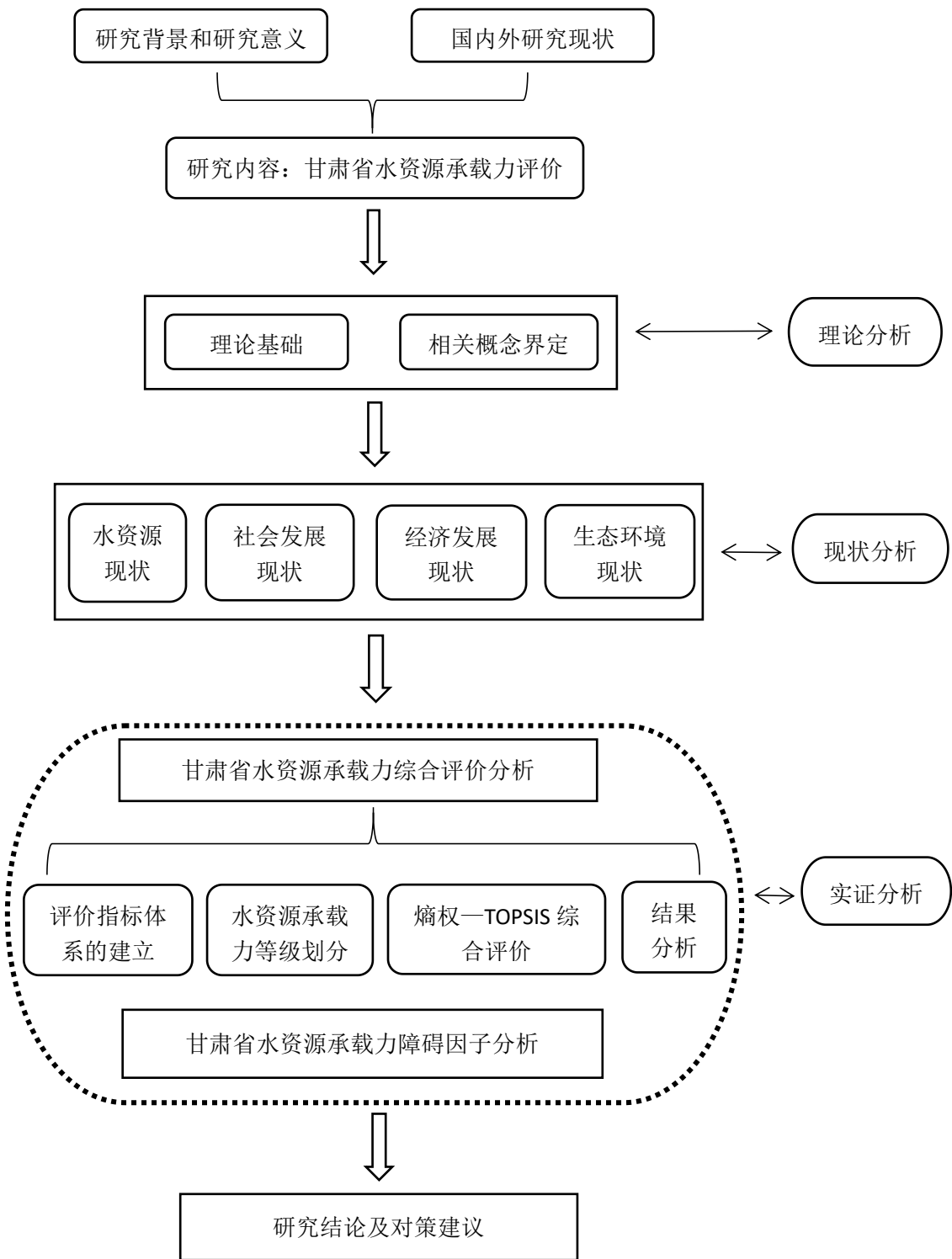


图 1.1 技术路线图

1.3.2 研究方法

1.文献分析法

在查阅大量有关水资源承载力研究的文献基础上，本文对水资源承载力的研究理论、评价指标体系和研究方法等进行了梳理和分类。

2.熵权法和 TOPSIS 法相结合

采用熵权法来确定 2009-2018 年甘肃省水资源承载力评价指标体系中各维度的具体指标的动态权重，采用 TOPSIS 法使得评价结果直观可比。

3.障碍因子诊断模型

运用障碍因子诊断模型对 2018 年影响甘肃省各市（州）水资源承载力的主要障碍因素进行分析，以便更能有的放矢地提出对策建议。

1.3.3 创新点

1.基于指标选择

本文在选取由水资源、社会、经济和生态环境构成的甘肃省水资源承载力评价指标体系的具体指标时，将水资源的“量、质、域、流”理念贯穿其中，如社会和经济维度中的“居民人均日生活用水量”和“万元 GDP(Gross Domestic Product)用水量”体现了水资源的“量”；生态环境维度中的“化学需氧量排放量”和“氨氮排放量”体现了水资源的“质”；水资源维度中的“地表水资源占比”和生态环境维度中的“生态环境用水量”体现了水资源的“域”；水资源维度中的“平原区水资源补给量”体现了“流”。

2.基于权重设定

目前关于水资源承载力综合评价研究中的赋权方法主要分为主观赋权法和客观赋权法两种，客观赋权法相对而言避免了主观随机性产生的干扰。本文设定水资源、社会、经济和生态环境四个方面对于水资源承载力的评价同等重要，运用客观赋权法中的熵权法对 2009-2018 年水资源、社会、经济和生态环境四个维度中包含的具体指标进行动态赋权，以便后续能够根据评价结果更好地对各维度的具体方面进行分析并提出建议。

2 概念界定与理论基础

2.1 水资源承载力研究的理论基础

2.1.1 资源稀缺理论

人类在地球上并不是孤独存在的,我们的一举一动都与特定的资源存在和发生着直接或间接的联系。如果离开资源,那么人类的生存和发展将无从谈起。然而,在一定的时间跟空间尺度内,不仅非可再生资源是有限的,可再生资源的数量也是有限的。资源有限性与人类需求无限性之间的矛盾是人类社会最基本的矛盾和事实,同时资源的稀缺性是经济学的第一原则。

水资源是人类日常生活所需且必不可少的自然资源。地球的储水量很丰富,约 14.5 亿立方千米,然而能直接被人们生产和生活利用的淡水资源仅占其总水量的 2.5%,在这极少的淡水资源中,真正能够被人类利用的淡水资源仅是江河湖泊和地下水中的一部分,约占地球总水量的 0.26%。随着人口增长和经济发展,用水量显著增多,缺水状况在我国普遍存在而且有不断加剧的趋势,成为国家经济建设发展的瓶颈。

因此,本文将资源稀缺理论应用于甘肃省水资源承载力的研究,为实现合理开发利用水资源、切实保护水资源安全和水资源的可持续利用提供了理论基础。

2.1.2 可持续发展理论

可持续发展概念最早出现在 1987 年世界与环境发展委员会 (WECE) 发表的报告《我们共同的未来》中,被定义为“既满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”^[46],由此可将可持续发展概念理解为促进经济增长的方式要以提高人们的生活水平为目标,尽可能地减少由于生产方式不当而造成的对大气、淡水、海洋、土地和森林等自然资源和生态环境的破坏,实现绿色的、长久的发展。

可持续发展理论的核心是人与自然和谐共处,这也是水资源承载力研究的重心所在^[47]。水资源是一个地区能否实现可持续发展的重要前提,主要问题在于该区域的经济水平能否与水资源的承载能力相适应:一方面表现为该地区水资源可利用总量的多少;另一方面为人口增加和经济发展所导致的污水排放量增加和水环境承受压力增大的

多少。本文将可持续发展理论应用于甘肃省水资源承载力的研究，以便能够更准确地对水资源承载力进行定性和定量评价分析并提出改进措施，使得水资源能够在满足人类社会经济发展需求的同时实现自身的可持续发展。

2.1.3 自然—社会二元模式下水文循环理论

自然—社会二元模式下的水文循环理论是指社会水循环系统从自然水循环系统中取水，而部分水资源又会在人类进行生产活动的过程中以蒸发、渗漏等形式回到自然水循环系统中，两系统之间相互影响相互作用。人口流动、城市化、经济活动、生态环境及其变化梯度对二元水循环造成更大更广泛的直接影响^[47]。在二元水循环的功能属性方面，又增加了资源、社会、经济与环境属性，强调了水的有限性、用水的集约、用水的效率和水质与生态系统的健康^[48]。由此可见，社会、经济和生态环境各方面都是影响水资源承载力的重要因素，自然—社会二元模式下的水文循环理论为下文构建甘肃省水资源承载力评价指标体系奠定了相关基础。

2.1.4 水资源“量、质、域、流”理论

水资源的“量、质、域、流”理论具体包括：水量是指允许经济社会水资源消耗量；水质是指允许排入河湖水体的污染物质；水域是指维持一定的湖泊湿地等水域用水量和地下水位；水流是指维持一定的河道生态流量^[30]。

从水循环的角度来看，水资源承载力涉及水资源的“量、质、域、流”四大方面。水量、水质既受人类活动影响同时也制约人类活动，属于经济、社会可持续发展的指标类别；水域、水流为低影响开发下生态健康恢复主体，属于生态环境健康的指标类别；“量、质、域、流”是相互联系、互相制约的关系^[30]。本文在构建甘肃省水资源承载力评价指标体系的基础上，将该理论贯穿于各项具体指标的选择过程中，充分体现了选取指标时对于综合性和全面性的考虑。

2.2 相关概念界定

2.2.1 承载力的概念

承载力,最初在物理学中是指物体在不产生任何破坏时所能承受的最大负荷。随着对承载力研究客体的不断深入,逐渐衍生出生态承载力、土地资源承载力、人口承载力和水资源承载力等概念。其中,生态学最早将承载力的概念转引到其学科领域内,1921年,帕克和伯吉斯在人类生态学杂志上提出生态承载力概念是指“某一特定环境条件下(主要指生存空间、营养物质、阳光等生态因子的组合),某种个体存在数量的最高极限”^[49]。如今,生态承载力概念不再局限于用绝对量来表示,而是指“某一时期某一地域某一特定的生态系统,在确保资源的合理开发利用和生态环境良性循环发展的条件下,可持续承载的人口数量、经济强度及社会总量的能力”^[50]。

2.2.2 水资源承载力的概念

通过文献综述部分可知,目前国内对于水资源承载力的概念界定占据主流地位的是地区水资源可支撑当地人口生活、社会生产、经济发展和维系生态环境可持续发展的能力,其内涵主要包括两方面:一是地区水资源承载力应以该地区的可持续发展为基本导向;二是地区的经济、社会发展水平和生态环境状况都是影响水资源承载力的重要因素。

水资源的内在能力为维持自身循环提供了能量,外在能力在于支撑经济活动、社会发展和改善生态环境。水资源、社会、经济和生态环境各方面对水资源承载力的影响都十分重要,任何一方的运行发生故障或停滞都将影响水资源承载力。本文将水资源承载力理解为一定社会历史条件和科学技术发展水平下、地区(或区域)范畴内,以水资源的可持续发展为前提,所能够承载的来自人类生活、社会生产和生态环境压力的能力,是一个不断发展变化的综合目标。

2.3 水资源承载力研究的方法论基础

水资源承载力是一个涉及多方面因素的复杂问题,通过对相关文献的梳理发现前期学者们大多将某区域的实际取水量与可持续取水量进行对比作为水资源承载力的评价方法,近年来水资源承载力的评价方法日趋多样化,较多学者采用综合评价法对水资源

承载力进行研究。

综合评价法是一种比较系统的、规范的，对于多个指标、多个单位同时进行评价的方法，数据包络分析法、主成分分析法、模糊综合评判法等都是常见的综合评价方法。综合评价法的特点主要体现在：首先，评价过程不是一个指标接一个指标顺次完成，而是通过一些特殊的方法将多个指标的评价同时完成；其次，在综合评价过程中，需要根据指标的重要性进行加权处理，使评价结果更具有科学性；评价的结果为根据综合分值大小的单位排序，并据此得到结论。这种方法从需要考虑问题和计算上看都比较复杂，但由于其综合性和系统性的显著特点，得到众多学者的认可，朱一中 (2003 年)^[50]、周亮广(2006 年)^[39]、刘佳骏(2011 年)^[51]、孙国营(2019 年)^[45]、左其亭(2020 年)^[38]等都曾采用综合评价法对水资源承载力进行研究。本文在构建甘肃省水资源承载力评价指标体系的基础上，将综合评价法应用到水资源承载力研究中。

3 甘肃省各地区发展现状分析

甘肃省位于我国西北地区，地处黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇地带，东接陕西，南控巴蜀青海，西倚新疆，北扼内蒙、宁夏，总面积达 42.58 万平方千米，居全国第七位；地貌复杂多样，山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁交错分布；气候类型多样，大部分地区干旱少雨，生态环境脆弱。

经过建国以来的开发建设，甘肃已形成了以石油化工、有色冶金和机械电子等为主的工业体系，成为我国重要的能源和原材料工业基地；农业生产条件得到一定改善，基本实现省内粮食供需总量平衡，形成草畜、马铃薯、水果、蔬菜等战略性主导产业和制种、中药材、啤酒原料等区域性优势产业，以及食用百合、黄花菜、花椒、油橄榄等地方性特色产业和产品；对外经济、金融业、旅游业等第三产业蓬勃发展，显示出强大的经济动能。



图 3.1 甘肃省地理位置概况

3.1 水资源现状

甘肃省水资源主要分属黄河、长江、内陆河 3 个流域、9 个水系。黄河流域有洮河、

湟水、黄河干流（包括大夏河、庄浪河、祖厉河及其它直接入黄河干流的小支流）、渭河、泾河等 5 个水系；长江流域有嘉陵江水系；内陆河流域有石羊河、黑河、疏勒河（含苏干湖水系）3 个水系。兰州市域内城市工农业用水和生活用水主要由黄河及其支流湟水满足；讨赖河横穿嘉峪关市境内，同时大草滩水库作为它工业用水的调节；金昌市地处内陆干旱区，工农业和城市用水主要依赖祁连山区降水和东大河源头高山冰雪融水供给；酒泉市境内河流均发源于南山冰川积雪区，马营河、观山河、红山河等是主要灌溉水源；张掖市位居河西走廊腹地，主要由黑河水灌溉；甘南州地跨长江、黄河两大流域，上游河流纵横，水资源比较丰富；武威市境内所属黄河流域与内陆河的石羊河流域两大河流；白银市水资源丰富，黄河流经全市约占甘肃段的 58%；陇南市是甘肃省水力资源最丰富的地区，且落差集中、季节变化小、开发效率高；天水市境内主要河源为渭河；庆阳市内有马莲河、蒲河、洪河、四郎河、葫芦河 5 条河流；平凉市位于泾河上游；定西市分洮河、渭河、黄河干流 3 个水系，但南北水资源差异较大，北部水资源短缺且水质差、含泥量大；临夏州内河流均属黄河水系，流经临夏州境内达 103 公里。各市（州）的自然水资源条件不尽相同，对自身各方面发展也起到不同程度的促进和限制作用。

2018 年甘肃省自产地表水资源量 345.63 亿立方米，地下水资源量 167.29 亿立方米，其中内陆河流域地下水资源量比上年增加 0.03%，黄河流域地下水资源量比上年增加 78.9%，长江流域地下水资源量比上年增加 14.8%。水资源总量为 354.89 亿立方米（扣除与地表水重复的地下水计算量 158.02 亿立方米），比多年平均值 270.92 亿立方米偏大 31.0%，水资源总量最大地区为甘南州 129.06 亿立方米，最小地区为嘉峪关市 0.12 亿立方米，人均水资源量同样是甘南州最大、嘉峪关市最小。全省平均降水量 347.2 毫米，比多年平均值偏大 24.6%，比上年增大 12.3%，甘南州年降水量最多约是嘉峪关市的 270 倍。全省河川径流年内分配不均，汛期（5~9 月）水量集中，冬春季水量小。

全省供水总量 112.31 亿立方米，用水总量 112.31 亿立方米，缺水程度为 8.3%；内陆河流域缺水程度为 8.3%，属资源型缺水；黄河流域缺水程度为 8.1%，属资源型和工程型缺水并存；长江流域缺水程度为 8.7%，属工程型缺水。按照国际人均水资源量低于 1000 立方米为重度缺水等级标准，14 个市（州）中除甘南州、陇南市、酒泉市和张掖市外，其余地区均为重度缺水，水资源情况十分严峻。

3.2 社会发展现状

甘肃省下辖 12 个地级市、2 个自治州。2018 年常住人口 2637.26 万人，人口密度达到 61.94 人/平方千米，相比上年增长 7.2%，其中兰州市的人口密度最大为 284.51 人/平方千米，是酒泉市的 42.4 倍。人口自然增长率相对 2017 年降低 26.6%，其中甘南州的人口自然增长率最大为 7.55‰，是酒泉市的 3 倍，其余地区数值大部分在[3.24,4.74] 间。2018 年总人口中农村人口 1379.55 万人，城镇人口 1257.71 万人，城镇化率达到 47.69%，但地区间城镇化差异较大，嘉峪关市的城镇化率一直保持 90%以上较高水平，陇南市城镇化率只有 34%。虽然近年来人口增长速度减缓，居民节水意识增强，居民人均日生活用水量相对 2009 年减小 18.0%，但人口密度的增大和公共基础设施的不断完善使得社会发展对水资源的需求量越来越大，水资源承受的压力也越来越大。

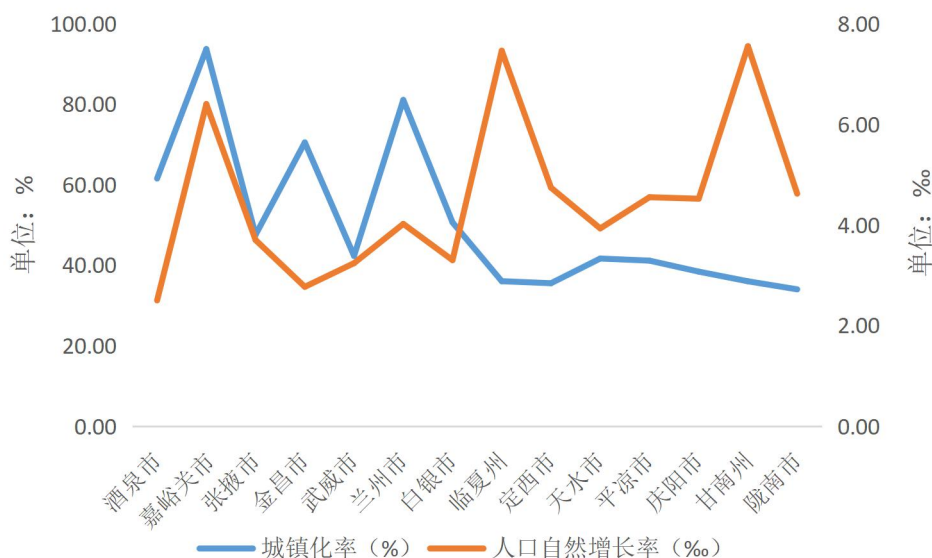


图 3.2 2018 年甘肃省各地级市（州）城镇化率和人口自然增长率

3.3 经济发展现状

截至 2020 年 11 月 21 日，甘肃全省 75 个贫困县全部摘帽退出贫困县序列，为打赢脱贫攻坚战做出了重要贡献。2007 年照原计划提前一年实现了总体小康的目标，2018 年实现地区生产总值 7455.65 亿元，是 2009 年的 2.2 倍（剔除通货膨胀因素）。兰州市 2018 年实际地区生产总值为 2295.79 亿元，是甘南州的 23.6 倍；人均 GDP 嘉峪关市达

到 164135.76 元，是定西市的 17.9 倍，地区经济发展不平衡不充分的矛盾更加突出。作为农业大省，2018 年全省耕地面积为 8065.05 万亩，耕地灌溉面积 2006.31 万亩，第一产业中农林牧渔业增加值相对 2017 年增长 4.6%，高于工业增加值增长率 4.3%；武威市农林牧渔业增加值最大为 88.43 亿元，是嘉峪关市的 28.9 倍。农林牧渔业增加值用水量表现最好的是陇南市，为 172.86 立方米/万元，相比金昌市每万元农林牧渔业增加值节水 3668.74 立方米，同时陇南市在万元工业增加值用水量方面也表现最好，相比平凉市每万元农林牧渔业增加值节水 65.57 立方米。尽管甘肃的地区生产总值在不断提高，但仍处于落后水平，较好于海南、宁夏、青海和西藏，居全国第 27 位，经济发展速度和质量仍是关键问题。

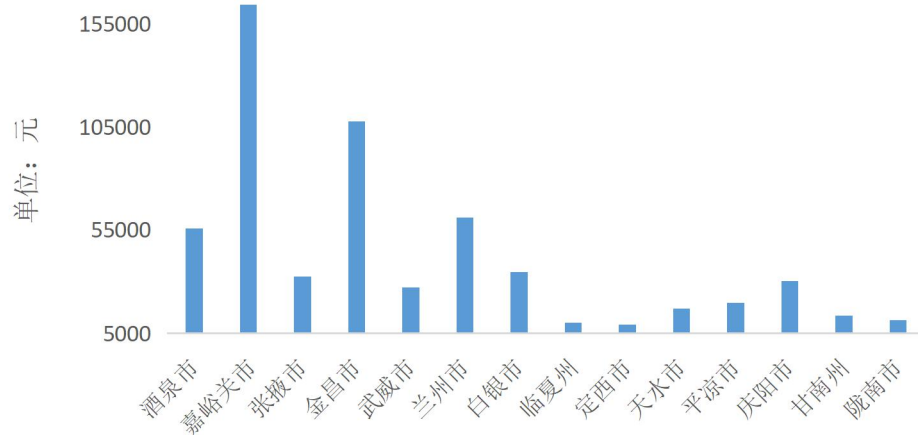


图 3.3 2018 年甘肃省各市（州）人均 GDP

3.4 生态环境现状

甘肃省境内山脉纵横交错，主要有祁连山、乌鞘岭、六盘山等，多数山脉属西北—东南走向，地区海拔相差悬殊，高山、盆地、平川、沙漠和戈壁等兼而有之。据第九次森林资源清查结果显示，全省林地面积 1046.35 万公顷，森林面积 509.73 万公顷，森林覆盖率仅为 11.33%。各地气候类型多样，从南向北包括了亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性（干旱）气候和高原高寒气候等四大气候类型，年平均气温 0—15℃，大部分地区气候干燥，干旱、半干旱区占总面积的 75%，主要气象灾害有干旱、暴雨洪涝、冰雹、大风、沙尘暴和霜冻等。2018 年旱灾成灾面积为 55.23 万亩，相对 2017 年降低 76.8%，对于自然灾害的预警和应对能力是甘肃的必修课。

随着城镇化进程的加快，甘肃省各市（州）的绿化覆盖率也逐渐提高，2018年嘉峪关市的建成区绿化覆盖率达40.0%。2018年全省生态用水量4.67亿立方米，其中酒泉市的生态用水量最高为1.45亿立方米。生态环境用水量是次于农业、工业和居民生活用水的第四大用水，生态环境的建设与修复都需要水资源来维持，促进水资源与生态环境间的良性循环能够有效地降低其最小用水量。

2018年甘肃省评价河长10110.5公里，其中I~III类水质占评价河长的83.5%，IV类水质占2.8%，V类水质占2.6%，劣V类水质占11.1%。全省共统计工业、生活、混合类的废污水排污口248个，废污水排放量6.90亿吨，其中入河排污口233个，入河废污水排放量4.90亿吨。全省水功能区划评价河长达标率为78.1%，主要超标项目为氨氮、化学需氧量。全省城市污水处理厂日处理能力153万立方米，其中兰州市遥遥领先于其他地区，在这方面充分发挥了省会带动作用，其它市（州）的污水处理能力亟待提高，特别是甘南州、陇南市和嘉峪关市。

4 甘肃省水资源承载力综合评价分析

通过对甘肃省水资源、社会、经济和生态环境的现状分析，可以看出甘肃省水资源面临匮乏和难以实现可持续发展的问题，这就需要对水资源的承载力进行研究。水资源承载力是一个受多种因素影响的复杂体系，因此本章在构建甘肃省水资源承载力评价指标体系的基础上，采用综合评价方法对 14 个市（州）的水资源承载力进行评价分析。

4.1 评价指标体系的建立

4.1.1 构建指标体系原则

水资源承载力评价指标体系是一个系统性的复杂体系。从理论的角度来看，该体系所包含的评价指标越详细、独立，所得出的结果可能会越准确^[47]。因此，在构建指标体系时，应该遵循以下几个原则：第一，系统性原则。即从影响水资源的多个角度出发构建指标体系，使得其系统性强、覆盖范围广。第二，科学性原则。即所选指标要符合一定的理论和社会生活实际，能够准确、真实的反映该地区的水资源承载力水平。第三，可得性原则。即评价指标的相关数据能够在有关资料或网站中找到，或根据相关资料可以计算得出。

4.1.2 “水资源—社会—经济—生态环境”四维评价指标体系

基于前文的理论概述和甘肃省各地区发展现状，参考众多学者^{[35][38][52][53]}等的研究成果，本文建立了涵盖水资源、社会、经济和生态环境四个维度，共 23 项具体指标的水资源承载力评价指标体系。

水资源维度是整个承载力体系存在、运行和实现社会经济可持续发展的重要基础保障，主要体现水资源量和水资源来源情况。某地区有多少水资源可被人类利用是其承载能力最为基础的体现，水资源的来源情况可以反映出地区的取水能力和开采水平。

社会维度中最重要的因素为水资源的消耗者即人口，相对而言，宽松的人口密度和较高的人口素质更能够有效地减小资源环境所承受的压力，促进社会经济的发展 and 实现水资源的可持续利用。

经济维度对一个地区的水资源承载力来说是至关重要的,主要体现在经济发展水平和产业结构分布用水量。一方面,地区的经济发展水平会受到自然环境条件的制约,而水资源是其中的重要因素;另一方面,地区的经济发展水平可以为水资源的开发与合理利用提供支持和保障。

生态环境维度是水资源实现可持续利用的重要保障,一方面生态环境用水量会对水资源总量造成一定的压力,而另一方面,生态环境也在支撑和维护着地区的水资源循环。生态结构、自然灾害、污水情况等都会对该地区的水资源承载力有着不同程度的影响。

本文在选取各维度的具体指标时充分考虑到水资源“量、质、域、流”理论^[36]:社会维度中的“居民人均日生活用水量”、经济维度中的“万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、万元农林牧渔业增加值用水量”体现了“量”;生态环境维度中的“化学需氧量排放量、氨氮排放量”体现了“质”;水资源维度中的“地表水资源占比”、生态环境维度中的“生态环境用水量”体现了“域”;水资源维度中的“平原区水资源补给量”、生态环境中的“入河污水量”体现了“流”,具体指标体系如表 4.1 所示。

表 4.1 甘肃省水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	表示	单位	性质 ^①
水资源承载力评价指标体系	水资源	人均水资源量	A1	立方米/人	+
		人均供水量	A2	立方米/人	+
		地表水资源占比	A3	%	+
		产水系数	A4	%	+
		产水模数	A5	万立方米/平方千米	+
		平原区水资源补给量	A6	亿立方米	+
		年降水量	A7	亿立方米	+
	社会	人口密度	A8	人/平方千米	-
		人口自然增长率	A9	%	-
		城镇化率	A10	%	+
		居民人均日生活用水量	A11	升/(人·日)	-
	经济	人均 GDP	A12	元/人	+
		经济密度	A13	万元/平方千米	+
		万元 GDP 用水量	A14	立方米/万元	-

^①注:表中“+”、“-”分别是指标的正向性质和负向性质。正向指标对水资源承载力的评价是正向影响,指标值越大,水资源承载力越大;负向指标对水资源承载力的评价是负向影响,指标值越大,水资源承载力越小。

续表 4.1 甘肃省水资源承载力评价指标体系

		万元工业增加值用水量	A15	立方米/万元	-
		万元农林牧渔业增加值用水量	A16	立方米/万元	-
生态环境		生态环境用水量	A17	亿立方米	-
		建成区绿化覆盖率	A18	%	+
		城市污水处理厂日处理能力	A19	万立方米	+
		旱灾成灾面积	A20	万亩	-
		氨氮排放量	A21	万吨	-
		化学需氧量排放量	A22	万吨	-
		入河污水量	A23	亿吨	-

原始数据均来源于《甘肃发展年鉴》和《甘肃省水资源公报》，部分指标经原始数据计算得出，同时为了剔除通货膨胀因素影响，本文选用的经济数据均为以 2008 年为基期进行计算的实际数值。

4.1.3 指标解释

各维度的具体指标解释如下，部分由公式计算得出，其他来源于统计资料原始数据。

1. 水资源维度：

人均水资源量=水资源总量/地区常住人口数，体现水资源的人均拥有状况；

人均供水量=总供水量/地区常住人口数，体现能够有效供给使用的人均水量；

地表水资源占比=地表水资源量/水资源总量，体现人类生活用水的重要来源；

产水系数：体现了降水量转化为水资源的能力；

产水模数：体现了单位面积的产水能力；

平原区水资源补给量：体现平原区地下水资源开采程度，反映人工水资源补给能力；

年降水量：体现水资源的自然补给能力。

2. 社会维度：

人口密度=地区常住人口数/地区土地面积，体现人口分布疏密程度；

人口自然增长率：反映人口自然增长的趋势和速度；

城镇化率：反映城市化水平；

居民人均日生活用水量=居民生活用水量/(人口数*天数)，体现人们生活用水量的变化情况。

3.经济维度:

人均 GDP=地区生产总值/常住人口数, 体现地区经济发展情况;

经济密度=地区生产总值/地区土地面积, 体现单位面积土地上经济效益的水平;

万元 GDP 用水量=总用水量/地区生产总值, 体现水资源的经济效率;

万元工业增加值用水量=工业增加值用水量/工业增加值, 体现工业用水效率;

万元农林牧渔业增加值用水量=农林牧渔业增加值用水量/农林牧渔业增加值, 体现农业用水效率。

4.生态环境维度:

生态环境用水量: 维持或修复改善生态环境所需最小用水量;

建成区绿化覆盖率: 反映城市绿化程度;

城市污水处理厂日处理能力: 体现每日污水处理量;

旱灾成灾面积: 体现旱灾对农林牧渔业的影响;

氨氮排放量: 体现主要污染物排放;

化学需氧量排放量: 体现主要污染物排放;

入河污水量: 体现人们生产活动的废水排放对生态环境的影响程度。

4.2 水资源承载力等级划分

水资源的承载力等级是水资源承载能力的体现, 对其综合评价结果进行统一、科学的划分将直接影响该地区水资源承载力的判定, 可根据等级划分结果为该地区的水资源实现可持续发展提供更为切实可行的方案。本文在遵循统一性和科学性的前提下, 参考学者们^{[47][53]}等在该领域的等距划分标准, 将水资源承载力评价结果进行如表 4.2 划分:

表 4.2 水资源承载力评价分级标准

区间	评价等级	承载情况
(0,0.2)	V	严重超载, 水资源和生态环境受到较强破坏, 水资源、社会、经济和生态环境发展极不协调
[0.2,0.4)	IV	轻度超载, 水资源承载能力已经大大减弱, 水资源和生态环境自然修复速度远慢于所受到破坏的速度, 水资源、社会、经济与生态环境发展不协调
[0.4,0.6)	III	濒临超载, 水资源承载能力有减弱的趋势, 水资源和生态环境自然修复能力变弱, 地区水资源、社会、经济与生态环境四者协调性受到了较大的影响

续表 4.2 水资源承载力评价分级标准

[0.6,0.8)	II	适度, 水资源承载能力一般, 水资源和生态环境自然修复能力较强, 地区水资源、社会、经济与生态环境四者协调性较高
[0.8,1)	I	盈余, 水资源承载能力较强, 水资源和生态环境基本未被破坏, 自然修复能力强, 地区水资源、社会、经济与生态环境协调性高

4.3 基于熵权—TOPSIS 法的甘肃省水资源承载力综合评价分析

4.3.1 数据的预处理

由于各项评价指标在性质和量纲上存在着不一致性, 为了消除这些干扰对评价结果可能造成的偏差, 首先对原始数据进行无量纲化处理以保证结果的可比性。本文采用最大最小值法对原始数据进行处理, 使其转化为[0,1]之间的数值, 从指标的性质来看, 评价指标分为正向指标和负向指标, 为保证计算的合理性, 将标准化后的数据平移 0.001 个单位^[54]。

具体计算公式如下:

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = (x_{ij} - x_{i \min}) / (x_{i \max} - x_{i \min}) \quad (4.1)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = (x_{i \max} - x_{ij}) / (x_{i \max} - x_{i \min}) \quad (4.2)$$

$$\text{平移后数据为: } y_{ij} = x'_{ij} + 0.001 \quad (4.3)$$

4.3.2 熵权法

综合评价中, 权重是用来度量各评价指标对总体系统影响程度的值, 它体现在其它指标不变的情况下, 该指标变动对结果的影响, 是一个能反应指标重要性的一个标尺。人与自然是相互联系、相互依存和相互制约的关系。本文构建的指标体系中水资源、社会、经济和生态环境四个维度都对甘肃省水资源承载力的评价至关重要, 任何维度的变动都会导致水资源承载力系统的评价结果呈现动态性变动。因此, 为提高不同年份及地区间水资源承载力评价结果的可比性, 更好地探究各维度中具体指标对评价结果所产生的影响, 基于可持续发展理论和自然—社会二元模式下的水文循环理论设定水资源承载力评价指标体系各维度的权重相同, 即均为 0.25, 采用熵权法赋予各维度中具体评价指

标动态权重，过程如下：

1. 计算第 j 项指标的熵值：用 e_j 表示第 j 项水资源承载力评价指标的熵值，则

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4.4)$$

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (4.5)$$

其中 $i=1,2,\dots,n$ ，表示甘肃省各地级市（州）， $n=14$ 。

2. 确定熵权：

$$g_j = 1 - e_j \quad (4.6)$$

$$v_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (4.7)$$

其中 m 表示水资源承载力评价指标体系中各维度具体指标的个数。

$$w_j = \frac{1}{4} v_j \quad (4.8)$$

由此计算出的熵权即各项具体指标的权重，2009-2018 年各项指标的权重计算结果如表 4.3 所示：

表 4.3 熵权法权重计算结果

指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
A1	0.0642	0.0580	0.0614	0.0667	0.0599	0.0663	0.0615	0.0592	0.0597	0.0653
A2	0.0353	0.0377	0.0374	0.0393	0.0409	0.0413	0.0407	0.0384	0.0387	0.0389
A3	0.0060	0.0070	0.0060	0.0057	0.0057	0.0068	0.0064	0.0066	0.0059	0.0076
A4	0.0278	0.0283	0.0272	0.0256	0.0288	0.0246	0.0281	0.0344	0.0311	0.0234
A5	0.0378	0.0353	0.0377	0.0325	0.0325	0.0298	0.0289	0.0293	0.0330	0.0349
A6	0.0651	0.0688	0.0663	0.0664	0.0669	0.0684	0.0683	0.0664	0.0671	0.0663
A7	0.0139	0.0149	0.0141	0.0138	0.0153	0.0127	0.0162	0.0155	0.0144	0.0135
A8	0.0730	0.0471	0.0459	0.0453	0.0479	0.0477	0.0480	0.0496	0.0493	0.0470
A9	0.0411	0.0421	0.0455	0.0456	0.0480	0.0468	0.0479	0.0348	0.0440	0.0441
A10	0.0925	0.1176	0.1179	0.1195	0.1239	0.1253	0.1237	0.1343	0.1263	0.1267
A11	0.0434	0.0431	0.0407	0.0396	0.0302	0.0302	0.0304	0.0314	0.0304	0.0322
A12	0.0887	0.0833	0.0827	0.0859	0.0860	0.0872	0.0859	0.0833	0.0809	0.0838
A13	0.1083	0.1065	0.1056	0.1110	0.1108	0.1131	0.1128	0.1099	0.1060	0.1116
A14	0.0154	0.0150	0.0150	0.0153	0.0165	0.0156	0.0151	0.0152	0.0153	0.0161
A15	0.0139	0.0187	0.0226	0.0124	0.0117	0.0121	0.0148	0.0206	0.0272	0.0191
A16	0.0236	0.0264	0.0242	0.0253	0.0250	0.0220	0.0215	0.0209	0.0206	0.0194
A17	0.0183	0.0173	0.0171	0.0135	0.0204	0.0190	0.0214	0.0150	0.0113	0.0158
A18	0.0255	0.0245	0.0247	0.0195	0.0216	0.0246	0.0232	0.0303	0.0284	0.0273
A19	0.1402	0.1391	0.1386	0.1386	0.1341	0.1211	0.1290	0.1455	0.1350	0.1265

续表 4.3 熵权法权重计算结果

A20	0.0220	0.0197	0.0240	0.0214	0.0127	0.0289	0.0165	0.0124	0.0109	0.0141
A21	0.0164	0.0234	0.0169	0.0151	0.0142	0.0125	0.0137	0.0190	0.0179	0.0225
A22	0.0139	0.0130	0.0162	0.0320	0.0362	0.0342	0.0364	0.0164	0.0360	0.0319
A23	0.0137	0.0129	0.0124	0.0098	0.0107	0.0096	0.0100	0.0113	0.0106	0.0119

4.3.3 TOPSIS 法

TOPSIS 法是一种综合评价方法，基本思想是把各备选方案与正理想解和负理想解之间的“距离”做比较，若评价对象最靠近最优解同时又最远离最劣解，则为最好，否则为最差。该方法的优势主要表现在：一方面，可信度较优，通过将被评价对象中的最优、最劣值引入评价模型中，使评价结果能够充分反映被评价对象的整体特征，还弥补了往常分析类似事项时碰到的排序问题；另一方面，TOPSIS 法对数据的分布类型无严格限制，能够有效降低由于不同评价者的主观偏好而导致的评价结果的差异性，同时对静态性、动态性的评价对象均适合^[55]。

1. 确定加权规范化决策矩阵：

$$z_{ij} = w_j y_{ij} \quad (4.9)$$

其中， w_j 为指标权重， y_{ij} 为指标标准化矩阵。

2. 确定正理想解与负理想解：

正理想解 z^+ 和负理想解 z^- 分别为加权规范化决策矩阵 z_{ij} 的最大值和最小值：

$$z_{ij}^+ = \{\max z_{ij}\}, (j = 1, \dots, m) \quad (4.10)$$

$$z_{ij}^- = \{\min z_{ij}\}, (j = 1, \dots, m) \quad (4.11)$$

3. 计算各评价对象与正理想解的距离和负理想解的距离：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_{ij}^+)^2}, (i = 1, \dots, n) \quad (4.12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_{ij}^-)^2}, (i = 1, \dots, n) \quad (4.13)$$

D_i^+ 值越小，表示评价单元与正理想解的距离越近，即水资源承载力水平越高； D_i^- 值越小，表明评价单元离负理想解的距离越近，即水资源承载力水平越低。

4. 计算各评价对象与正负理想解的贴近度：

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (4.14)$$

C_i 距离 1 越近, 表明评价对象越优。

5. 根据 C_i 大小进行排序与分级, 给出评价结果, 如表 4.4 所示:

表 4.4 甘肃省水资源承载力综合评价结果

	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	平均 值	排 序
酒泉市	0.409	0.390	0.384	0.373	0.379	0.398	0.395	0.386	0.405	0.401	0.392	4
嘉峪关市	0.506	0.527	0.526	0.523	0.534	0.550	0.538	0.518	0.519	0.534	0.528	2
张掖市	0.367	0.316	0.321	0.306	0.313	0.330	0.326	0.328	0.349	0.329	0.328	5
金昌市	0.382	0.385	0.390	0.378	0.396	0.411	0.398	0.387	0.400	0.405	0.393	3
武威市	0.300	0.275	0.272	0.251	0.245	0.259	0.241	0.239	0.260	0.257	0.260	7
兰州市	0.517	0.548	0.550	0.542	0.551	0.539	0.545	0.570	0.555	0.550	0.547	1
白银市	0.258	0.255	0.251	0.239	0.258	0.257	0.257	0.249	0.259	0.265	0.255	8
临夏州	0.195	0.202	0.187	0.180	0.171	0.179	0.166	0.162	0.155	0.181	0.178	14
定西市	0.226	0.228	0.222	0.217	0.220	0.210	0.214	0.192	0.196	0.204	0.213	13
天水市	0.228	0.230	0.248	0.212	0.237	0.220	0.222	0.224	0.229	0.238	0.229	10
平凉市	0.236	0.239	0.233	0.216	0.213	0.211	0.207	0.209	0.219	0.241	0.222	12
庆阳市	0.253	0.228	0.219	0.220	0.228	0.226	0.227	0.219	0.216	0.228	0.227	11
甘南州	0.351	0.314	0.314	0.314	0.303	0.312	0.304	0.289	0.304	0.309	0.311	6
陇南市	0.286	0.265	0.266	0.227	0.236	0.208	0.216	0.218	0.246	0.228	0.240	9

2009-2018 年甘肃省的水资源承载力情况较为严峻: 临夏州处于水资源承载力严重超载, 水资源和生态环境受到较强破坏, 水资源、社会、经济和生态环境发展极不协调的 V 级水平; 兰州市和嘉峪关市处于水资源承载力濒临超载, 水资源承载能力有减弱趋势, 水资源和生态环境自然修复能力变弱, 地区水资源、社会、经济与生态环境四者协调性受到了较大的影响的 III 级水平; 其余市(州)均处于水资源承载力轻度超载, 承载能力大大减弱, 水资源和生态环境自然修复速度远慢于所受到破坏的速度, 水资源、社会、经济与生态环境发展不协调的 IV 级水平。

4.4 水资源承载力评价结果分析

4.4.1 空间角度分析

1. 整体角度

2009年甘肃省14个级（州）中有3个地区处于III级水平，分别是兰州市、嘉峪关市和酒泉市；1个地区处于V级水平为临夏州；其余10个地区处于IV级水平。2018年有4个地区处于III级水平，分别为兰州市、嘉峪关市、酒泉市和金昌市；1个地区处于V级水平为临夏州；其余9个地区处于IV级水平。

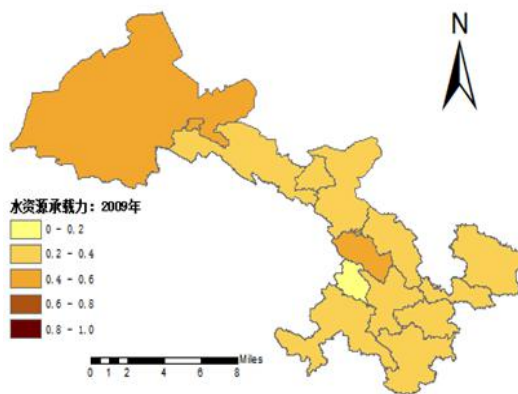


图 4.1 2009年甘肃省各市（州）
水资源承载力等级划分图

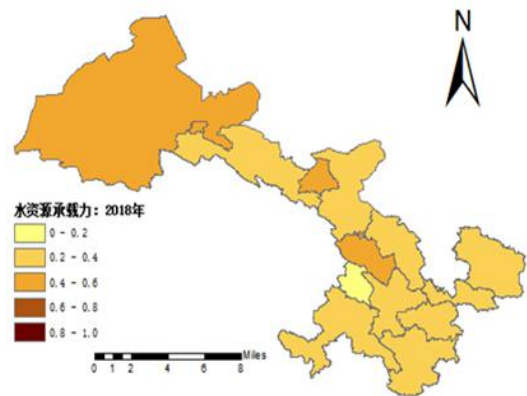


图 4.2 2018年甘肃省各市（州）
水资源承载力等级分布图

2009-2018年甘肃省各市（州）的水资源承载力表现优劣依次为兰州市、嘉峪关市、金昌市、酒泉市、张掖市、甘南州、武威市、白银市、陇南市、天水市、庆阳市、平凉市、定西市和临夏州。2009年14个市（州）的水资源承载力在 $[0.195, 0.517]$ 之间，空间差异度为评价年间最小值0.322，2016年在 $[0.162, 0.570]$ 之间，空间差异度为评价年间最大值0.408。2009-2011年空间差异度呈逐渐增大趋势但增长幅度逐年降低，2012年空间差异度与2011年基本持平，2013年空间差异度再度增长达到0.380，随后2014年略有下降，2015-2016年呈现增大趋势且增长幅度逐年加大，达到评价年间空间差异度最大值，2016-2018年空间差异度逐年递减且递减幅度增大。

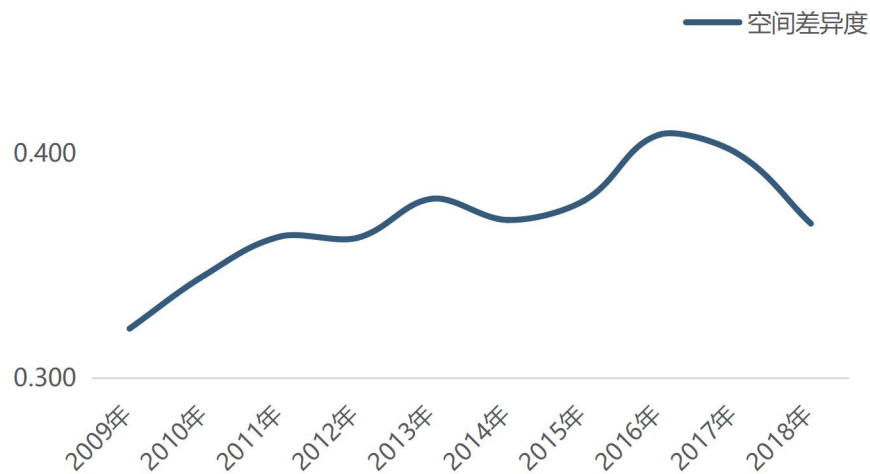


图 4.3 2009-2018 年甘肃省水资源承载力空间差异度

2.各市（州）角度

2009 年甘肃省水资源承载力的评价结果最优和最劣地区分别为兰州市和临夏州。水资源维度中，平原区水资源补给量的权重最大，但二者并无差异；临夏州人均水资源量是兰州市的 7.9 倍，表明临夏州人均水资源量充足，但人均供水量仅为兰州市的 2/5。社会维度中，城镇化率权重最大，兰州市城镇化率约是临夏州的 4.8 倍。经济维度中，经济密度和人均 GDP 权重较大，且二者均表现为兰州市情况较好约是临夏州的 6.5 倍，地区经济发展差异显著；产业结构中表现为万元农林牧渔业增加值用水量权重高于万元工业增加值用水量。生态环境维度中，城市污水处理厂日处理能力权重最高，兰州市约是临夏州的 29.3 倍；旱灾成灾面积兰州市约是临夏州的 2.0 倍；生态环境用水量兰州市约是临夏州的 35.4 倍。可以看出，兰州市在人均水资源量和各方面用水量以及旱灾成灾面积均不占优势的情况下，水资源承载力仍较强好于临夏州，这主要得益于兰州市的水资源开发技术水平和较好的经济发展状况以及对于城市污水的良好处理。2007 年甘肃省在照原计划提前实现总体小康社会的目标后，兰州作为甘肃省会和西部地区重要中心城市之一以及丝绸之路经济带的重要节点城市，进一步积极发挥省会带头作用，响应十七大号召构建生态文明社会，加强污水治理能力和提高公民的环保意识。

2014 年甘肃省水资源承载力评价结果最优和最劣地区分别为嘉峪关市和临夏州。水资源维度中平原区水资源补给量和人均水资源量权重较大，平原水资源补给量嘉峪关市是临夏州的 1.2 倍，但人均水资源量临夏州是嘉峪关市的 20.3 倍，人均供水量仅为嘉峪关市的 1/4。社会维度中，城镇化率权重最大，嘉峪关市城镇化率约是临夏州的 3.6

倍，嘉峪关市的城镇化率在评价年间一直处于 90% 以上的较高水平，临夏州的城镇化率由 2009 年的 12.85% 提升至 29.57% 已有较大进步。经济维度中，经济密度和人均 GDP 仍然是影响相对较大指标，嘉峪关市的经济密度约是临夏州的 12.6 倍，人均 GDP 约是临夏州的 16.7 倍，且这两项指标嘉峪关市均优于兰州市，地区经济发展不平衡现象非常显著；产业结构表现为万元农林牧渔业增加值用水量影响大于万元工业增加值用水量，临夏州优于嘉峪关市。生态环境维度中，城市污水处理厂日处理能力权重最高，嘉峪关市与临夏州基本持平；主要污染物化学需氧量排放量临夏州约是嘉峪关市的 8.4 倍；旱灾成灾面积兰州市约是临夏州的 8.2 倍；绿化覆盖率嘉峪关市约是临夏州的 2.6 倍。2014 年甘肃省水资源承载力的空间差异度相对前几年呈现短暂下降趋势，嘉峪关市的水资源承载力在评价年间首次优于兰州市，作为甘肃省域的次中心城市，嘉峪关市的城镇化经验值得其他地区特别是临夏州学习和借鉴，提高和改善村、田、路、渠、电、通信等农业生产条件，实现了农田水利化、作业机械化、种植良种化和栽培科学化，对于临夏州在提升农业发展水平和调整农林牧渔业产业结构等方面起到了良好的示范作用；同时嘉峪关市作为国家重要的冶金和先进制造业基地，万元工业增加值用水量和万元 GDP 用水量情况优于省内大部分其他市（州）。

2018 年甘肃省水资源承载力评价结果最优和最劣地区为兰州市和临夏州。水资源维度中人均水资源量权重相对 2016 年有所增加，临夏州的数值是兰州市的 8.3 倍，差距显著增大。社会维度中，城镇化率权重最大，兰州市城镇化率约是临夏州的 2.2 倍，差距与 2016 年相比逐渐减小；人口密度权重相对 2016 年略有降低，差距情况与 2016 年基本持平。经济维度中，经济密度、人均 GDP 和万元 GDP 用水量权重相对 2016 年都略有提升，兰州市的经济密度约是临夏州的 6.9 倍，人均 GDP 约是临夏州的 6.1 倍，万元 GDP 用水量约是兰州市的 3.6 倍。生态环境维度中，城市污水处理厂日处理能力权重最高，兰州市约是临夏州的 11.7 倍相对 2016 年的 22.7 倍有明显进步；化学需氧量排放量二者相差不大；兰州市的绿化覆盖率约是临夏州的 2.7 倍相对 2016 年差异增大。2016-2018 年甘肃省水资源承载力的空间差异度均表现为兰州市与临夏州间差异最大，二者的空间差异度逐年减小，且减小幅度逐渐增大，一方面是由于临夏州在自身人均水资源量占据优势的前提下，城镇化建设和经济发展水平得到提高，城市污水处理能力也有明显进步，生态环境方面有所改善，水资源承载力相对 2016 年提升 0.019 达到 0.181，但仍处于水资源开采水平较低、可利用水资源不足以支撑当地社会经济和生态环境可持

续发展的状况；另一方面，兰州市近两年的水资源承载力不断降低，人均水资源量严重不足，人均供水量减少，作为西部地区经济发展的中心城市之一，外来人员的不断增加和居民人均日生活用水量、生态环境用水量的增大也加重了水资源承受的压力，但好在经济发展状况尚可，万元 GDP 用水量逐年降低，主要污染物排放和污水处理方面做得很好使得水资源承载力仍能保持在适度、具有开发潜力的水平上。

金昌市、酒泉市、张掖市、甘南州、武威市、白银市、陇南市、天水市、庆阳市、平凉市和定西市在评价年间的平均水资源承载力均处于轻度超载状态，承载能力大大减弱，水资源和生态环境自然修复速度远慢于所受到破坏的速度，水资源、社会、经济与生态环境发展不协调的IV级水平。

4.4.2 时间角度分析

1. 水资源承载力提高地区

金昌市在评价年间有三年达到III级水平，分别是2014年、2017年和2018年，其余年份均处于IV级水平。水资源承载力由2009年的0.382到2018年的0.405，实现由IV级向III级水平跨越。评价年间仅2012年、2015年和2016年水资源承载力呈现降低趋势。水资源维度中年降水量在这三年中明显降低，导致水资源来源量相对减少。社会维度中的人口自然增长率不断提高，且其权重相对较大；居民人均日生活用水量相对增加。经济维度中万元农林牧渔业增加值用水量权重大于万元工业增加值用水量，但2012年万元农林牧渔业增加值用水量权重相对2011年增大且用水量上升，2015年万元工业增加值用水量权重相对2014年增大且用水量上升。生态环境维度中主要污染物氨氮排放量和化学需氧量排放量2012年均增大；生态用水量相对增大。金昌市在水资源总量匮乏的情况下，保障了经济的良好运行，人均GDP和经济密度逐年增加，在2016年后污水排放的主要污染物也得到有效控制，但对于城市污水的日处理能力一直未能得到提升，若能在此方面做出改善，提高污水治理能力和效率，促进水资源和生态环境系统之间的转换循环，有望进一步提高水资源承载力和促进可持续发展。

白银市在评价年间均处于IV级水平，2013年、2017年和2018年水资源承载力呈现上升趋势，其余年份均呈下降趋势。2018年水资源承载力综合评价为0.265略好于2009年的0.258。水资源维度中除平原区水资源补给量和年降水量外其他指标2013年均优于2012年，2018年与2009年相比除地表水资源占比和产水系数数值下降外均增加且所占

比重也增大。社会维度中的城镇化率不断提高且其权重相对较大，2018年城镇化率是2009年的1.4倍；人口密度相对稳定；人口自然增长率在2017-2018年出现明显降低且权重增大；居民人均日生活用水量在2013年表现为下降转折明显后变动不大。经济维度中经济密度和人均GDP数值持续增长权重相对稳定；万元农林牧渔业增加值用水量权重大于万元工业增加值用水量，2009-2011年二者权重差距逐渐减小，2012年增大后有呈缩小趋势，2018年万元农林牧渔业增加值用水量约是2009年的3/5，万元GDP用水量逐年减小。生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力2013年提升65%；绿化覆盖率2018年实现2009年的1.6倍；生态用水量在2012-2018年逐年递增但权重变化呈波动趋势，主要污染物氨氮排放量在2012年后权重小于化学需氧量排放量，化学需氧量排放量在2016年来明显降低。白银市水资源丰富，黄河流经全市258千米占黄河甘肃段的58%，但人均水资源量在评价年间不足140立方米/人，居民人均日生活用水量存在进步空间，加快经济的发展步伐同时保持万元GDP用水量的递减趋势，利用四季分明、日照充足，夏无酷暑、冬无严寒的气候优势助力农林牧渔业的发展，进一步提高有效灌溉面积和效能，加强对主要污染物的排放管控，从而实现水资源承载力的提升。

天水市在评价年间均处于IV级水平，2012年和2014年的水资源承载力呈下降趋势，其余年份均呈上升趋势。2018年其水资源承载力综合评价结果为0.238高于2009年的0.228。水资源维度中人均水资源量在2012年和2014年权重均增大但指标数值却明显下降，对水资源承载力的评价产生负向影响，2018年该项指标相比2009年权重略有增大，数值是2009年的2.0倍；人均供水量2018年相对2009年权重上升但数值降低，且与其他各地区相比仅高于陇南市；产水系数和产水模数在2016-2018年间逐年提升。社会维度中的城镇化率权重最高，2018年指标数值为41.65%是2009年的1.4倍，但在省内仍处于中等水平；人口密度权重呈先降低后升高再降低趋势，2018年人口密度数值略有降低，权重下降55.4%；居民人均日生活用水量在2013年明显降低但所占权重也有所减小。经济维度中的经济密度和人均GDP持续增长，2018年人均GDP为16859.87元，为省内中下水平；万元农林牧渔业增加值用水量权重大于万元工业增加值用水量，二者权重差距在2009-2011年逐渐减小随后短暂增大，2013-2018年又逐渐缩小，指标数值均逐年降低，处于中上水平。生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力在2011年提升一倍后保持不变，权重保持相对最高水平；绿化覆盖率权重次之，2012年指标数值出现明显降低随后逐年增长；旱灾成灾面积在评价年间权重稳定性较差，指标数值

在[3.17,64.01]范围内上下波动,尤其2014年旱灾成灾面积是2013年的2.5倍且权重相对增长127.97%;化学需氧量排放量在2016年后明显降低且权重相对增大。天水市的经济开发较早,20世纪初雕漆、纺织、面粉等传统工业就开始萌芽,新中国成立后,工业发展较快,特别是国家“三线”建设时期一批企业相继搬迁至此,天水逐步发展成为西北地区的重要工业城市,但近年来发展速度有所降低,2018年工业增加值为173.67亿元,省内排名第七位,人均GDP省内排名第十位。天水市的城镇化步伐亟待加快,同时应加强对气候自然灾害的预警和防控措施,特别是旱灾影响;在城市污水处理和万元工业增加值用水量方面处于省内较好水平。

平凉市在评价年间均处于IV级水平,2009-2010年水资源承载力呈现上升趋势,2011-2015年表现为下降趋势,2016-2018年逐年增加至0.241高于2009年水平0.236。水资源维度中人均供水量和产水模数在2011-2015年对水资源承载力的下降起到促进作用,2017-2018年人均水资源量和产水模数的指标数值和权重相对增加,2018年人均水资源量相对2009年权重略有提高,指标数值为2009年的4.2倍,产水模数权重相对降低但指标数值是2009年的4.0倍。社会维度中的城镇化率权重最高,2018年城镇化率达到41.13%,是2009年的1.3倍,但提升速度相对较慢;人口密度在2010年权重降低后相对稳定,2018年指标数值比2010年增长2.7%;居民人均日生活用水量在2013年明显降低后又逐渐增大,但2018年指标数值比2009年降低15.5%。经济维度中的经济密度和人均GDP权重相对稳定,二者指标数值均逐年增长,2018年经济密度是2009年的2.2倍,人均GDP是2009年的2.3倍;万元农林牧渔业增加值用水量的权重大于万元工业增加值用水量,万元农林牧渔业增加值用水量的权重相对稳定且数值逐年递减,万元工业增加值用水量在2012年和2018短暂出现短暂增加,权重在[0.0117,0.0272]间波动;万元GDP用水量的权重相对稳定,指标数值在2014年短暂增大后呈现降低趋势,2018年万元GDP用水量约是2009年的1/3,节水效果明显。生态环境维度中城市污水处理厂日处理能力的权重最高,指标数值在2009-2017年恒定,2018年翻倍达到10万立方米仅次于兰州市、酒泉市和天水市;绿化覆盖率2018年是2009年的1.3倍,但在2009年生态环境维度中仅次于城市污水处理厂日处理能力,2018年化学需氧量排放量的权重超过绿化覆盖率成为第二影响因素,2011-2012年化学需氧量排放量在权重和指标数值上均显著增大,2016-2017年呈现减小趋势;旱灾成灾面积的数值在[0,116.09]间有较强波动,生态环境用水量的数值呈增长趋势。平凉市是我国西北地区重要的畜牧

业基地和皮毛集散地，是甘肃省的主要农林产品生产基地，万元农林牧渔业增加值用水量处于省内较好水平，在自然资源相对贫瘠的条件下仍能保持经济的平稳增长，曾获“年度魅力文旅扶贫城市”；但万元工业增加值用水量较大，高于省内其他地区；污水处理能力在 2018 年得到提升，在被确定为“第三批城市黑臭水体治理示范城市”后更应加强对主要污染物的排放管控、污水处理和后续循环利用，确保水资源和生态环境维度间的良性循环，为实现可持续发展提供有力保障。

2. 水资源承载力降低地区

酒泉市在评价年间有三年达到Ⅲ级水平，分别是 2009 年、2017 年和 2018 年，其余年份均处于Ⅳ级水平。2018 年水资源承载力处于濒临超载状态，综合评价结果为 0.401 相对 2009 年的 0.409 有所减小。2013 年、2014 年和 2017 年为水资源承载力呈现上升趋势的年份，其余年份均呈下降趋势。水资源维度中的年降水量和平原区水资源补给量相对其他地区较为丰富且发展趋势较好；产水系数和产水模数在 2009 年和 2018 年所占权重相对变化不大的情况下指标数值明显降低；人均水资源量在 2011 年、2012 年、2014 年、2017 年和 2018 年也都出现了不同程度的下降。社会维度中的城镇化率不断提高且权重相对较大；人口密度在 2018 年所占权重相对 2009 年略有降低，但指标数值是 2009 年的 1.3 倍；居民人均日生活用水量明显降低但所占权重也有所减小。经济维度中万元农林牧渔业增加值用水量的权重大于万元工业增加值用水量，2013 年万元农林牧渔业增加值用水量相对 2012 年上升；经济密度和人均 GDP 持续增长，2018 年经济密度是 2009 年的 2.5 倍，人均 GDP 是 2009 年的 2.0 倍。生态环境维度中的主要污染物氨氮排放量和化学需氧量排放量虽然数值上有所减小，但所占权重呈增大趋势；入河污水量在 2016 年和 2017 年出现短暂减少后 2018 年再次增大；生态用水量仅在 2011 年和 2018 年呈下降趋势。酒泉市在水资源补给量相对较好的情况下，经济发展态势良好，境内河西走廊灌溉农业区是甘肃省最重要的农业区，同时也是中国西北内陆著名的灌溉农业区，在提供全省 2/3 以上的商品粮、几乎全部棉花、9/10 的甜菜、2/5 以上油料、啤酒大麦和瓜果蔬菜的基础上大力发展了节水灌溉技术，万元农林牧渔业增加值用水量 2018 年实现为 2009 年的 3/5，2014 年城市污水日处理能力得到提升，但生态环境用水量和主要污染物的排放量仍未能得到有效调控，同时人口密度的增大应引起对人均水资源量的重视程度，提高节水和循环用水意识。

张掖市在评价年间均处于Ⅳ级水平且变动趋势波动性较强。2018 年水资源承载力

综合评价结果为 0.329 低于 2009 年的 0.367，评价年间水资源承载力呈现下降上升交错分布趋势。水资源维度中的平原区水资源补给量相对其他地区较为丰富，指标数值在 2018 年比 2009 年有所降低但所占比重增大；人均水资源量数值在 2018 年为评价年间最低水平；产水系数和产水模数相对 2009 年来说明显下降；人均供水量在 2009-2014 年间呈现升高降低交错分布趋势，2015 年后逐年降低。社会维度中的城镇化率数值不断提高且权重相对较大；人口密度在 2018 年比 2009 年略有降低但权重变小；人口自然增长率整体呈现降低趋势；居民人均日生活用水量在数值和权重上呈现波动趋势，特别是 2010 年和 2013 年波动较大。经济维度中的经济密度和人均 GDP 数值持续增长，2018 年经济密度是 2009 年的 2.3 倍，人均 GDP 是 2009 年的 2.2 倍；万元农林牧渔业增加值用水量和万元工业增加值用水量的权重差距在评价年间呈先减小后增大再减小趋势，但二者的指标数值均逐年递减，2018 年万元 GDP 用水量是 2009 年的 2/5，体现出张掖市在节水方面所做出的努力结果。生态环境维度中城市污水处理厂日处理能力在 2015 年得到提升；化学需氧量排放量所占权重呈增大趋势；绿化覆盖率和生态环境用水量在评价年间数值和权重波动性较强。张掖市有着黑河水灌溉得天独厚的优势，且地势平坦，土壤肥沃，是我国重点建设的 12 个商品粮基地之一，同时在节水灌溉方面取得了较大进步，森林覆盖率达 9.2%；但在经济发展方面与兰州市、嘉峪关市、酒泉市相比仍存在一定差距，万元 GDP 用水量显著高于其他地区。随着近年来旅游行业的蓬勃发展，张掖市在餐饮、民俗住宿等服务型行业市场体系的逐步完善，辐射带动能力的进一步增强，势必会增大水资源的开采利用和污水排放，因而提倡文明旅行和增强游客保护自然生态环境的意识确有必要，同时城市污水处理能力和建成区绿化覆盖率也有待进一步提高，只有保障水资源、社会、经济和生态环境的良性循环，才能不断充分利用资源创造更多财富实现可持续发展。

甘南州在评价年间均处于 IV 级水平，2009 年水资源承载力为 0.351，2010 年下降至 0.314 后保持相对平稳，2013 年再度下降至 0.303，随后 2014 年、2017 年、2018 年略有提升，2018 年水资源承载力综合评价结果为 0.309。水资源维度中的人均水资源量相对其他 13 个市（州）最为丰富；地表水资源占比、产水系数和产水模数也极具优势，但人均供水量相对较小。社会维度中的城镇化率所占比重最大，指标数值虽逐年递增但仍处于省内较低水平；2018 年的人口自然增长率相对 2009 年下降 0.58‰；人口密度在数值上有所增大但所占权重降低；居民人均日生活用水量为社会维度中影响最弱的因

素，2009-2013年指标数值和权重均逐年降低，2017-2018年呈现相反趋势。经济维度中的经济密度和人均GDP逐年增加，2018年人均GDP是2009年的1.9倍；万元农林牧渔业增加值用水量在2009-2012年逐年降低，2013-2015年逐年升高但权重有所下降，2017-2018年万元GDP用水量、万元农林牧渔业增加值用水量和万元工业增加值用水量数值均降低。生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力在2014年有所提高，但相对于其他市（州）而言仍处于最低水平；旱灾成灾面积在2017-2018年权重增大且数值降低，与省内其他地区比较而言存在一定优势；主要污染物氨氮排放量和化学污染物排放量的数值和权重在2018年都高于2009年；绿化覆盖率的权重也相对提高；生态用水量相对减少且权重降低。甘南藏族自治州地跨长江、黄河两大流域，上游河流纵横，不仅水资源丰富，且多年平均径流量稳定，植物资源丰富，有“中国小西藏，甘肃后花园”的美称；但经济发展状况较差，评价年间一直落后于其他地区，2018年实际地区生产总值与省会兰州市相比更是相差20多倍，工农业生产技术相对落后，铁路、航空、水运等交通方式还处于起步阶段。一方面，加快经济发展速度、加强基础设施建设和转变经济增长方式是甘南州提升水资源承载力的必然途径，同时提高对主要排放污染物的处理能力也离不开资金和科学技术的支撑；另一方面，藏族人口约占甘南州境内总人口的54.2%，发展特色畜牧业、旅游业等产业，加快城镇化建设，调动少数民族人民的生产积极性对于健全少数民族管理政策和实现中华民族的伟大复兴极具现实意义。

武威市的水资源承载力在评价年间均处于IV级水平，但相对同处于IV级水平的金昌市、酒泉市、张掖市和甘南州而言更差，只有2009年达到0.300，呈现增长趋势年份仅为2014年和2017年。水资源维度中的平原区水资源补给量2014年高于2013年且权重增大；产水系数和产水模数在2017年高于2016年但权重降低；人均水资源量2018年所占权重高于2009年且数值增加，但仍不足1000立方米/人，属于重度缺水。社会维度中的城镇化率权重最高，且城镇化建设取得进步，2018年城镇化率为42.31%，处于省内的中等水平；人口自然增长率2018年与2009年相比数值有所降低但权重增大；2013年是居民人均日生活用水量的数值和权重转折减小年。经济维度中的万元农林牧渔业增加值用水量权重大于万元工业增加值用水量，但2012年开始万元农林牧渔业增加值用水量在数值和权重上相对逐渐降低，权重与万元工业增加值用水量权重差距逐渐减小；除2017年经济密度和人均GDP相对2016年略有下降外其他年份均实现增长，2018年经济密度是2009年的2.2倍，人均GDP是2009年的2.3倍。生态环境维度中的城市污

水处理厂日处理能力权重最大, 指标数值在 2015 年和 2016 年较低, 其他年份都为省内的中上水平; 绿化覆盖率影响次之, 2009-2012 年数值逐年降低, 2013-2018 年逐年增长且 2018 年所占比重相对 2009 年略有提升; 旱灾成灾面积的数值在 $[0.53, 125.99]$ 间存在较强波动, 化学需氧量排放量在权重上逐渐超过氨氮排放量且数值变动极不稳定, 2018 年入河污水量比 2009 年增长 0.12 亿吨, 约 62.9%。武威市作为自然景观与历史文化交相辉映的区域中心城市, 水资源所属黄河流域与内陆河的石羊河流域两大河流, 但人均水资源量重度缺乏, 居民节水意识相对酒泉市、张掖市和金昌市较强。经济发展处于省内的中上等水平, 2014 年武威保税物流中心获得国家部委联合批准设立的正式批复, 成为甘肃省第一个海关特殊监管区, 同年 12 月, 由武威开出的首列中欧班列“天马号”开通运营, 2016 年甘肃(武威)国际陆港建设上升到全省对外开放和发展外向型经济的战略层面, 高歌猛进的发展过程中更应提高水资源的合理开采利用水平和加强对生态环境建设的重视程度, 控制主要污染物排放和增强污水处理能力, 强化水循环系统的良好效能。武威市受干旱、大风、沙尘暴、暴雨洪涝和霜冻等气象灾害影响而造成损失时有发生, 加强预警工作和抵御措施, 对于农业种植生产的合理规划具有重要意义。

陇南市在评价年间均处于 IV 级水平, 2009-2014 年水资源承载力波动性较强, 2012 年和 2014 年下降幅度较大, 2015-2017 年逐年增大且增幅递增, 但 2018 年回落至 0.228 与 2009 年 0.286 相比承载力水平下降。水资源维度中的地表水资源占比在评价年间与其他各市(州)相比均为最大值; 人均水资源量相对其他地区具有较大优势, 2018 年人均水资源量为 3019.82 立方米/人, 高于甘肃省和全国人均水资源量水平; 人均供水量和产水模数在 2016-2017 年均增大, 但人均供水量 2018 年与 2009 年相比权重增大的同时指标数值降低。社会维度中的城镇化率权重不断提高但城镇化水平相对较低, 2018 年城镇化率为 34%; 人口密度权重在 2009-2012 年呈减小趋势, 随后呈波动性变化; 居民人均日生活用水量在 2013 年明显降低。经济维度中的经济密度和人均 GDP 持续增长, 但仍处于较低水平, 2018 年人均 GDP 为 11291.51 元, 为省内第 12 名; 万元农林牧渔业增加值用水量的权重大于万元工业增加值用水量, 但呈现降低趋势, 天然优越的水资源条件使得万元农林牧渔业增加值用水量少于其他地区。生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力在 2010 年降低为 2009 年的 50%, 随后短暂提高后又降低为 2009 年的 33% 左右; 绿化覆盖率逐年递增; 旱灾成灾面积的数值波动性较强在 $[1.72, 36.97]$ 间, 2014 年权重明显提升且数值变化较大; 化学需氧量排放量和氨氮排放量 2018 年与 2009 年相

比权重和数值均增大。陇南是甘肃水力资源最丰富的地区，不仅境内江河众多、水量充沛，且落差集中、季节变化小、开发效率高，发展水利水电事业的条件十分优越，同时自然生态条件优越，拥有3个国家级自然保护区、7个省级自然保护区、4个国家森林公园、2个国家湿地公园；但城镇化进程和经济发展水平亟待提高，再良好的生态环境如果不加以保护和管理，可能对未来发展起到限制甚至阻碍作用，特别是城市污水排放的处理能力亟待加强，否则将难以保障水资源的良性循环和可持续发展。

庆阳的水资源承载力在评价年间均处于IV级水平，2009-2011年呈下降趋势且2010年下降最多，2012-2018年间波动性较强，2018年水资源承载力为0.228小于2009年的0.253。水资源维度中的平原区水资源补给量和人均水资源量的数值和权重在2012-2018年间呈现反复波动极不稳定趋势，地表水资源占比在2009-2011年逐年下降特别是在2010年权重略有增大，2015-2018年产水模数逐年增加且权重相对增大。社会维度中的城镇化率2010年权重相对2009年增大但数值降低，2011-2018年变动较小；人口自然增长率在2017年数值变动最大且权重相对升高；人口密度在2010年数值和权重均下降较大后相对平稳；居民人均日生活用水量在2013年明显降低，2018年相对2009年居民人均日生活节水10.4升，但权重降低25.79%。经济维度中的经济密度和人均GDP持续增长，2018年经济密度是2009年的2.4倍，人均GDP是2009年的2.7倍，居省内第7位；万元农林牧渔业增加值用水量的权重大于万元工业增加值用水量，2009-2011年差距逐渐减小，2012年骤增后2013-2018年逐年减小，万元农林牧渔业增加值用水量的数值在2009-2013年递减，2014-2016年短暂增加后2017-2018年再次呈现递减趋势；万元工业增加值用水量处于省内较高水平。生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力数值恒定，但权重呈波动趋势；绿化覆盖率、主要污染物氨氮排放量和化学污染物排放量的权重也不稳定，相对2009年而言，2018年的绿化覆盖率权重增大7%，氨氮排放量权重增大37.4%，化学需氧量排放量权重增大129.5%，指标数值均增大，氨氮排放量和化学需氧量排放量的变动对水资源和生态环境造成了严重危害。庆阳市有马莲河、蒲河、洪河、四郎河、葫芦河共五条河流，但人均水资源量严重不足，且总体气候干旱，不利于农业的生产发展。庆阳是仅次于陕西榆林的中国第二大能源资源大市，是甘肃最大的原油生产基地和长庆油田的诞生地，2018年实际工业增加值和农林牧渔业增加值的差距相对其他地区较小，作为以矿产资源为主的资源型城市，污水处理能力急需提高，特别是在入河污水流量和主要污染物排放量增加的情况下，必须确保资源的

合理开采和对生态环境的保护与修复，走可持续发展之路。

定西市的水资源承载力在 2016 年和 2017 年处于严重超载、水资源和生态环境受到较强破坏、各方面发展极不协调的 V 级水平，其余年份处于轻度超载的 IV 级水平。2018 年水资源承载力为 0.204 濒临轻度超载的 IV 级边界且低于 2009 年水平 0.226。水资源维度中的人均水资源量权重相对较大，但指标数值在[202.10,685.85]内呈波动变化，2018 年权重相对上升是 2017 年的 1.8 倍；人均供水量的权重呈先上升后下降趋势，数值呈相反变动趋势；2018 年人均水资源量约是 2009 年的 2.9 倍，但人均供水量约是 2009 年的 4/5，年降水量是 2009 年的 1.5 倍；产水模数的数值和权重分别在[2.78,9.87]和[0.0289,0.0378]间波动。社会维度中的城镇化率逐年递增，权重在 2009-2013 年相对降低，2015-2016 年递增，2017-2018 年相对稳定；人口密度的数值变动相对较小，2018 年权重相对 2016 年提升 3.2%；居民人均日生活用水量在 2013 年下降 28.4%后逐年上升；人口自然增长率在 2017 年下降幅度较大且权重增大，2018 年影响水资源承载力的程度高于居民人均日生活用水量。经济维度中的经济密度和人均 GDP 持续增长，2018 年经济密度是 2009 年的 2.2 倍，人均 GDP 是 2009 年的 2.3 倍，但相对其他地区，定西市的经济密度和人均 GDP 都处于较低水平，特别是人均 GDP，2018 年省内排名第十四位；万元农林牧渔业增加值用水量的权重大于万元工业增加值用水量，二者差距在 2009-2011 年逐渐缩小，2012 年短暂增大后再次逐渐缩小，2018 年万元农林牧渔业增加值用水量为 2009 年的 2/5，权重下降 17.8%。生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力在 2012 年得到提高，但 2017 年降低 66.7%，2018 年又迅速增长；绿化覆盖率的权重在 2009 年仅次于城市污水处理厂日处理能力，指标数值的增长速度较慢，2014 年曾短暂降低 31.5%，随后逐年增长至 2018 年达到 26.4%，是 2009 年的 1.03 倍，但权重低于化学需氧量排放量；2018 年化学需氧量排放量是 2009 年的 2.6 倍且权重增大 129.5%；生态用水量在 2015 年增长较为明显，其他年份相对稳定。定西市的水资源贫乏，特别是北部极缺，水质差、含泥量大，但农耕地又多，所需水量大。在相对劣势的自然条件下可因地制宜地发展马铃薯、中药材等特色优势产业，同时可利用历史文化优势和天然避暑条件发展旅游业等第三产业来拉动经济增长；但发展的过程中一定要注意保护水资源，主要污染物的排放量和入河污水量必须得到有效管控，否则在水资源已经严重紧缺的情况下，生态环境和水资源间再不能形成良性循环，后果将极其严重，可能会导致定西市的水资源承载力再度降低至 V 级水平，威胁人类的生存和发展。

5 甘肃省水资源承载力障碍因子分析

5.1 障碍因子诊断模型

障碍度模型由因子贡献度、指标偏离度和障碍度 3 个指标组成，作为衡量区域生态安全的重要方法，已在诸多领域获得广泛应用^{[56][57][58]}。本文在对甘肃省各地区的水资源承载力进行综合评价和分析基础上，运用障碍度模型对各地区的水资源承载力进行障碍因子分析，有利于辨识出不同地区水资源承载力的主要影响因素，对于提高水资源管理水平和提升水资源承载力有积极意义^[38]，计算过程如下：

1. 计算第 j 个评价指标的因子贡献度 F_j ：

$$F_j = w_j w_j^* \quad (5.1)$$

w_j^* 为指标 j 所属准则层的权重。

2. 计算偏离度：

$$I_j = 1 - x_{ij}' \quad (5.2)$$

3. 计算各评价指标障碍度 Q_j ：

$$Q_j = \frac{F_j I_j}{\sum_{j=1}^m F_j I_j} \quad (5.3)$$

根据公式计算出 2018 年甘肃省水资源承载力评价指标体系各维度中具体指标的障碍度，选出障碍度较高的指标作为主要障碍因子列于表 5.1：

表 5.1 2018 年甘肃省各市（州）水资源承载力主要影响因素的障碍度

	水资源				社会			经济		生态环境		
	人均水资源量	人均供水 量	产水 模数	平原区 水资源 补给量	人口 密度	人口自然 增长率	城镇 化率	人均 GDP	经济 密度	城市污水 处理厂日 处理能力	氨氮 排放 量	化学需氧 量排放量
酒泉市	10.34	0.00	6.19	0.00	0.00	0.00	12.28	10.53	20.03	18.48	1.20	2.37
嘉峪关 市	13.66	5.15	7.30	13.01	7.05	7.13	0.00	0.00	0.00	26.08	0.17	0.00
张掖市	9.62	1.86	4.82	2.65	0.71	1.75	16.36	11.88	18.22	18.99	0.00	0.06
金昌市	11.45	2.62	6.14	9.98	1.65	0.42	8.70	5.39	15.96	20.09	0.44	0.66
武威市	8.92	3.58	4.47	6.62	1.20	0.92	15.53	10.53	15.29	15.92	1.31	2.69
兰州市	12.44	6.59	6.34	12.67	8.97	2.54	5.12	10.63	10.42	0.00	1.75	2.48

续表 5.1 2018 年甘肃省各市（州）水资源承载力主要影响因素的障碍度

白银市	9.12	4.38	4.84	8.78	1.89	0.98	12.85	9.83	14.42	16.24	3.17	2.74
临夏州	7.89	4.64	2.02	8.36	5.21	5.46	15.42	10.50	13.12	14.78	1.26	1.73
定西市	8.27	5.00	3.40	8.72	3.05	2.57	16.22	11.01	14.21	15.90	1.64	3.34
天水市	8.81	5.31	3.27	9.19	5.34	1.73	15.29	11.02	13.75	14.72	2.19	4.42
平凉市	8.96	5.38	3.69	9.34	4.38	2.52	15.71	10.99	14.07	15.49	0.82	0.89
庆阳市	8.68	5.20	4.38	8.72	1.77	2.40	15.96	9.83	14.15	16.95	1.36	2.87
甘南州	0.00	6.01	0.00	10.42	0.34	6.94	19.24	12.80	17.54	19.87	0.39	0.90
陇南市	7.46	5.33	0.93	9.09	2.04	2.54	17.36	11.32	14.93	17.33	2.40	3.99
平均值	8.97	4.36	4.13	8.40	3.11	2.71	13.29	9.73	14.01	16.49	1.29	2.08

5.2 障碍因子分析

从障碍因子诊断结果可看出不同地区的水资源承载力受到水资源、社会、经济和生态环境各维度中具体指标的阻碍程度不同。

水资源维度中人均水资源量平均阻碍作用最大为 8.97%，酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市、武威市和白银市受到人均水资源量阻碍最大；兰州市、临夏州、定西市、天水市、平凉市、庆阳市、甘南州和陇南市受到平原区水资源补给量阻碍最大。社会维度中城镇化率的平均阻碍作用最大为 13.29%，除嘉峪关市和兰州市外，其余各市（州）均受该指标阻碍作用最大；嘉峪关市受人口自然增长率阻碍最大；兰州市受人口密度阻碍作用最大。经济维度中经济密度的平均阻碍作用最大为 14.01%，除嘉峪关市和兰州市外，其余各市（州）均受该指标阻碍作用最大；嘉峪关市受万元农林牧渔业增加值用水量阻碍最大；兰州市受到人均 GDP 阻碍最大。生态环境维度中城市污水处理厂日处理能力的阻碍作用最大为 16.49%，除兰州市外其余各市（州）均受该指标阻碍作用最大；兰州市受化学需氧量排放量影响最大。

整个体系来看，酒泉市受到经济密度的障碍最大，表明对于土地面积而言经济发展水平和速度有待提高；嘉峪关市、张掖市、金昌市、武威市、白银市、庆阳市和甘南州受到城市污水处理厂日处理能力的障碍最大，处理污水能力不能满足水资源和生态环境进行自我修复；兰州市受到平原区水资源补给量的障碍最大，表明需要提高人工水资源的补给能力；临夏州、定西市、天水市和陇南市受到城镇化率的阻碍最大。

从各维度的主要障碍指标来看，水资源维度中人均水资源量障碍度最高和最低的地区分别为嘉峪关市和甘南州；人均供水量障碍度最高和最低的地区分别为兰州市和酒泉市；产水模数障碍度最高和最低的地区分别为嘉峪关市和甘南州；平原区水资源补给量

障碍度最高和最低的地区分别为嘉峪关市和酒泉市。社会维度中城镇化率障碍度最高和最低的地区分别为甘南州和嘉峪关市；人口密度障碍度最高和最低的地区分别为嘉峪关市和酒泉市；人口自然增长率障碍度最高和最低的地区分别为嘉峪关市和酒泉市。经济维度中经济密度障碍度最高和最低的地区分别为酒泉市和嘉峪关市；人均 GDP 障碍度最高和最低的地区分别为甘南州和嘉峪关市。生态环境维度中城市污水处理厂日处理能力障碍度最高和最低的地区分别为嘉峪关市和兰州市；化学需氧量排放量障碍度最高和最低的地区分别为天水市和嘉峪关市；氨氮排放量障碍度最高和最低的地区分别为白银市和张掖市。临夏州虽然在各主要障碍因子上均未达到最大障碍度，但人均供水量、城镇化率、人口密度、人口自然增长率和人均 GDP 均超过平均障碍度，其他七项主要障碍因子虽未超过平均水平，但也较为接近。

6 结论及对策建议

6.1 主要结论

本文构建了“水资源—社会—经济—生态环境”四维水资源承载力评价指标体系，选用熵权法和 TOPSIS 综合评价法对甘肃省 14 个市（州）的水资源承载力进行研究并确定水资源承载力等级，分别从空间和时间角度分析了 2009-2018 年甘肃省各地区水资源承载力的动态变化情况，并利用障碍度模型对 2018 年影响甘肃省水资源承载力的主要障碍因素进行分析，主要结论有：

1. 甘肃省水资源承载力整体呈上升发展趋势

2009 年甘肃省 14 个市（州）中有 3 个地区处于 III 级水平，分别是兰州市、嘉峪关市和酒泉市；1 个地区处于 V 级水平为临夏州；其余 10 个地区均处于 IV 级水平。2018 年有 4 个地区处于 III 级水平，分别为兰州市、嘉峪关市、酒泉市和金昌市；1 个地区处于 V 级水平为临夏州；其余 9 个地区处于 IV 级水平。

2018 年水资源维度中人均水资源量是 2009 年的 1.45 倍，产水模数是原来的 1.55 倍，平原区水资源补给量上升 10.39%，年降水量增加 37.14%，水资源紧缺情况相对有所改善。社会维度中人口自然增长率和居民人均日生活用水量相对下降，城镇化率提高体现了社会的发展和进步，但人口密度相对 2009 年增长 6.79%。经济维度中人均 GDP 和经济密度是 2009 年两倍多，农林牧渔业和工业的用水效率明显提高，特别是万元工业增加值用水量仅为 2009 年的 1/3，整体经济用水效率提高 57.91%。生态环境维度中城市污水处理厂日处理能力为原来的 1.57 倍，旱灾成灾面积、入河污水量和主要污染物的排放都有所降低，但生态环境用水量是原来的 1.56 倍，建成区绿化覆盖率降低。

综合来看，各维度中均存在需要改进方面，特别是水资源维度中的人均供水量、社会维度中的人口密度、经济维度中的万元农林牧渔业增加值用水量和生态环境维度中的生态环境用水量和建成区绿化覆盖率等。这就要求我们要提高水资源的开采水平和节水灌溉技术，牢固树立“水是生命之源，真爱生命”的理念和意识，在促进经济发展的同时保护生态环境和加强绿化建设，进一步改善水资源承载力情况。

2. 甘肃省各市（州）水资源承载力水平差异较大

2009 年 14 个市（州）的水资源承载力空间差异度为评价年间最小值 0.322，2016

年空间差异度为评价年间最大值 0.408。2018 年空间差异度为 0.369，主要表现为兰州市、嘉峪关市和临夏州间差异水平较大。水资源维度中的人均供水量，社会维度中的城镇化率和人口自然增长率，经济维度中的经济密度、人均 GDP 和万元 GDP 用水量，生态环境维度中的绿化覆盖率、旱灾成灾面积和主要污染物排放量都是造成水资源差距较大的主要因素。除上述因素外，临夏州在城市污水处理厂日处理能力方面与兰州市也有较大差距，不足兰州市的 1/10；在平原区水资源补给量、人口密度、万元工业增加值和入河污水量方面与嘉峪关市相比存在劣势。临夏州是黄河上游重要的水源补给区，州内河流属黄河水系，与其他地区相比人均水资源量占有一定优势，但人均供水量仅为人均水资源量的 1/4，表明水资源的开采水平和技术存在进步空间，在合理范围内提高水资源的开发利用率，同时对上述不足因素加以改进和提高，促进水资源承载力的提升。

3.甘肃省各市（州）水资源承载力变动情况不一且制约因素不同

2009-2018 年各市（州）的水资源承载力综合评价结果波动情况不一，或短暂上升或下降趋势，如金昌市、酒泉市、武威市等；或波动性较强如张掖市、甘南州、陇南市等。整体而言 2018 年相对 2009 年水资源承载力处于 III 级水平的地区增加了金昌市，酒泉市虽依然处于 III 级水平但综合评价结果下降；处于 IV 级水平中的白银市、天水市和平凉市综合评价结果相对提高，其他地区均降低。2018 年各地区排名情况与多年平均值排序情况有所出入，依次为兰州市、嘉峪关市、金昌市、酒泉市、张掖市、甘南州、白银市、武威市、平凉市、天水市、庆阳和陇南市并列、定西市、临夏州，白银市排名提升一名，平凉市提升三名；武威市下降一名，下降三名。

各市（州）在不同年份受到水资源、社会、经济和生态环境各维度的具体指标及影响程度不同，导致水资源承载力不同。2018 年水资源承载力提升面临的障碍因素主要有水资源维度的人均水资源量、人均供水量、产水模数和平原区水资源补给量；社会维度主要有人口密度、人口自然增长率和城镇化率；经济维度主要有人均 GDP 和经济密度；生态环境维度主要有城市污水处理厂日处理能力和主要污染物的排放量。不同地区受到上述主要障碍因子的影响也不尽相同，如水资源承载力较好的兰州市水资源维度中人均供水量障碍度高于其他地区；嘉峪关市水资源维度中人均水资源量、产水模数、平原区水资源补给量，社会维度中的人口密度、人口自然增长率，生态环境维度中的城市污水处理厂日处理能力障碍度较高；但这两个地区的其他主要影响因素能够弥补障碍因子的不足，使得水资源承载力尚为可观。甘南州社会维度中的城镇化率和经济维度中的

人均 GDP 障碍度高于其他地区；酒泉市经济维度中的经济密度障碍度高于其他地区；天水市生态环境维度中化学需氧量排放量障碍度高于其他地区；白银市生态环境维度中氨氮排放量障碍度高于其他地区。临夏州作为处于水资源和生态环境受到较强破坏，水资源、社会、经济和生态环境发展极不协调的严重超载 V 级水平，虽在各主要障碍因子上未达到最大障碍度，但在水资源、社会、经济和生态环境发展各方面都有较大欠缺，不能优劣互补，使得水资源承载力的提升成为难题。

6.2 甘肃省水资源承载力提升策略

1. 水资源方面

(1) 加强水资源的有效开发与合理利用

嘉峪关市和兰州市的人均水资源、陇南市的人均供水量在 14 个城市中排名靠后，金昌市、临夏州、甘南州的人均水资源量和人均供水量存在极大差异，这些地区在合理开发利用传统水资源的基础上，应加大对非传统水资源的开发力度，如合理利用丰水期和枯水期的季节特征，建设储水设施以缓解地区水资源时间分布不均的问题。

(2) 提高水资源开发利用技术水平

提高水资源开发利用技术水平使得地下水资源能够较高效率地转变为可供人类利用的水资源，降低水资源承载力发展中平原区水资源补给量的障碍程度，尤其是兰州市和嘉峪关市更需要在此方面提升来支撑起经济的迅速发展。

(3) 推动南水北调西线工程项目建成

南水北调西线工程对于解决我国西北地区特别是甘肃省干旱缺水的现状和补充黄河上游水资源，促进黄河治理开发具有重要意义。

2. 社会方面

(1) 强化社会集约用水意识

生活用水量的增加加大了水资源承载的社会压力，特别是二胎政策放开后，人口自然增长率虽呈下降趋势，但人口密度越来越大，这就需要强化社会公众的集约用水意识。甘肃省近年来居民人均日生活用水量逐年增长，特别是嘉峪关市、兰州市、金昌市和酒泉市等人均日生活用水量较大，表明公众有待提高集约用水意识和能力。甘肃省政府、高校等可在该方面起到表率带头作用，通过深入水资源严重匮乏地区进行调研、打造公益视频短片等方式增强全民的节水意识，树立节水光荣，浪费水可耻的道德观念和社会

氛围；社会可通过建立水资源灾后模拟体验馆等方式增强公众的切实感受、促进自觉提高节水意识；同时也可以利用经济学原理中的杠杆效应，从价格角度适当调整进阶水价强化公众的节水意识，对水资源的有效管理和配置起到调节作用。

（2）提高城镇化率，推动城市群由量向质发展

城镇化率是影响水资源承载力的重要因素，甘南州、陇南市、定西市和临夏州在此方面需要较大提高。公共基础设施的建设增加了水资源的使用量，但节水设施和雨水回收系统的完善能够更好地提高水资源利用效率，同时由农村转移到城镇的人口有更多的机会享受到更好的医疗和教育培训服务，一定程度上有助于人口素质的提高和推进城市文明建设，降低水资源消耗和水污染强度。

3.经济方面

经济发展水平与产业结构、布局等有直接关联，而水资源的供需更是直接和间接受到影响。一方面，产业结构和产业布局对水资源的需求至关重要，甘肃省作为农业大省和老工业基地，农业种植结构、品种和工业发展方式等都会对水资源需求产生较大影响；另一方面，较高的经济发展水平意味着可以有更多的财政收入来支持和研发节水技术和购买相关设备，增强节水能力和提高水资源利用率。因此，甘肃省各地区特别是定西市、陇南市和临夏州等应加强对现有高耗水产业的调整，转化生产模式来提高水资源的利用效率和经济密度，进而提高地区水资源对社会、经济和生态环境的承载能力。

（1）农业发展方面

甘肃属于农业大省，但农业用水效率较低，节水技术的推广与应用缓慢，水资源浪费现象严重，特别是金昌市和酒泉市。因此，应利用先进科学技术来加强农业用水的监管，同时根据不同地区的土壤、气候等自然条件因地制宜推广高产耐旱作物和高效节水灌溉设施，最大限度地降低水源输水、配水、直至灌溉过程中的损失，统筹全省农业布局进行相应的农业空间转移。

（2）工业发展方面

平凉市、庆阳市、酒泉市和兰州市的万元工业增加值用水量相对其他地区较高，政府可推出优惠政策来吸引和鼓励水耗低、污染小的企业创办和发展，加强对企业生产过程中用水效率和污水排放的监管；同时企业应主动淘汰落后的高耗水设备，及时进行生产设备和废污水排放处理设备的改造和革新，提高产品的生产效率和工业重复用水率。

（3）第三产业方面

进一步激发旅游业、服务业等产业的内生活力，提升拉动经济增长的能动作用。特别是旅游业的发展，设置西北环线游和小镇特色游等多种模式，将节水理念与绿色文明出行相结合，打造国内特色生态绿色旅行方式。

4.生态环境方面

生态环境不仅会影响地区的水资源承载力，还会对地区能否实现可持续发展产生重要影响，因此加强保护与治理生态环境，不仅对于提升甘肃省水资源承载力具有重要意义，而且对于提高公众的生活水平和促进可持续发展同样具有现实意义。城市污水厂日处理能力和主要污染物排放量是甘肃省水资源承载力生态环境维度中的主要障碍因素，可采取以下措施：

（1）推动水资源污染的防治工作。首先可通过加强立法来阻止湖泊湿地等周围进行的房地产开发和工矿开采等活动，从源头上预防和控制湖泊富营养化和有机污染。其次要加强废污水和主要污染物的排放监管，严禁直接排放未经处理的废污水，对排放未经处理废污水的企业进行罚款甚至行政处理，尤其是白银市、陇南市、庆阳市、酒泉市、天水市、定西市和临夏州。

（2）加大城市集中污水处理厂和污水截排管网的建设，特别是金昌市、嘉峪关市、酒泉市、张掖市、庆阳市、甘南州和陇南市在提升污水处理能力，再生水的质量和用途范围等方面需要重点关注。

（3）重视并加强对绿地面积和森林生态系统的保护，合理提高森林覆盖率和城市绿化覆盖率，实现水资源和生态环境之间的良性循环和提高水资源的自我修复能力；同时要增强人民群众对于生态环境和水资源可持续发展之间的理解，推出惠农政策鼓励种植生态林及经济林，加强对“植树节”等节日和“蚂蚁森林”等公益产品的宣传，使得节约资源、保护环境蔚然成风。

参考文献

- [1] 魏振枢,李靖靖,王炳君,汤丽萍,姚虹,胡玉琳,岳福兴.高等院校进行环境教育问题的探讨[J].中州大学学报,2004(01):106-110.
- [2] 袁鹰. 区域水资源承载能力评价方法研究[D].中国水利水电科学研究院,2006.
- [3] Malin Falkenmark and Jan Lundqvist. Towards water security: political determination and human adaptation crucial[J]. Natural Resources Forum, 1998, 22(1) : 37-51.
- [4] Jonathan M Harris and Scott Kennedy. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3) : 443-461.
- [5] Michiel A. Rijsberman and Frans H.M. van de Ven. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(3) : 333-345.
- [6] Olli Varis,Pertti Vakkilainen. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century[J]. Geomorphology,2001,41(2).
- [7] Marianne Milano et al. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin[J]. Journal of Hydrology, 2013, 500 : 114-126.
- [8] Hojjat Mianabadi,Erik Mostert,Saket Pande,Nick van de Giesen. Weighted Bankruptcy Rules and Transboundary Water Resources Allocation[J]. Water Resources Management,2015,29(7).
- [9] Meriem Naimi Ait-Aoudia and Ewa Berezowska-Azzag. Water resources carrying capacity assessment: The case of Algeria's capital city[J]. Habitat International, 2016, 58 : 51-58.
- [10] Alberto Stanislao Atzori,Caterina Canalis,Ana Helena Dias Francesconi,Giuseppe Pulina. A Preliminary Study on a New Approach to Estimate Water Resource Allocation: The Net Water Footprint Applied to Animal Products[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia,2016,8.
- [11]田文凯. 基于合理配置的水资源承载力动态评价研究[D].华北水利水电大学,2018.
- [12]新疆水资源软科学课题研究组.新疆水资源及其承载能力和开发战略对策[J].水利水电技术,1989(06):2-9.
- [13]许有鹏.干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J].自然资源学报,1993(03):229-237.
- [14]冯尚友,刘国全.水资源持续利用的框架[J].水科学进展,1997(04):2-8.
- [15]张鑫,李援农,王纪科.水资源承载力研究现状及其发展趋势[J].干旱地区农业研究,2001(02):117-121.
- [16]阮本青,沈晋.区域水资源适度承载能力计算模型研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998(03):58-62+86.
- [17]姚治君,王建华,江东,陈传友.区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J].水科学进展,2002(01):111-115.
- [18]封志明,杨艳昭,游珍.中国人口分布的水资源限制性与限制度研究[J].自然资源学报,2014,29(10):1637-1648.
- [19]王浩,秦大庸,王建华,李令跃.西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J].自然资源学报,2004(02):151-159.
- [20]赵恩国.基于产业结构的北京市水资源承载力模型分析[J].中国社会科学院研究生院

- 学报,2015(06):50-56.
- [21]施雅风,曲耀光.乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M].北京:科学出版社,1992.
- [22]左其亭,马军霞,高传昌.城市水环境承载能力研究[J].水科学进展,2005(01):103-108.
- [23]许新宜,王浩,甘泓.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].黄河水利出版社,1997.
- [24]贾嵘,薛惠峰,解建仓,蒋晓辉.区域水资源承载力研究[J].西安理工大学学报,1998(04):54-59.
- [25]惠泱河,蒋晓辉,黄强,薛小杰.水资源承载力评价指标体系研究[J].水土保持通报,2001(01):30-34.
- [26]夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002(03):262-269.
- [27]程国栋.承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J].冰川冻土,2002(04):361-367.
- [28]龙腾锐,姜文超,何强.水问题反思与水资源承载力研究[J].中国给水排水,2003(07):20-23.
- [29]黄林楠,张伟新,姜翠玲,范晓秋.水资源生态足迹计算方法[J].生态学报,2008(03):1279-1286.
- [30]王建华,翟正丽,桑学锋,李海红.水资源承载力指标体系及评判准则研究[J].水利学报,2017,48(09):1023-1029.
- [31]李云玲,郭旭宁,郭东阳,王晓红.水资源承载能力评价方法研究及应用[J].地理科学进展,2017,36(03):342-349.
- [32]何刚,夏业领,秦勇,朱艳娜,王雯雯.长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J].水土保持研究,2019,26(01):287-292+300.
- [33]刘志明,周召红,王永强,洪晓峰,陈进.区域水资源承载力及可持续发展综合评价研究[J].人民长江,2019,50(03):145-150.
- [34]陈洋波,陈俊合,李长兴,冯智瑶.基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J].水利学报,2004(07):98-103.
- [35]袁鹰,甘泓,汪林,游进军.基于不同承载水平的水资源承载能力计算[J].中国农村水利水电,2006(06):40-43.
- [36]王建华,姜大川,肖伟华,陈琰,胡鹏.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409.
- [37]金菊良,董涛,邴建强,张礼兵,李辉.不同承载标准下水资源承载力评价[J].水科学进展,2018,29(01):31-39.
- [38]左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].水资源保护,2020,36(02):1-7.
- [39]周亮广,梁虹.基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究——以贵阳市为例[J].自然资源学报,2006(05):827-833.
- [40]刘树锋,陈俊合.基于神经网络理论的水资源承载力研究[J].资源科学,2007(01):99-105.
- [41]胡吉敏.沿海地区水资源承载力评价研究[D].大连理工大学,2008.
- [42]马峰,王千,蔺文静,王贵玲.基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价——以石家庄为例[J].南水北调与水利科技,2012,10(03):62-66.
- [43]张军,张仁陟,周冬梅.基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J].草业学

- 报,2012,21(04):267-274.
- [44]李辉,金菊良,童芳,张礼兵,周玉良.基于联系数的安徽省水资源承载力评价及空间差异诊断分析[J].水电能源科学,2018,36(07):22-27.
- [45]孙国营,孙新杰,霍兴赢,龙尚银.基于三支决策改进 TOPSIS 的水资源承载力评价[J].节水灌溉,2019(12):77-81.
- [46]孙富行. 水资源承载力分析与应用[D].河海大学,2006.
- [47]徐彤彤. 京津冀水资源承载力比较研究[D].河北大学,2019.
- [48]王浩,王建华,秦大庸,贾仰文.基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J].水利学报,2006(12):1496-1502.
- [49]胡珀. 甘南藏族自治州生态环境安全研究[D].兰州大学,2008.王友贞. 区域水资源承载力评价研究[D].河海大学,2005.
- [50]朱一中,夏军,谈戈.西北地区水资源承载力分析预测与评价[J].资源科学,2003(04):43-48.
- [51]刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(02):258-269.
- [52]吴光嫻. 湖北省水资源承载力评价与预测研究[D].中南财经政法大学,2019.
- [53]林龙圳,李达,林震.基于熵权-TOPSIS 模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J].华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(04):640-648.
- [54]舒小林,高应蓓,张元霞,杨春宇.旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(03):82-90.
- [55]张潇. 基于面板数据的动态 TOPSIS 评价方法研究[D].湖南大学,2016.
- [56]孙振杰,袁家冬,刘继斌.中国典型旅游城市生活服务水平评价及障碍因素研究[J].地理科学,2020,40(02):289-297.
- [57]万炳彤,鲍学英,赵建昌,李爱春.区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用[J].环境科学,2021,42(04):2089-2100.
- [58]胡悦,马静,李雪燕,陈国鹰.京津冀地区生态安全评价及障碍因子诊断[J].环境污染与防治,2021,43(02):206-210+236.
- [59]David Pimentel et al. Biofuel Impacts on World Food Supply: Use of Fossil Fuel, Land and Water Resources[J]. Energies, 2008, 1(2) : 41-78.
- [60]Kenneth Muniina and Cedo Maksimovic and Nigel Graham. A novel approach for estimating urban water end use characteristics of cities in the developing world[J]. Urban Water Journal, 2017, 14(7) : 750-757.
- [61]薛小杰,惠泱河,黄强,蒋晓辉.城市水资源承载力及其实证研究[J].西北农业大学学报,2000(06):135-139.
- [62]曲耀光,樊胜岳.黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J].中国沙漠,2000(01):2-9.
- [63]胡玉贵.区域水资源承载能力研究[D].河海大学,2005.
- [64]巫春平,张济世.甘肃省水资源承载力评价[J].人民长江,2007(11):135-136+156.
- [65]陈长安.区域水资源承载力评价研究[D].昆明理工大学,2008.
- [66]刘旭东,曾现来,巩如英,王丽芸,李敬苗.基于多目标决策与主成分分析的水资源承载力评价及预测——以河北省为例[J].安徽农业科学,2008(02):751-753.
- [67]李书敏.土地生态承载力研究[D].华中农业大学,2010.
- [68]余思敏,胡雨村.生态城市水资源承载力的系统动力学仿真[J].四川师范大学学报(自然科学版),2013,36(01):126-131.
- [69]席丹墀,许新宜,韩冬梅,杨中文.京津冀地区水资源承载力评价[J].北京师范大学学报

- (自然科学版),2017,53(05):575-581.
- [70]孙雅茹,董增川,刘淼.基于改进 TOPSIS 法的盐城市水资源承载力评价及障碍因子诊断[J].中国农村水利水电,2018(12):101-105.
- [71]吉婷婷,陈童,毛广雄.基于熵权 Topsis 的淮河生态经济带水资源承载力评价[J].中国农业资源与区划,2018,39(09):130-135.
- [72]张琳玲.基于模糊综合评价模型的水资源资产负债表编制与应用[D].兰州财经大学,2020.
- [73]黄昌硕,耿雷华,颜冰,卞锦宇,赵雨婷.水资源承载力动态预测与调控——以黄河流域为例[J].水科学进展,2021,32(01):59-67.

致 谢

行文至此，落笔为终。匆匆三载，始于戊戌年金秋九月，终于辛丑年六月盛夏。青春校园，目之所及，皆是回忆。

事师之犹事父也，幸入师门，如沐春风。感谢恩师王永瑜教授三年来的谆谆教诲，传道授业和耐心解惑。王老师知识渊博，治学严谨，从论文开题到最终完稿给予了我莫大的指导、鼓励和帮助。山高水长有时尽，唯我师恩日月长。

父母之爱女，则为之计深远。咿呀学语至学生时代终结，辗转二十二年，感谢父母的言传身教，悉心呵护与浓浓爱意，迷茫之际的引导帮助，沮丧之际的安慰鼓励，从无后顾之忧。星河滚烫，岁月漫长，你们是我最温暖的人，也是我坚定前行的力量。

恰同学少年，结识同窗王梦宇、封诗睿，学姐杜慧娟；感谢杨燕燕、徐绮阳师姐在生活和学术上给予我的莫大帮助。另挚友宋天新，学生时代相识，相知相伴，何其幸之。

硕士三年，受益匪浅，着实成长。离别之际，祝愿母校年年桃李、岁岁芬芳；祝愿恩师身体健康；愿各位同窗前程似锦，所愿皆可得！