

学号： 2019015244



西北农林科技大学
NORTHWEST A&F UNIVERSITY

2023 届本科生毕业论文
石羊河流域水资源承载力及驱动
因素研究

学 院： 水利与建筑工程学院

专 业： 水文与水资源工程

年 级 班 级： 2019 级卓越班

学 生 姓 名： 贾玉博

指 导 教 师： 栗晓玲

协助指导教师：

完 成 日 期： 2023 年 3 月

本科生毕业论文的独创性声明

本人声明：所呈交的毕业论文是我个人在导师指导下独立进行的研究工作及取得的研究结果。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结果，也不包含其他人和自己本人已获得西北农林科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文的致谢中作了明确的说明并表示了谢意。如违反此声明，一切后果与法律责任均由本人承担。

本科生签名: 时间: 年 月 日

关于本科生毕业论文知识产权的说明

本毕业论文的知识产权归属西北农林科技大学。本人同意西北农林科技大学保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本人保证，在毕业离开西北农林科技大学后，发表或者使用本毕业论文及其相关的工作成果时，将以西北农林科技大学为第一署名单位，否则，愿意按《中华人民共和国著作权法》等有关规定接受处理并承担法律责任。

任何收存和保管本论文各种版本的其他单位和个人(包括作者本人)未经本论文作者的导师同意,不得有对本论文进行复制、修改、发行、出租、改编等侵犯著作权的行为,否则,按违背《中华人民共和国著作权法》等有关规定处理并追究法律责任。

本科生签名: 时间: 年 月 日

指导教师签名: 时间: 年 月 日

石羊河流域水资源承载力及驱动因素研究

摘 要：石羊河流域是中国西北干旱地区重要的河流之一，其水资源承载力对该区域的可持续发展至关重要。尽管近年来该地区的水资源状况受到越来越多的学者关注，但现有的水资源承载力研究方法相对陈旧，且由于水资源承载系统的复杂性，各要素间的关系及驱动机制尚未明晰。因此，采用先进的全新方法，从系统的角度研究该区域水资源承载力演变特征及障碍因素是必要的，对于提高流域水资源的开发利用、促进流域水生态安全及可持续发展具有重要的学术价值和实践意义。

本文采用子水循环和水代谢理论，构建了一个新的系统耦合理论框架模型，该模型包含“输入-消耗-活力-调节-输出”五个系统。熵权法和网络层次分析法（ANP）被用于确定指标的综合权重，对 2011-2020 年间石羊河流域的水资源承载力进行了全面综合评价。此外，该研究首次使用网络相关分析方法，探讨了水资源承载系统各指标因素之间的交互耦合机制，为深入理解耦合机制提供了新方法。最后，可解释的机器学习模型被应用于定量诊断影响石羊河流域水资源承载力提升的主要障碍因素，并分析了水资源承载力的驱动机制。本文的主要研究内容及研究结果如下：

（1）基于时间序列的石羊河流域水资源承载力评价

基于水循环和水代谢理论的研究框架，可提供更全面和深刻的水资源承载力评价指标。该指标体系基于输入、消耗、活力、调节和输出这五个子系统评价，并考虑每个子系统对水资源承载力的影响程度。人均水资源量、水域面积率、工业增加值用水量、水资源利用率、入河污水量占比权重较大。消耗子系统的权重高，调节子系统的权重低，但其维持水资源循环平衡的重要作用不应被忽视。时间序列分析显示，石羊河流域水资源承载力评分逐年提高，说明该区域采取子有效措施以提升水资源承载力。

（2）水资源承载系统各要素耦合机制分析

采用网络相关分析的方法可视化水资源承载系统的复杂性。不同指标的相互作用呈现动态变化的趋势，越来越耦合。网络中心度整体上增加，表明网络中的重要节点数量增加。正相关链路数变化不大，负相关链路数增加，表明不同指标的相互作用更加复杂微妙。需要权衡网络和协同网络的关联强度、均匀度和模块化等特征。不同水资源承载力水平下，这些特征的表现也会不同。不同系统间的指标产生交互作用，形成相关关联

的模块。因此，水资源管理问题已超越单一系统的范畴，需深入研究相互作用的本质和影响，以更好地管理和保护水资源。

(3) 水资源承载力驱动因素分析

~~本研究~~利用 XGBoost 模型识别石羊河流域水资源承载力驱动因素。关键因素包括人均 GDP、生活用水量、城市中水重复利用率、产水模数、地下水工程供水、降水量。采用 ALE 和 LIME 方法对模型结果进行解释，揭示地下水工程供水对水资源承载力有负面影响，而提高城市中水重复利用率有助于缓解水资源压力。本研究提高了水资源承载力预测的准确性和可解释性，强调了地下水管理的重要性和提高城市水资源重复利用率的必要性。

关键词：石羊河流域; 水资源承载力; 耦合机制; 网络相关分析法; 可解释的机器学习; 驱动因素

Study on water resources carrying capacity and driving mechanisms in the Shi Yang River basin

Abstract: The Shiyang River Basin is one of the important rivers in the arid northwest region of China, and its water carrying capacity is crucial for the sustainable development of this area. Although the water resources situation in this region has attracted increasing attention from scholars in recent years, the existing research methods for water carrying capacity are relatively outdated, and the relationships and driving mechanisms between various elements of the water carrying system have not yet been clarified due to the complexity of the system. Therefore, it is necessary to adopt advanced and innovative methods to study the evolution characteristics and obstacles of the water carrying capacity in this region from a systematic perspective. This has important academic value and practical significance for improving the development and utilization of water resources in the basin, promoting water ecological security and sustainable development.

In this study, a new systemic coupling theoretical framework model was constructed using water cycle and water metabolism theories, which includes five systems of "input-consumption-vitality-regulation-output". The entropy weight method and Analytic Network Process (ANP) were used to determine the comprehensive weight of indicators, and a comprehensive evaluation of the water carrying capacity in the Shiyang River Basin during 2011-2020 was conducted. Moreover, the study employed network correlation analysis methods for the first time to explore the interactive coupling mechanism between various indicator factors in the water carrying system, providing a new approach for a deeper understanding of the coupling mechanism. Finally, interpretable machine learning models were applied to quantitatively diagnose the main obstacles to improving the water carrying capacity in the Shiyang River Basin, and the driving mechanism of water carrying capacity was analyzed. The main research content and results of this paper are as follows:

(1) Evaluation of water carrying capacity in the Shiyang River Basin based on time series

Based on the water cycle and water metabolism theories, a research framework is provided to offer more comprehensive and profound evaluation indicators for water carrying capacity. This indicator system evaluates the five sub-systems of input, consumption, vitality, regulation, and output, and considers the impact degree of each sub-system on water carrying capacity.

Indicators such as per capita water resources, water area ratio, industrial water consumption, water resources utilization rate, and proportion of wastewater discharged into the river carry relatively higher weight. The consumption sub-system has a higher weight while the regulation sub-system has a lower weight, but its important role in maintaining water resource circulation balance should not be neglected. Time series analysis shows that the water carrying capacity score in the Shiyang River Basin has been improving year by year, indicating that effective measures have been taken to enhance water carrying capacity in the region.

(2) Analysis of coupling mechanisms among elements in water carrying capacity system

The use of network correlation analysis can visualize the complexity of the water carrying capacity system. The interactions among different indicators show a dynamic trend of increasing coupling. The overall centrality of the network increases, indicating an increase in the number of important nodes in the network. The number of positive correlation links shows little change, while the number of negative correlation links increases, indicating a more complex and subtle interaction among different indicators. It is necessary to balance the characteristics of network association strength, uniformity, and modularity. These characteristics show different performance under different water carrying capacity levels. Indicators from different systems interact with each other to form related modules. Therefore, water resource management issues have surpassed the scope of a single system and require in-depth study of the nature and impact of interactions to better manage and protect water resources.

(3) Analysis of driving factors of water resources carrying capacity

This study utilized XGBoost model to identify the driving factors of water resource carrying capacity in the Shiyang River Basin. The key factors included per capita GDP, domestic water consumption, urban water reuse rate, water production modulus, groundwater engineering water supply, and precipitation. ALE and LIME methods were used to explain the model results, revealing that groundwater engineering water supply had a negative impact on water carrying capacity, while improving urban water reuse rate could help alleviate water stress. This study improves the accuracy and interpretability of water carrying capacity prediction, emphasizing the importance of groundwater management and the necessity of increasing urban water reuse rate.

Keywords: Shi Yang River basin; water resources carrying capacity; coupling mechanism; network correlation analysis method; interpretable machine learning; driving factors.

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 水资源承载力概念	3
1.2.2 水资源承载力指标体系及评价方法	4
1.2.3 系统耦合协调水平	5
1.2.4 水资源承载力驱动因素	5
1.3 研究思路和内容	6
第 2 章 研究区概况与数据来源	7
2.1 研究区概况	7
2.1.1 水资源状况	7
2.1.2 社会经济状况	7
2.1.3 生态环境状况	9
2.2 数据来源	10
2.3 本章小节	11
第 3 章 水资源承载力评价与分析	12
3.1 概述	12
3.2 水资源承载力评价指标体系的构建	12
3.2.1 评价指标构建的原则	12
3.2.2 评价指标体系的构建	13
3.2.3 评价体系解释及意义	14
3.3 指标权重的确定	16
3.3.1 网络层次分析法	16
3.3.2 熵权法	17
3.3.3 基于最小二乘法的组合权重	18
3.4 指标赋权计算	19
3.4.1 网络层次分析法计算指标权重	19
3.4.2 熵权法计算指标权重	20
3.4.3 指标综合权重	20

3.5 评价指标分级标准	21
3.6 水资源承载力评价	22
3.6.1 可变模糊集综合评价模型	22
3.6.2 基于可变模糊集的水资源承载力评价	24
3.6.3 水资源承载力时序演化分析	29
3.7 本章小结	30
第 4 章 石羊河流域水资源承载系统耦合协调水平分析	31
4.1 指标要素间关系的可视化	31
4.2 水资源承载力对网络指标的影响	32
4.3 本章小结	35
第 5 章 石羊河流域水资源承载力驱动因素	37
5.1 主要驱动因素的识别	37
5.1.1 XGBoost 模型参数的确定	37
5.1.2 特征重要性	39
5.2 水资源承载力与影响因素关系探析	39
5.2.1 ALE 的原理	39
5.2.2 结果分析	40
5.2.3 LIME 的原理	41
5.2.4 结果分析	42
5.3 提高水资源承载力的策略	42
5.4 本章小结	44
第 6 章 结论与展望	45
6.1 主要研究结论	45
6.2 展望	46
参考文献	47
致 谢	54

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

众所周知,水资源不仅是人类生存的基本资源,也是经济社会发展的关键资源。(Ren et al. 2016a; Walter et al. 2012)。全球和区域的气候变化增加了水资源的不确定。石羊河流域地处中纬度地带的欧亚大陆腹地,是西北内陆干旱区与东部季风的交汇过渡地带,对气候变化非常敏感,降水少而不规则,蒸发量大,干旱期长(Zhu et al. 2022)。加之,近年来,流域的农田面积急剧扩张,农业用水量超过可利用水量的 80 %。农业活动对地下水和地表水产生巨大影响,导致流域水资源利用率高,用水矛盾的问题突出(Zhang et al. 2023)。因此,石羊河流域一直以来是政府管理者的难点,也是众多学者们的研究热点,如何解决人水关系中面临的突出问题,更好的联结水资源系统—社会经济系统-生态环境系统,实现流域的可持续发展,是当前时期亟待解决的学术问题和现实问题。

气候及人类活动因素的变化改变了水循环的形成过程以及水资源与其他系统之间的相互作用,进而影响了区域的水资源承载力。气候变化影响水循环过程的方式是多种多样的,具有复杂、动态和非线性的特点(Liu et al. 2014; Zhang et al. 2014)。气候变化导致的温度升高、降雨模式变化、冰川消融和海平面上升等因素对水循环过程产生了重大的影响。Li et al. (2021b)指出全球变暖可能导致地球上的大气中水蒸气量增加,从而增加了降水的强度和频率。此外,降雨模式也可能会发生变化,例如,中高纬度地区可能经历更长时间的干旱和更强烈的降雨事件(Ren et al. 2021)。人类活动对流域水循环的影响也日益显著,造成了一系列问题,如可用水资源减少、水环境恶化、生态系统退化,特别是在人口密集地区。其中许多问题是不可逆转的,危及人类社会的长远发展(宋晓猛等 2013)。著名水文学家陈希孺教授在 20 世纪 80 年代提出二元水循环理论,即社会水循环和自然水循环。二元水循环理论反映了取水、用水、废水回用、废水排放等人类用水过程对自然水循环系统的影响。它可以描述用水(Zhang et al. 2017)下水质和水量的变化,将人类水循环与自然水循环的相互作用系统进行系统的联系。然而,二元水循环的过程的变化会导致水文特征的复杂性和水资源承载力的不确定性显著增加(Peng et al. 2023)。水循环理论是水资源承载力的理论基础,因此,一些学者基于水循环理论的视角深化了水资源承载力的内涵(Li et al. 2022; Liu et al. 2022; Zhang et al. 2019)。此外,一个区域可以被认为是一个复杂的、开放的、有机的耗散系统。这类似于生物的新陈代谢-生物体与环境之间的物质和能量交换过程,以及生物体内部的物质和能量转化过程(Ren et al. 2016b: 142-143)。在水循环理论的基础上,除少数研究者运用水代谢理论进行水资源承载力分析

外(Ren et al. 2016b; Wu et al. 2020: 139-146), 多数研究者则运用水代谢理论建立了城市水资源管理的评价体系, 分析了城市水循环演变规律(Emanjomehzadeh et al. 2023; Lv et al. 2022; Renouf et al. 2017)。结合前人的研究, 本文综合水代谢理论和水循环理论, 深化了水资源承载力~~承载力~~的内涵, 丰富了水资源承载力的理论。水作为一种自然资源, 进入某一区域内部, 并受到社会生产、生态环境等用水的消耗影响。而区域的人口密度、经济水平等活力因子会影响水资源的消耗水平。区域内的植被覆盖度、湿地面积起到调节径流的作用。水在各个用水部门~~这~~间的流动以及人类生产生活产生的污水, 经过污水处理~~的措施~~又被人类所用都可看作水的社会循环, 同时, 在该区域外部的蒸发、降雨等过程则构成了水的自然循环。准确理解这一系列的过程, 有助于更加清晰地认识水资源承载力的本质。水循环及代谢过程与水资源承载力间的关系如图 1-1 所示。

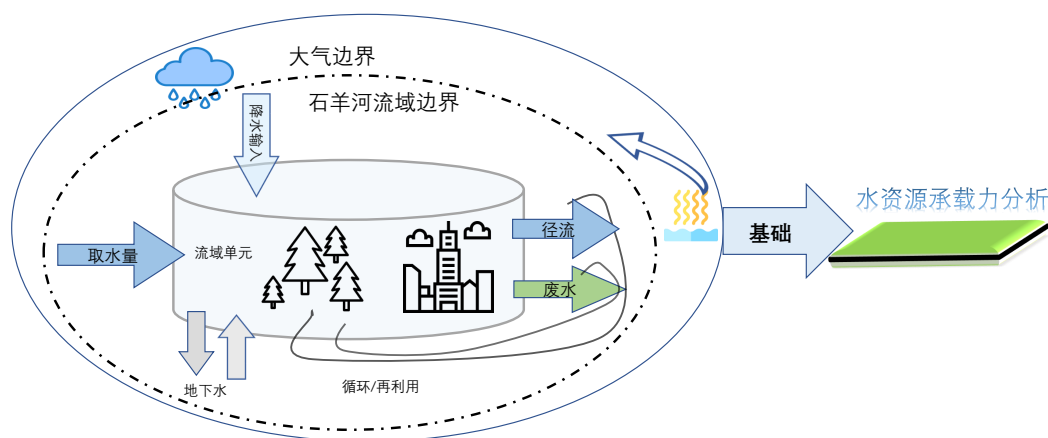


图 1-1 水资源承载力的内涵

水资源承载系统是一个多目标决策系统, 由水资源、社会、经济、生态环境子系统耦合组成(田俊峰等 2019), 因而在水资源承载力研究中, 从可持续发展的角度, 有必要研究各要素间的相互作用关系。已有研究多由耦合协调度模型定量描述区域范围内各要素或系统间的协调状况(盖美等 2018; 展亚荣和盖美 2018)。然而, 水资源~~资源~~承载系统是自然地理环境与人类社会经济所构成~~相互作用、~~~~相互作用~~相互影响的复杂巨系统, 该方法无法充分利用数据信息来表征各要素间的互馈关系, 难以从机理层面认识系统的可持续发展水平。石羊河流域是人-水相互作用的典型案例, 一方面流域环境~~尤其~~受农业活动强烈影响, 另一方面水资源匮乏成为流域社会经济发展的重要约束条件。因此, 如何探

索一种合适的研究手段，科学系统的探究水资源承载系统各成分之间的关联作用，对理解复杂巨系统以及流域的可持续发展具有重要意义。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

水资源承载力作为可持续发展和水资源安全战略研究的基础性课题，已成为当前水资源科学的研究热点(Chen et al. 2023)。本文在已有研究的基础上，创新构建水资源承载力评价指标框架，定性分析流域水资源承载力，运用网络相关分析的新方法尝试探索各要素间的关联机制，运用机器学习的可解释模型深入挖掘水资源承载力的驱动因子。本次研究内容及结果可以提高对水资源承载力内涵的认识，可以揭示水资源承载系统中各要素间的关系，此外网络相关的分析方法首次应用在水资源承载力研究中的要素间耦合水平的研究，为评估系统间的耦合协调发展提供了新的视角。

(2) 实践意义

对石羊河流域水资源承载力水平及系统内部作用机理深入的研究，有着实践上极强的意义。本文对于合理的水资源开发与利用规划方案具有决策依据的作用，同时有助于提高石羊河的经济、社会与生态综合效益，促进流域水资源的承载能力，以及推动社会经济协调、健康、可持续发展。因此，本文具有重要的实践意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水资源承载力概念

在水资源承载力(WRCC)的研究中，其概念不断发展。承载力概念的演化与发展是对发展中出现问题的反应与变化结果。资源承载力的概念最早可以追溯到马尔萨斯的人类人口增长理论(Malthus 1826)。后来，联合国教科文组织(Unesco 1985)正式提出了这一概念。随着水资源的日益短缺，WRCC已成为当前水资源科学的研究热点(Cordier et al. 2020)。相关研究发展至今，水资源承载力还是一个外延模糊、内涵混沌的概念，没有统一的定义。早期的研究集中于“增长极限”的思想，即在特定的环境范围和条件下，能够持续生存的物种的最大数量(Feng et al. 2008)。最近的研究通常将WRCC的概念与可持续发展理论相结合(Oo et al. 2019)。水资源承载力是指在一定的经济、社会和技术发展水平下，使区域水资源系统能够支撑社会经济可持续发展的合理规模(Fu et al. 2020)。金菊良等(2019)认为水资源承载力指某一区域在一定条件下，以维护生态良性循环和可持续发展为前提，当地水资源系统可支撑的人口数量，水资源开发利用的最大规模。尽管学者们对WRCC的定义不尽相同，但现有研究一致认为WRCC能够反映经济发展与水资源

源系统之间的关系(Liao et al. 2020; Wang et al. 2018)。

1.2.2 水资源承载力指标体系及评价方法

过去几十年来,学者们对国家(Liao et al. 2020)、流域(Li, Yang, et al. 2016; Zhou et al. 2019)和城市(Zhou, Lei, et al. 2017)等不同尺度下的水资源承载力进行了评估。在这些研究中,首先构建指标体系,然后利用各种评价方法计算 WRCC 指数。指标体系的构建通常基于压力-状态-响应(PSR),驱动-压力-状态-影响-响应(DPSIR),驱动力-压力-工程性缺水-状态-生态基础-响应(DPESBR)等理论框架。PSR 指标体系能够反映人与环境的相互作用(Fu et al. 2020)。DPSIR 和 DPESBR 指标体系是 PSR 指标体系的延续和改进(Kaur et al. 2020; Peng and Deng 2020),并且提高了指标体系的全面性。然而,这些理论框架侧重于“增长极限”的研究,缺乏“可持续发展”的环保理念。Wang and Liu (2019)首次提出压力-支持、破坏-恢复、退化-促进的理论框架,考虑了“增长极限”问题和人地关系的稳定性,运用该方法对北京市资源环境承载力进行评价。尽管现有的指标体系日益全面,然而其涵盖的角度仍存在不足,难以全面考量各种视角下的指标体系。因此,本文从水资源的内涵出发,将流域比作一个巨大的有机体,水资源作为“有机体”的输入,建立了输入-活力-调节-消耗-输出的指标体系,更加全面系统的反映石羊河流域的水资源承载力状况。

为了深入研究区域水资源承载力,需要综合分析多种因素对其的影响,并根据实际情况选择合适的方法进行研究。上世纪九十年代,国外学者Avogadro et al. (1997)建立了一种两阶段组成的决策程序,Davies and Simonovic (2011)建立了基于系统动态的综合评价模型对水资源承载力进行评价。Rushforth and Ruddell (2016)采用了生态足迹法评价了城市水资源短缺的脆弱性。我国早在 1987 年就开始了对于水资源承载力评价方法的研究。齐文虎(1987)运用系统动力学模型,对人口、资源、环境等方面的发展进行了深入的探讨。此外,层次分析法(AHP)、熵权法(EW)、优劣解距离法(TOPSIS)、突变级数法等被广泛应用于水资源承载力评价的研究中。每种方法都有不同的特征。总体而言,层次分析法计算的指标权重具有主观性,但缺乏对各因素之间相互作用的系统分析(Sindhu et al. 2017)。熵权法和 TOPSIS 法能够根据指标的原始数据客观地确定指标权重(李少朋等 2021)。突变级数法的计算无需纳入指标权重,保证了评价结果的科学性和合理性。然而,这种高度概括的结果并不适合具体深入的评价(Jia et al. 2018)。SD 模型侧重于解释水资源系统的反馈机制和演化过程但过程较为复杂(张相忠等 2008)。本文针对水资源承载力的不确定性的特征,采用可变模糊综合评价的方法将模糊和不确定的信息量化,并进行分析。同时,运用层次网络分析法(ANP)-熵权法组合赋权,以消除单一方法的不足。

1.2.3 系统耦合协调水平

近年来,越来越多的研究人员正在识别复合系统中的耦合程度和协调程度。一些研究通过构建综合指标框架来评估不同系统之间的双向耦合关系(Hui et al. 2015; Shen et al. 2018)。Su et al. (2016)应用耦合度评价不同产业之间的耦合机制。Zhou et al. (2020)运用耦合度指数评价碳排放与产业结构升级的耦合路径。为了进一步评价系统间的协调发展水平,提出了耦合协调度(CCD)的概念。Cui et al. (2019), Li, Han, et al. (2016)建立了基于 CCD 模型的综合指标体系,研究了中国的社会经济、水资源与水环境的耦合协调状况。Fan et al. (2019)构建了综合指标体系,测算了中国 31 个省的社会经济和生态环境的耦合协调发展水平。Liu et al. (2020)对 CCD 模型进行了改进,并对南四湖流域的社会经济和水环境质量进行了计算。可见,现有研究多是运用 CCD 模型模型计算系统的耦合协调度。系统的耦合和协调是指在一个系统中各个组成部分之间的关联程度和相互配合的程度。结合耦合协调度的概念,本文采用一种新的网络相关分析的方法运用系统思维探究水资源承载系统的耦合机制。尽管网络相关分析已广泛应用于复杂系统中,例如:健康(Barabási et al. 2011)、生态系统(Saavedra et al. 2011)、社交网络(Bodin et al. 2019; Bond 2017),然而在水资源承载系统中,探究各要素间关系的研究尚未被学者采用网络分析方法进行探究。该方法提供了变量之间交互作用的清晰可视化和概念化,并提供了描述这些交互作用的完善概念(Swain and Ranganathan 2021),这将有助于对水资源承载系统中要素间的耦合机制的认知。

1.2.4 水资源承载力驱动因素

水资源承载力影响因素是多方面的,涉及到人类社会生活的方方面面,最主要有农业生产用水,居民生活用水,工业生产用水,生态用水,城市市政用水等。早期在上世纪七十年代就有学者开始研究这方面的问题。在早期研究中, Billini (1974)就提出了人口增长、人口密度、经济发展、农业发展、空间分布对水资源承载力的影响,比较系统的进行了影响因素的研究。中国学者黄允彬在上世纪 80 年代开始也逐步关注水资源承载力因素研究,早期研究中开始关注水资源、自然资源、气候、人口增长、粮食供应之前的平衡关系,从协调平衡发展角度开始关注水资源承载力的问题。孟凡德和王晓燕(2004)运用主成分分析方法分析了社会经济因素对北京市水资源承载力的影响。在水资源可持续发展理论的指导下,利用 STIRPAT 模型对不同区域的生态环境影响因素进行了研究。在水资源可持续发展理论的指导下, Sun and Xu (2016)利用 STIRPAT 模型对不同区域的生态环境影响因素进行了研究。然而,由于水资源和社会经济发展的空间分布不平衡(Wang et al. 2013),它们的空间关系和异质性很少被阐明。传统的普通最小二乘法(OLS)模型没有考虑空间效应对 WRECC 的影响,回归系数不能准确反映 WRECC 水平的变化趋

势。2010 年，通过将空间距离扩展到时空尺度，Huang et al. (2010)提出了时空地理加权回归（GTWR）模型，该模型已成功应用于不同领域，很好地解释了复杂系统的时空异质性。然而，各因素是如何影响结果的？各因素是如何导致水资源承载力变化的呢？回答这些问题有助于更深层次的理解水资源承载力的驱动机制。

1.3 研究思路和内容

本论文从“承载力评价-耦合机制-驱动机制”三个方面，分析石羊河流域的水资源承载力及可持续发展水平。通过构建全面的指标体系评价流域的水资源承载力，创新使用网络相关分析方法明晰水资源承载系统各要素的相互作用关系，同时运用机器学习的可解释模型以及向量自回归（VAR）模型探究影响流域承载力的因素。本文包括以下研究内容：

- (1) 石羊河流域指标权重计算及水资源承载力分析评价
- (2) 石羊河流域水资源承载系统中各要素的耦合机制
- (3) 水资源承载力的驱动因素
- (4) 主要影响因素对水资源承载力的控制

本文研究思路框架如图 1-2 所示。

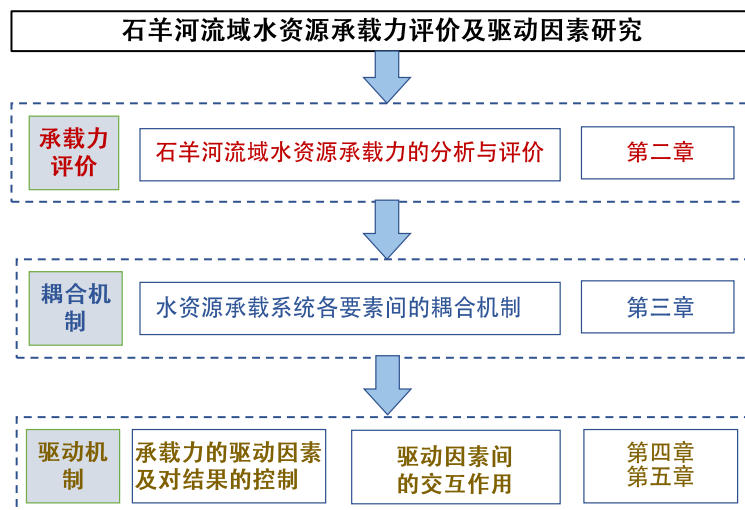


图 1-2 论文研究思路

第2章 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

石羊河流域位于古丝绸之路—甘肃省河西走廊以东，乌鞘岭以西，祁连山以北，北纬 $36^{\circ}29' \sim 39^{\circ}27'$ ，东经 $101^{\circ}41' \sim 104^{\circ}16'$ 。自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河等八条河流和众多小沟小河组成。河流补给来源主要为山区大气降水和山区冰雪融水，整个流域面积约为 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内约四分之一的流域面积为山地。同时，由于新生代以来的构造运动和气候变化，其余部分为平原、冲积扇和沙漠，导致地貌具有明显的分带性(Sun et al. 2019)，流域上游为祁连山脉，中游为走廊平原，下游为民勤绿洲。流域全长 300 公里，是河西走廊最长的内陆河流域之一(Li et al. 2015)。从行政区划上来看，石羊河流域主要有 4 市 9 县，即金昌市、武威市的凉州区、张掖市和白银市的部分区域。流域属于大陆性干旱气候，具有降水稀少、蒸发强烈、空气干燥和温差大等特点。该地区第一产业所承担的人口比重较高，绿洲区则承载了较高的人口密度，同时该区也是甘肃工农业发达、人口集中、供水用水矛盾突出，生态恶化程度最严重的区域之一，是西北干旱区人水关系不协调的典型代表区域(戴文渊等 2022; 康绍忠 2009)。研究区位图如图 2-1 所示。

2.1.1 水资源状况

石羊河流域位于欧亚大陆腹地深处。流域大部分地区属于大陆性温带干旱气候，降雨稀少，日照充足，蒸发强烈。流域降水量为 $54 \sim 608 \text{ mm/yr}$ ，年蒸发量高达 $2000 \sim 3000 \text{ mm/yr}$ (Li et al. 2021a)。流域内自东向西由 8 条河流组成，多年平均流量为 $1.57 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$ ，水库蓄水量约 6.4 亿 m^3 ，约占流域水资源总量的 40.7 %。约 71 % 的地表水在枯水期储存在水库中，32 % 储存在丰水期。流域内主要的农业水利工程有水源区的西营水库、中游绿洲区的红崖山水库、荒漠边缘区的青土湖水库等。流域内农业活动强度从上游到下游逐渐增强。1960–2020 这 60 年间，径流量呈相对下降趋势，平均减少率为 $0.11 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ 。气候显著变暖前后径流量平均值分别从 $44.3 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ 下降到 $42.1 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ (Jun et al. 2022)。地下水总体由南部山前向北、西部向东流动，到达石羊河主河道后转向东北，经洪雅-阿拉古山断裂进入民勤盆地。平原区地下水位自 1985 年以来呈快速下降趋势。如民勤绿洲地下水位埋深下降速率为 $4.1 \text{ m}/10\text{a}$ ，增加了地下水矿化度。受人工绿洲扩张、人口数量增加等因素的影响，该地区用水量急剧增加，导致(速率为 $2.4 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$)下游民勤绿洲地表径流量显著减少。流域人均水资源量如图 2-2 所示。

2.1.2 社会经济状况

流域主要分为武威市和金昌市，武威市以农业发展为主，金昌市是中国著名的有色金属生产基地。该地区交通便利，资源丰富，有色金属和农业加工业发展迅速，是黑河

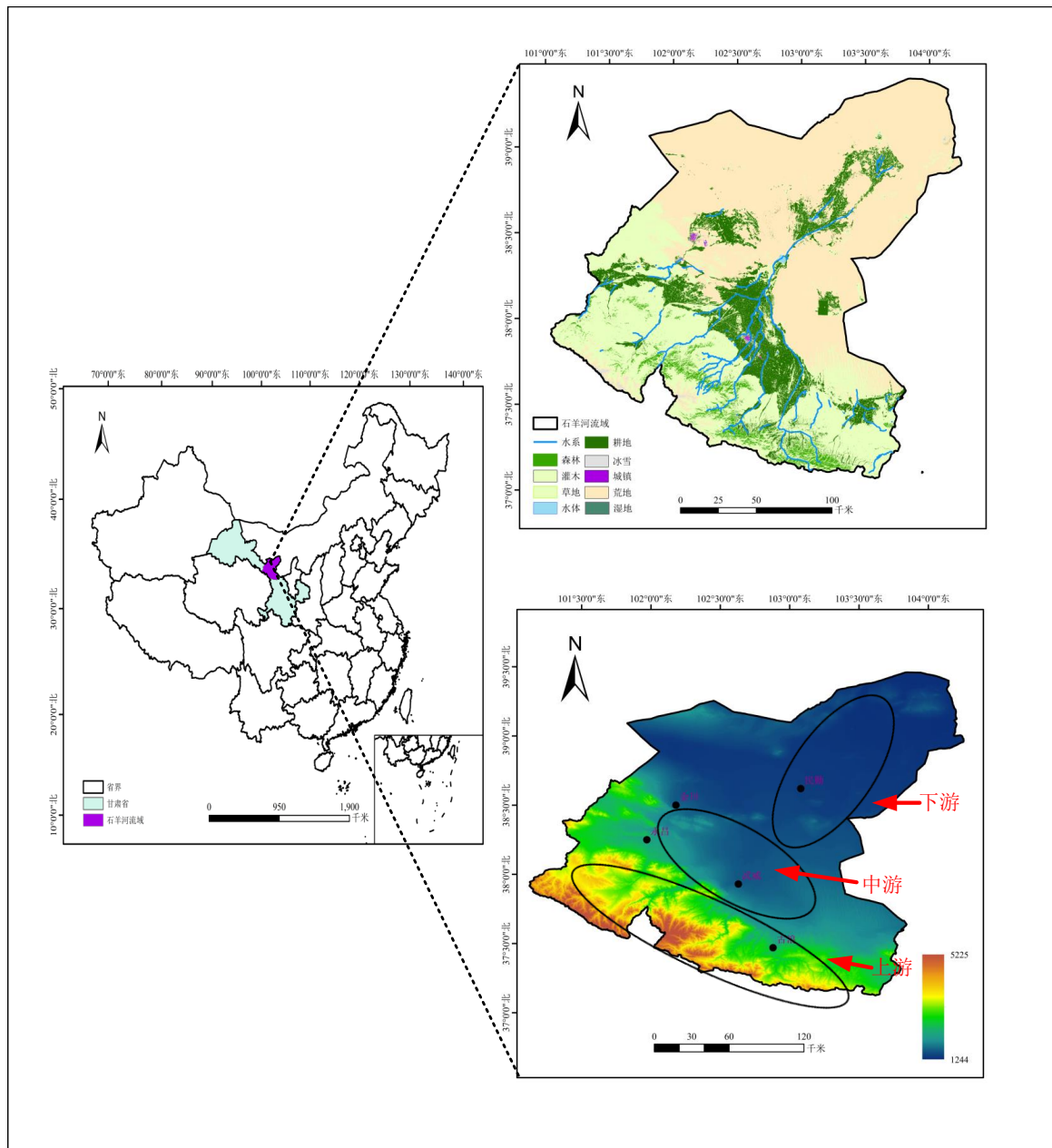


图 2-1 石羊河流域区位图

流域经济较为繁荣的地区之一。流域拥有耕地 6.25×10^6 亩，人口约为 227×10^4 人，人口密度为 $55 \text{ 人}/\text{km}^2$ ，约为黑河流域平均人口密度的 3.4 倍。流域包括武威市、金昌市、张掖市和白银市，其中武威市是石羊河流域经济、政治和社会发展的重点区域。其人口占总人口的 78.4%，灌溉面积占 70%，GDP 占 61%，粮食总产量占 80%，是河西地区人口最多，水资源利用程度最高，供需矛盾最突出的地区。流域内的城镇人口主要分布于凉州区、金川区、河西堡镇及各县城关镇等核心区域。其中，绿洲承载人口密度超 $300 \text{ 人}/\text{km}^2$ ，远高于其它内陆干旱地区。其中，从事种植业生产的人口约占总人口的 77%，

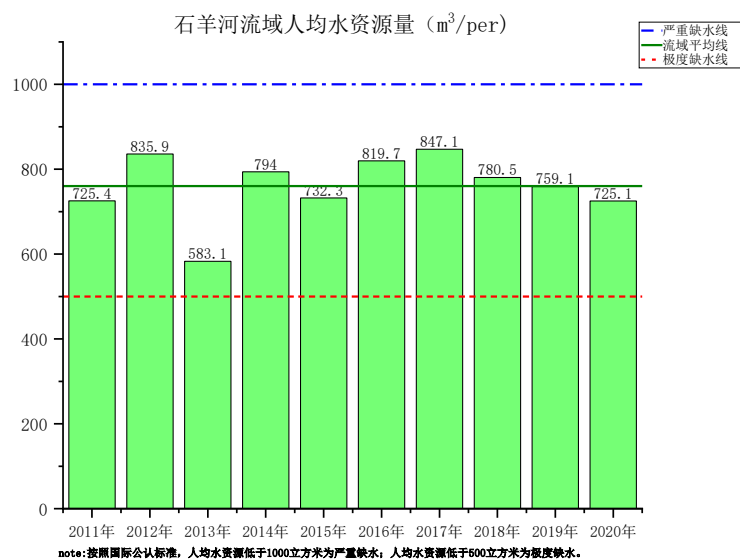


图 2-2 2011-2020 年石羊河流域人均水资源量

第一产业负担的人口所占比重较大。流域人均 GDP 如图 2-3 所示。

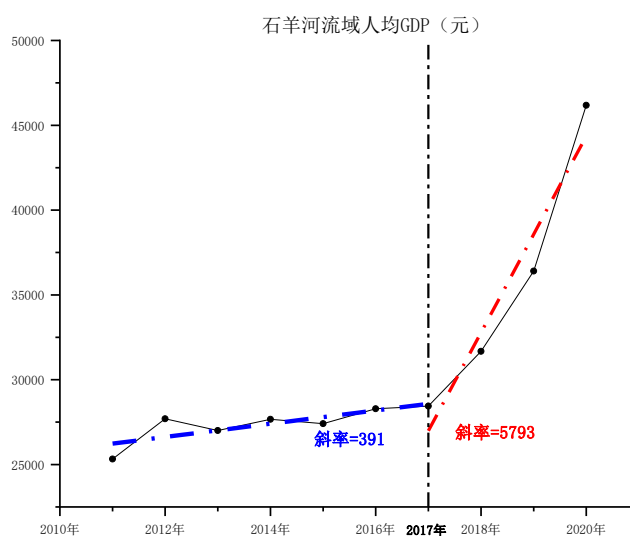
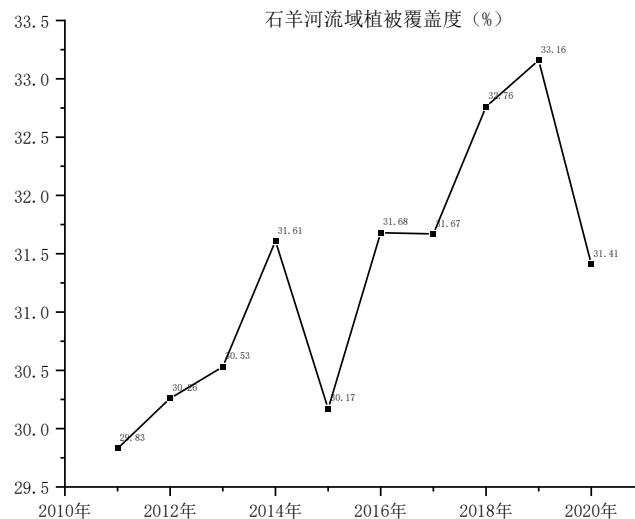


图 2-3 2011-2020 年石羊河流域人均 GDP

2.1.3 生态环境状况

20 世纪末以来, 石羊河流域生态环境问题日益凸显。首先, 流域内不断扩大的人口导致对水土资源的需求增加, 随之而来的是人工绿洲面积的不断扩大, 导致流域内水资

源的过度开发利用。第二，用水效率低，水污染严重。因此，由于浪费和低效的用水，优质水资源短缺，生态农业滞后。第三，长期的资源过度利用导致流域生态退化严重，自然灾害频发(Shang et al. 2022)。逐渐成为我国荒漠化最严重的地区之一。2000–2010 年民勤县耕地、旱沟、流动沙地(Li et al. 2004)、风蚀地、残丘的比例持续上升，而草地、林地等土地的比例随着水土保持而下降。由于人类活动的影响，城镇用地和居民用地扩张了 176.7km^2 ，比 1986 年增加了 48.57%，而林地和草地分别减少了 7.24 和 1.39%(Wei et al. 2017)。2008 - 2018 年，天然绿洲和农田面积分别以 $2.57\text{km}^2/\text{yr}$ 和 $8.99\text{km}^2/\text{yr}$ 的速率减少。石羊河流域以沙化土地、裸岩、裸土为主，植被覆盖度低，有植被覆盖的区域主要在民勤腹地，该区域也是土壤水分较高的区域。属于短覆盖和冠层覆盖区的土地利用类型主要为耕地、草地、林地。这些区域虽然是民勤植被覆盖的主要区域，但最大植被覆盖度不足 70%，且大部分低于 50%。总体来看，植被覆盖度为 0 - 20% 的区域所占比例最为显著(Yang et al. 2023)。近年来，流域植被覆盖率演化过程如图 2-4 所示。



1

图 2-4 2011-2020 年石羊河流域植被覆盖率变化曲线

2.2 数据来源

本研究各指标数据主要来源于甘肃省 2011-2020 年的水资源公报和水利发展统计公报 (<http://slt.gansu.gov.cn/slt/c106726/c106732/c106773/zcfg.shtml>)。而其中“水域面积率”该指标的数据来源于武汉大学遥感团队发布的土地利用数据集(Yang and Huang 2021)，后经 ArcGis 栅格计算器计算得到。研究区 2011-2013 年和 2014-2020 年的植被覆盖度的数

据分别利用 Landsat7 和 Landsat8 影像，基于谷歌地球引擎（GEE）遥感云计算平台经过数据筛选、去云、掩膜处理等步骤，最终计算得到。遥感图像预处理过程如图 2-5 所示。

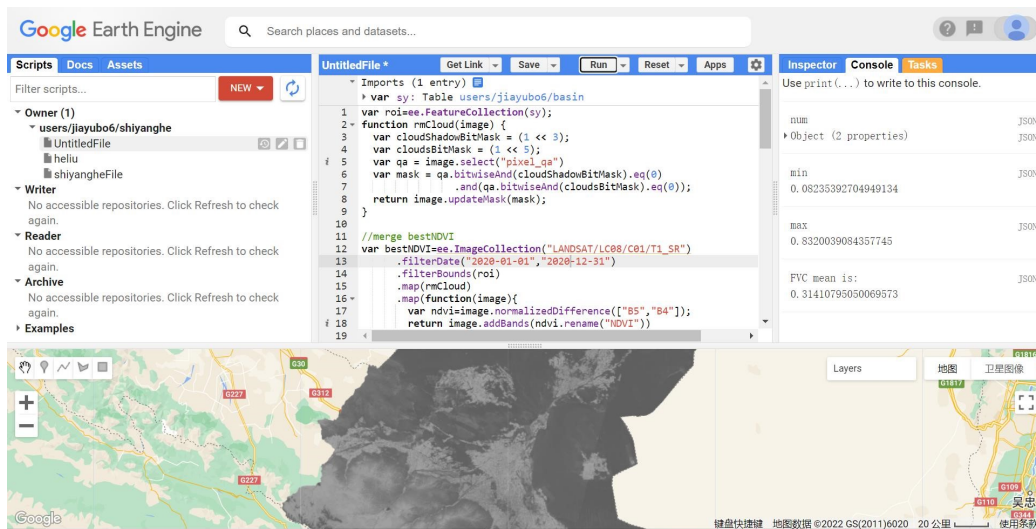


图 2-5 遥感图像预处理

2.3 本章小节

本章介绍了研究区的地形地貌、水资源状况、社会经济状况、生态环境状况，突出反映了流域人水关系紧张，有待进行水资源承载力评价。同时详细的介绍了数据的来源或获取方法，~~这~~为本论文水资源承载力评价分析提供基础资料。

第3章 水资源承载力评价与分析

3.1 概述

科学测评石羊河流域水资源承载力,既可以为流域水资源的合理调控、开发和保护提供必要的理论基础,同时也有助于促进流域水资源与经济社会、生态环境的协调发展,提高流域水资源承载力可持续水平。从第二章可以看出,石羊河流域水资源禀赋差,而经济社会活动需水量大,流域水资源可持续发展面临诸多挑战,有必要对流域水资源承载力进行评估。因此,本章建立输入-活力-调节-消耗-输出的指标体系,以流域2011-2020年的20个指标的数据为基础,分析流域水资源承载力的年际变化。

3.2 水资源承载力评价指标体系的构建

3.2.1 评价指标构建的原则

构建客观、完备、实用的评价指标体系是水资源承载力评价的基础,要从系统思维出发,一方面要全面反映流域水资源条件、社会经济发展水平等实际情况,涵盖水资源承载力内涵的多个方面,另一方面需要考虑数据的可获取性,同时规避含义相近的指标。评价指标体系的构建遵循的原则如下(党丽娟和徐勇 2015; 王建华等 2017; 王友贞等 2005):

(1) 科学性原则

评价指标体系的构建应基于科学理论和实证数据,科学的反映流域的真实情况,保证评价结果的真实性。

(2) 系统性原则

评价指标体系应考虑多种因素,包括水资源的数量、生态环境的质量等方面,以及水资源利用的各种形式,如农业、工业、生活用水等,实现对水资源承载力的全面评价。

(3) 可操作性原则

评价指标体系应具有可操作性,便于数据采集、计算和分析,以便于实际应用。选取指标时,应避免使用过于抽象或网络化的术语,而是应该选择常见且易于理解的指标,这些指标可以从政府公报、统计年鉴、遥感数据等来源中获取。如果有一些代表性强但难以获取的指标,则可以考虑使用合理的替代指标来确保区域综合评价的准确性。

(4) 动态性原则

区域水资源承载力评价主要是为了反映在一个区域在时间尺度上或者空间尺度上的变化情况。需要设计的指标可以通过多年连续监测统计获得,指标需考虑到数据的动态性。

(5) 可比性原则

评价指标体系应具有可比性，不同地区、不同时间的评价结果应具有可比性，以方便评价结果的比较和分析。

3.2.2 评价指标体系的构建

本文综合考虑指标的科学性、系统性、动态性、可比性等原则，并结合石羊河流域干旱半干旱的气候特点和水资源供需状况等问题，考虑水资源与各影响因素之间的关系，从水资源承载力的内涵出发，将流域比作大的有机体，构建输入-活力-调节-消耗-输出的新的评价模型，形象刻画水代谢过程及水循环过程。区域水资源代谢可以看作是一个将区域水资源投入到本区域社会经济系统中，产出产品、服务、污染物的有机过程。Lv et al. (2020)将区域水资源新陈代谢中的社会经济系统分为水资源的投入、水资源的消耗、资本的积累和废物排泄四大部分（即，输入层、社会经济系统消耗层、输出层）。然而，水资源对流域人口规模、经济规模的承载的具体形式可以形象的表述为水资源的代谢过程和循环过程，但是流域的人口数量、科学技术水平以及生态环境状况等多种因素会对水资源的消耗或输出起到促进或是抑制或是控制的作用，只是根据输入层、消耗层和输出层建立指标体系是不完善的，因此，本文在原有研究的基础上，加入活力层和调节层。本文依据这5个层次选取的20个指标，具体如表3-1所示：

表 3-1 石羊河流域水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	属性	单位
石羊河流域水资源承载力评价	输入	降水量	正向	mm
		产水模数	正向	万m ³ /km ²
		人均水资源量	正向	m ² /人
		城市水回用率	正向	%
	消耗	地下水工程供水量	正向	亿m ³
		水资源开发利用率	负向	%
		万元工业增加值用水量	负向	m ³ /万元
		农业灌溉亩均用水量	负向	亿m ³
	活力	人均每日生活用水量	负向	L
		生态环境用水率	负向	%
		人均 GDP	正向	万元
		人口密度	负向	人/km ²
	调节	城镇化率	正向	%
		第三产业比重	正向	%
		人口自然增长率	负向	‰
		水域面积率	正向	%
	输出	植被覆盖率	正向	%
		入河污水量	负向	万吨
		人均氨氮排放量	负向	吨/万人

接下页

表 3-1 石羊河流域水资源承载力评价指标体系 (续)

目标层	准则层	指标层	属性	单位
		单位面积粮食产量	正向	吨/亩

3.2.3 评价体系解释及意义

输入层中主要考虑水资源的输入,包括地表水资源、地下水资源、再生水。当地的水资源条件、水资源利用方式等会对输入层的水资源量产生巨大的影响。考虑以上因素,选取降水量、产水模数、人均水资源量、城市水回用率、地下水工程供水量作为输入层的指标。

- (1) 降水量:它是衡量一个地区水资源补给程度和降水丰裕度的重要指标。
- (2) 产水模数:它用来衡量流域单位面积上的水资源量。计算公式为流域水资源总量与流域总面积的比值。
- (3) 人均水资源量:它是衡量流域水资源的可持续性和可利用性的重要指标,可以反映水资源的稀缺性和利用情况。计算公式为水资源总量与人口数量的比值。
- (4) 城市水回用率:它是评价城市水资源利用效率、减少淡水使用量和缓解水资源短缺问题的一个重要指标。通过城市水回用,可以减少城市对淡水的需求,降低地下水开采压力,减少水资源浪费和环境污染,有利于节约水资源、保护生态环境,实现可持续发展。计算公式为再生水利用量与污水排放量的比值。
- (5) 地下水工程供水量:指通过开采地下水和进行相关处理后,向城市或农村供应的水量。开采利用地下水可以有效解决流域水资源短缺问题,而过度开采会造成地下水位下降、地表地下水相互联系失调以及地下水的水质受到污染等问题。

消耗层是维持流域社会经济正常运转的基础,是水资源代谢的一种表现形式。人们的生产生活依赖于水的消耗,水资源量以不同的消耗形式转换为各种产品。

- (6) 水资源开发利用率：反映流域水资源利用状况。计算公式为水资源开发利用总量与流域水资源总量的比值。
- (7) 万元工业增加值用水量：评价工业水资源利用效率的重要指标，若工业增加值用水量过高，会导致水资源短缺、水质恶化等问题，从而影响流域可持续发展。计算公式为工业用水总量与工业增加值总额的比值。
- (8) 农业灌溉亩均用水量：它是评估流域农业水资源利用效率和可持续性的重要指标。计算公式为农业灌溉用水总量与农业灌溉面积的比值。
- (9) 人均每日生活用水量：衡量居民用水的节约程度和资源利用效率。计算公式为生活用水总量 / 人口数 / 统计天数。
- (10) 生态环境用水率：反映流域生态系统维持正常运转所需要的水量。计算公式为生态环境水需求量与用水总量的比值。

活力是水资源代谢的能量，涉及到水资源的转换过程。在经济发展的推动下和人口的作用下，水资源被转换为其它形式的产品。活力反映了流域水资源代谢的强度，对水资源承载力起到促进或是阻碍作用。

- (11) 人均 GDP：它是衡量流域经济发展水平的重要指标之一。计算方式为流域当年生产总值/流域年末总人口数量。
- (12) 人口密度：反映了流域人口聚集情况。高的人口密度有利于资源的使用和创新发展但高人口密度也可能导致资源短缺、环境恶化和社会治理难度加大等问题。计算公式为人口数量与流域面积的比值。
- (13) 城镇化率：它是衡量城市化进程和人口分布结构变化的重要标志。计算公式为流域的城镇人口数量与总人口数量的比值。
- (14) 第三产业比重：衡量流域的经济结构和产业结构的现代化程度和转型进程。计算公式为第三产业的 GDP 除以总 GDP。
- (15) 人口自然增长率：衡量流域的人口增长速度。人口自然增长率的高低与人口结构、社会福利、医疗水平、文化传统等因素有关。较高的人口自然增长率可能会导致人口过度增长、资源短缺和环境污染等问题。计算公式为在一定时期内，出生人口数量减去死亡人口数量所得到的差额与总人口数量的比率。

调节层对流域水资源的量和质具有保障作用，可以维护水生态系统的平衡稳定。本文选取植被覆盖率和水域面积率两个指标反映流域的调节能力。

(16) 植被覆盖率: 植被覆盖率是描述流域内植被分布密度的指标, 是评价流域水资源调节能力的重要指标。植被能够稳固土壤, 减少土壤侵蚀和水土流失, 从而保护水资源。同时能够吸收水中的营养物质和有机物, 从而减少水中的污染物质。此外, 植被根系中的微生物也能够分解有机污染物, 从而净化水质。本文通过对遥感图像的分析计算获得流域历年的植被覆盖率。

(17) 水域面积率: 它反映了一个地区的水资源丰富程度, 也可以间接反映水环境的质量, 因为较高的水域面率意味着水环境更为稳定和健康。本文通过流域历年的土地利用影像计算水域面积率。

输出层表示流域系统可量化的生产价值和废弃物排放量。包含入河污水量, 人均氨氮排放量、单位面积粮食产量等。高的生产价值意味水资源整体利用效率较高, 有利于流域的可持续发展, 同时废物排放量越低对生态的压力越小。

(18) 入河污水量: 入河污水量主要为了表征流域域工业、农业、居民生活等人类活动对生态环境系统的影响力度, 废水排放容易造成生态环境造成破坏, 尤其工业有机和重金属污染容易造成长久性的污染。

(19) 人均氨氮排放量: 它是衡量流域污染程度的重要指标。通过监测和控制人均氨氮排放量, 可以有效地降低污染程度, 减少对生态环境的影响。计算公式为流域氨氮总排放量与该流域人口总数的比值。

(20) 单位面积粮食产量: 反映了农业生产效率和土地利用效率的高低。单位面积粮食产量高, 流域可以获得更高的农业生产价值, 具有更强的经济实力。计算公式为粮食总产量与农田总面积的比值。

3.3 指标权重的确定

3.3.1 网络层次分析法

网络层次分析法 (ANP) 是 T.L.Saaty 在层次分析法 (AHP) 的基础上比较系统地提出的一种适合非独立递阶层次结构的决策方法, 既摆脱了 AHP 对层次结构的限制, 又解决了具有相互依赖和反馈效应的多准则分析问题(Ko and Chiu 2020)。ANP 将整个系统划分为两大部分, 第一部分为控制层, 包括目标层及准则层。各准则之间彼此独立, 且只受目标支配。控制层中可缺少决策准则, 但必须有一个目标。第二部分为网络层, 由所有受控制层支配的元素组组成, 元素组内部各元素互相影响, 同时, 在各准则下, 各元素组之间相互依存、相互支配。

假设 ANP 控制层中有 P_1, P_2, \dots, P_m 个准则, 在网络层中有元素组 D_1, D_2, \dots, D_n , 在

准则层 P_s 下, 根据元素 D_i 中的多有元素对 d_{jk} 影响程度的大小, 按照九分法(李岱远等 2017) 构造判断矩阵, 并由特征根法得到排序向量 $(w_{i1}^{(jk)}, \dots, w_{in}^{(jk)})$, 对排序向量进行一致性检验, 若满足一致性则进一步得到 w_{ij} 。

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \dots & w_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

式中 w_{ij} 中列向量代表元素组 D_i 中的元素 (d_{i1}, \dots, d_{in}) 对 D_j 中各元素影响程度的排序向量, 若 D_i 对 D_j 无影响, 则 $w_{ij} = 0$, 重复上述过程, 最终得到在 P_S 准则下的超矩阵 W 。

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

超矩阵共有 m 个, 超矩阵 W 中的 w_{ij} 为列归一化的向量组, 但 W 不是列归一化的。因此, 根据各个元素组对准则 D_j 影响程度, 得到加权矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

最终, 得到加权矩阵, $W = (W_{ij})$, 其中 $W_{ij} = a_{ij} W_{ij}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N$ 。

对加权超矩阵做极限运算, 使幂指数趋于无穷大即 $\overline{W}^\infty = \lim \overline{W}^t$, 若极限存在, 则 \overline{W}^∞ 的第一列为各指标在 P_S 准则下的稳定权重。

3.3.2 熵权法

每个变量的关联程度不同, 在计算过程中需要对每个变量赋权, 客观权重的确定采用熵权法, 来消除人为主观影响。基本步骤如下(Zhou, Pan, et al. 2017):

$$R = (x_{ij})_{mn} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3-4)$$

假设有 m 个评价对象, 每个评价对象有 n 个评价指标。构造判断矩阵: 对判断矩阵进行归一化得到归一化矩阵, 其元素如下:

$$R = (x_{ij})_{mn} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3-5)$$

根据信息熵的定义, 如果有 m 个评价对象和 n 个评价索引, 则第 i 个指数 ($i = 1, 2, \dots, n$) 将

是 X_{im} 的综合评价索引, 有 m 个状态, 第 i 个索引对应的信息熵为:

$$H_i = -\frac{\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln n_{ij}}{\ln m}, i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, m \quad (3-6)$$

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m 1 + b_{ij}}$$

计算评价指标的熵权重:

$$\omega_i = \frac{1 + H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}, \text{ 并满足条件, } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (3-7)$$

3.3.3 基于最小二乘法的组合权重

指标赋权方法分为主观赋权、客观赋权及主客观综合赋权等 3 类。ANP 为主观赋权方法, 能够清楚呈现各准则层与指标的关系, 但受人为因素的影响较大; 熵权法为客观赋权方法, 其精确性及适应性较高, 但过度依赖样本数据。两种方法的单一赋权均会对指标权重及评价结果的准确性造成一定程度的影响, 而将主客观赋权结合的 ANP—熵权法组合权重模型在避免个人主观赋权随意性的同时, 又可兼顾样本数据的客观现实性, 能够有效克服单一赋权方法的局限性, 使指标权重及评价结果更加准确。因此, 本文采用基于最小二乘法的 ANP—熵权法组合权重模型。求解各指标组合权重 $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$ 。其计算公式如下(毛定祥 2012):

$$\min F(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ [(s_j - \omega_j) z_{ij}]^2 + [(o_j - \omega_j) z_{ij}]^2 \right\} \quad (3-8)$$

约束函数为

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad (3-9)$$

式中, $F(\omega)$ 为组合权重偏差; s_j 、 o_j 、 ω_j 分别为第 j 个指标主观权重、客观权重、组合权重; Z_{ij} 为具有 n 个评价对象、 m 个指标的标准化后的数据矩阵; $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。构造拉格朗日函数, 求解模型为:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ [(s_j - \omega_j) z_{ij}]^2 + [(o_j - \omega_j) z_{ij}]^2 \right\} + 4\lambda \left(\sum_{j=1}^m \omega_j - 1 \right) \quad (3-10)$$

此后, 将拉各朗日函数分别对 ω 、 j 、 λ 、求偏导数可得:

$$\frac{\partial L}{\partial \omega_j} = \sum_{i=1}^n 2(s_j + o_j - 2\omega_j) z_{ij}^2 + 4\lambda = 0 \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 4 \left(\sum_{j=1}^m \omega_j - 1 \right) = 0 \quad (3-12)$$

用矩阵形式可表示为:

$$\begin{vmatrix} P & e \\ e^T & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} W \\ \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Q \\ 1 \end{vmatrix} \quad (3-13)$$

其中,

$$P = \text{diag} \left[\sum_{i=1}^n z_{i1}^2, \sum_{i=1}^n z_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^n z_{im}^2 \right] \quad (3-14)$$

$$Q = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (s_1 + o_1) z_{i1}^2, \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (s_2 + o_2) z_{i1}^2, \dots, \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (s_m + o_m) z_{im}^2 \right]^T \quad (3-15)$$

式中, P 为 $m \times m$ 对角矩阵; e 、 W 、 Q 为 $m \times 1$ 向量; λ 是随机数。解矩阵方程可得:

$$W = P^{-1} \times \left(Q + \frac{1 - e^T P^{-1} Q}{e^T P^{-1} e} \times e \right) \quad (3-16)$$

3.4 指标赋权计算

3.4.1 网络层次分析法计算指标权重

ANP 的网络关系可以表示准则之间的相关性,并计算每个控制准则之间的极限影响,形成超矩阵,所以其计算过程非常复杂。因此,本文以 Super Decision 3.20 为使用工具,计算各指标的权重。网络分析法的基本流程如图 3-1 所示。所获取的权重如表 3-2 所示。

表 3-2 网络层次分析法获取权重

目标层	准则层	指标层	指标层权重	总权重
石羊河流域水资源承载力评价	输入 0.2800	降水量	0.0832	0.0233
		产水模数	0.0486	0.0136
		人均水资源量	0.5758	0.1612
		城市水回用率	0.1124	0.0315
		地下水工程供水量	0.1800	0.0504
	消耗 0.2750	水资源开发利用率	0.3544	0.0975
		万元工业增加值用水量	0.4574	0.1258
		农业灌溉亩均用水量	0.0483	0.0133
		人均每日生活用水量	0.0401	0.0110
		生态环境用水率	0.0998	0.0275
	活力 0.1935	人均 GDP	0.1400	0.0271
		人口密度	0.3147	0.0609
		城镇化率	0.0140	0.0027

接下页

表 3-2 网络层次分析法获取权重 (续)

目标层	准则层	指标层	指标层权重	总权重
石羊河流域水资源承载力评价	调节 0.1441	第三产业比重	0.3534	0.0684
		人口自然增长率	0.1428	0.0302
		水域面积率	0.7825	0.1128
		植被覆盖率	0.2175	0.0313
	输出 0.1074	入河污水量	0.6977	0.0749
		人均氨氮排放量	0.2642	0.0284
		单位面积粮食产量	0.0381	0.0041

3.4.2 熵权法计算指标权重

将流域 2011-2020 年的各指标数据代入, 得到各评价指标体系的权重如表 3-3 所示。

表 3-3 熵权法获取权重

目标层	准则层	指标层	指标层权重	总权重
石羊河流域水资源承载力评价	输入 0.2290	降水量	0.2101	0.0481
		产水模数	0.1906	0.0436
		人均水资源量	0.1346	0.0308
		城市水回用率	0.2997	0.0686
	消耗 0.2730	地下水工程供水量	0.1652	0.0378
		水资源开发利用率	0.2201	0.0601
		万元工业增加值用水量	0.1530	0.0418
		农业灌溉亩均用水量	0.2421	0.0661
		人均每日生活用水量	0.2229	0.0608
		生态环境用水率	0.1620	0.0442
	活力 0.2116	人均 GDP	0.2310	0.0489
		人口密度	0.1411	0.0299
		城镇化率	0.2142	0.0453
		第三产业比重	0.2709	0.0573
石羊河流域水资源承载力评价	调节 0.1087	人口自然增长率	0.1428	0.0302
		水域面积率	0.5417	0.0589
	输出 0.1777	植被覆盖率	0.4583	0.0498
		入河污水量	0.3673	0.0653
		人均氨氮排放量	0.4304	0.0765
		单位面积粮食产量	0.2023	0.0359

3.4.3 指标综合权重

采用最小二乘法的 ANP—熵权法组合权重模型, 获取到的组合权重如表 3-4 所示。

表 3-4 组合权重

目标层	准则层	指标层	指标层权重	总权重
石羊河流域水资源承载力评价	输入 0.2392	降水量	0.1492	0.0357
		产水模数	0.1196	0.0286

接下页

表 3-4 组合权重 (续)

目标层	准则层	指标层	指标层权重	总权重
石羊河流域水资源承载力评价	消耗 0.2712	人均水资源量	0.4013	0.0960
		城市水回用率	0.2090	0.0500
		地下水工程供水量	0.1844	0.0441
		水资源开发利用率	0.2906	0.0788
		万元工业增加值用水量	0.3090	0.0838
		农业灌溉亩均用水量	0.1464	0.0397
		人均每日生活用水量	0.1324	0.0359
		生态环境用水率	0.1320	0.0358
	活力 0.2104	人均 GDP	0.1806	0.0380
		人口密度	0.2158	0.0454
		城镇化率	0.1141	0.0240
		第三产业比重	0.2985	0.0628
	调节 0.1296	人口自然增长率	0.1535	0.0323
		水域面积率	0.6620	0.0858
		植被覆盖率	0.3133	0.0406
		入河污水量	0.4686	0.0701
	输出 0.1496	人均氨氮排放量	0.3503	0.0524
		单位面积粮食产量	0.1350	0.0202

3.5 评价指标分级标准

在衡量区域社会、经济、自然等因素协调发展中水资源承载力评价标准是最基本的条件, 根据石羊河流域水资源状况, 本文参考夏玮静等 (2020)、杨亚锋等 (2021)、王君诺等 (2021) 等学者以及《地表水环境质量标准》 (https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml) 《城市居民生活用水量标准》 (http://swj.wuhan.gov.cn/whjs/jsb_jsbz/202105/t20210518_1699782.html) 确定了水资源承载能力评价标准, 将评价标准划分成 I-V 级, 这 5 个级别分别表示为承载盈余、承载适宜、濒临超载、轻度超载、严重超载, 具体内容如表 3-5 所示

表 3-5 评价指标等级标准

评价指标	评价区间				
	I	II	III	IV	V
降水量 (mm)	> 550	550-400	400-250	250-100	< 100
地下水工程供水量 (亿/m ³)	< 2	2-3	3-4	4-5	> 5
产水模数 (万m ³ /km ²)	> 28	28-18	18-10	10-4	< 4
人均水资源量 (m ³ /人)	> 900	900-800	800-700	700-600	< 600
水资源开发利用率 (%)	< 45	45-55	55-65	65-75	> 75
万元工业增加值用水量 (m ³ /万元)	< 30	30-70	70-110	110-150	> 150
农业灌溉亩均用水量 (亿m ³)	< 200	200-350	350-500	500-650	> 650
人均每日生活用水量 (L)	< 60	60-75	75-90	90-105	> 105
生态环境用水率 (%)	> 5	5-3	3-2	2-1	< 1

接下页

表 3-5 评价等级标准 (续)

评价指标	评价区间				
	I	II	III	IV	V
城市水回用率 (%)	> 5	5-3	3-2	2-1	< 1
人口密度 (人/km ²)	< 50	50-55	55-60	60-65	> 65
城镇化率 (%)	> 70	70-60	60-50	50-40	< 40
人口自然增长率 (‰)	< 3	3-6	6-8	8-10	> 10
人均 GDP (万元)	> 6	6-5	5-4	4-3	< 3
第三产业比重 (%)	> 60	60-50	50-40	40-30	< 30
水域面积率 (%)	> 5	5-3	3-2	2-1	< 1
植被覆盖率 (%)	> 55	55-45	45-35	35-30	< 30
人均氨氮排放量 (吨/万人)	< 1	1-3	3-5	5-10	> 10
入河污水量 (万吨)	< 2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	> 5000
单位面积粮食产量 (吨/亩)	> 500	500-420	420-360	360-300	< 300

3.6 水资源承载力评价

3.6.1 可变模糊集综合评价模型

基于模糊数学的变量模糊评估方法是一种综合评估方法, 具有清晰的系统结构。该方法将定性评价转化为定量评估, 可以解决由多个因素影响的问题, 可以更好地解决量化的不确定性难题, 适用于各种非确定性问题(Yang and Yang 2021)。基本步骤如下:

设论域 U 上的对立模糊概念 (事物、现象), 对 U 中的任意元素 $\mu, \mu \in U$, 在相对隶属度函数的连续数轴上一点, μ 对表示吸引性质 \tilde{A} 的相对隶属度为 $\mu_{\tilde{A}}(u)$, 表示排斥性 \tilde{A}_c 的相对隶属度为 $\mu_{\tilde{A}_c}(u)$, $\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{A}_c}(u) \in [0, 1], \mu_{\tilde{A}}(u) \in [0, 1]$ 。设:

$$D_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}}(u) - \mu_{\tilde{A}_c}(u) \quad (3-17)$$

$D_{\tilde{A}}(u)$ 称为 u 对 \tilde{A} 的相对差异度。其中:

$$\mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}_c}(u) = 1 \quad (3-18)$$

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 \tilde{V} 的吸引域, $X = [c, d]$ 为包含 X_0 的某一上、下界范围区间 (排斥域)。

模糊集理论根据权重综合考虑多重相关因子的贡献率, 采用隶属度函数减少模糊性。基于此, 采用区间值代替分类标准的点值提出了可变模糊集理论。假设水资源承载力有 m 个指标, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 。

A 代表一个模糊子集, 对任意元素 $u(u \in U)$, $\mu_A(u)$ 是 u 到 A 相对隶属函数。包含 m

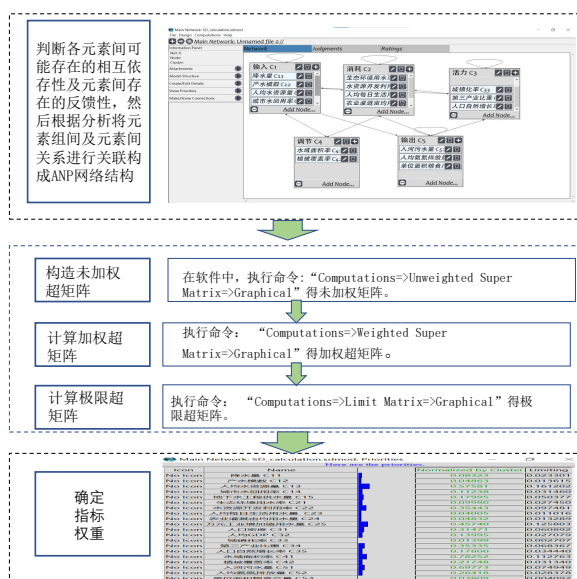


图 3-1 层次网络分析法的流程图

个指标和 c 个分类层的标准区间矩阵如下：

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [a_{11}, b_{11}] & [a_{12}, b_{12}] & \cdots & [a_{1c}, b_{1c}] \\ [a_{21}, b_{21}] & [a_{22}, b_{22}] & \cdots & [a_{2c}, b_{2c}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [a_{m1}, b_{m1}] & [a_{m2}, b_{m2}] & \cdots & [a_{mc}, b_{mc}] \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

若指标越大越好, 则 $a_{ij} > b_{ij}$; 否则 $a_{ij} < b_{ij}$, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq c$ 。

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [c_{11}, d_{11}] & [c_{12}, d_{12}] & \cdots & [c_{1c}, d_{1c}] \\ [c_{21}, d_{21}] & [c_{22}, d_{22}] & \cdots & [c_{2c}, d_{2c}] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ [c_{m1}, d_{m1}] & [c_{m2}, d_{m2}] & \cdots & [c_{mc}, d_{mc}] \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

假设 M 是集合 $[a, b]$ 中 $\mu_A(u) = 1$ 的点值, M 可以由实际问题取值或取为 $[a, b]$ 中值。如果 x 在 M 左侧, 相对差异度函数模型为:

$$D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a} \right)^\beta \quad x \in [a, M] \quad (3-21)$$

$$D_A(u) = - \left(\frac{x-a}{c-a} \right)^\beta \quad x \in [c, a] \quad (3-22)$$

若 X 在 M 右侧, 相对差异度函数模型为:

$$D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b} \right)^\beta \quad x \in [M, b] \quad (3-23)$$

$$D_A(u) = - \left(\frac{x-b}{d-b} \right)^\beta \quad x \in [b, d] \quad (3-24)$$

式中, β 为负指数, 一般取 $\beta=1$ 。综合相对隶属度函数为:

$$\mu_A(u)_{ij} = [1 + D_A(u)] / 2 \quad (3-25)$$

相对隶属度矩阵:

$$\mu_A(u) = (\mu_A(u)_{ij}) \quad (3-26)$$

则可变模糊集评价模型为:

$$v_A(u)_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^m (w_i (1 - \mu_A(u)_{ij}))^p}{\sum_{i=1}^m (w_i \mu_A(u)_{ij})^p} \right)^{\frac{a}{p}}} \quad (3-27)$$

式中, w_i 为第 i 个评价指标的权重; a 为优化准则参数, 通常取 $a = 1$ 或 $a = 2$; p 为距离参数, $p = 1$ 时为线性模型, $p = 2$ 时为非线性模型。

对综合相对隶属向量 $v_A(u)_j$ 进行归一化处理, 得到最终的归一化综合相对隶属度向量 $v'_A(u)_j$:

$$v'_A(u)_j = \frac{v_A(u)_j}{\sum_{j=1}^c v_A(u)_j} \quad (3-28)$$

3.6.2 基于可变模糊集的水资源承载力评价

根据表 3-5 水资源承载力评价指标分级标准所示, 给出可变集合的吸引域矩阵 I_{ab} 、范围域矩阵 I_{cd} 和点值 M 的矩阵分别为:

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [1000, 550] & [550, 400] & [400, 250] & [250, 100] & [50, 10] \\ [0, 2] & [2, 3] & [3, 4] & [4, 5] & [5, 10] \\ [50, 28] & [28, 18] & [18, 10] & [10, 4] & [4, 1] \\ [1000, 900] & [900, 800] & [800, 700] & [700, 600] & [600, 500] \\ [0, 45] & [45, 55] & [55, 65] & [65, 75] & [75, 200] \\ [0, 30] & [30, 70] & [70, 110] & [110, 150] & [150, 200] \\ [0, 200] & [200, 350] & [350, 500] & [500, 650] & [650, 700] \\ [0, 60] & [60, 75] & [75, 90] & [90, 105] & [105, 150] \\ [20, 5] & [5, 3] & [3, 2] & [2, 1] & [1, 0] \\ [20, 5] & [5, 3] & [3, 2] & [2, 1] & [1, 0] \\ [0, 50] & [50, 55] & [55, 60] & [60, 65] & [65, 100] \\ [80, 70] & [70, 60] & [60, 50] & [50, 40] & [40, 20] \\ [-200, 3] & [3, 6] & [6, 8] & [8, 10] & [10, 100] \\ [10, 6] & [6, 5] & [5, 4] & [4, 3] & [3, 1] \\ [80, 60] & [60, 50] & [50, 40] & [40, 30] & [30, 10] \\ [7, 5] & [5, 3] & [3, 2] & [2, 1] & [1, 0] \\ [65, 55] & [55, 45] & [45, 35] & [35, 30] & [30, 10] \\ [0, 1] & [1, 3] & [3, 5] & [5, 10] & [10, 15] \\ [1000, 2000] & [2000, 3000] & [3000, 4000] & [4000, 5000] & [5000, 7000] \\ [600, 500] & [500, 420] & [420, 360] & [360, 300] & [300, 240] \end{bmatrix}$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [1000, 400] & [1000, 250] & [550, 100] & [400, 50] & [250, 0] \\ [0, 3] & [0, 4] & [2, 5] & [3, 10] & [4, 15] \\ [50, 18] & [5, 10] & [28, 4] & [18, 1] & [10, 0] \\ [1000, 800] & [1000, 700] & [900, 600] & [800, 500] & [700, 400] \\ [0, 55] & [0, 65] & [45, 75] & [55, 200] & [65, 300] \\ [0, 70] & [0, 110] & [30, 150] & [70, 200] & [110, 300] \\ [0, 350] & [0, 500] & [200, 650] & [350, 700] & [500, 800] \\ [0, 70] & [0, 90] & [60, 105] & [75, 150] & [90, 200] \\ [20, 3] & [20, 2] & [5, 1] & [3, 0] & [2, 0] \\ [20, 3] & [20, 2] & [5, 1] & [3, 0] & [2, 0] \\ [0, 55] & [0, 60] & [50, 65] & [55, 100] & [60, 100] \\ [80, 60] & [80, 50] & [70, 40] & [60, 20] & [50, 0] \\ [-200, 6] & [-200, 8] & [3, 10] & [6, 100] & [8, 100] \\ [10, 5] & [10, 4] & [6, 3] & [5, 1] & [4, 0] \\ [80, 50] & [80, 40] & [60, 30] & [50, 10] & [40, 0] \\ [7, 3] & [7, 2] & [5, 1] & [3, 0] & [2, 0] \\ [65, 45] & [65, 35] & [55, 30] & [45, 10] & [35, 0] \\ [0, 3] & [0, 5] & [1, 10] & [3, 15] & [5, 20] \\ [1000, 300] & [1000, 4000] & [2000, 5000] & [3000, 7000] & [4000, 7000] \\ [600, 420] & [600, 360] & [500, 300] & [420, 240] & [360, 200] \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1000 & 550 & 325 & 100 & 50 \\ 0 & 2 & 3.5 & 5 & 10 \\ 50 & 28 & 14 & 4 & 1 \\ 1000 & 900 & 750 & 600 & 500 \\ 0 & 45 & 60 & 75 & 200 \\ 0 & 30 & 90 & 150 & 200 \\ 0 & 200 & 425 & 650 & 700 \\ 0 & 60 & 82.5 & 105 & 150 \\ 20 & 5 & 2.5 & 1 & 0 \\ 20 & 5 & 2.5 & 1 & 0 \\ 0 & 50 & 57.5 & 65 & 100 \\ 80 & 70 & 55 & 40 & 20 \\ -200 & 3 & 7 & 10 & 100 \\ 10 & 6 & 4.5 & 3 & 1 \\ 80 & 60 & 45 & 30 & 10 \\ 7 & 5 & 2.5 & 1 & 0 \\ 65 & 55 & 40 & 30 & 10 \\ 0 & 1 & 4 & 10 & 15 \\ 1000 & 2000 & 3500 & 5000 & 7000 \\ 600 & 500 & 390 & 300 & 240 \end{bmatrix}$$

以石羊河流域 2020 年数据为例，利用式 (3-21)至式 (3-26)，结合 I_{cd} 、 I_{ab} 、 M 矩阵，计算各指标的隶属度等级，并构建相应的隶属度矩阵：

$$\mu_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.23 & 0.77 & 0.27 \\ 0 & 0 & 0 & 0.27 & 0.73 \\ 0 & 0 & 0 & 0.39 & 0.61 \\ 0 & 0.13 & 0.75 & 0.37 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.07 & 0.93 \\ 0.56 & 0.44 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0.59 & 0.46 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0.55 \\ 0.64 & 0.36 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.16 & 0.82 & 0.34 & 0 \\ 0.56 & 0.44 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0.74 & 0.38 & 0 \\ 0.89 & 0.11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.31 & 0.88 & 0.19 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0.74 & 0.38 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0.94 \\ 0 & 0 & 0.14 & 0.86 & 0.36 \\ 0.89 & 0.11 & 0 & 0 & 0 \\ 0.27 & 0.77 & 0.23 & 0 & 0 \\ 0 & 0.16 & 0.83 & 0.34 & 0 \end{bmatrix}$$

由式 (3-25)、式 (3-27) 和式 (3-28) 得到综合相对隶属度向量和归一化综合相对隶属度向量如表 3-6 所示

表 3-6 2022 年流域综合相对隶属度向量及归一化综合相对隶属度向量

	$v_A(u)$					$v'_A(u)$				
a=1 p=1	0.19	0.18	0.28	0.23	0.25	0.17	0.16	0.25	0.20	0.22
a=1 p=2	0.28	0.26	0.36	0.26	0.37	0.18	0.17	0.23	0.17	0.24
a=2 p=1	0.05	0.05	0.13	0.08	0.10	0.13	0.11	0.32	0.20	0.24
a=2 p=2	0.13	0.11	0.24	0.11	0.26	0.15	0.13	0.28	0.13	0.30

级别特征公式是为了解决模糊概念分级中最大隶属度原则的限制性问题而提出的, 它将各级别的隶属度信息和特征综合考虑, 从而能够更好地描述模糊概念的分级特征。

级别特征的计算公式见式 (3-29)。石羊河流域级别特征评价结果如表 3-7 所示。

$$H = \sum_{j=1}^c v'_A(j) \cdot j \quad (3-29)$$

表 3-7 石羊河流域级别特征评价结果

年份	a=1 p=1	a=1 p=2	a=2 p=1	a=2 p=2	平均
2011	3.51	3.31	4.06	3.69	3.64
2012	3.45	3.28	3.85	3.53	3.53
2013	3.95	3.69	4.48	4.26	4.09
2014	3.80	3.54	4.35	4.01	3.92
2015	3.84	3.63	4.21	4.05	3.93
2016	3.42	3.35	3.63	3.59	3.50
2017	3.23	3.22	3.23	3.31	3.25
2018	3.19	3.15	3.29	3.31	3.23
2019	3.15	3.14	3.14	3.24	3.17
2020	3.15	3.12	3.31	3.29	3.22

3.6.3 水资源承载力时序演化分析

根据表 3-7 可知, 石羊河流域水资源承载力评分虽有波动, 但整体呈向好势态, 由 2011 年的 3.64 的评分值到 2020 年 3.22 的评分值。这说明石羊河流域统筹治理以及节水控水、污染防治、生态治理等措施的实施成效显著。在 2011-2020 年期间, 2013 年的水资源承载力最差, 2013 年流域平均降水量 169.3mm, 比多年平均降水量 213.0mm 减少 43.7mm, 且地表水资源量比多年平均自产地地表水资源减少 25.9 %, 属枯水年份。水资源状况的匮乏可能是导致水资源承载力低的主要原因之一。2019 年的水资源承载力最好, 评分值达到 3.19, 较 2013 年的水资源承载力水平有明显提高。2019 年, 通过景电工程的调水增加了地表水供水量, 同时在流域内减少种植作物类型、推行畦灌、滴灌等节水灌溉模式也相应的减小了灌溉水量, 在石羊河流域总用水量基本不变的情况下, 地下水开采强度的降低, 减小了流域内地下水供水量, 使得石羊河流域水资源承载力较好。这与王文川等 (2021) 的研究结果一致。

为进一步明晰石羊河流域水资源承载力水平在时序上的差异性, 做了水资源承载力时序变化图 (如图 3-2 所示), 并构建一元线性回归模型, 采用最小二乘法拟合年际变化斜率, 斜率的大小反映年际变化速度的快慢。可以看出, 2011-2020 年水资源承载力的评分值呈减小趋势, 即流域整体水资源承载力朝健康、有序、持续方向不断向前推进, 整体的年际变化速度为 0.08。具体来看, 2015 年是一个明显的分段值, 2015 年前水资源承载力波动较大, 变异系数 (CV 值) 达到 0.06, 且水资源承载状态恶化显著, 水资源承载力的评分值年增加值为 0.10。2015 年后流域的水资源承载力有了明显的改善, 水资源承

载状态持续向好，水资源承载力的评分值递减速度为 0.13。

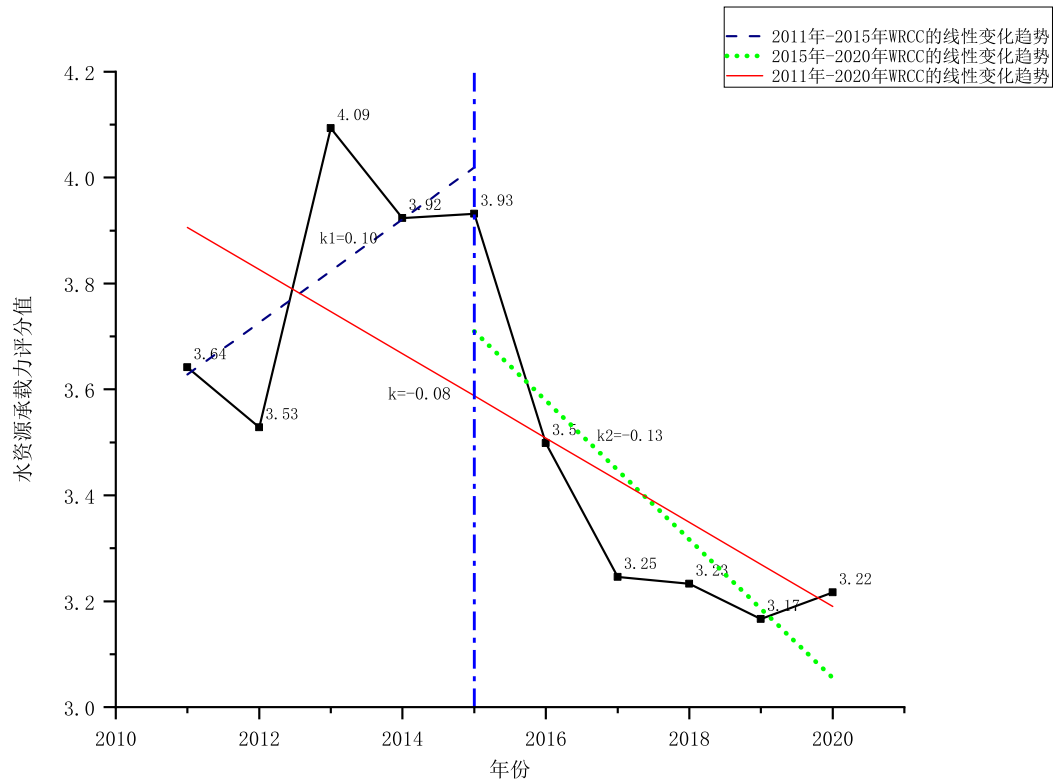


图 3-2 2011-2020 年石羊河流域水资源承载力变化曲线

3.7 本章小结

- (1) 输入-消耗-活力-调节-输出的指标体系框架是基于水循环理论、水代谢理论开发的，也是输入-消耗-输出框架模型的拓展。新的框架模型的应用为构建指标体系提供了一种新的方法。该框架有助于构建更为全面的指标体系，有助于形象反映水资源承载力内涵，有助于更深入地理解影响因素之间的相互作用。
- (2) 各指标和子系统所占的权重不同。人均水资源量、水域面积率、万元工业增加值用水量、水资源开发利用率、入河污水量是所占权重为前 5 的显著指标。消耗子系统的权重高于其他子系统，调节子系统的权重最小。
- (3) 从时间序列整体来看，石羊河流域水资源承载力呈现逐年提升趋势，水资源承载力评分值最大值出现在 2013 年，为 4.09 分，最小值为 3.17 分，出现在 2019 年，较 2013 年降低 22.5%，水资源承载力情势有明显好转。

第4章 石羊河流域水资源承载系统耦合协调水平分析

水资源承载系统是水资源-社会经济-生态组成的复杂巨系统，各子系统间动态交互以应对外界变化，这种在系统运动发展过程中系统及要素间交互耦合的过程对水资源承载力的可持续具有重要影响。然而，要素间相互关联的关系的错综复杂的，是非线性的，传统的耦合协调度模型难以客观深刻的反映系统的耦合协调机制，那水资源承载力变化时，系统的结构会有明显的变化吗？在水资源承载力何种状态下，哪些要素间的联系倾向于耦合或是解耦？为解决这些问题，本章首次使用网络相关分析法，基于复杂系统视角可视化各指标间的相互关系，全面揭示系统的内部结构，通过分析系统内部要素规律随水资源承载力的演变规律，为流域的可持续发展提供理论支撑。

4.1 指标要素间关系的可视化

网络分析是一种研究复杂网络结构和特征的方法，它可以用于理解复杂系统中的相互关系和交互作用。图论是复杂网络研究的数学基础，它提供了一种用抽象的点和线表示各种实际网络的统一方法。石羊河流域水资源承载系统可以被描述为网络，其中节点是各个指标，边是指标间的连接。使用 Pearson 相关系数来表示指标间的相互作用：正值表示协同作用，负值表示权衡作用，相关系数的绝对值表示相互作用的强度。为分析水资源承载力提高对水资源承载系统中各要素间的关系的影响，使用了滑动窗口法(Felipe-Lucia et al. 2020)。将 2011-2020 年的水资源承载力值从高到低排序，并将互动窗口大小设置为 6。这样总共有 6 个窗口（1-6，2-7，3-8，4-9，5-10），每个窗口包含 6 个年份。对于每个窗口，计算了每对指标间的关联性，并使用显著性相关系数 ($p < 0.5$) 进行性分析。基于 R 语言 4.2.2 计算绘制水资源承载系统网络图如图 4-1 所示。图中蓝线表示正相关，红线表示负向。f1-f5 属于输入系统，f6-f10 属于消耗系统，f11-f15 属于活力系统，f16-f17 属于调节系统，f18-f20 属于输出系统。

图 4-1 可以反映出随着水资源承载力的提高，系统中各指标间的交互作用是动态变化的，且过程倾向于耦合。这说明指标间的关联链增加及加强要素间的耦合关系可能会促进水资源承载力的提高。分系统来看，活力子系统 (f11-f15) 与其它子系统的耦合关系最强，在水资源承载力提高过程中，其它子系统对活力系统的依赖度更大。然而，输出系统与其它子系统的关系一直较弱。为深入挖掘网路图的信息，采用网络密度 (式 (4-1)) 评估指标间的关联程度。

$$d = \frac{2L}{n(n-1)} \quad (4-1)$$

式中， n 为网络中节点的数目， L 为网络中关系的数目， d 的取值范围为 $[0,1]$ 。

计算不同水资源承载力状况下网络图的网络密度并分别统计正相关、负相关的链条

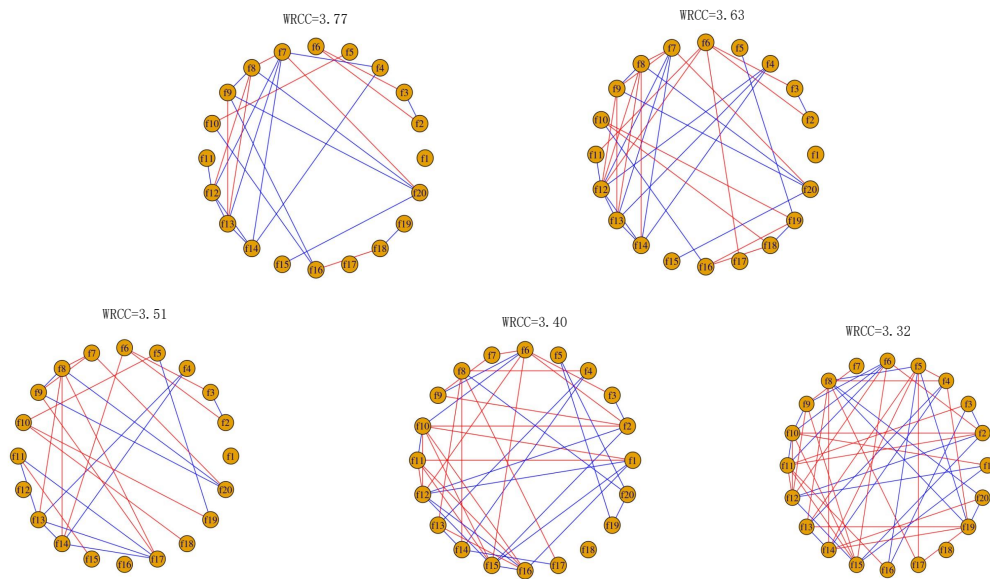


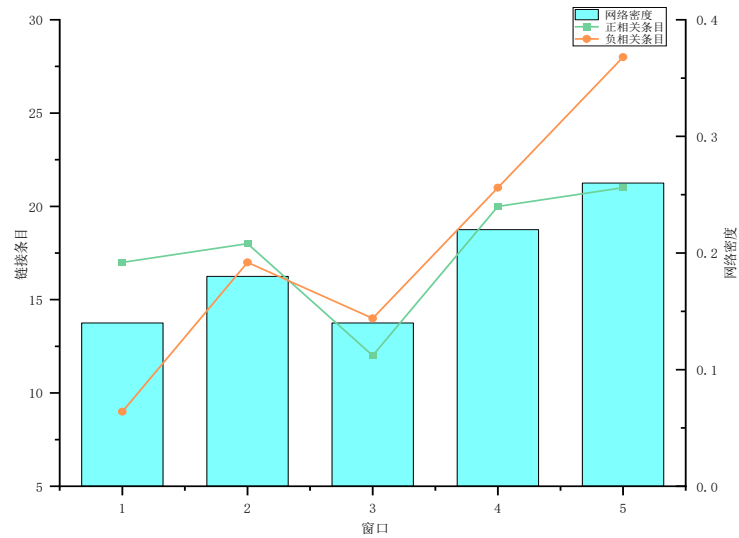
图 4-1 石羊河流域水资源承载系统交互网络

数目。由图 4-2 可知，随着水资源承载力的提升，网络中心度整体上是增加趋势，由 0.14 提高到 0.26。其中水资源承载力评分值为 3.77 与评分值为 3.51 的网络密度相同，但是网络结构显然不同，前者网络指标间的关系更为局部，后者则更加平均、分散。正相关链路的个数随水资源承载状态的变化范围不大，而负相关链数整体上呈增加趋势。这可能是由于在发展的一定阶段后，某个指标的提升会抑制另一个指标的发展。例如，环境库兹涅茨曲线假设 ((Grossman and Krueger 1995)) 认为，在经济发展到达某个拐点后，~~环境质量随着人均 GDP 的增加会抑制生态环境的恶化。~~

4.2 水资源承载力对网络指标的影响

选取了三个关键的网络指标，关联强度、均匀度和模块化。连通强度分为协同网络（正相关）和权衡网络~~计算~~（负相关），每对指标间的关联强度的平均值即可反映整个网络的关联强度。模块化是指将网络分解为若干个紧密相关的子网络或模块的强度，具体求解使用 Cluster Walktrap 算法，其算法原理如图 4-3 所示。评估这两个指标随水资源承载力的变化有助于认识水资源承载系统内部结构。

图 4-4 展示了协同网络和权衡网络的关联强度、均匀度在不同水资源承载力水平下的变化，因权衡网络模块化的趋势主要与窗口数的大小有关，因此只考虑协同网络下模块化的趋势(Wu et al. 2022)。权衡网络下，随着水资源承载力水平的提高，关联强度呈波动变化，具有多个峰和谷 (图 4-4 (a))。总体上呈现先增大后减小的趋势，水资源承载力在比较高的水平下，关联强度比初始状态下的关联强度更弱。这说明权衡网络中，当这两



1

图 4-2 水资源承载系统指标间链接条目及网络密度

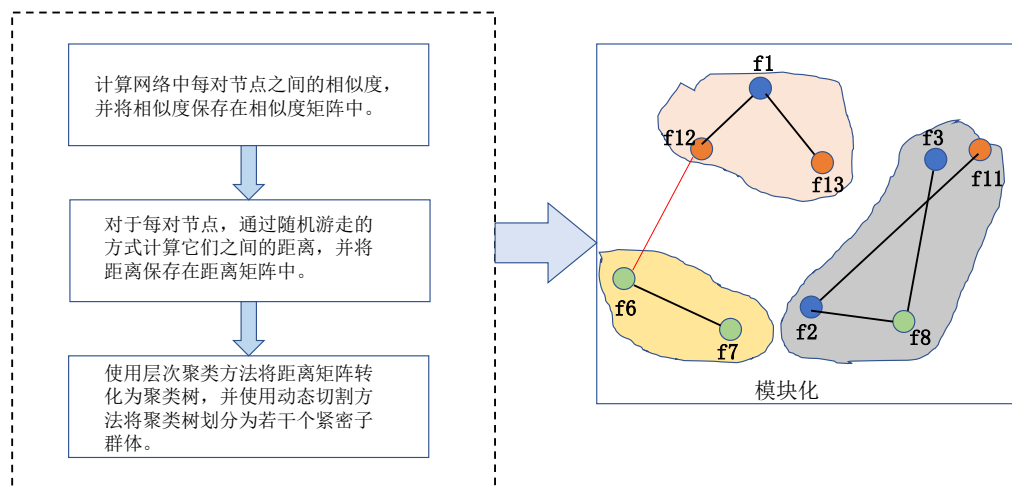


图 4-3 Cluster Walktrap 算法原理

个指标之间的负相关性减弱或消失时，它们之间的变化趋势就可能变得更加一致，即两个指标都向着更优的方向发展。例如农业灌溉亩均用水量与人口密度呈负相关关系，这意味着高的灌溉用水量却有着低的人口密度，但二者都朝着减小的相同趋势变化有助于提升水资源承载力。而协同网络的关联强度变化趋势虽与权衡网络类似，但是变化范围较小（图 4-4 (b)）。权衡网络的均匀度在水资源承载力水平提升的初期，呈快速上升的

趋势,在后期趋于稳定,且高于初始状态,在均匀度 0.9993 附近摆动 (图 4-4 (c))。这说明在水资源承载力提高的初期,节点的度分布快速趋于均匀化,而在拐点后,权衡网络的均匀度略有下降,这可能由于出现了新的对权衡网络结构有重要影响的超级节点。在后期,均匀度对水资源承载力的响应较弱。协同网络的均匀度在水资源承载力水平提高的初期均匀度整体上呈上升趋势,更多的节点开始发挥作用。在水资源承载力水平较高时,达到拐点,之后均匀度开始下降,但仍然高于初始状态 (图 4-4 (d))。随着水资源承载力.随着水资源承载力水平的提高,网络倾向于被分为更加孤立的正向关联组 (图 4-4 (e))。这说明在水资源承载能力较低的情况下,网络中的各要素之间需要通过互补和补偿来维持水资源的供需平衡,因此会形成相互依存的模块。而当水资源承载能力提高时,这些依存模块之间的联系变得不再必要,因此网络中的节点开始向着更加独立和孤立的方向发展,即形成了更加孤立的正向关联组。

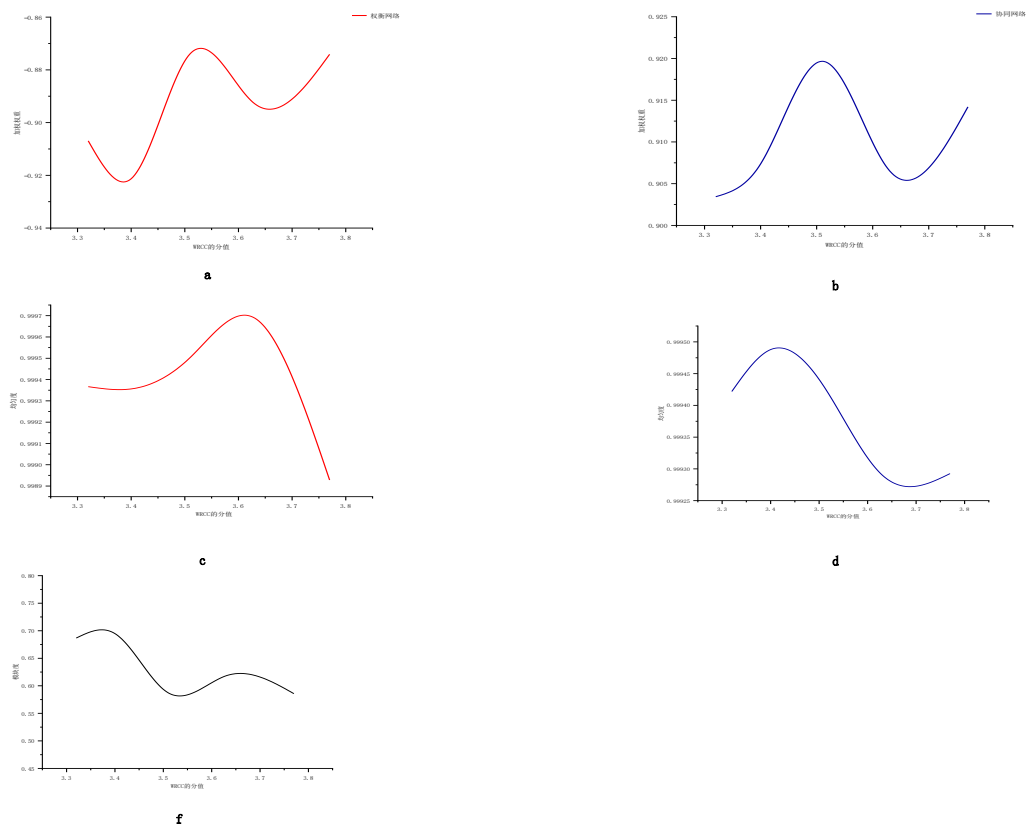


图 4-4 水资源承载水平对网络指标的影响

图 4-5 可以看出,不同模块之间的联系作用变强。活力子系统 (f11-f15) 的指标组成的模块随着水资源承载力的提高而被破坏。在水资源承载力水平较低的时候,降水量

指标是一个单独的模块，而在水资源承载力水平较高的时候，降水量指标与活力系统的指标交互形成新的模块。这可能是因为这个较低的水资源承载力水平下，降水量对于水资源的承载能力具有很大的影响，因此它独立成为一个模块。而在水资源承载力水平较高的时候，降水量不再是唯一重要的指标，其他指标也开始对水资源承载力产生影响。因此，这些指标之间开始形成新的模块，相互之间产生交互作用，共同影响水资源承载力的表现。随着水资源承载力水平的提高，越多的不同系统间的指标产生交互作用，形成相关关联的模块。

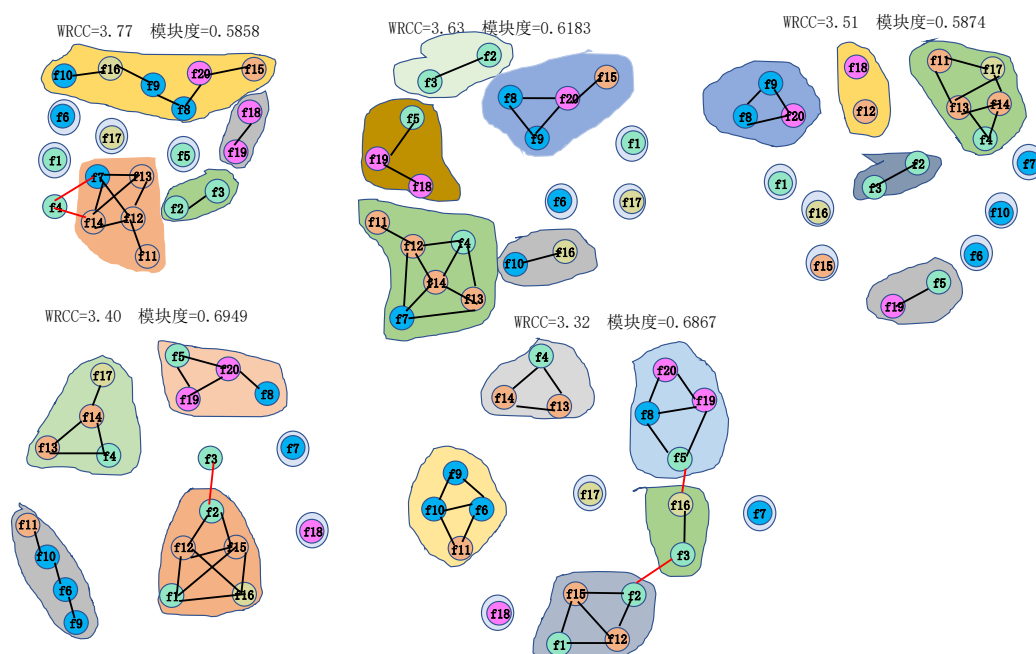


图 4-5 协同网络的模块构成及其在不同 WRCC 水平下的变化

注意：图中不同的节点颜色代表来自不同的子系统。黑线表示同一模块中的指标交互；红线代表指标在不同模块中的交互作用。

4.3 本章小结

本章通过可视化水资源承载系统内部结构以及量化权衡网络和协同网络的关联强度、均匀度和模块化在不同水资源承载力水平下的特征，为明晰水资源承载系统的耦合机制提供了新的方法。主要归纳以下几点结论。

- (1) 随着水资源承载力的提高，指标间交互作用动态变化，且趋向于耦合。水资源承载力提高后，网络中心度整体上呈增加趋势，正相关链路数变化不大，负相关链路数增加。网络结构随水资源承载力的变化也有所不同，可能是因为某指标的提升会抑制另一个指标的发展。
- (2) 权衡网络的关联强度在水资源承载力较高时呈波动变化，但总体趋势是先增大后减小；而协同网络的关联强度变化范围较小。权衡网络的均匀度在水资源承载力提高的初期快速上升，后期趋于稳定且高于初始状态，但在拐点后略有下降；协同网络的均匀度在水资源承载力提高的初期整体上呈上升趋势，但在拐点后开始下降。随着水资源承载力的提高，网络倾向于被分为更加孤立的正向关联组，即形成了更加孤立的正向关联组。
- (3) 随着水资源承载力的提高，不同系统间的指标开始产生交互作用，形成相关关联的模块。在较低水资源承载力下，降水量指标是一个单独的模块，而在水资源承载力较高时，降水量指标与其他指标交互形成新的模块，共同影响水资源承载力的表现。

第5章 石羊河流域水资源承载力驱动因素

由第三章可知, 石羊河流域水资源承载力评价中指标占比前六的分别是人均水资源量 (f3)、水域面积率 f(16)、万元工业增加值用水量 (f7)、水资源开发利用率 (f6)、入河污水量 (f18)、第三产业比重 (f14), 然而, 由于人的主观意识, 方法的不确定性, 若仅凭指标权重确定水资源承载力的驱动因素是缺乏合理性的。此外, 水资源承载系统是一个复杂的巨系统, 各因素相互交织, 不同学者关于石羊河流域水资源承载力驱动因素得到的研究结果也是不一样的, 我们对各指标对水资源承载力的控制的理解仍然有限。因此, 为获得对驱动因素的识别以及深入的解释, 应当使用先进的技术和框架。本章采用 XGBoost 集成学习方法, 旨在识别主要驱动因素, 并借助累积局部效应 (ALE) 和局部代理模型 (LIME) 这两种可解释的机器学习方法, 揭示“黑盒”模型背后的底层机制。

5.1 主要驱动因素的识别

5.1.1 XGBoost 模型参数的确定

XGBoost 模型最早由陈天奇和 Carlos Gestrin 于 2011 年提出, 并在后续研究中被众多科学家不断优化和完善(Li et al. 2019)。XGBoost 是一种高效且可扩展的梯度提升机器学习算法, 其可以通过迭代的方式, 不断地优化预测模型在训练数据集上的表现, 使其能够更准确地预测新的未知数据的结果。这一算法的成功, 主要得益于其使用了一些有效的正则化技术和剪枝策略, 以及基于梯度的优化算法来加速学习过程, 并使得该算法具有较高的预测准确度和鲁棒性(Babajide Mustapha and Saeed 2016)。XGBoost 模型算法的目标函数为(Alim et al. 2020):

$$Obj_m = \sum_{i=1}^n l((y_i, y_i^{m-1}) + f_m(x_i)) + \Omega(f_m) \quad (5-1)$$

式中, 变量 n 和 m 分别代表样本大小和迭代次数。 f_m 表示 m 次迭代中的误差。 l 代表成本函数, 用于衡量标签和上一步预测之间的差异, 以及新树的输出, Ω 则是正则化项, 惩罚新树的复杂度。成本函数被扩展为二阶泰勒展开, 并同时引入 L1 和 L2 正则化以避免过拟合。

在 XGBoost 模型中, 最重要的参数包括子模型数量 ($n_estimators$), 决策树的最大深度 (max_depth), 学习率 ($learning_rate$) 用于控制提升算法的保守程度, 以及进一步分裂决策树所需的最小损失减少量 ($gamma$) (Gibson et al. 2021)。考虑到模型的参数较多, 本文首先采用贝叶斯优化自动调参, 通过参数自动调优, 算法性能可以得到显著提升, 而且确定的参数更加客观(Dagasan et al. 2018; Huang et al. 2019)。此外, 为了提高模型的精确性和稳健性, 并避免过拟合现象的发生, 使用了手动调参的方法, 通过观察训

表 5-1 XGBOOST 模型的参数

参数	描述	值
max_depth	树的最大深度限制	4
learning_rate	每次迭代中模型参数的更新步长	0.2
n_estimators	构建的弱分类器（即决策树）的数量	250
booster	使用的基础模型，可以选择 gbtree 或者 dart	gbtree
gamma	节点分裂所需的最小损失函数下降值	0
min_child_weight	每个叶子节点最少需要的样本权重和	0
subsample	每个决策树构建时，用于训练的子样本的比例	0.5
colsample_bytree	每个决策树构建时，用于训练的特征的比例	0.9
reg_alpha	L1 正则化的惩罚力度	0
reg_lambda	L2 正则化的惩罚力度	0

训练集和验证集的均方误差 (MSE) 随参数变化的情况如图 5-1，确定了最重要的参数。这些关键参数可以作为自动优化调参的辅助依据，从而进一步提高模型的性能表现。结合两种调参方法，最终模型参数的确定结果如表 5-1 所示。

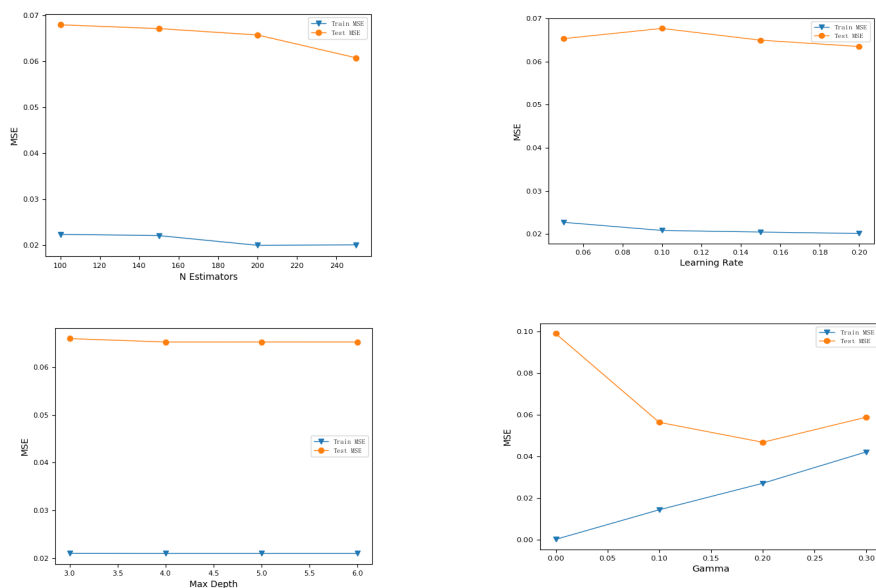


图 5-1 训练集和验证集均方误差随参数变化的趋势分析

在本研究中，使用 5 次交叉验证策略，通过最小化具有高斯误差分布的均方误差 (MSE)，来判断模型的性能。从图 5-2 看出，在模型交叉验证的过程中，验证曲线逐渐向训练曲线收敛，且始终具有较低的均方误差，这表明该模型表现出优异的性能。

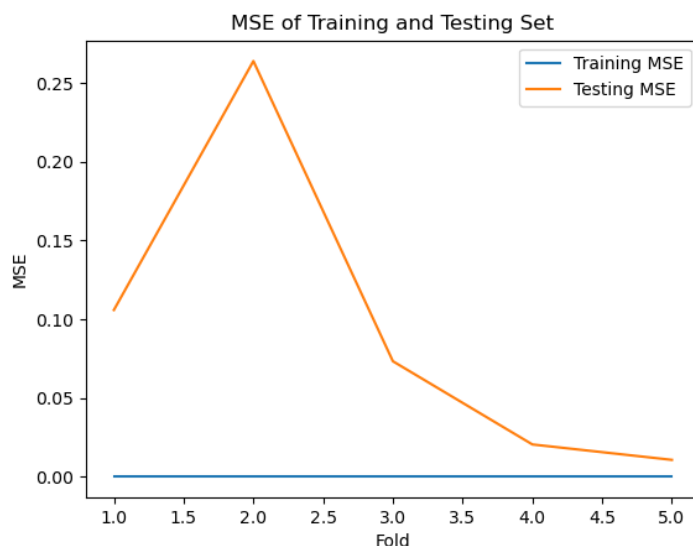


图 5-2 训练集和验证集均方误差随折数变化的趋势分析

5.1.2 特征重要性

水资源承载系统充分体现了自然和人文交互、多要素互馈的特征，流域水资源承载力的变化与系统各要素息息相关。本文利用 XGboost 探析水资源承载力的驱动因素，通过获取每个特征的重要性得分，在得分中，分值越高，说明对对估计因变量的影响越大。图 5-3 显示了识别的六个主要特征的特征重要性。人均 GDP 是控制水资源承载力的最重要因素 (f11,43.31 %)，其次是人均每日生活用水量 (f9,31.64 %)、城市水回用率 (f4,13.31 %)、产水模数 (f2,5.8 %)、地下水工程供水量 (f5, 3.21 %) 和降水量 (f1,2.73 %)。由此可见，水资源承载力的影响因素既包括自然先天条件，也包括人为因素，但人为因素占据了主导地位。因此，我们需要采取切实可行的措施来减缓人为因素对水资源承载力的负面影响，需要综合考虑人均 GDP、每个人的生活用水量、城市水回用率、产水模数、地下水工程供水量和降水量等多个因素。通过加强水资源管理和保护、推广水资源节约和再利用技术、实行合理的水价政策等措施，可以提高水资源的承载能力，促进石羊河流域的可持续发展。

5.2 水资源承载力与影响因素关系探析

5.2.1 ALE 的原理

累积局部效应 (Accumulated Local Effects, ALE) 是一种解释机器学习模型中单个特征对预测结果的影响的方法，其核心思想是将某个特征的值域划分为若干个离散的区间，

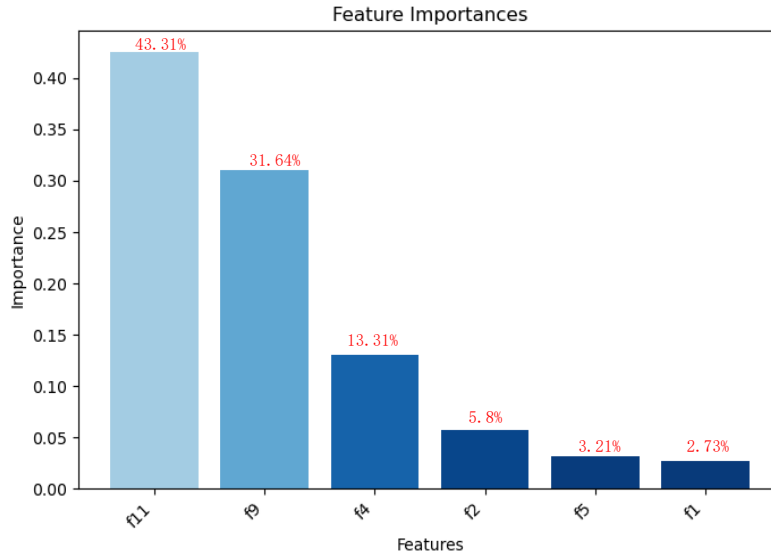


图 5-3 训练集和验证集均方误差随折数变化的趋势分析

计算在该特征的每个区间内改变该特征值所带来的平均预测效应、(Apley and Zhu 2020)。ALE 图可以用于描述目标变量和特征之间的关系是线性的、单调的，还是非线性、复杂的。特征 X_1 的 ALE 可以定义为：

$$\begin{aligned}
 f_{1,ALE}(x_1) &= \int_{x_{min,1}}^{x_1} E[f^1(X_1, X_2) | X_1 = z_1] dz_1 - \text{常量} \\
 &= \int_{x_{min,1}}^{x_1} \int P_{2|1}(x_2 | z_1) f^1(z_1 | x_2) dx_2 dz_1 - \text{常量}
 \end{aligned} \quad (5-2)$$

式中， $f^1(x_1, x_2) = \partial f(x_1, x_2) / \partial x_1$ 表示 x_1 对训练好的模型 $f()$ 的局部影响， $x_{min,1}$ 是在 X_1 的有效支撑下界附近选择的某个值； $P_{2|1}(x_2 | z_1)$ 是在 $x_1 = z_1$ 处的 X_2 的条件密度函数。

5.2.2 结果分析

ALE 曲线描述了模型在对于特征进行不断调整时，对模型输出结果的影响情况。通过将特征划分成一些等分点，并计算在每个等分点处对模型输出结果的影响，从而得到了 ALE 曲线。通过观察图 5-4，我们可以发现，流域的水资源承载力与关键因素的关系是非线性和非单调的。由于水资源承载力 (WRCC) 的分值越低，代表水资源承载力越高。因此，一般情况下，人均 GDP (f_9) 前期对 WRCC 具有负效应，当人均 GDP 增长到 2.8 万元左右的时候，人均 GDP 对 WRCC 转为正效应。这可能意味着，当经济发展到一定水平时，经济增长的正面效应开始主导，例如技术进步和资源利用效率的提高，这些因素可能带来更好的环境保护和资源管理，从而对水资源承载力产生正面影响。这一结果可

以与库兹涅茨曲线的理论相结合, 为我们提供了对经济发展与资源利用之间关系的更深入理解。人均每日生活用水量 (f_9) 对 WRCC 的影响过程与人均 GDP 类似, 即达到某一值时, 对 WRCC 的负效应转为正效应。WRCC 随城市水回用率 (f_4) 增加而非线性上升, 在城市水回用率 1.5 %–1.9 % 这个阶段, 提升速度较快。产水模 (f_2) 数对 WRCC 的影响较为复杂, 具有非线性和非单调关系。地下水工程供水量 (f_5) 对 WRCC 具有明显的负效应, 虽然地下水工程供水增加了水资源承载系统的输入, 但是地下水储量相对有限, 长期过度开采地下水会导致地下水位下降、水质恶化、地表下陷等问题, 从而影响水资源的可持续利用和水生态系统的稳定性。因此, 地下水工程对水资源承载力的负面影响比较显著, 特别是在地下水开采量过大、管理不当的情况下。WRCC 随降水量 (f_1) 的变化而波动, 但整体上降水量具有较强的正效应。ALE 分析结果表明, 不同因子对 WRCC 非线性、非单调的控制不同阶段是不同的和可变的。

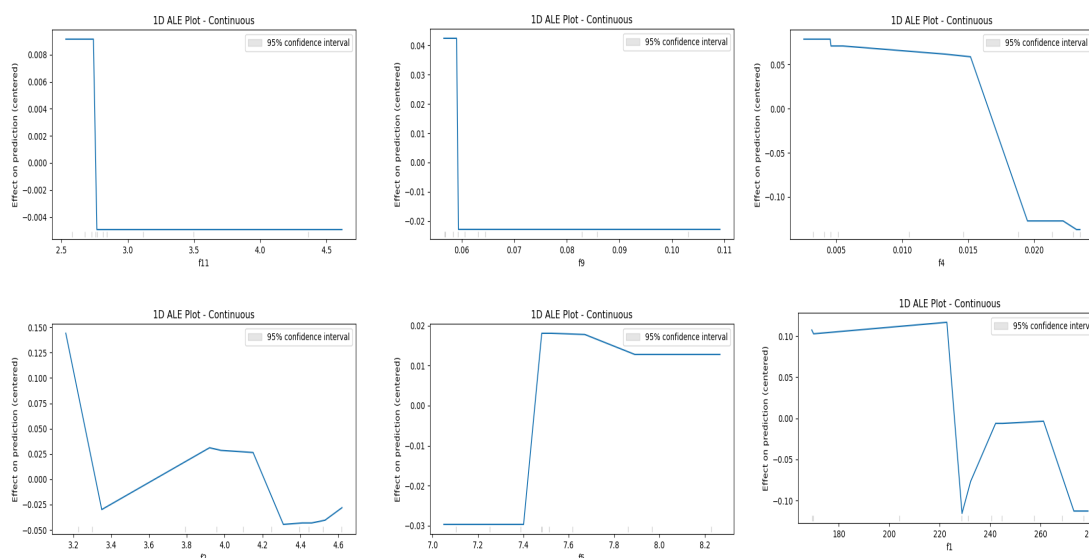


图 5-4 主导因素如何影响 WRCC

5.2.3 LIME 的原理

LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) 是一种可解释的机器学习方法, 用于解释黑盒模型的预测结果。LIME 将黑盒模型的预测结果近似为一个可解释的局部线性模型, 并在该局部模型中选择最具影响力的特征作为解释(Ribeiro et al. 2016)。最后, LIME 将所有局部模型的解释结果汇总, 生成对整个黑盒模型的解释。LIME 基于以下步骤(Molnar 2018):

- (1) 选择需要解释其黑盒预测的感兴趣实例
- (2) 扰动数据集并获取这些新数据点的黑盒预测
- (3) 根据它们与感兴趣实例的相似性，对新样本进行加权
- (4) 在带有变化的数据集上训练加权的可解释模型
- (5) 通过解释本地模型来解释预测

5.2.4 结果分析

在第三章中，我们得到了水资源承载力随时间变化的曲线。从这个曲线可以看出，水资源承载力在不同时间段内出现了波动，并在 2015 年出现了明显的转折点。然而，我们目前还不清楚这个转折点的原因是什么，也不知道为什么某些年份的水资源承载力会上升或下降。为了解决这些问题，我们采用了 LIME 可解释性方法对每个转折点进行了分析和解释。

根据图 5-5 的分析结果可知，在 2011 年至 2015 年这一时期，主导因素对 WRCC 的影响多数呈现负向作用；而在 2016 年至 2020 年这一时期，主导因素对 WRCC 的影响多数呈现正向作用。因此，可以得出结论：水资源承载力的变化受主导因素的影响，并且其受影响方向可能会从负向转变为正向，或者反之。这表明，影响水资源承载力的主导因素可能会发生变化，从而导致水资源承载力的变化趋势发生转折。因此，在水资源管理实践中，应当根据主导因素的变化及其对水资源承载力的影响趋势，及时调整管理策略和措施，以实现水资源的可持续利用和保护。

图 5-6 展示了 2015 年 WRCC 出现转折点的原因。2014 年仅有降水量 (f1) 和产水模数 (f2) 对 WRCC 具有正向作用，其余主导因素均对 WRCC 是负向作用。2015 年全部主导因素均对 WRCC 起负向作用。然而，2016 年仅有地下水工程供水量 (f5) 对 WRCC 起负向作用。此外，2014 影响 WRCC 的最主要的因素是降水量，2015 年和 2016 年影响 WRCC 的最主要因素是城市水回用率 (f4)。这表明，城市水回用率的提高有助于减轻水资源承载压力，在城市用水过程中，大量的废水排放到环境中，如果这些废水能够被再利用，将有助于缓解水资源的短缺问题。

5.3 提高水资源承载力的策略

首先，要提高石羊河流域人均 GDP 水平，但需要注意经济发展与资源利用之间的平衡。石羊河流域的经济主要依赖于农业和畜牧业，但这些活动对水资源的需求非常高。因此，政府应该采取措施促进农业和畜牧业的节水和水资源利用效率的提高，同时加强水资源的管理和监测。

年份	特征1	特征2	特征3	特征4	特征5	特征6
2011	f4	f1	f11	f2	f9	f5
2012	f4	f2	f1	f5	f7	f9
2013	f4	f1	f9	f11	f2	f5
2014	f1	f4	f9	f2	f11	f5
2015	f4	f1	f9	f2	f5	f11
2016	f4	f1	f5	f9	f11	f2
2017	f4	f1	f2	f11	f9	f5
2018	f4	f5	f1	f11	f2	f9
2019	f1	f4	f5	f2	f11	f9
2020	f4	f1	f5	f2	f11	f9

图 5-5 各年影响 WRCC 的主导因素

注意：蓝色代表该指标对 WRCC 是正向作用，红色代表该指标对 WRCC 是负向作用

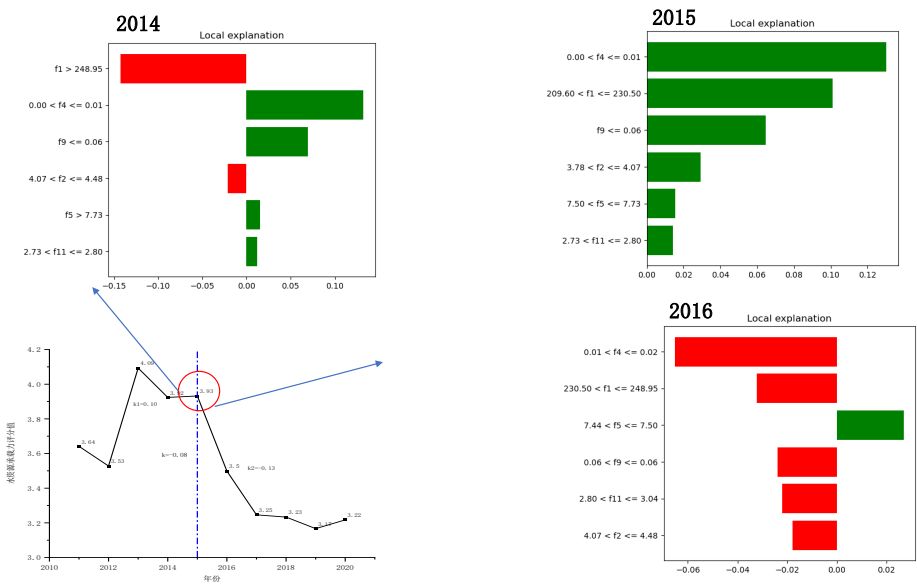


图 5-6 2015 年的 WRCC 的转折点分析

注意：绿色代表该指标对分值是促进作用，即对 WRCC 是负效应，红色代表该指标对分值是负作用，即对 WRCC 是正效应

其次，应该降低石羊河流域人均每日生活用水量，以减少对水资源的消耗，同时提高水资源利用效率。这可以通过推广节水设备和技术、加强农业灌溉的管理、控制农村

居民和城市居民的用水量等措施来实现。

第三，要加强石羊河流域城市水回用的管理和保护，特别是在城市水回用率较低的情况下。石羊河流域的城市化程度正在加快，城市用水量不断增加。因此，政府应该采取措施促进城市水回用，例如建立城市水回用设施、加强水回用水质的监管和管理等。

第四，要控制石羊河流域地下水工程供水量，避免地下水过度开采导致地下水位下降、水质恶化、地表下陷等问题，从而影响水资源的可持续利用和水生态系统的稳定性。政府可以通过加强地下水资源的监测和管理、建立水资源保护区等措施来实现。

最后，要加强石羊河流域降水量的管理和保护，以保障水资源的稳定供应。石羊河流域是中国西北地区的干旱地区，降水量非常有限。因此，政府应该采取措施保护水源地和水生态系统、减少水资源的污染和浪费等，以确保水资源的可持续利用。

5.4 本章小结

由于长期的人类活动和气候变化等因素的影响，石羊河流域的水资源状况变得非常严峻。因此，探究石羊河流域水资源承载力的驱动机制，可以为管理者提供理论支持，对于提高流域水资源承载力具有重要意义。本研究采用机器学习方法 (XGboost 模型)，对影响水资源承载力的因素进行了解释。利用特征重要性确定了影响流域水资源承载力的关键因素，并使用 ALE 和 LIME 方法对“黑箱” XGboost 模型进行了进一步解释。主要结论如下：

- (1) 利用 XGboost 探析水资源承载力的驱动因素，发现人均 GDP、生活用水量、城市水回用率、产水模数、地下水工程供水量和降水量等因素对水资源承载力影响最大。
- (2) ALE 曲线是一种常用于描绘水资源承载力 (WRCC) 与各关键因素之间的非线性和非单调关系的方法。根据该曲线的分析结果，经济发展水平、人均每日生活用水量、城市水回用率、产水模数和地下水工程供水量都对水资源承载力产生影响，且这些影响呈现出不同阶段的非线性和非单调关系。特别地，地下水工程供水量对水资源承载力的负面影响显著，而降水量对水资源承载力具有较强的正效应。
- (3) 主导因素对水资源承载力有重要影响，可能会从负向转变为正向。水资源管理应根据变化及趋势及时调整策略和措施，城市水回用率的提高有助于缓解水资源压力。

第6章 结论与展望

基于石羊河流域水资源先天禀赋差、水资源紧缺的基本背景，该地区的水资源状况受到越来越多的学者关注。本研究基于水循环和水代谢理论，创新构建了“输入-消耗-活力-调节-输出”的系统耦合理论框架模型。熵权法和网络层次分析（ANP）法被用于确定指标的综合权重，对石羊河流域在 2011-2020 年间的水资源承载力进行了全面综合评价。同时，采用网络相关分析的方法，从复杂系统的视角探究了水资源承载系统各指标因素间的交互耦合机制，这为深入理解水资源承载系统的耦合机制提供了新的方法。并使用可解释的机器学习模型定量诊断了影响石羊河流域水资源承载力提升的主要障碍因素，分析了关键因素对水资源承载力的控制，并提出了相应的对策建议。本研究的方法为深入理解水资源承载系统的耦合机制提供了新思路，对于石羊河流域的水资源科学管理、维护生态安全和促进可持续发展具有重要意义。研究成果为该区域的生态环境保护 and 高质量发展提供了理论参考和借鉴，有助于加快实现区域可持续发展目标，促进生态文明建设和人与自然和谐共生。

6.1 主要研究结论

基于水循环理论和水代谢理论的研究框架，可为水资源承载力评价提供更全面和深刻的分析指标，帮助我们更好地理解影响水资源承载力的因素。该指标体系框架基于输入、消耗、活力、调节和输出这五个子系统进行评价，每个子系统的权重与其对水资源承载力的影响程度相关。其中，人均水资源量、水域面积率、万元工业增加值用水量、水资源开发利用效率、入河污水量是评价水资源承载力时的排在前六重要指标。值得注意的是，消耗子系统的权重高于其他子系统，这意味着人类活动所带来的水资源消耗是影响水资源承载力的重要因素之一。同时，调节子系统的权重最小，表明其对水资源承载力的影响相对较小，但是不应忽略其在维持水资源循环平衡方面的重要作用。通过时间序列分析，我们还发现石羊河流域水资源承载力评分值在过去几年逐年提升，最大值出现在 2013 年，最小值出现在 2019 年，但总体呈现明显好转的趋势。这说明在石羊河流域的水资源管理中，采取了一系列有效的措施，如水资源开发利用效率的提高、污水治理的加强等，以提升该区域的水资源承载力。总之，基于水循环理论和水代谢理论的指标体系框架为水资源承载力评价提供了更加科学的方法，而时间序列分析则可为我们提供关于水资源承载力的变化趋势和评价的基础数据，为水资源管理决策提供了重要的参考。

随着水资源承载力的提高，水资源管理的复杂性也不断增加。在这个过程中，各个指标之间的相互作用呈现出动态变化的趋势，并且越来越趋向于耦合。这就意味着，水资源管理中涉及的各个方面之间的联系越来越密切，相互作用的影响也越来越显著。在

这种情况下,网络中心度整体上呈现出增加的趋势,这表明网络中的重要节点数量正在增加。同时,正相关链路数变化不大,负相关链路数却呈现出增加的趋势,这说明不同指标之间的相互作用更加复杂和微妙。为了更好地管理水资源,需要权衡网络和协同网络的关联强度、均匀度和模块化等特征。不同水资源承载力水平下,这些特征的表现也会有所不同。因此,为了更好地理解和应对不同情况下的水资源管理问题,需要深入研究这些特征的变化和影响。此外,不同系统间的指标开始产生交互作用,形成相关关联的模块。这表明,水资源管理问题已经超越了单一系统的范畴,涉及到了多个系统之间的相互作用。为了更好地管理和保护水资源,需要深入研究这些相互作用的本质和影响。

利用机器学习方法(XGboost模型)分析石羊河流域水资源承载力的驱动因素,并确定了人均GDP、生活用水量、城市水回用率、产水模数、地下水工程供水量和降水量等关键因素。通过使用ALE和LIME方法进一步解释模型结果,发现地下水工程供水量对水资源承载力产生了负面影响,而城市水回用率的提高有助于缓解水资源压力。这一研究提高了水资源承载力预测的精度和可解释性,并强调了地下水资源管理的重要性以及提高城市水回用率的必要性。未来,基于机器学习的水资源承载力研究方法将有望在水资源管理和决策中得到广泛应用。

6.2 展望

本文在水资源承载系统的研究理论和方法上有所创新,但研究仍存在指标数据获取难导致时间序列短以及方法的不确定性等客观问题,限制评价水资源承载力及其分析驱动因素的精度,将在后续研究中着重突破。

在当前的研究中,我使用了时间序列数据分析的方法来评估流域的水资源承载力。然而,在未来的研究中,我应该加入空间序列的数据,并从时空两个角度来分析流域的水资源承载力。这样可以更全面地了解流域的水资源承载能力,并且体现“空间均衡”的思想。因此,我计划在未来的研究中使用空间分析方法,进一步深入探究流域水资源承载力的时空特征,为实现水资源可持续利用提供更有价值的科学支持。

本文的研究方法是基于时间序列数据分析的,这可能对于一些网络相关分析法和可解释机器学习的方法所获得的结果的可靠性产生一定的影响,导致这些方法的优越性未能充分体现。因此,未来的研究可以考虑获取更多的序列数据,以便从更多的角度来研究流域的水资源承载力。

大多数研究都是基于现有数据对地区可持续发展进行评估。然而,在未来的研究中,可以采用情景分析和预测模型的方法,通过预测未来可能出现的各种情况,来判断地区的可持续发展性,以期地区的可持续发展提供更为有力的支持。

参考文献

- 戴文渊, 郭武, 郑志祥, 陈亦晨, 张芮, 许勇. 2022. 石羊河流域水生态安全影响因子及驱动机制研究. 干旱区研究, 39(5): 1555 ~ 1563.
- 党丽娟, 徐勇. 2015. 水资源承载力研究进展及启示. 水土保持研究, 22(3): 341 ~ 348.
- 盖美, 聂晨, 柯丽娜. 2018. 环渤海地区经济—资源—环境系统承载力及协调发展. 经济地理, (7): 163 ~ 172.
- 金菊良, 陈磊, 沈时兴, 陈梦璐, 汪明武, 童芳. 2019. 基于联系云和风险矩阵的水资源承载力评价. 人民黄河, 10.
- 康绍忠. 2009. 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. 中国水利水电出版社.
- 李岱远, 高而坤, 吴永祥, 王高旭, 万永静. 2017. 基于网络层次分析法的节水型社会综合评价. 水利水电工程学报, (2): 29 ~ 37.
- 李少朋, 赵衡, 王富强, 杨东明. 2021. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价. 水资源保护, 37(3): 20 ~ 25.
- 毛定祥. 2012. 一种最小二乘意义下主客观评价一致的组合评价方法. 中国管理科学, (5): 95 ~ 97.
- 孟凡德, 王晓燕. 2004. 北京市水资源承载力的现状及驱动力分析. 首都师范大学学报: 自然科学版, 25(3): 100 ~ 105.
- 齐文虎. 1987. 资源承载力计算的系统动力学模型. 自然资源学报, 2(1): 38 ~ 48.
- 宋晓猛, 张建云, 占车生, 刘春蓁. 2013. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展. 水利学报, 44(7): 779 ~ 790.
- 田俊峰, 王彬燕, 王士君. 2019. 东北三省城市土地利用效益评价及耦合协调关系研究. 地理科学, 39(2): 305 ~ 315.
- 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 李海红. 2017. 水资源承载力指标体系及评判准则研究. 水利学报, 48(9): 1023 ~ 1029.
- 王君诺, 孙新如, 刁艳芳. 2021. 基于可变模糊集理论的区域水资源承载力评价. 水资源开发与管理, 王文川, 杨柳, 郑野, 徐冬梅. 2021. 基于博弈论和云模型的石羊河流域水资源承载力评价研究. 水利水电技术 (中英文),
- 王友贞, 施国庆, 王德胜. 2005. 区域水资源承载力评价指标体系的研究. 自然资源学报, 20(4): 597 ~ 604.
- 夏玮静, 王宁练, 沈月. 2020. 基于流域的陕西省水资源承载力研究. 干旱区地理, 43(3): 602 ~ 611.
- 杨亚锋, 王红瑞, 赵伟静, 闫佳伟. 2021. 水资源承载力的集对势—偏联系数评价模型.
- 展亚荣, 盖美. 2018. 滨海旅游地社会-生态系统恢复力测度及协调发展研究. 地域研究与开发, 37(5): 158 ~ 164.
- 张相忠, 毛子龙, 张延青. 2008. 基于承载力模拟的水资源优化配置研究. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 40(3): 418 ~ 423.

- Alim M, Ye G H, Guan P, Huang D S, Zhou B S, Wu W. 2020. Comparison of ARIMA model and XG-Boost model for prediction of human brucellosis in mainland China: a time-series study. *BMJ open*, 10(12): e039676.
- Apley D W, Zhu J. 2020. Visualizing the effects of predictor variables in black box supervised learning models. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 82(4): 1059–1086.
- Avogadro E, Minciardi R, Paolucci M. 1997. A decisional procedure for water resources planning taking into account water quality constraints. *European Journal of Operational Research*, 102(2): 320–334.
- Babajide Mustapha I, Saeed F. 2016. Bioactive molecule prediction using extreme gradient boosting. *Molecules*, 21(8): 983.
- Barabási A L, Gulbahce N, Loscalzo J. 2011. Network medicine: a network-based approach to human disease. *Nature reviews genetics*, 12(1): 56–68.
- Billini B D. 1974. Some aspects of the relationship between population and ecology in the Dominican Republic. *Estudios sociales (Santo Domingo, Dominican Republic)*, 7(1-2): 71–82.
- Bodin Ö, Alexander S M, Baggio J, Barnes M L, Berardo R, Cumming G S, Dee L E, Fischer A P, Fischer M, Mancilla Garcia M, et al. 2019. Improving network approaches to the study of complex social–ecological interdependencies. *Nature sustainability*, 2(7): 551–559.
- Bond R. 2017. Complex networks: network healing after loss. *Nature Human Behaviour*, 1(5): 0087.
- Chen Q, Zhu M, Zhang C, Zhou Q. 2023. The driving effect of spatial-temporal difference of water resources carrying capacity in the Yellow River Basin. *Journal of Cleaner Production*, 388: 135709.
- Cordier C, Guyomard K, Stavrakakis C, Sauvade P, Coelho F, Moulin P. 2020. Culture of microalgae with ultrafiltered seawater: a feasibility study. *SciMedicine Journal*, 2(2): 56–62.
- Cui D, Chen X, Xue Y, Li R, Zeng W. 2019. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale-A case study of Kunming. *Journal of environmental management*, 234: 189–199.
- Dagasan Y, Renard P, Straubhaar J, Erten O, Topal E. 2018. Automatic parameter tuning of multiple-point statistical simulations for lateritic bauxite deposits. *Minerals*, 8(5): 220.
- Davies E G, Simonovic S P. 2011. Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. *Advances in water resources*, 34(6): 684–700.
- Emamjomehzadeh O, Kerachian R, Emami-Skardi M J, Momeni M. 2023. Combining urban metabolism and reinforcement learning concepts for sustainable water resources management: A nexus approach. *Journal of Environmental Management*, 329: 117046.
- Fan Y, Fang C, Zhang Q. 2019. Coupling coordinated development between social economy and ecological environment in Chinese provincial capital cities-assessment and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 229: 289–298.
- Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, Fischer M, Ammer C, Boch S, Boeddinghaus R S, Bonkowski M,

- Buscot F, Fiore-Donno A M, et al. 2020. Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45): 28140–28149.
- Feng L H, Zhang X C, Luo G Y. 2008. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(3): 269–278.
- Fu J, Zang C, Zhang J. 2020. Economic and resource and environmental carrying capacity trade-off analysis in the Haihe River basin in China. *Journal of Cleaner Production*, 270: 122271.
- Gibson P B, Chapman W E, Altinok A, Delle Monache L, DeFlorio M J, Waliser D E. 2021. Training machine learning models on climate model output yields skillful interpretable seasonal precipitation forecasts. *Communications Earth & Environment*, 2(1): 159.
- Grossman G M, Krueger A B. 1995. Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2): 353–377.
- Huang B, Wu B, Barry M. 2010. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *International journal of geographical information science*, 24(3): 383–401.
- Huang C, Yuan B, Li Y, Yao X. 2019. Automatic parameter tuning using bayesian optimization method. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 2090–2097.
- Hui E C, Wu Y, Deng L, Zheng B. 2015. Analysis on coupling relationship of urban scale and intensive use of land in China. *Cities*, 42: 63–69.
- Jia Z, Cai Y, Chen Y, Zeng W. 2018. Regionalization of water environmental carrying capacity for supporting the sustainable water resources management and development in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 134: 282–293.
- Jun Z, Ming L, Qiang C, Min W, Xin P. 2022. Impacts of changing conditions on the ecological environment of the Shiyang River Basin, China. *Water Supply*, 22(6): 5689–5697.
- Kaur M, Hewage K, Sadiq R. 2020. Investigating the impacts of urban densification on buried water infrastructure through DPSIR framework. *Journal of Cleaner Production*, 259: 120897.
- Ko Y Y, Chiu Y H. 2020. Empirical study of urban development evaluation indicators based on the urban metabolism concept. *Sustainability*, 12(17): 7129.
- Li K, et al. 2021a. The application of reweighted markov chains in water-sediment prediction in inland river basins—a case study of the shiyang river basin. *Sustainable Cities and Society*, 73: 103061.
- Li N, Yang H, Wang L, Huang X, Zeng C, Wu H, Ma X, Song X, Wei Y. 2016. Optimization of industry structure based on water environmental carrying capacity under uncertainty of the Huai River Basin within Shandong Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 112: 4594–4604.
- Li T, Han Y, Li Y, Lu Z, Zhao P. 2016. Urgency, development stage and coordination degree analysis to support differentiation management of water pollution emission control and economic development in the eastern coastal area of China. *Ecological Indicators*, 71: 406–415.

- Li W, Yin Y, Quan X, Zhang H. 2019. Gene expression value prediction based on XGBoost algorithm. *Frontiers in genetics*, 10: 1077.
- Li X, Wu K, Xiao D. 2004. Studies on the landscape dynamics of the Shiyang River watershed and its typical oases. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(6): 747–754.
- Li Y, Bai J, You Z, Hou J, Li W. 2021b. Future changes in the intensity and frequency of precipitation extremes over China in a warmer world: Insight from a large ensemble. *Plos one*, 16(5): e0252133.
- Li Y, Zhang J, Song Y. 2022. Comprehensive comparison and assessment of three models evaluating water resource carrying capacity in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 143: 109305.
- Li Y, Wang Y, Zhang C. 2015. Interactions among millennial-scale geomorphic processes in different parts of a drainage basin, arid China. *Physical Geography*, 36(5): 367–394.
- Liao X, Ren Y, Shen L, Shu T, He H, Wang J. 2020. A “carrier-load” perspective method for investigating regional water resource carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 269: 122043.
- Liu M, Li C, Hu Y, Sun F, Xu Y, Chen T. 2014. Combining CLUE-S and SWAT models to forecast land use change and non-point source pollution impact at a watershed scale in Liaoning Province, China. *Chinese geographical science*, 24: 540–550.
- Liu X, Wei M, Li Z, Zeng J. 2022. Multi-scenario simulation of urban growth boundaries with an ESP-FLUS model: A case study of the Min Delta region, China. *Ecological Indicators*, 135: 108538.
- Liu Y, Yang L, Jiang W. 2020. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality—A case study from Nansi Lake catchment, China. *Ecological Indicators*, 119: 106870.
- Lv H, Yang L, Zhou J, Zhang X, Wu W, Li Y, Jiang D. 2020. Water resource synergy management in response to climate change in China: From the perspective of urban metabolism. *Resources, Conservation and Recycling*, 163: 105095.
- Lv H, Yang L, Zhou J, Zhang X, Wu W, Li Y, Jiang D. 2022. Water resource synergy management in response to climate change in China: From the perspective of urban metabolism (vol 163, 105095, 2020). *RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING*, 178.
- Malthus T R. 1826. An Essay on the Principle of Population.. Vol. 2.
- Molnar C. 2018. A guide for making black box models explainable. URL: <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book>, 3.
- Oo H T, Zin W W, Kyi C C T. 2019. Assessment of future climate change projections using multiple global climate models. *Civil Engineering Journal*, 5(10): 2152–2166.
- Peng J, Tong H, Liu X, Feng Y, Zhu Y, Wu Y, Chu Z, Zheng B. 2023. Comprehensive evaluation of water resources and environmental carrying capacity based on dualistic water cycle analysis and its application in the Tuo River Basin, China. *Ecological Indicators*, 146: 109897.
- Peng T, Deng H. 2020. Comprehensive evaluation on water resource carrying capacity based on DPESBR

- framework: A case study in Guiyang, southwest China. *Journal of Cleaner Production*, 268: 122235.
- Ren C, Guo P, Li M, Li R. 2016a. An innovative method for water resources carrying capacity research – Metabolic theory of regional water resources. *Journal of Environmental Management*, 167: 139–146 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971530387X>.
- Ren C, Guo P, Li M, Li R. 2016b. An innovative method for water resources carrying capacity research– metabolic theory of regional water resources. *Journal of environmental management*, 167: 139–146.
- Ren G, Chan J C, Kubota H, Zhang Z, Li J, Zhang Y, Zhang Y, Yang Y, Ren Y, Sun X, et al. 2021. Historical and recent change in extreme climate over East Asia. *Climatic Change*, 168: 1–19.
- Renouf M, Serrao-Neumann S, Kenway S, Morgan E, Choy D L. 2017. Urban water metabolism indicators derived from a water mass balance–bridging the gap between visions and performance assessment of urban water resource management. *Water research*, 122: 669–677.
- Ribeiro M T, Singh S, Guestrin C. 2016. ” Why should i trust you?” Explaining the predictions of any classifier. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining: 1135–1144.
- Rushforth R R, Ruddell B L. 2016. The vulnerability and resilience of a city’s water footprint: The case of Flagstaff, Arizona, USA. *Water Resources Research*, 52(4): 2698–2714.
- Saavedra S, Stouffer D B, Uzzi B, Bascompte J. 2011. Strong contributors to network persistence are the most vulnerable to extinction. *Nature*, 478(7368): 233–235.
- Shang H, Fan J, Fan B, Su F. 2022. Economic effects of ecological compensation policy in Shiyang River Basin: Empirical research based on DID and RDD models. *Sustainability*, 14(5): 2999.
- Shen L, Huang Y, Huang Z, Lou Y, Ye G, Wong S W. 2018. Improved coupling analysis on the coordination between socio-economy and carbon emission. *Ecological Indicators*, 94: 357–366.
- Sindhu S, Nehra V, Luthra S. 2017. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73: 496–511.
- Su Y, Wang F y, An X l. 2016. Coupling mechanism and coupling degree measurement model of shipbuilding industry cluster. *Polish Maritime Research*, 23(s1): 78–85.
- Sun K, Xu Z. 2016. The impacts of human driving factors on grey water footprint in China using a GWR model. *Chinese Journal of Geographical Research*, 35(1): 37–48.
- Sun Q, Xue W, Zamanian K, Colin C, Duchamp-Alphonse S, Pei W. 2019. Formation and paleoenvironment of rhizoliths of Shiyang river basin, Tenggeri Desert, NW China. *Quaternary international*, 502: 246–257.
- Swain R B, Ranganathan S. 2021. Modeling interlinkages between sustainable development goals using network analysis. *World Development*, 138: 105136.
- Unesco F. 1985. Carrying capacity assessment with a pilot study of Kenya: A resource accounting methodology for sustainable development. *Paris and Rome*, 9–12.
- Walter A, Cadenhead N C R, Lee V S W, Dove C, Milley E, Elgar M A. 2012. Water as an Essential Resource:

- Orb Web Spiders Cannot Balance Their Water Budget by Prey Alone. *Ethology*, 118: 534–542.
- Wang J, Wei X, Guo Q. 2018. A three-dimensional evaluation model for regional carrying capacity of ecological environment to social economic development: Model development and a case study in China. *Ecological indicators*, 89: 348–355.
- Wang L, Liu H. 2019. Comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity using a PS-DR-DP theoretical model. *Journal of Geographical Sciences*, 29: 363–376.
- Wang Y, Kang L, Wu X, Xiao Y. 2013. Estimating the environmental Kuznets curve for ecological footprint at the global level: A spatial econometric approach. *Ecological indicators*, 34: 15–21.
- Wei W, Xie Y, Shi P, Zhou J, Li C. 2017. Spatial Temporal Analysis of Land Use Change in the Shiyang River Basin in Arid China, 1986-2015. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(4).
- Wu C, Zhou L, Jin J, Ning S, Zhang Z, Bai L. 2020. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model. *Science of the total environment*, 710: 136324.
- Wu X, Fu B, Wang S, Song S, Li Y, Xu Z, Wei Y, Liu J. 2022. Decoupling of SDGs followed by re-coupling as sustainable development progresses. *Nature Sustainability*, 5(5): 452–459.
- Yang J, Zhao J, Zhu G, Wen Y, Liu J. 2023. Spatial Coupling Characteristics and Factors Influencing Soil–Vegetation Relationships in the Lower Part of the Shiyang River Basin. *Land*, 12(3): 558.
- Yang J, Huang X. 2021. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13(8): 3907–3925.
- Yang S, Yang T. 2021. Exploration of the dynamic water resource carrying capacity of the Keriya River Basin on the southern margin of the Taklimakan Desert, China. *Regional Sustainability*, 2(1): 73–82.
- Zhang S, Fan W, Yi Y, Zhao Y, Liu J. 2017. Evaluation method for regional water cycle health based on nature-society water cycle theory. *Journal of Hydrology*, 551: 352–364.
- Zhang S, Xiang M, Yang J, Fan W, Yi Y. 2019. Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity models for water resources based on optimal water cycle theory. *Ecological indicators*, 101: 432–443.
- Zhang W, Zhu G, Qiu D, Liu Y, Sang L, Lin X, Ma H, Zhao K, Xu Y. 2023. Effects of agricultural activities on hydrochemistry in the Shiyang River Basin, China. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH*, 30(5): 12269–12282.
- Zhang Z, Lu W, Chu H, Cheng W, Zhao Y. 2014. Uncertainty analysis of hydrological model parameters based on the bootstrap method: A case study of the SWAT model applied to the Dongliao River Watershed, Jilin Province, Northeastern China. *Science China Technological Sciences*, 57: 219–229.
- Zhou D, Zhang X, Wang X. 2020. Research on coupling degree and coupling path between China's carbon emission efficiency and industrial structure upgrading. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 25149–25162.
- Zhou R, Pan Z, Jin J, Li C, Ning S. 2017. Forewarning model of regional water resources carrying capacity

- based on combination weights and entropy principles. *Entropy*, 19(11): 574.
- Zhou X, Luo R, An Q, Wang S, Lev B. 2019. Water resource environmental carrying capacity-based reward and penalty mechanism: A DEA benchmarking approach. *Journal of Cleaner Production*, 229: 1294–1306.
- Zhou X Y, Lei K, Meng W, Khu S T. 2017. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 165: 1462–1472.
- Zhu G, Liu Y, Shi P, Jia W, Zhou J, Liu Y, Ma X, Pan H, Zhang Y, Zhang Z, Sun Z, Yong L, Zhao K. 2022. Stable water isotope monitoring network of different water bodies in Shiyang River basin, a typical arid river in China. *Earth System Science Data*, 14(8): 3773–3789<https://essd.copernicus.org/articles/14/3773/2022/>.

致 谢

在此，我想向所有帮助过我、支持过我的人们致以最诚挚的感谢和敬意。

首先，我要感谢我的导师栗晓玲教授。她在我论文写作过程中发挥了不可替代的作用。她总是以非常耐心、细致和专业的态度对待我的工作，帮助我梳理论文框架、提高论文质量。她的鼓励和支持让我有信心克服挑战和困难，不断进步和成长。在她的帮助下，我不仅学到了知识和技能，也体会到了成为一名准秀研究人员所需的品质和精神。她是我学术道路上的良师益友，我会一生珍惜这份师生情谊。

我还要感谢水利与建筑工程学院的所有领导和老师。在我大学四年的学习生涯中，他们为我们提供了优质的教育和学习环境。他们的教诲和指导让我学到了知识，更重要的是培养了我的自主学习和解决问题的能力。这些能力在我论文的研究和撰写中发挥了重要的作用。同时，他们的鼓励和支持也让我更加有信心去追求自己的梦想和目标。

除此之外，我还要感谢我的同学们。在我们的学习生涯中，我们一起学习、讨论和探索。我们互相帮助、鼓励和支持，在互相学习和帮助中，我们一起进步，一起成长。这段经历是我人生中宝贵的财富。

最后，我要感谢我的家人和朋友。他们一直支持我、鼓励我，为我提供了无私的关爱和帮助。在我遇到挫折和困难的时候，他们总是给予我最温暖的鼓励和支持。没有他们，我不可能走到今天的位置，我会永远感恩他们的支持和陪伴。他们是我人生中最宝贵的财富。

总之，我要再次感谢所有帮助过我、支持过我的人们，是你们的帮助和支持让我变得更加坚强、更加自信、更加优秀。我会永远感恩他们的支持和陪伴。

贾玉博

二〇二三年六月于 杨凌