

分类号：  
学号：20232110070

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于水资源承载力约束下的多情景模拟预测的 研究——以吐哈盆地为例

学位申请人	郑晓明
指导教师	李俊峰 教授 伏小弟 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水资源利用与管理
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

分类号：  
学号：20232110070

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于水资源承载力约束下的多情景模拟预测的 研究——以吐哈盆地为例

学位申请人	郑晓明
指导教师	李俊峰 教授 伏小弟 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水资源利用与管理
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

**Study on Multi-Scenario Simulation and Prediction under the  
Constraint of Water Resources Carrying Capacity: A Case Study of  
the Turpan-Hami Basin**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Zheng xiao-ming**

**(Water Resources Utilization and Management)**

Dissertation Supervisor: Prof. Li Jun-feng

May,2026

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：郑晓明

时间：2026年5月21日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：郑晓明

时间：2026年5月21日

导师签名：李心峰

时间：2026年5月21日

## 摘要

当前我国发展过程中，水资源供需结构失衡与用水矛盾日益突出。水资源承载力作为衡量水资源系统支撑社会经济与生态可持续发展的关键指标，具有重要研究价值。然而，以往研究在关键障碍指标的动态分析及评估不确定性方面仍存在不足。为此，亟需开展水资源承载力的科学评估与优化策略研究，以缓解日益严峻的水资源危机。

本研究围绕水资源承载力的科学评估与多情景仿真预测开展了深入的研究，通过改进优化的综合赋权 TOPSIS 评价模型，实现了指标的主客观权重稳定性分析与承载力时空演变的科学评估。此外，本研究通过构建水资源承载力的系统动力学模型以探究不同发展情景下的社会发展与水资源承载力的动态变化过程。本研究以新疆吐哈盆地作为研究区域（2011~2022 年），探究了多情景下水利工程能力、经济发展潜力、水资源禀赋的动态仿真结果。主要研究结论如下：

（1）构建了水资源承载力的评估体系，并确定了指标的权重。采用综合赋权方法为水资源管控能力子系统赋权最高为 0.41。此外，在权重稳定性检验过程中，大多数的指标排名未出现明显的波动现象，平均总排名变化幅度仅为 0.64，体现出水资源承载力评估指标的较强抗干扰能力。

（2）阐明了水资源承载力水平的时空演变特征以及评估值的不确定性。2011~2022 年，吐鲁番市的水资源承载力评估值呈现出“波动上升”的趋势，2022 年吐鲁番的水资源承载力评估值是 0.43，承载等级表现为临界超载状态；哈密市的水资源承载力评估值呈现出“平稳上升”的趋势，2022 年哈密的水资源承载力评估值是 0.60，承载等级表现为临界超载状态。两地评估值的核心差异体现在得分区间与峰值位置，吐鲁番市的承载力评估值主要集中在 0.30~0.45 区间，哈密市的承载力评估值主要集中在 0.40~0.60 区间。

（3）构建并检验了水资源承载力的系统动力学模型。系统动力学模型指标参数之间的因果关系图与系统流图反映了不同子系统以及评估指标的反馈作用机理。通过模型的历史性检验可知，绝大多数参数指标的平均误差与变化幅度均保持在 10.00%以内，体现模型具有可靠的稳定性与准确性。

（4）评估了不同发展情景下的重要水资源测度指标以及承载状态。预测吐鲁番市 2035 年 S5 情景下的水资源承载力评估值为最优值，达到 0.67，处于弱承载状态；哈密市在 S3 情景下的水资源承载力评估值是所有情景中提升最为显著的，预测在 2035 年达到 0.73，处于弱承载状态。

综上所述，本研究系统总结了吐鲁番市、哈密市当前水资源管理工作中存在的不足，揭示了关键障碍指标对水资源承载力的影响机制，并基于不同情景下的水资源承载状态，提出了针对性的政策规划建议，为两地制定科学高效的水资源管理与规划方案提供了重要的理论支撑和实践参考。

**关键词：**水资源承载力；TOPSIS 法；系统动力学；多情景分析

## Abstract

Against the background of China's current development, the structural imbalance between water supply and demand as well as water use conflicts have become increasingly prominent. As a core indicator to measure the capacity of water resources systems to support the sustainable development of socio-economic and ecological environments, water resources carrying capacity is of important research significance. Nevertheless, existing studies still have deficiencies in the dynamic analysis of key obstacle indicators and the uncertainty of evaluation results. Therefore, it is urgent to carry out scientific evaluation and optimization strategy research on water resources carrying capacity to alleviate the increasingly severe water resources crisis.

This study conducts an in-depth research on the scientific evaluation and multi-scenario simulation prediction of water resources carrying capacity. By adopting an improved and optimized comprehensive weighting TOPSIS evaluation model, the paper realizes the stability analysis of subjective and objective weights of evaluation indicators and the scientific assessment of the temporal and spatial evolution of water resources carrying capacity. Furthermore, a system dynamics model for water resources carrying capacity is constructed to explore the dynamic evolution process of social development and water resources carrying capacity under different development scenarios. This study takes the Turpan-Hami Basin in Xinjiang as the research area from 2011 to 2022, and explores the dynamic simulation results of water conservancy engineering capacity, economic development potential and water resources endowment under multiple scenarios. The main research conclusions are summarized as follows :

(1) An evaluation system of water resources carrying capacity was constructed, and the weights of indicators were determined. Using the comprehensive weighting method, the water resources management and control subsystem was assigned the highest weight of 0.41. In addition, during the weight stability test, most indicator rankings showed no obvious fluctuation, and the average total ranking change was only 0.64, reflecting the strong anti-interference ability of the water resources carrying capacity evaluation indicators.

(2) This study elucidates the spatiotemporal evolution characteristics of water resource carrying capacity levels and the uncertainty of the evaluation values. From 2011 to 2022, the water resource carrying capacity evaluation value of Turpan City exhibited a "fluctuating upward" trend, reaching 0.43 in 2022, corresponding to a critical overload state in carrying capacity grade. The evaluation value of Hami City showed a "steady upward" trend, reaching 0.60 in 2022, also classified as a critical overload state. The core differences in the evaluation values between the two cities are reflected in their score intervals and peak positions: the carrying

capacity evaluation values of Turpan City are mainly concentrated in the range of 0.30 – 0.45, while those of Hami City are mainly concentrated in the range of 0.40 – 0.60..

(3) A system dynamics model of water resources carrying capacity was constructed and validated. The causal loop diagram and stock-flow diagram among parameters and indicators of the system dynamics model reflect the feedback mechanisms of different subsystems and evaluation indicators. According to the historical validation of the model, the average error and variation range of most parameters and indicators were kept within 10.00%, demonstrating reliable stability and accuracy of the model.

(4) This study assesses core water resource indicators and carrying capacity status under different development scenarios. It is predicted that Turpan will reach an optimal water resource carrying capacity value of 0.67 under Scenario S5 in 2035, presenting a weak carrying state. Hami' s carrying capacity improves most obviously under Scenario S3, hitting 0.73 in 2035 and remaining in a weak carrying state.

In conclusion, this research summarizes the deficiencies in existing water resource management of Turpan and Hami, reveals the influence mechanism of key constraint indicators on water resource carrying capacity, and puts forward targeted policy suggestions in view of varied carrying capacity states. It provides important theoretical support and practical reference for formulating scientific and efficient water resource management and planning schemes for the two regions.

**Key words:** Water Resources Carrying Capacity (WRCC); TOPSIS Method; System Dynamics (SD); Multi-Scenario Analysis

# 目录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 水资源承载力的研究进展	2
1.2.2 水资源承载力的评估方法	3
1.2.3 系统动力学在水资源承载力的应用	4
1.3 研究内容	5
1.4 研究目标与意义	6
1.4.1 研究目标	6
1.4.2 研究意义	6
1.5 技术路线	6
第 2 章 研究区概况及研究方法	8
2.1 研究区概况	8
2.1.1 地理位置	8
2.1.2 社会经济概况	9
2.1.3 气候特征	10
2.2 水资源概况	10
2.2.1 水资源分布	10
2.2.2 水资源水质	11
2.2.3 水资源开发利用现状	14
2.2.4 水资源供需平衡分析	14
2.2.5 开发利用存在的问题与潜力	16
2.3 构建指标评价体系的方法	16
2.3.1 体系的构建原则	16
2.3.2 选取评价指标	17
2.4 承载力的评估方法	18
2.4.1 权重确定的方法	18

2.4.2	TOPSIS 法	21
2.4.3	不确定性的计算方法	22
2.4.4	障碍度模型	22
2.5	系统动力学模型	23
2.5.1	设置模型参数的方法	23
2.5.2	历史性检验的方法	24
第 3 章	水资源承载力的评估	26
3.1	指标权重的确定	26
3.1.1	指标权重的计算	26
3.1.2	权重稳定性检验	27
3.2	水资源承载力的时空演变分析	28
3.3	承载力评估的不确定性分析	30
3.3.1	水资源承载力的分布特征分析	30
3.3.2	子系统敏感性分析	31
3.3.3	不确定性特征分析	32
3.4	障碍度分析	32
3.4.1	障碍度计算	32
3.4.2	子系统障碍因子分析	34
3.5	本章小结	35
第 4 章	系统动力学模型的构建	36
4.1	解决问题的步骤	36
4.2	确定模型边界	37
4.3	因果关系分析	38
4.3.1	构建因果关系图	38
4.3.2	原因树状图分析	40
4.4	系统流图分析	40
4.5	模型检验	44
4.5.1	单位一致性检验	45
4.5.2	历史性检验	46
4.6	情景仿真方案设计	46
4.7	本章小结	48
第 5 章	多情景仿真结果的分析	49
5.1	多情景下吐鲁番市的主要预测结果及分析	49
5.2	多情景下哈密市的主要预测结果及分析	51

5.3 承载力预测结果及分析·····	52
5.4 水资源开发利用的分析·····	54
5.5 水利工程供水能力分析·····	55
5.6 政策建议·····	57
5.7 本章小结·····	58
第6章 结论与展望·····	59
6.1 结论·····	59
6.2 展望·····	60
参考文献·····	61
致谢·····	70
作者简介·····	71

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景

水资源是支撑人类社会存续与进步的不可或缺的自然资源<sup>[1]</sup>。自我国迈入 21 世纪以来,随着国家飞速发展的工业化与城市化,部分地区仍不可避免地存在着对水资源的不合理利用与过度开发等现象<sup>[2]</sup>。现阶段我国正面临着总量大但人均占有量少、时空分布不均、污染和浪费严重、用水需求不断增加等水资源特点<sup>[3,4]</sup>。随着我国现代化建设下城市化步伐进一步加快,而人口基数的规模依然庞大,必然产生持续的大规模用水需求,对原有的产业生产和居民生活用水方式产生了新的挑战<sup>[5]</sup>。而现有的水资源配置与利用模式可能难以有效应对这一挑战,将造成人口增长、经济发展与水资源供给之间的矛盾日益尖锐<sup>[6]</sup>。因此,对水资源的研究已经成为衡量社会经济与自然生态的可持续发展协调度的关键标尺<sup>[7]</sup>。

除此以外,在自然生态与气候波动的双重挑战下,较大或超大型城市暴露出较为显著的结构性的水资源供需紧张,严重威胁了地区的生态安全,对人类社会的福祉产生了负面影响<sup>[8]</sup>。因产业结构不平衡的城市工业化进程造成废水污染物的大量排放,可能进一步加剧水资源水质的恶化,对水资源的可持续发展利用造成了双重压力<sup>[9]</sup>。此外,部分干旱地区的城市开发作业已接近或超出了其水资源所能承载的极限,陷入了水资源严重短缺的困境<sup>[10]</sup>。因此,开展对水资源承载力的科学评估与优化配置策略的研究,是缓解水资源危机与推动社会、经济、生态以及水资源可持续发展的重要途径<sup>[11]</sup>。

以吐哈盆地为例,地理位置处于极度干旱区,具有降水稀少、蒸发强烈的水资源特征,城市化与工业化过度依赖于地下水的开采,造成了两地水资源开发与供水结构的不平衡现状<sup>[12-14]</sup>。此外,吐哈盆地还存在着水资源生态系统退化、生态系统服务功能下降等现象,引发了湖泊与河流面积萎缩、水体自净能力衰减等问题,严重制约了两地水资源的可持续利用<sup>[15,16]</sup>。2021 年,《新疆维吾尔自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》正式发布,明确提出“能耗和水资源消耗、建设用地、碳排放总量得到有效控制,生态保护和修复机制基本形成”等发展目标,不仅为吐鲁番市与哈密市建成可持续发展社会提供了蓝图,也对两地水资源开发的科学配置与高效利用提出了更高要求。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 水资源承载力的研究进展

“承载力”的概念可追溯于《生态学》中的“承载能力”(Carrying Capacity),指的是在不破坏生态系统平衡的前提下,该生态系统或环境中所能支撑的最大生物种群数量<sup>[17,18]</sup>。水资源承载力是由“承载力”的概念引申而来,通常是指在一定时期内区域在自然、经济、社会等条件约束下,通过合理利用水资源所能支撑的最大人口数量或经济社会发展规模<sup>[8]</sup>。尽管这一概念在学术界中已经得到了广泛的应用,但对水资源承载力的确切定义和评估标准现如今仍未达成一致意见。

自20世纪70年代以来,水资源承载力的研究吸引了国内外众多学者的广泛关注与深入探讨<sup>[19,20]</sup>。1972年,Dennis L. Meadows等在《增长的极限》中以系统性、前瞻性的视角,将承载力的概念拓展至环境科学、经济学、地理学、城市规划等多个领域<sup>[21]</sup>。1998年,Joardar等人对城市基础设施供应(如供水和卫生设施)方面的承载能力进行评估<sup>[22]</sup>。1999年,Harris等人揭示了水资源短缺如何直接影响农作物的灌溉需求以及作物的生长周期、产量和质量<sup>[23]</sup>。2014年,Aoudia等人根据存在显著差异的干旱和湿润年的水资源输入量评估了阿尔及尔家庭用水的承载能力<sup>[24]</sup>。2017年,Fischer等人构建了侧重于管理城市水循环中新出现的污染物信息管理系统,并提出了相关问题的技术解决方案<sup>[25]</sup>。此后,国外学者们对于水系统承载力的研究主要集中于水资源储存量、水质水环境、水生态等方面<sup>[26]</sup>。

国内对于水资源承载力的研究同样取得了丰硕的成果。1988年,新疆水资源软科学研究组首次将承载力的概念引申于水资源管理的研究之中<sup>[27]</sup>,指出水资源承载力是“在确保社会和生态系统不受损害的基础上,考虑社会科技发展的当前阶段,合理界定一个区域内农业、工业、城市发展及人口增长所能依托的最大可开发水资源规模”。1990年,学者们以不同的角度对水环境承载力的概念给出了定义以及相应的指标评价体系<sup>[28]</sup>。1992年,施雅凤院士将水资源承载力定义为“在一定社会历史和科学技术发展阶段,水资源系统在不破坏社会和生态系统平衡的前提下,所能承载的农业、工业、城市规模和人口的最大能力”<sup>[29]</sup>。2002年,夏军等人针对西北干旱区环境提出了包括可利用水资源量、水资源需求量等水资源承载力的度量与计算方法<sup>[3,30]</sup>。2018年,金菊良等人通过对“水资源—社会经济—生态环境”复合系统间各要素的相互作用机理阐述了水资源承载力预警方法<sup>[20]</sup>。此后,国内学者对水资源承载力的研究主要针对水资源管理、承载力评价、水安全等内容展开<sup>[31-33]</sup>。

针对水资源承载力的研究在全球范围内取得了多项显著进展,内容涵盖了水资源开发潜力、社会经济可持续能力及可承载人口规模等方面,成果核心在于促进社会可持续

发展<sup>[26]</sup>。随着人类社会的快速发展，以“合理规模”与“最大承载极限”为核心的水资源承载力的概念界定与评价手段仍需持续更新，以适应新的发展需求<sup>[34]</sup>。未来的研究迫切需要针对地理异质性而构建系统化的研究方法，以开展更为科学高效的水资源承载力评估。

## 1.2.2 水资源承载力的评估方法

过往的学者们对于水资源承载力的研究较为单一，常以水资源储存量、用水效率与水资源开发规模等独立的研究内容表述类似含义<sup>[35,36]</sup>。例如，2020年，张钰洁通过划分水生态功能区的控制单元对招苏台河铁岭市的COD和氨氮作为污染物对水环境容量进行了评估与预警<sup>[37]</sup>。2021年，王艺洁分析了新疆阿克苏河流域水土资源的利用现状，采用NSGA-II遗传算法计算了水资源承载力，实现了对阿克苏河流域农业水土资源优化的最优方案配置<sup>[38]</sup>。2022年，Xian等人通过基于水量与水质的灰色水足迹框架评估了水资源的可持续发展能力<sup>[39]</sup>。2022年，黄昕通过NSGA-III模型对郑汴地区进行“常规水—中水”的水资源优化配置，使用TOPSIS法计算现状及规划年郑汴地区的综合发展指数<sup>[40]</sup>。2024年，刘家溪采用水资源承载力综合评估模型探究了甘肃省的社会经济发展水平和水资源利用状况<sup>[41]</sup>。2024年，Liu等人通过线性回归趋势法评估了城乡水资源配给紧缺度<sup>[42]</sup>。

鉴于过往研究中对水资源承载力研究方法存在着的局限性，学者们正在尝试构建综合了不同子系统的水资源综合评估框架<sup>[43]</sup>。目前，对于水资源综合评估框架的研究方法主要是多标准评估方法<sup>[44]</sup>，通常涵盖了模糊综合评价(PCE)<sup>[45]</sup>、多阶段迭代<sup>[46]</sup>、TOPSIS法<sup>[47,48]</sup>等。例如，2021年，向维通过BP神经网络分析了白洋淀水环境状况，并构建了白洋淀水环境承载力的预警指标体系，对白洋淀水环境承载力进行了评价与预警<sup>[49]</sup>。2023年，周齐彬通过“矩估计—TOPSIS—RSR模型”对云南省及其各州市2008~2020年水资源承载力进行综合评价，阐述了云南省及16州市的水资源承载力状况及问题所在<sup>[50]</sup>。2024年，Xu等人使用概率统计法与灰狼优化算法分析了水资源承载力的时空演变趋势以及相关敏感指标的水资源配置策略<sup>[51]</sup>。2024年，王智翔基于BP神经网络的回归训练对湘江流域未来5年水资源承载力进行了评测与预警<sup>[52]</sup>。2025年，Zhou等人基于Lorenz不对称系数模型分析了影响该研究区域水资源承载力的归因指标<sup>[47]</sup>。

此外，学者们对于水资源短缺背景下的水资源承载力的探讨也不全面，尤其是在极端干旱环境下的水资源供给矛盾<sup>[53-55]</sup>。例如，2022年，Ji等人探究了干旱区域的水资源水量、水质、水生态等问题<sup>[56]</sup>；2023年，Wei等人探究了干旱地区水资源承载力的水生态影响因素以及相关系统之间的耦合协调程度<sup>[57]</sup>；2024年，Yang等人探究了极度干旱地区水资源承载力的潜在驱动因子<sup>[16]</sup>。这些研究往往忽略了干旱地区的水资源供给来源以及相应的水资源供水工程设施。但是，半干旱以及极度干旱区的用水需求强烈依赖于

以地下水为供水源的水利设施，而以往的水资源承载力评估体系对水利工程能力等方面缺少更深入的研究<sup>[16, 58, 59]</sup>。

### 1.2.3 系统动力学在水资源承载力的应用

学者们对水资源承载力仿真与预测的研究方法主要是数学建模法<sup>[32]</sup>，包括：系统动力学模型<sup>[60, 61]</sup>、分布式水文模型<sup>[45]</sup>、神经网络模型<sup>[62]</sup>等。系统动力学(System Dynamics)起源于20世纪50年代中期，由美国麻省理工学院教授J.W.福雷斯特(Forrester)率先创立，作为20世纪经济数学领域中的一项重要分支，其融合了系统论、控制论与信息反馈理论，是理解复杂系统的动态行为及其管理决策强有力的工具和方法论基础<sup>[63, 64]</sup>。作为一种因果机理性模型，该模型擅长处理跨越时间维度，解析长期与周期性问题，即便在数据有限或量化困难时，也能依托反馈环理论进行深入研究。针对于高阶次、非线性、时变的复杂问题，系统动力学模型展现出明显优势<sup>[63, 65]</sup>。随着系统动力学被广泛应用在社会、经济、管理以及资源环境等领域，该模型能够以“一切都可以用能量来衡量”的假设探究了人口增长、可用自然资源存量、生态环境和经济发展之间的因果作用关系以用于仿真水资源承载力的动态变化<sup>[66, 67]</sup>。

系统动力学模型将一个复杂的水资源承载力问题分解为多个子系统小问题并探究不同指标之间的因果关系，以解决水资源系统存在着的非线性、多变量和复杂机制的困难<sup>[60]</sup>。国内外通过系统动力学对水资源承载力进行多情景预测，以期实现水资源的优化配置与可持续发展利用。例如，2017年，Wang等人基于系统动力学模型预测了用水需求以及相应供需比关系<sup>[68]</sup>。2021年，刘夏等人对新疆塔里木河流域的水资源承载力构建系统动力学模型，对水资源承载力的未来演变趋势进行了定量评估和预测<sup>[69]</sup>。2022年，Liu等人基于系统动力学模型探究了中国东南北调水工程与研究区水量的供需比关系<sup>[60]</sup>。2023年，赵佩玉构建了水资源环境承载力的系统动力学预测模型，结果表明西安市水资源环境承载力综合评估值呈波动上升态势，发展趋势向好<sup>[70]</sup>。2024年，Shi等人采用系统动力学模型评估了中国河南省内长江、淮河、黄河和海河流域为重点的水资源承载力，阐述了人口扩张、经济增长和水资源社会发展之间的非线性相互作用<sup>[71]</sup>。

综上所述，过往的研究往往局限于水资源系统、社会系统、生态系统的独立分析，而很少考虑经济活动与社会发展的协同作用对水资源禀赋可利用状态及承载能力的综合影响。尽管多标准评估方法将不同的子系统与评价指标统一在一个主系统中，实现了在时间与空间等多维角度下水资源承载力的评估与预测，但上述方法在应对水资源承载力多情景评估与预测的实验过程中仍然存在将不同子系统指标贡献度异化的局限性。因此，选择合适的指标赋权方法与多标准评估方法相结合可以提高评估模型的精确性与全面性。此外，对于决策者而言，系统动力学模型的参数设置具有主观性，评估体系的指标数目也将影响模型的计算效率和准确性。GM(1,1)模型是预测与时间联系问题的常用

方法，对预测变量的发展趋势进行建模和预测是其核心思想，适用于存在小样本、不完全信息缺点的预测变量。因此，将 GM(1,1)模型与系统动力学仿真系统相结合，能够提高系统动力学模型预测的准确性和可操作性。

### 1.3 研究内容

本研究以吐哈盆地的自然地理、水文气象、社会经济及生态环境等历史统计数据为基础，着重于解析水资源开发利用现状及水资源供需问题，采用 TOPSIS 法、蒙特卡洛法、系统动力学模型等方法对研究区域过往 12 年（2011~2022 年）的水资源承载力进行了综合评估与仿真预测。同时，基于水资源承载力评估框架以深入探究不同指标以及相应子系统的障碍程度。此外，通过结合区域发展目标设置了 5 种具有显著代表性的仿真发展情景，分析多情景下所有测度指标的统计特征与演化规律。在此基础上，使用水资源承载力综合评价模型对多情景下的仿真数据进行约束校核，得到不同情景下水资源承载力的评估值。主要研究内容如下：

#### （1）水资源承载力的综合评估

通过对历史统计数据进行不同指标间的相关性分析，以水资源压力、水资源禀赋与水资源管控能力的指标属性构建评估水资源承载力的测度指标体系。采用层次分析法与熵权法的优化赋权方法确定承载力指标的综合权重，并检验不同指标间的权重稳定性。最后，采用蒙特卡洛法探究评估指标的不确定性，采用障碍度模型识别水资源承载力评估体系的主要障碍因子。

#### （2）水资源承载力仿真模型的构建以及检验

基于系统动力学构建水资源承载力的仿真模型，主要步骤是：设置模型的系统边界与时间边界，通过构建承载力指标层的分析因果图与系统流图确定模型参数的变量类型以及相应的计算方程。此外，依托 2011~2022 年的历史数据开展模型的历史性检验。

#### （3）基于系统动力学模型的多情景仿真

通过调控系统动力学模型的指标变量参数，对比分析吐哈盆地 2023~2035 年不同情景下的社会经济发展水平、水资源利用效率和水资源供需结构的仿真结果，以此为基础探究未来不同发展情景下仿真预测的动态变化规律以及相应的承载力等级，为吐鲁番市与哈密市的水资源承载力最优发展策略提供理论依据。

## 1.4 研究目标与意义

### 1.4.1 研究目标

针对干旱以及半干旱地区缺少水资源承载力多情景动态分析的问题,本研究拟开展系统动力学仿真试验,探究影响吐哈盆地水资源承载力的关键驱动因子,阐明承载力时空演变的特征与评估值的不确定性,旨在为优化干旱区水资源配置结构性失衡问题提供理论依据。

### 1.4.2 研究意义

针对吐哈盆地水资源承载力的研究,不仅能定量评估吐哈盆地的水资源现状,以揭示重要障碍指标对水资源承载力的反馈作用机制,还总结出了当前水资源管理的不足之处,为吐鲁番市、哈密市制定科学高效的水资源规划与管理策略提供重要的理论依据<sup>[72]</sup>。而对吐哈盆地水资源承载力的多情景仿真能够综合考虑社会经济条件、自然环境变化和政策调整等多种因素对水资源承载力的影响,对于科学分析水资源系统的承载能力和潜力具有重要作用<sup>[69, 71]</sup>。

此外,多情景的仿真结果以承载能力为表现形式,保障了决策者能够合理地规划水资源的开发利用和保护,推动了吐鲁番市与哈密市用水结构不平衡的优化改善,对于水资源、生态及社会经济的可持续协调发展具有促进作用,对水资源的长期规划和科学管理具有重要实践价值和理论意义。

## 1.5 技术路线

本文的整体技术路线如图 1-1 所示,研究遵循“从基础数据梳理到科学评估、从模型构建到情景仿真、从结果分析到决策支撑”的递进逻辑,主要包含四个关键环节:前期基础准备,完成研究区概况梳理、水资源问题识别与研究方法体系搭建;水资源承载力科学评估,明确区域承载力水平与关键障碍因子;系统动力学模型构建与验证,实现模型的准确性检验与多情景方案设计;多情景仿真结果分析与讨论。在此基础上,提出两地水资源管理政策建议,整体技术路线如下: