

水资源空间均衡调控理论框架与平衡机制

王红瑞¹, 杜新龙¹, 王 煜², 杨亚锋³, 王祉静⁴, 郑小康²

(1. 北京师范大学水科学研究院; 2. 黄河勘测规划设计有限公司; 3. 华北理工大学理学院; 4. 上海交通大学数学科学学院)

摘要:针对水资源空间均衡的科学调控与量化分析的核心命题,从历史演进、现实需求和系统耦合的多维视角剖析了水资源空间均衡的内涵与基本特征,解构了水资源-经济社会-生态环境复杂系统,构建了水资源空间均衡调控理论框架,从生态安全、社会公平和经济发展三位一体的视角探明了水资源对生态环境和社会经济的保障、协调、联动的多重作用机制。融合动态对称思想与统计学原理、代数几何思想,开发了时空双维水资源配置动态均衡统计模型,并量化了系统间动态适配规律并识别关键驱动因子。研究成果可为协同优化水量分配、生态保护与社会经济需求提供量化决策工具,为破解我国水资源空间错配难题提供兼具理论深度与实践可操作性的系统解决方案。

关键词:水资源;空间均衡;多维解析;调控机制;理论框架;动态对称

Theoretical framework and balance mechanism of spatial equilibrium regulation of water resources//Wang Hongrui¹, Du Xinlong¹, Wang Yu², Yang Yafeng³, Wang Zhijing⁴, Zheng Xiaokang²(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.; 3. College of Sciences, North China University of Science and Technology; 4. School of Mathematical Sciences, Shanghai Jiao Tong University)

Abstract: In response to the core proposition of scientific regulation and quantitative analysis of spatial equilibrium of water resources, this article analyzes the connotation and basic characteristics of spatial equilibrium of water resources from a multidimensional perspective of historical evolution, practical needs, and system coupling. It deconstructs the complex system of water resources-economic society-ecological environment and constructs a theoretical framework for the regulation of spatial equilibrium of water resources. From the trinity perspective of ecological security, social equity, and economic development, it explores the multiple mechanisms of water resources in safeguarding, coordinating, and linking the ecological environment and socio-economic systems. By integrating dynamic symmetry thinking with statistical principles and algebraic geometry ideas, a dynamic equilibrium statistical model for water resource allocation in both time and space dimensions is developed to quantify the dynamic adaptation rules between systems and identify key driving factors. The research results can provide a quantitative decision-making tool for collaborative optimization of water allocation, ecological protection, and socio-economic needs, offering a systematic solution that combines theoretical depth with practical operability to address the spatial mismatch of water resources in China.

Key words: water resources; spatial equilibrium; multidimensional analysis; regulation mechanism; theoretical framework; dynamic symmetry

水资源是经济社会发展的基础性和战略性资源^[1]。我国虽水资源总量居世界第六,但人均占有量仅为世界平均水平的 1/4^[2-3],被联合国列为水资源紧缺国家,呈现“南丰北缺”的分布失衡特征^[4],当前全国水资源短缺和严重短缺的地市占比分别达 23%和 22%^[5]。同时,水污染加剧了资源短缺,主要河流的监测断面中超 1/5 监测点的水质低于 GB3838—2022《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水质标准^[6],形成水质型缺水与资源型缺水叠加的严峻

局面。2014 年,“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”(以下简称“十六字”)治水思路的提出为新时代水利事业发展提供了思想武器和行动指南。其中,“空间均衡”是破解我国水资源空间分布与经济社会发展需求不适配的关键,其根本目的是通过水资源空间均衡配置促进水资源合理配置和利用,实现人口规模、产业结构、增长速度与水资源、水环境、水生态承载能力相适应,达到人口、经济与资源环境均衡发展的良好状态^[7-8]。“十六字”治水思路深刻

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3205600);国家自然科学基金项目(52279005)

作者简介:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

通信作者:王煜(1968—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利规划与水文水资源研究。E-mail:happytimes@126.com

把握我国人多水少、水资源时空分布不均的基本水情,为新时代治水兴水提供了根本遵循^[9]。深入贯彻“十六字”治水思路,特别是将水资源空间均衡思想贯穿流域规划、产业布局和生态保护全过程,是落实新发展理念的必然选择,也是实现人与自然和谐共生、建设美丽中国的内在要求^[10-11]。2023 年国务院印发了《国家水网建设规划纲要》,旨在指导当前及未来一段时期(2021—2035 年)的国家水网建设,出发点之一就是解决水资源的时空失衡问题,需要区域水平衡理论方法作为支撑。综上,水资源空间均衡思想长期存在于我国的战略、政策、制度和规划中,开展区域水资源空间均衡研究是国家的重大需求。

目前,我国有关水资源空间均衡的研究还较为薄弱,对其概念内涵的解析多停留于供需匹配的表层认知,其调控方法缺少系统性的理论框架指导,同时其分析识别方法往往受限于静态均衡假设,对要素交互的复杂系统非线性特征及空间异质性响应刻画不足。为此,本文从多维视角系统解析水资源空间均衡内涵特征,构建水资源空间均衡调控理论框架并融合动态对称思想提出量化分析方法,以期水资源空间均衡调控方法和技术的开发提供理论支撑,助力破解我国水资源时空错配难题。

1 水资源空间均衡的多维解析

水资源空间均衡作为水科学领域的核心议题,其复杂性不仅源于资源时空分布的高度异质性,更源于自然禀赋与社会需求的深度耦合,是水文循环、生态系统、社会经济多维系统间动态平衡的综合体现。因此,对水资源空间均衡丰富内涵的认识需要从历史纵深、现实约束及系统关联的多维视角进行解析,在此基础上方可结合区域特征探索高度适配性的水资源空间均衡调控路径。

1.1 历史维度

考察我国治水实践,水资源时空异质性与人类文明的互动关系始终遵循空间均衡调控的基本逻辑。受地质构造与季风气候双重作用,我国形成了“南丰北缺”的水资源本底格局^[12],这种资源禀赋的先天失衡,推动了古代社会在生产演进过程中持续探索水资源空间均衡的治理范式。

古代的人水关系集中表现在农业生产对水资源空间失衡的适应性选择上。考古证据表明,原始农业肇始于山区或高地边沿而非河谷与三角洲地带,源于先民对河谷地带不确定性的洪涝灾害的规避需求^[13-14]。如,半坡遗址(距今约 6 700 年)选址产河二级阶地规避洪水威胁,河姆渡遗址(距今约 7 000 年)在姚江河谷构建榫卯结构的干栏式建筑,

《管子》有言:“高毋近旱而水用足,下毋近水而沟防省”,原始聚落及城市的空间分布蕴含着趋利避害的空间均衡思想。同时,黄河流域与长江流域分别形成粟作、稻作农业的文明分野,也体现了水资源空间上的不均衡对文明边界的刚性约束。

历史中的自然水文演变与人类活动交互作用,持续塑造着水资源空间均衡的格局。自然演变方面,北魏及北宋时期黄河经历 9 次重大改道,致使下游洪水泛滥频繁,改变了区域的地貌和水文条件,导致华北平原城市密度锐减,此后城市中心逐渐向东南方向迁移,形成了新的城市分布格局^[15-17]。人类活动方面,随着农业社会生产力的提升,古代水资源空间均衡从被动适应转向以工程和制度协同的主动调控,宏观层面通过都江堰、灵渠等工程措施调配水量,改善水资源空间失衡状况,体现了早期“因势利导”的水资源空间协调思想^[18];微观层面表现为行政主导的配水制度创新,“凡浇田皆仰预知顷亩,依次取用”等定量配水制度展现了古人对水资源精细化空间管理的智慧。

图 1 为古代水资源空间均衡调控演进过程,可见,早期的灌溉渠系、防洪堤坝等一般水利工程多聚焦于单一流域或区域内的水资源利用^[19],而农业文明后期,京杭大运河的挖掘构建起覆盖海河、黄河、淮河、长江四大流域的全国性水运网络,从“单点治理”升级为“网络化调配”。工程建设目的不再局限于农业生产灌溉,水资源的空间分配向政治安全、经济贸易等目标倾斜,水资源系统与区域农田灌溉、城市供水、防洪排涝、经济贸易等形成紧密交织的复合系统,体现了水、地、人、产协同互作的整体观。大运河工程的实践是水资源空间均衡调控系统性、制度性、跨尺度的跃迁,标志着水资源空间均衡理念从局部优化向区域多目标协同的演进。

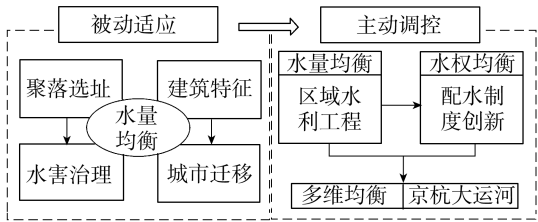


图 1 古代水资源空间均衡调控演进过程

Fig. 1 Evolution process of spatial equilibrium regulation of ancient water resources

以上古代文明的水利实践共同揭示了在农业社会技术条件下,人类通过工程拓扑结构创新与管理制度设计等实现了水资源在空间上的重新配置。历史维度下的水资源空间均衡本质是通过人工系统对自然水循环过程施加定向干预,重构水源-输水-用

水的空间关系,从而突破地理环境对社会生产的约束。

1.2 现实维度

随着工业化和城市化的加速发展,我国面临的水资源问题更加复杂。一方面,由于区域自然资源禀赋不足和高强度的开发利用,水资源供需矛盾不断加剧,全国 70%以上的城市群、90%以上的能源基地、60%以上的粮食主产区位于水资源紧缺地区,其中大部分地区水资源已超载或临界超载,同时用水方式粗放、浪费问题严重,工业用水重复利用率、农业灌溉水利利用系数等指标远低于国际先进水平,区域水安全问题不容忽视;另一方面,工业废水、生活污水和农业面源污染构成三大主要污染源,工业废水排放量占全国污水总量的 40%以上,部分企业违规排放的重金属、有机物污染物直接威胁流域生态安全,城市生活污水年排放量突破 200 亿 t,农业面源污染更为隐蔽,每年约 1 000 万 t 化肥农药通过径流进入水体,致使全国 30%的耕地周边水域出现富营养化。

我国水资源短缺、水污染加剧、水生态退化的现实困境迫切要求治水思路从单一的工程治理转向更为系统的综合规划。“十六字”治水思路为新时代治水工作提供了科学行动指南^[9],统筹高质量发展和高水平安全,聚焦水灾害、水资源、水生态、水环境 4 大水问题,提升水旱灾害防御、水资源节约集约利用、水资源优化配置、江河湖泊生态保护治理 4 种能力,确保防洪、供水、粮食、生态 4 个安全^[20]。治水要素的系统整合本质上体现了空间均衡的目标内

核,也是对水资源空间失衡问题深度矫正的实现路径。

“空间均衡”是“十六字”治水思路的重要内容,是可持续发展观在空间层面上的落实。水资源空间均衡是水资源自然分布与水资源开发利用之间空间关系冲突的重要测量标准。Flinn 等^[21]于 1970 年首次将空间均衡概念引入水资源利用,但当时水资源不是制约区域发展的关键因素。随着用水需求的加剧,流域有限的水资源量与区域快速发展的经济之间的矛盾日益尖锐,对水资源空间均衡的研究开始引起越来越多的关注。表 1 解析梳理了水资源空间均衡理念,可见水资源空间均衡理念基于流域水循环形成的可利用水资源量与区域用水日益尖锐的矛盾提出,其研究重点经历了从内涵认知到评价方法的过程,现已取得了一系列成果,为区域水资源优化配置提供了有效指导,然而其创新内涵与评价模式仍在不断发展之中。水资源空间均衡的多元维度及其与水资源承载力、“四水四定”及国土空间规划之间的内在关联机制,变化环境下水资源空间均衡多维系统调控技术与再平衡策略仍存在许多值得探索的空间。

1.3 系统维度

在当前水利高质量发展背景下,空间均衡既是分析工具,也是价值目标。水资源空间均衡绝非追求机械的、形而上学的平均主义,其核心在于通过科学手段调整水的空间布局,辩证地协调水资源自然禀赋的客观差异性与人类生存发展需求的主观能动性之间的矛盾,使其分布更适应发展需求。这种平

表 1 水资源空间均衡理念解析

Table 1 Analysis of concept of spatial equilibrium of water resources

年份	文献	水资源空间均衡理念解析
2016	王浩等 ^[22]	以水资源荷载平衡为目标进行面向水资源系统空间均衡的优化协同配置,促进区域经济社会发展规模与水资源承载力相适应
2017	左其享 ^[23]	按照人口、资源、环境相均衡,经济、社会、生态效益相统一的原则,调控水资源空间分配格局,促进水资源配置与经济社会的空间协调发展
2018	唐克旺 ^[24]	按照水资源条件和承载能力,确定各地区的发展规模和产业结构,适度进行水网络建设以解决空间上的水土要素不匹配问题
2019	郦建强等 ^[25-26]	通过水资源的高效利用、适度开发、优化配置、合理布局,实现人口规模、产业结构、增长速度与水资源、水生态、水环境承载能力相适应,把握人口、经济、资源环境的平衡点推动发展
2019	张细兵 ^[27]	以水定需,即各地方根据自身的水资源承载能力来确定经济社会发展的规模,包括以水定城、以水定地、以水定人、以水定产
2019	金菊良等 ^[4]	是水资源与经济社会、生态环境系统在时空上协调匹配的双重供需平衡过程,通过供需双向调节实现三系统适配发展,并随技术进步从低水平向高水平螺旋上升,最终达成共同均衡的理想状态
2020	王建华等 ^[28]	以水资源承载力为刚性约束,通过产业集约调优降低用水压力和水网多源扩容增供提升支撑能力,最终实现荷载均衡
2022	郭旭宁等 ^[29]	坚持以水定需、量水而行、因水制宜,通过水资源的高效利用、适度开发、优化配置、合理布局,实现人口规模、产业结构、增长速度与水资源、水生态、水环境承载能力相适应
2022	Bian 等 ^[30]	在一定区域内克服水资源对区域可持续发展的空间限制的一种重要手段,指的是通过合理调整以确保区域各种生产、生活、经济和社会需求的最大程度的理想状态和生态活动
2024	魏豪杉等 ^[31-34]	“四水四定”是空间均衡的调控工具,通过约束发展规模与优化用水结构,驱动水资源在区域间趋向均衡状态

衡智慧的探索贯穿古今,从大禹治水的“疏堵结合”到当代南水北调重塑我国水网,水资源空间均衡的当代内涵已突破传统“以量补缺”的工程思维,跃升为在复杂系统视角下,对水资源、水环境、水生态、水灾害等多系统空间关系的辩证性重构。表 2 为复杂系统视角下水资源空间均衡内涵解析。

图 2 为水资源空间均衡内涵示意图。可见,水资源空间均衡的深层必要性根植于现代水问题固有的、高度复杂的空间辩证特性,风险在跨域转移中不断加剧,环境在空间分割中持续退化,生态因空间割裂走向衰退,各维度矛盾在空间上的叠加催生出错综复杂的系统性风险,已超出单一维度或局部治理的解决能力。因此,当代水资源空间均衡的目标应在于通过空间规划实现多目标协同,即划定生态空

间保障系统稳定性,预留弹性空间应对不确定性,优化生产空间提升资源效率,最终实现水资源、经济社会、生态环境在空间上的良性耦合。

2 水资源空间均衡调控理论框架构建

在当前我国水利事业乃至整个经济社会高质量发展的大背景下,如何通过主动调控,实现水资源空间均衡至关重要。水资源空间均衡涉及自然、社会、经济等方面,其调控系统是一个复杂而精细的体系,有必要单独形成一个理论体系来指导区域水资源的空间布局与规划。

2.1 调控理论

图 3 为水资源空间均衡调控理论框架。水资源空间均衡调控应以水资源为核心要素,优化水资源

表 2 复杂系统视角下水资源空间均衡内涵解析

Table 2 Connotation analysis of spatial equilibrium of water resources from complex system perspective				
系统	核心矛盾 (辩证关系)	空间失衡表现	均衡调控路径	系统关联性
水资源	自然流动随机性与人类需求稳定性	区域水量丰枯极化	构建替代性流动网络	通过水网重构联动经济布局
	资源分布锁定与经济扩散需求	水-产空间错配	多维价值补偿机制	
水环境	污染转移便捷性与治理责任固化	治理权责-污染迁移空间错配	“源-流-汇”全空间分层治理	污染消纳能力决定水资源可利用量
水生态	工程切割改造与生态空间依存性	生境破碎化	人工恢复生态系统自组织能力	生态完整性保障水资源可持续性
		生物多样性衰减		
水灾害	风险局部转移与系统脆弱性累积	洪水压力下泄	建立基于系统整体韧性的风险共担机制	灾害风险制约水资源开发强度
		地下水超采代际失衡		

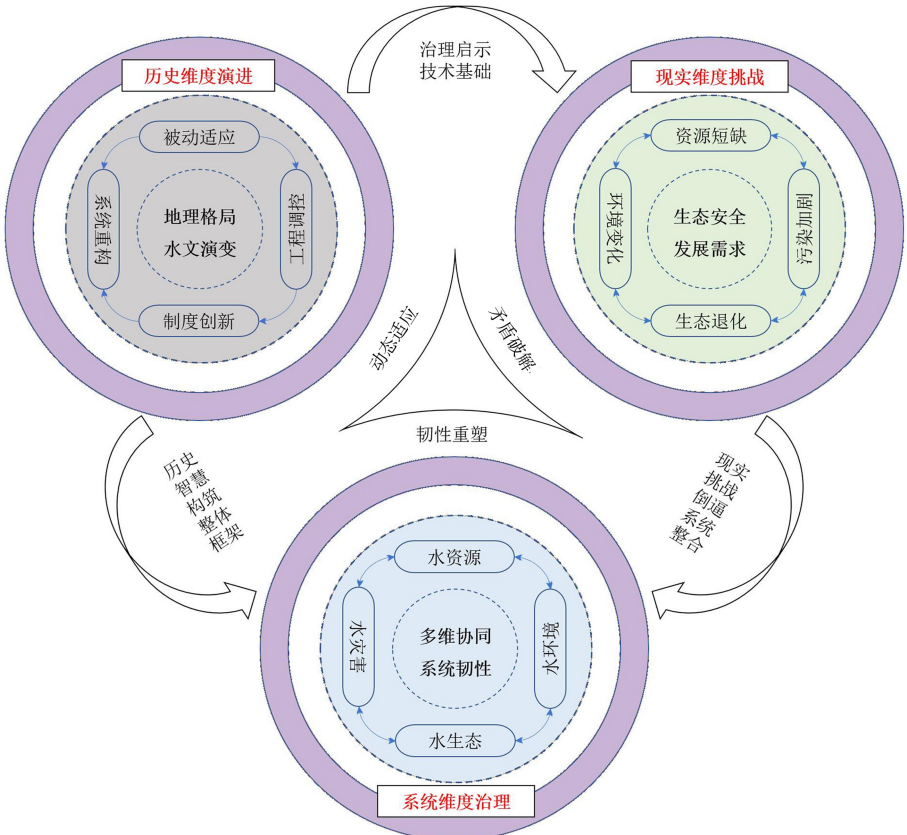


图 2 水资源空间均衡内涵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of connotation of spatial equilibrium of water resources

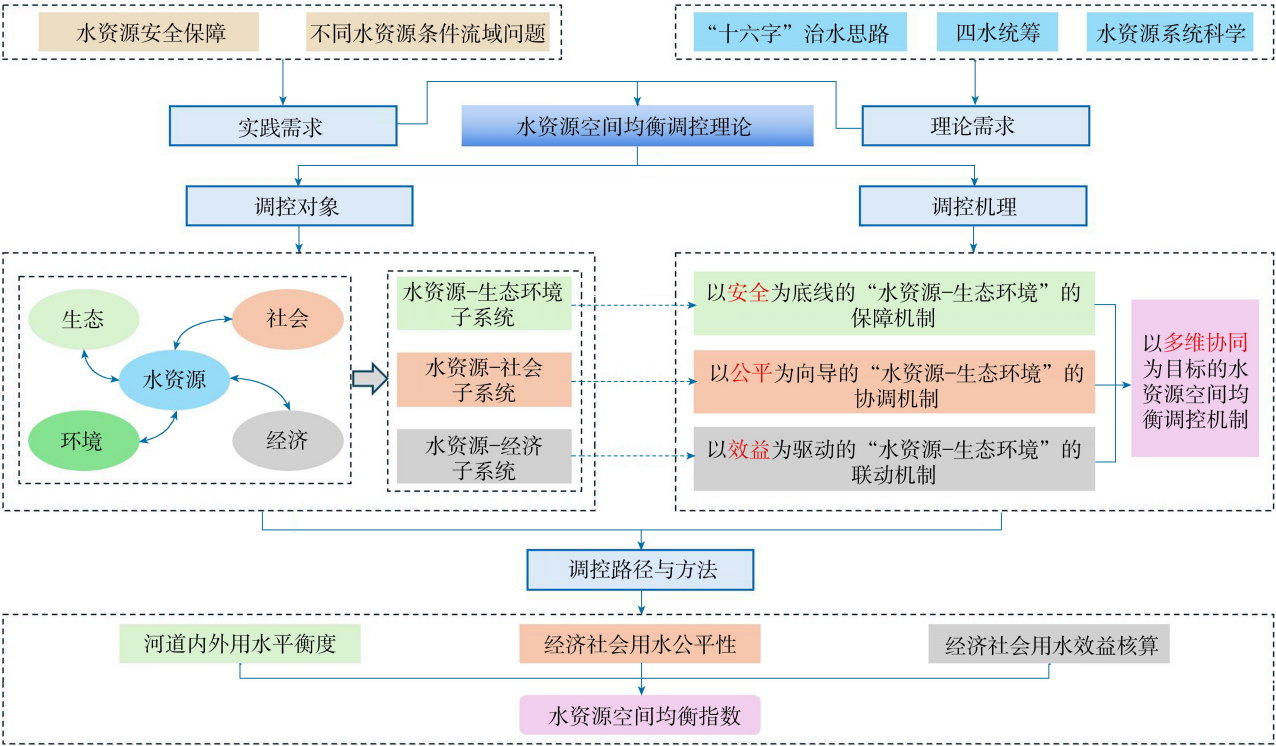


图3 水资源空间均衡调控理论框架

Fig. 3 Theoretical framework for spatial equilibrium regulation of water resources

与生态环境、经济社会发展之间的动态平衡机制。在“十六字”治水思路指导下,以“节水优先”为根基,合理利用有限的水资源,应将经济社会用水控制在水资源和生态环境承载力范围内,同时提高水资源利用效率,建立用水效率刚性约束下的要素配置机制。以“空间均衡”为主干,需要从水、城、地、人、产多维度协同的视角,突破传统地理空间平衡模式,依据区域功能定位建立差异化水资源配置机制,通过空间均衡度指数刻画水资源与经济社会要素的匹配关系。系统治理原则基于系统工程理论与生态整体论,构建自然-社会二元水循环耦合机制,追求系统各要素之间的稳态平衡。切实推进两手发力,从政府和市场的双规视角,通过宏观调控和市场规律促进水资源、生态环境、经济社会的和谐共处。

2.2 调控对象

在水资源空间均衡调控理论总体框架下,考虑水资源、水环境、水生态和水灾害“四水统筹”,将调控对象概括为3个子系统(图4),即水资源-生态环境子系统、水资源-社会子系统和水资源-经济子系统,进而探索水资源调控机制和主要路径。

a. 水资源-生态环境子系统。水资源与生态环境的相互作用是维系自然系统稳定性的基础。从自然水循环视角看,水资源不仅是生态系统的物质载体,更是能量流动与生物地球化学循环的驱动要素。从空间均衡视角出发,在江河源头区、重要湿地、生

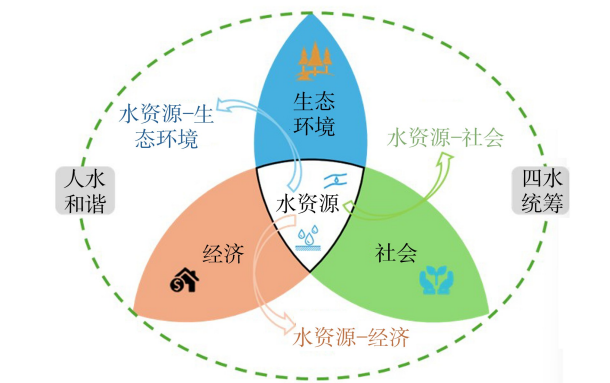


图4 水资源空间均衡调控对象

Fig. 4 Regulation objects of spatial equilibrium of water resources

物多样性热点区域实施最严格的水资源管控,通过生态需水优先配置保障核心生态功能;在生态脆弱区则需构建适应性管理机制,采用动态调整的生态补水策略应对气候变化带来的不确定性。同时,应重视“蓝绿空间”的网络化构建,通过水系廊道连接分散的生态斑块,形成具有层级结构的生态安全格局。这种空间布局不仅提升了生态系统的整体稳定性,也为水资源优化配置提供了自然解决方案。

b. 水资源-社会子系统。水资源-社会子系统的水资源问题本质上是人类需求与资源供给的动态平衡问题。随着城镇化进程加快,生活用水需求呈现刚性增长与质量提升的双重特征,这对供水安全保障提出了更高要求。从空间均衡视角出发,需重

点解决人口分布与水资源承载力的空间错配,通过产业布局调整引导人口有序流动;应对公共服务供给的区域失衡,建立跨行政区的水资源调配补偿机制;强调代际公平,在当代用水需求与后代发展权利之间建立平衡点。为此,需要构建考虑社会包容性、文化适应性、制度有效性的综合评价体系,将社会系统的复杂性转化为水资源配置的决策参数。

c. 水资源-经济子系统。水资源-经济子系统运行的核心在于破解水资源约束与经济发展的互馈关系。产业结构与用水效率的空间分异特征显著,需要建立“以水定产”的刚性约束机制。从空间均衡视角出发,需做好经济集聚区与水源地的利益平衡,通过横向生态补偿实现发展权共享;实体水与虚拟水进行空间置换,构建基于比较优势的产业协作网络;近期效益与长期可持续性的权衡,建立包含绿色GDP核算的政绩考核体系。基于多维度调控思维,将水资源约束转化为经济转型升级的内生动力。

2.3 调控机制

在确定水资源空间均衡调控对象后,进一步明晰各子系统的调控机制是确保有效运行调控的关键,进而协调各子系统之间的关系,使各部分协同工作,以实现水资源空间均衡的最终目标。

2.3.1 以安全为底线的水资源-生态环境保障机制

水资源-生态环境子系统的保障机制需以生态安全为底线,通过统筹水资源、水环境、水生态和水灾害的协同治理,构建多尺度、多要素联动的动态平衡体系(图5)。其核心在于突破传统单要素治理模式,将河道内外用水需求纳入统一框架,建立基于生态水文过程的阈值管控机制。从空间维度看,需识别流域上下游、左右岸的生态功能梯度差异,划定生态敏感区与脆弱区的保护优先级,通过生态流量保障、河湖连通性修复等措施维持关键节点的水文循环完整性。

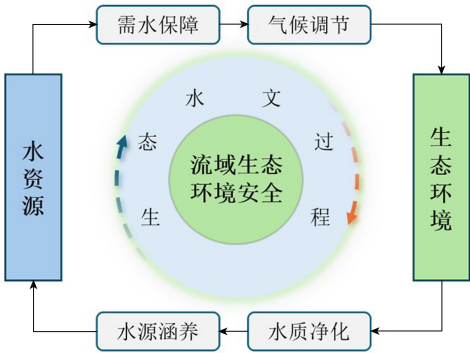


图5 水资源-生态环境保障机制

Fig. 5 Water resources-ecological environment guarantee mechanism

为实现“四水统筹”的目标,需构建风险识别-阈

值管控-适应性修复的闭环调控链。通过生态需水动态核算模型,量化不同生态保护目标的用水阈值,并将其作为水资源配置的刚性约束。在流域尺度建立跨行政区生态补偿机制,通过横向财政转移支付、水权交易等方式平衡上下游保护成本与收益,强化水灾害与生态退化的协同防控,在极端气候变化情景下构建弹性调控策略,通过自然力与人工调控的有机结合,实现生态保护与水资源利用的空间均衡。

2.3.2 以公平为导向的水资源-社会稳定协调机制

水资源-社会子系统的协调机制需以社会公平为刚性约束,重点破解城乡、区域、群体间的用水权益失衡问题(图6)。其理论内核是通过空间再平衡实现基本水权保障与差异化服务的统一。在城乡维度,需构建基础设施均等化-服务标准梯度化的复合模式,通过城乡供水管网互联互通保障饮用水安全底线,同时根据城市群、小城镇、农村社区的功能定位制定差异化的水质提升路径。在用水群体维度,需建立特殊用水权益保障清单,对低收入群体、原住民社区、生态移民等实施水价补贴或定量免费配额,防止水资源市场化配置导致的社会排斥。

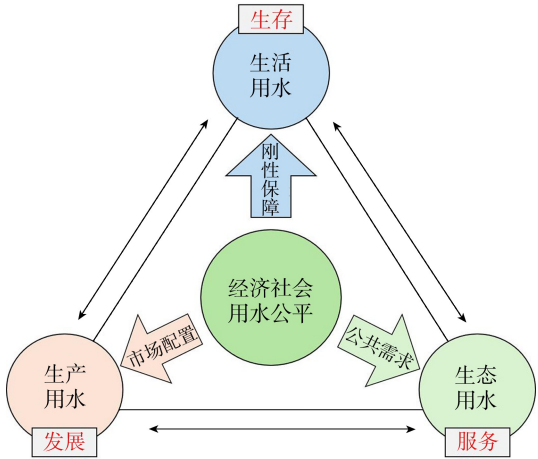


图6 水资源-社会稳定协调机制

Fig. 6 Water resources-social stability coordination mechanism

空间公平的实现需要多维度的制度创新。通过水足迹核算揭示虚拟水资源流动的不平等性,构建生存权-发展权-环境权分级保障体系,将人均最低生活用水量作为基本人权刚性保障,工业生产用水通过市场化配置体现效率原则,生态景观用水则纳入公共服务范畴。建立参与式水资源治理框架,通过社区水理事会、流域听证会等机制,将原住民传统知识、弱势群体诉求融入决策过程。在跨区域调配工程中,需设计受益区与水源地的长效利益共享机制。

2.3.3 以效益为驱动的水资源-经济发展联动机制

水资源-经济子系统的联动机制需以综合效益

最大化为导向,通过水要素的优化配置驱动经济转型升级(图 7)。其理论突破在于将水资源约束转化为全要素生产率提升的内生变量。在空间层面,依据水资源承载力划定禁止开发区、限制开发区和优化开发区。在缺水地区严格限制高耗水产业扩张,引导电子制造、数据中心等低耗水高附加值产业集聚;在丰水地区则通过水价杠杆淘汰落后产能,培育水资源密集型绿色产业。同时,推动虚拟水战略与实体水配置的协同优化,通过农产品贸易结构调整、工业产品水足迹认证等途径,实现虚拟水资源的空间置换。



图 7 水资源-经济发展联动机制

Fig. 7 Water resources-economic development linkage mechanism

市场机制在该子系统中发挥核心作用。需完善水权交易二级市场,允许农业节水指标向工业领域转让,建立跨行业、跨区域的水银行制度。创新水价形成机制,将生态修复成本、水资源稀缺性溢价纳入定价体系,通过阶梯水价、季节浮动水价等工具调节供需关系。在效益评估层面,需构建考虑经济效率、社会效益、生态效益的多维指标体系,并实时关注水资源配置的边际效益变化。

2.3.4 以多维协同为目标的水资源空间均衡调控机制

保障、协调、联动三大机制紧密关联,安全保障

是公平协调和效益驱动的前提,公平协调为效益驱动提供社会接受度,效益驱动产生的经济收益反哺安全保障和促进更高水平的公平,共同支撑水资源空间的可持续均衡发展。以多维协同为目标的水资源空间均衡调控机制(图 8)是水资源空间均衡调控理论框架的总体目标,需通过协同生态安全、社会稳定、经济发展三大子机制,构建多目标协同的系统工程框架。首先,以河流生态安全为底线,划定水资源开发利用红线,确保生态需水不被挤占;其次,以社会公平为导向,通过水权分配与利益补偿机制协调区域矛盾;最后,以经济高效为驱动,推动水资源从低效部门向高效部门流动。在此基础上,需建立政府-市场-公众三元共治新模式,政府通过法规与规划主导顶层设计,市场通过水价、水权交易优化资源配置,公众通过参与式管理提升节水意识。这一机制的核心在于动态平衡保护与发展的关系,通过弹性调控适应气候变化与人类活动的双重不确定性。

多维协同目标的实现需要 3 个子系统的耦合共振,其本质是构建自然承载力-社会公平性-经济可持续性的三维均衡体系。该机制遵循“四水统筹”的系统规律,通过多尺度反馈调节实现整体最优。在时间维度,建立代际公平调节器,通过水生态账户、战略储备水源等工具平衡当代用水与后代权益;在空间维度,设计核心保护区-弹性缓冲带-协调发展区的圈层结构,依据生态红线、水资源承载力阈值动态调整开发强度。

在构建水资源空间均衡总体调控机制时,需要充分考虑人类需求与水资源承载力的关系。通过水资源规划和管理,确保水资源利用在合理范围内,避免对生态环境造成不可逆的损害。同时,还需要通

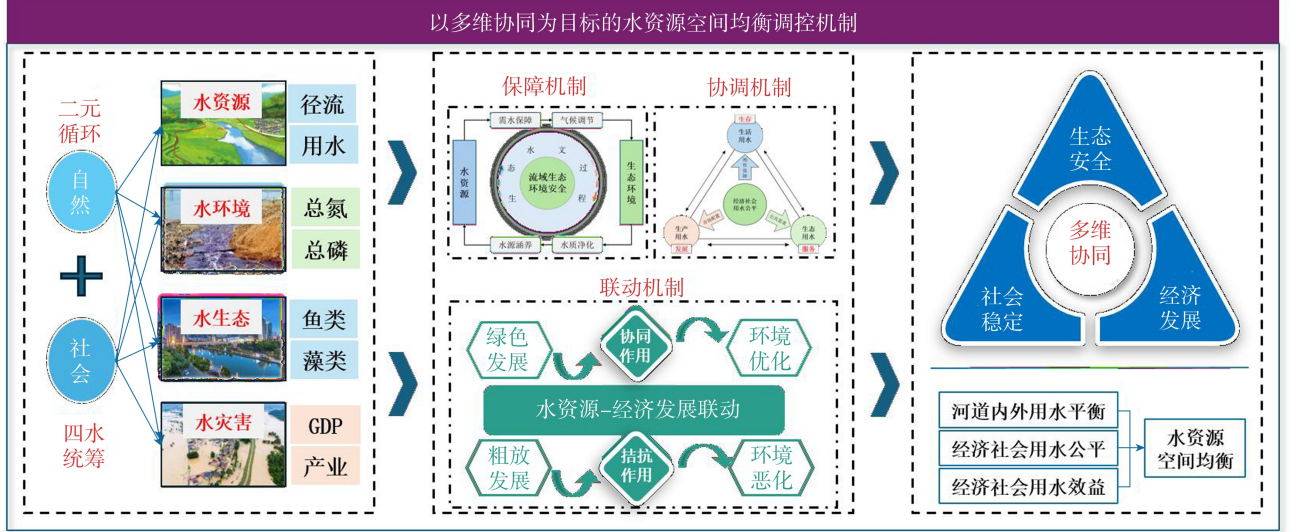


图 8 水资源空间均衡调控机制

Fig. 8 Spatial equilibrium regulation mechanism of water resources

过水资源价格机制等手段,调节水资源供需关系,引导水资源的高效利用和节约使用。最终,实现人类与水资源之间的和谐共生,为经济社会发展和生态环境保护提供有力的水资源保障。

3 时空动态平衡机制与方法体系

面对水资源-经济社会-生态环境复杂系统的多维耦合特征,水资源空间均衡研究需构建结构化的概念模型解释复杂系统的演化机理,从而达到统一认识和简化问题的效果。水资源物理平衡遵循物质守恒定律,闭合系统的水资源总量保持不变。在自然界中,表现为全球或某一区域的水量平衡,即降水、蒸发、径流、下渗等水文过程之间的水量收支平衡,是水资源空间均衡的动量与能量基础。对称是均衡的结构性基础,动态对称思想是指在不同时间和空间尺度上,系统内各要素之间维持一种随情境变化而动态调整的平衡或对称关系。这一思想强调平衡并非静态不变,而是能够在外部条件(如社会经济发展、环境演变)作用下灵活适应。在水资源空间均衡的语境中,动态对称思想可用于解析水资源、生态环境、社会经济三大系统之间的互动与协调机制。复杂系统的对称性既是均衡的“稳定器”,也是适应变化的“调节阀”。

3.1 平衡机制

水资源物理平衡通过建立水量平衡方程进行分析和计算,以了解水资源在不同环节之间的转化和分配情况,为水资源的合理开发、利用和管理提供科学依据。对于水质平衡,要考虑污染物的输入、输出和转化等过程,通过控制污染源、加强污水处理等措施来维持水质的稳定和良好状态。

水资源空间均衡的实现需要以水资源物理平衡为基础,只有了解水资源在物理层面的平衡关系,才能更好地确定水资源空间均衡的阈值函数或者方程,进行空间上的调配和均衡。同时,水资源空间均衡的措施也会对物理平衡产生影响,如跨流域调水会改变调水区和受水区的水量平衡关系。

3.1.1 钟摆模型

社会经济和文化的发展一般经历发展和起飞两个阶段,随后进入加速阶段再趋向稳定,达到另外一种平衡,其发展轨迹往往伴随显著的生态代价^[35]。在启动与加速时期,经济系统对资源的急剧消耗导致环境质量持续下滑,形成类似钟摆自高位向低位加速下行的态势^[36],如图 9 中的 1、2、3 阶段,水资源空间均衡失衡,矛盾随之凸显。当社会发展进入高水平稳定期后,公众环境认知深度提升,生态危机意识普遍增强,加之系统性环保措施逐步落地,区域

生态环境呈现改善态势,类似钟摆自轨迹最低点开始回升,如图 9 中的 3、4、5 阶段,此时通过跨区域调配、虚拟水贸易与节水技术应用等机制,水资源空间均衡状态得到有效调节。

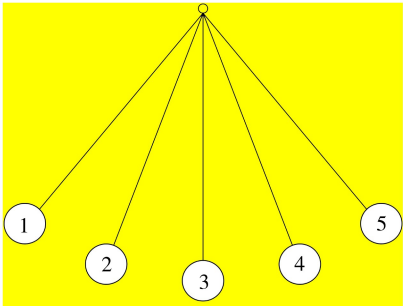


图 9 水资源空间均衡钟摆模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of pendulum model for spatial equilibrium of water resources

水资源管理的重点在社会经济繁荣和生态环境保护之间来回转变,这种钟摆现象体现了经济生产力和环境恢复力之间的竞争机制和动态平衡,而人类活动在其中发挥了主要的调节作用。理想的水资源空间均衡不是静态分配,而是通过弹性基础设施和动态响应机制维持社会经济-水资源-生态环境的钟摆在受控范围内振荡。

3.1.2 杠杆模型

杠杆原理揭示了作用在杠杆上的力与力臂之间的平衡关系,与一定水资源承载力条件下流域内经济社会和生态环境此消彼长的发展过程十分相似,由此可构建水资源空间均衡的杠杆模型(图 10)。

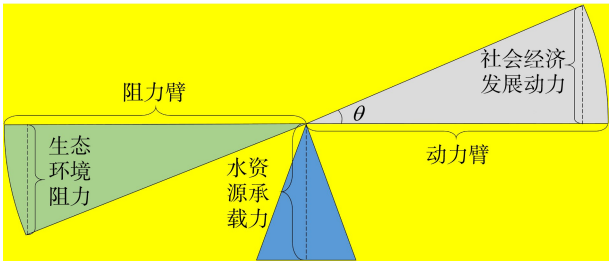


图 10 水资源空间均衡杠杆模型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of leverage model for spatial equilibrium of water resources

水资源空间均衡杠杆模型由 3 个基本模块构成:代表水资源子系统的支点模块、代表社会经济子系统的动力模块、代表生态环境子系统的阻力模块。在水资源空间均衡中,水资源条件是决定社会经济和生态承载力的支点,将水资源利用的平衡比作杠杆的两端:左边代表生态环境,阻力臂表示环境的脆弱性,决定了生态环境在遭遇水资源开发压力时的抵抗力;右边代表经济社会,动力臂表示水资源的利用效率,反映了经济社会发展减轻其规模扩张对水

资源和生态的负面影响。图中 θ 表示社会经济用水对生态环境用水的挤占程度。变化环境下,水资源的空间均衡需要平衡好生态和经济,形成相辅相成、共生共赢的动态关系,使系统的杠杆在安全幅度内持续摆动,实现可持续的水资源利用。

3.2 基于动态对称思想的方法体系

3.2.1 代数几何与动态对称

在水资源动态均衡配置研究中,代数几何理论提供了一种新颖的分析框架^[37]。传统水资源配置优化通常只求解特定时空点下的静态最优解,而从代数几何视角看,可以将整个水资源空间优化配置问题表示为代数簇:

$$V = \{X_i \in \mathbf{R}, i = 1, 2, \cdots, n \mid F(x_1, x_2, \cdots, x_n, t, s) = 0\} \quad (1)$$

式中: V 为代数簇; x_i 为区域 i 的水资源分配量; n 为区域数; $F(\cdot)$ 为均衡条件函数; t, s 分别为时间和空间参数。这意味着水资源配置的解不再是单一点,而是一个可以随着时间和空间变化的动态均衡轨迹。在这个代数簇中,任意点都代表一个可行的动态均衡配置,系统可以沿着这个轨迹演化,同时保持系统内水资源均衡状态。

进一步地,时间与空间上的对称性可通过群论进行精确描述。定义变换群 G , 对于群中任意变换 $g \in G$, 均有:

$$F(g \cdot x, t, s) = F(x, t, s) \quad (2)$$

这表示在某些变换下(如区域置换、时间平移等),均衡方程保持不变,最优水资源配置方案具有不变性。例如,若区域 i 和区域 j 在地理条件、用水需求等特征上相似,则在最优配置中可能有 $x_i \approx x_j$, 这种对称性可简化决策空间。利用群作用理论,可以通过识别不变轨道 $G \cdot x = \{g \cdot x \mid g \in G\}$, 将原本高维的决策问题进行降维处理,有效提高水资源配置的决策效率和合理性。

3.2.2 系统内时间与空间动态分析及统计建模

水资源的空间分布与调度是复杂的动态过程,受水量供给、污染状况、用水需求等多重因素驱动。其空间均衡的实现依赖于子系统间联系的科学量化分析与水资源优化配置。为此,通过将动态对称思想融入水资源空间均衡调控,可以揭示子系统间在时空维度上的对称水资源配置调整规律,即在不同区域和时间段内实现水资源配置的动态平衡。为量化水资源配置的动态均衡规律,强调动态效应在水资源空间均衡中的作用,可以采用考虑时间与空间维度的统计模型进行模拟。

3.2.2.1 时间动态效应分析

水资源系统中各要素间通常存在滞后影响与长

期均衡趋势,如当年降水量减少对次年农业用水量、地下水开采量的连锁影响、节水政策实施后工业用水效率的滞后提升等。通过向量自回归(VAR)模型分析水资源配置中的多变量时间序列数据,可以更好地刻画这些系统变量的特征^[38]。VAR模型通过考察变量间的相互影响及滞后效应,揭示子系统间的动态依赖关系。该模型适用于分析水资源配置的长期均衡趋势与短期波动特征,为动态对称调整提供时间维度的量化依据。模型表达式为:

$$X_t = c + \Phi_1 X_{t-1} + \Phi_2 X_{t-2} + \cdots + \Phi_p X_{t-p} + \epsilon_t \quad (3)$$

式中: X_t 为与时间 t 有关的研究变量; c 为常数向量; $\Phi_i (i=1, 2, \cdots, p)$ 为系数矩阵; ϵ_t 为误差项,通常假设为白噪声。式(3)中,水资源系统配置过程中的滞后现象可以通过线性效应对当前时间下的结果产生影响,进而实现时间层面上的动态分析。

3.2.2.2 空间动态效应分析

区域间水资源利用存在交互影响机制,如上游过度取水可能导致下游生态流量不足、跨省界流域的水污染事件会通过水系网络扩散形成空间连锁效应等。通过构建空间自回归(SAR)模型可以探究水资源配置的空间依赖性^[39-40]。SAR模型通过纳入空间滞后项,量化地理邻近区域间水资源变量与配置体系的相互影响,分析水资源空间下数据的异质性与自相关性。该模型能够有效捕捉在同一水资源配置框架下空间层面的对称关系,进而识别水资源分布的空间均衡状态。模型表达式为:

$$y = \rho w_1 y + \beta_x + \epsilon_1 \quad (4)$$

其中 $\epsilon_1 = \lambda w_2 \epsilon_2 + \mu$
式中: y 为研究变量; ρ 为空间自回归系数; w_1 为空间权重; β_x 为非空间因素 x 的影响项; ϵ_1 为误差项,其中包含不能被观测到的生态变量,因此假设误差项之间具有空间相关性; λ 为空间误差系数; w_2 为误差项的空间权重; ϵ_2 为除 ϵ_1 之外的随机误差项; μ 为独立的随机误差。

3.2.2.3 多维动态因子提取

考虑到生态机制通常十分复杂,水资源系统中通常存在多维指标,本文进一步引入动态因子模型(DFM),从复杂的多源数据中提取关键驱动因子^[41],揭示水资源空间系统核心因素,简化对称性评估。DFM不仅纳入了时间滞后效应,还通过贝叶斯方法将参数估计推广为随机变量的后验估计,通过先验分布和后验推断实现不确定性量化,增强模型对动态均衡特征的刻画能力。模型表达式为:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 F_{1t} + \beta_2 F_{2t} + \cdots + \beta_k F_{kt} + \epsilon_t \quad (5)$$

式中: y_t 为 t 时刻观测到的变量; F_{it} 为第 i 个随机因子在 t 时刻的得分; β_i 为第 i 个随机因子的系数; ϵ_t

为随机误差项。状态的科学评估提供参考。

3.3 不同系统间动态均衡的差异分析与统计检验

在水资源动态均衡配置研究中,评估不同时间和空间尺度下子系统间的水资源利用效率与环境影响的平衡状态至关重要^[42-43]。建议采用不同统计方法比较各子系统间的动态均衡特征,判断水资源配置是否达到预期对称状态。

a. 非参数分布比较。用 Kruskal-Wallis 检验可以分析不同时间段或空间区域间在生态系统内水资源利用模式、水质指标或环境影响的分布差异。该方法适用于非正态分布数据,能够有效检测多组样本间的显著性差异,有助于识别出系统内的失衡区域。

b. 多重比较校正。当 Kruskal-Wallis 检验显示子系统对应的组间存在显著差异时,可进一步应用 Bonferroni 校正进行多重比较,精确定位具体子系统间的差异,并通过控制家族错误率确保结果的稳健性。

c. 分布异质性检验。为评估生态系统内部的时空异质性,可以采用 Kolmogorov-Smirnov 检验比较不同区域或时间段的水资源累积分布函数。Kolmogorov-Smirnov 检验作为非参数方法,不需预设分布类型即可检测分布差异,适用于揭示水资源利用模式的显著变化,为优化配置策略提供支持^[44]。

通过整合 Kruskal-Wallis 检验、Bonferroni 校正和 Kolmogorov-Smirnov 检验,可系统评估不同子系统间的动态均衡差异,识别关键失衡区域与时段,为水资源空间均衡调控提供数据驱动的科学依据。

4 结 论

a. 水资源空间均衡是基于水资源的自然禀赋,通过科学调控实现水量分配、生态环境保护与社会经济需求的平衡统一。这一理念贯穿了历史、现实与系统的多维视角,体现了人类对水资源的长期适应与调控实践,是实现人口、经济社会、生态系统的空间协调,促进区域可持续发展的关键路径。

b. 以实现水资源空间均衡为最终目标,构建了以安全为底线的水资源-生态环境保障机制、以公平为导向的水资源-社会稳定协调机制、以效益为驱动的水资源-经济发展联动机制,破解了水资源-生态环境-社会经济多维协同优化难题,为解决我国水资源空间不均衡问题提供系统化路径。

c. 为解析水资源-生态环境、水资源-社会、水资源-经济三大子系统间的联系与协调机制,结合动态对称思想与统计学方法,提出了系统水资源配置的时空动态效应分析与统计建模方法,量化其动态均衡规律,为不同时间和空间下水资源系统动态均衡

参考文献:

[1] 左其亭. 水资源可持续利用研究历程及其对我国现代治水的贡献[J]. 地球科学进展,2023,38(1):1-8. (Zuo Qiting. Research on sustainable utilization of water resources and its contribution to modern water control in China[J]. Advances in Earth Science,2023,38(1):1-8. (in Chinese))

[2] 彭青玲,何伟军,孔阳,等. 基于“供需-承载-资产”视角的中国水资源可持续性评价[J]. 资源科学,2025,47(3):512-525. (Peng Qingling, He Weijun, Kong Yang, et al. Sustainability evaluation of water resources in China based on the perspective of “supply and demand-carrying capacity-asset” [J]. Resources Science, 2025, 47(3): 512-525. (in Chinese))

[3] 黄晓家,单聪,卢金锁,等. 基于统计数据的我国水资源承载力研究[J]. 中国给水排水,2025,41(6):1-8. (Huang Xiaojia, Shan Cong, Lu Jinsuo, et al. Water resources carrying capacity in China: a statistical analysis [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(6): 1-8. (in Chinese))

[4] 金菊良,酆建强,吴成国,等. 水资源空间均衡研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(6):47-60. (Jin Juliang, Li Jianqiang, Wu Chengguo, et al. Research progress on spatial equilibrium of water resources[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 47-60. (in Chinese))

[5] 赵勇,李激,何凡,等. 中国水资源短缺标准与分区评价[J]. 中国水利,2024(15):13-19. (Zhao Yong, Li Wei, He Fan, et al. Water resources scarcity standards and zoning evaluation in China [J]. China Water Resources, 2024(15):13-19. (in Chinese))

[6] 姚鹏,梁琼云,杜曙光. 水资源与产业高质量发展:政策演进、互动机理及发展路径[J]. 学习与实践,2023(8):86-95. (Yao Peng, Liang Qiongyun, Du Shuguang. Water resources and high-quality industrial development: policy evolution, interaction mechanism and development path [J]. Study and Practice, 2023(8): 86-95. (in Chinese))

[7] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):35-41. (An Lina, Fan Guofu, Wu Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))

- [8] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (Hu Qiling, Dong Zengchuan, Yang Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))
- [9] 李国英. 深入学习贯彻习近平经济思想 推动新阶段水利高质量发展[J]. 水利发展研究, 2022, 22(7): 1-3. (Li Guoying. Thoroughly studying and implementating Xi Jinping's Economic Thought to promote the high-quality development of water conservancy in the new stage [J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(7): 1-3. (in Chinese))
- [10] 吴强,高龙,李森. 空间均衡:必须树立人口经济与资源环境相均衡的原则[J]. 水利发展研究, 2018, 18(9): 17-24. (Wu Qiang, Gao Long, Li Miao. Spatial equilibrium: the principle of balancing population, economy, resources, and environment must be established [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(9): 17-24. (in Chinese))
- [11] 李原园,李云玲,何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1340-1346. (Li Yuanyuan, Li Yunling, He Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1340-1346. (in Chinese))
- [12] 张雷,鲁春霞,李江苏. 中国大河流域开发与国家文明发育[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10): 1639-1645. (Zhang Lei, Lu Chunxia, Li Jiangsu. Developments of river basins and national civilization in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1639-1645. (in Chinese))
- [13] 李加林,田鹏,龚虹波,等. 中国水利发展与治水思想的历史演变及其时代价值解析[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(3): 64-72. (Li Jialin, Tian Peng, Gong Hongbo, et al. Evolution and contemporary mission of China's water conservancy development and water management philosophy [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2025, 36(3): 64-72. (in Chinese))
- [14] 左其亭,邱曦,马军霞,等. 黄河治水思想演变及现代治水方略[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 1-9. (Zuo Qiting, Qiu Xi, Ma Junxia, et al. Evolution of flood control thought and modern flood control strategy in the Yellow River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(3): 1-9. (in Chinese))
- [15] 左其亭,张志卓,马军霞. 我国现代治水研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 102-111. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Ma Junxia. Progress and prospects of modern water control research in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 102-111. (in Chinese))
- [16] Du Longjiang, Peng Xiao, Zhao Yong, et al. From nature-based to engineering-based: the interaction process and turning point of the city-water system relationship in the North China plain [J]. Applied Geography, 2021, 135: 102556.
- [17] Du Longjiang, Peng Xiao, Wang Fang. City walking-trace: how watershed structure and river network changes influenced the distribution of cities in the northern part of the North China Plain [J]. Quaternary International, 2019, 521: 54-65.
- [18] 司雨,王英. 习近平治水思路的系统哲学基础[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 41-46. (Si Yu, Wang Ying. System philosophy foundation of Xi Jinping's thought on water governance [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 41-46. (in Chinese))
- [19] 张芮. 中国农业水利工程历史与生态文明建设研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [20] 黄一为. 见证思想伟力踔厉奋发前行[N]. 中国水利报, 2023-03-17(1).
- [21] Flinn J C, Guise J W B. An application of spatial equilibrium analysis to water resource allocation [J]. Water Resources Research, 1970, 6(2): 398-409.
- [22] 王浩,刘家宏. 国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J]. 中国水利, 2016(17): 7-9. (Wang Hao, Liu Jiahong. Collaboration of national water resources with eco-social system in China [J]. China Water Resources, 2016(17): 7-9. (in Chinese))
- [23] 左其亭. 水资源空间均衡支撑供给侧结构性改革[N]. 黄河报, 2017-06-13(03).
- [24] 唐克旺. 对中国治水新方略的认识和体会[J]. 中国水利, 2018(9): 11-13. (Tang Kewang. Understanding and observation of new solutions and measures for water governance in China [J]. China Water Resources, 2018(9): 11-13. (in Chinese))
- [25] 郦建强,王平,何君,等. 水资源空间均衡理论方法与对策措施研究[J]. 中国水利, 2019(23): 23-25. (Li Jianqiang, Wang Ping, He Jun, et al. Study on theory methodology and countermeasures about water resources spatial equilibrium [J]. China Water Resources, 2019(23): 23-25. (in Chinese))
- [26] 郦建强,王平,郭旭宁,等. 水资源空间均衡要义及基本特征研究[J]. 水利规划与设计, 2019(10): 1-5. (Li Jianqiang, Wang Ping, Guo Xuning, et al. Research on the essentials of spatial equilibrium of water resources and its basic feature [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(10): 1-5. (in Chinese))
- [27] 张细兵. 十六字治水方针的科学内涵及其对长江治理的启示[J]. 人民长江, 2019, 50(增刊1): 1-5. (Zhang Xibing. Scientific connotation of sixteen-word water control

- policy and its inspiration for Yangtze river management [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(Sup1): 1-5. (in Chinese))
- [28] 王建华, 何凡, 何国华. 关于水资源承载力需要厘清的几点认识 [J]. *中国水利*, 2020 (11): 1-5. (Wang Jianhua, He Fan, He Guohua. Some understandings about the clarification of water resources carrying capacity [J]. *China Water Resources*, 2020(11): 1-5. (in Chinese))
- [29] 郭旭宁, 酆建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 62-66. (Guo Xuning, Li Jianqiang, Li Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))
- [30] Bian Dandan, Yang Xin, Xiang Wenjuan, et al. A new model to evaluate water resource spatial equilibrium based on the game theory coupling weight method and the coupling coordination degree [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 366: 132907.
- [31] 魏豪杉, 王红瑞, 郝鹏鑫, 等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型的应用 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(5): 78-85. (Wei Haoshan, Wang Hongrui, Jia Pengxin, et al. Application of water resources spatial equilibrium-based “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 78-85. (in Chinese))
- [32] 魏豪杉, 王红瑞, 郝鹏鑫, 等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 71-77. (Wei Haoshan, Wang Hongrui, Jia Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 71-77. (in Chinese))
- [33] 杨荣雪, 王丰, 王红瑞, 等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 130-136. (Yang Rongxue, Wang Feng, Wang Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 130-136. (in Chinese))
- [34] 杨亚锋, 巩书鑫, 王红瑞, 等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 33-44. (Yang Yafeng, Gong Shuxin, Wang Hongrui, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 33-44. (in Chinese))
- [35] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [36] Umer M, Hanasaki N, Gopalan S P, et al. Incorporating dynamic crop area in hydrological model to address interannual variability in water withdrawal and implication of sustainable water management [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 661: 133778.
- [37] De Wijs C M. Mathematical analysis of groundwater resources [M]. London: Butterworths, 1983.
- [38] Chen J D, Boccelli D L. Forecasting hourly water demands with seasonal autoregressive models for real-time application [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(2): 879-894.
- [39] Ver Hoef J M, Peterson E E, Hooten M B, et al. Spatial autoregressive models for statistical inference from ecological data [J]. *Ecological Monographs*, 2018, 88(1): 36-59.
- [40] Zhang Qifan, Hu Tieshan, Zeng Xin, et al. Exploring the effects of physical and social networks on urban water system's supply-demand dynamics through a hybrid agent-based modeling framework [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129108.
- [41] Berendrecht W L, Van Geer F C. A dynamic factor modeling framework for analyzing multiple groundwater head series simultaneously [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 50-60.
- [42] 慕云霄, 程玉菲, 王军德. 白龙江引水工程受水区水资源利用效率测算与影响因素分析 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2025, 53(4): 38-46. (MU Yunxiao, CHENG Yufei, WANG Junde. Measurement and influencing factors for water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(4): 38-46. (in Chinese))
- [43] 卢仪思, 景来红, 严登明, 等. 南水北调西线一期工程对水源区的综合影响评价 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2025, 53(4): 10-17. (LU Yisi, JING Laihong, YAN Dengming, et al. Comprehensive impact assessment of the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (Phase I) on water source areas [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(4): 10-17. (in Chinese))
- [44] Kini K R, Harrou F, Madakyaru M, et al. Enhanced data-driven monitoring of wastewater treatment plants using the Kolmogorov-Smirnov test [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2024, 10(6): 1464-1480.

(收稿日期: 2025-07-21 编辑: 王芳)