

竞争性用水问题本质及解决途径与方法

左其亭^{1,2}, 张志卓¹, 马军霞^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要: 竞争性用水现象普遍存在于水科学研究与治水实践的各个层面, 系统认识并合理解决竞争性用水问题, 对新时期国家水安全保障具有重要意义。基于竞争性用水相关研究积累, 首次定义了竞争性用水的概念, 从时间、空间、系统 3 个维度解读其内涵并进行类型划分, 构建了包含 12 种类型竞争性用水的三维层级结构。逐一解析不同竞争性用水问题的本质, 归纳了解决问题应遵循的基本原理。在此基础上进一步研判不同竞争性用水问题潜在的解决途径及方法, 系统提出了竞争性用水一般性计算方法, 对黄河分水问题进行实例分析, 得到了 370 亿 m^3 水量下的黄河综合分水方案。

关键词: 竞争性用水; 用水类型划分; 人水关系; 分水; 黄河

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)01-0001-08

Essence, resolutions, and dealing methods of competitive water use issues//ZUO Qiting^{1,2}, ZHANG Zhizhuo¹, MA Junxia^{1,2} (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The phenomenon of competitive water use generally exists in various aspects of water science research and water management practice. Systematic understanding and reasonable resolution of competitive water use issues are significant for ensuring national water security in the new era. Based on the accumulated research on competitive water use, the concept of competitive water use is defined for the first time, its connotation is interpreted from the three dimensions of time, space and system, and its types are classified. Accordingly, a three-dimensional hierarchical structure of 12 types of competitive water use is constructed. Then, the essence of different competitive water use issues is analyzed, and the basic principles that should be followed to solve these issues are summarized. On this basis, the potential solutions and related methods for different competitive water use issues are further explored, and a general calculation method for competitive water use is proposed systematically. A case study of the Yellow River water allocation problem is carried out, and an integrated water allocation scheme with a total volume of 370 m^3 is obtained for the Yellow River.

Key words: competitive water use; classification of water use; human-water relationship; water allocation; the Yellow River

在人口增长、气候变化和土地利用等因素的综合作用下, 全球用水量自 20 世纪 80 年代以来增长超过 35%, 并正在以每年约 1% 的速度增长^[1], 人类可能很快接近淡水资源利用的地球可承载边界^[2]。2023 年可持续发展目标报告指出, 全球仍有 24 亿人生活在用水压力紧张的国家, 超过 8 亿人面临严重水资源短缺困境^[3]。水资源短缺会进一步演化为不同维度的用水竞争, 愈发突出的用水竞争问题已然成为全球性难题, 这给 2030 年前相关可持续发展目标^[3]的实现带来巨大挑战。中国是人口大国, 用不足全球 6% 的淡水资源支撑了全球 20%

人口的生存和发展^[4], 用水压力显著高于欧美发达国家。现阶段, 我国正处于水利高质量发展转型的关键时期, 对国家水安全能力建设提出了更高要求^[5]。系统解析竞争性用水问题本质并探寻其科学解决途径是国家水安全保障的内在需求, 也是人水关系和谐发展的关键动力, 对促进我国人与自然和谐共生目标的实现具有重要意义。

我国自古重视水利研究, 对竞争性用水问题的相关探讨由来已久。早在西汉时期, 我国就已出现“均水约束”制度, 以处理农田灌溉中的水资源分配问题^[6]。唐代《水部式》和宋代《农田水利约束》作

基金项目: 国家科技基础专项“第三次新疆综合科学考察”项目(2021xjkk0703); 国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介: 左其亭 (1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

通信作者: 马军霞 (1968—), 女, 高级实验师, 硕士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: majx@zzu.edu.cn

为我国古代极具代表性的水利法规,针对农业生产和城市供水中的用水竞争现象均提供了有效处理方案,如在农田灌溉方面明确了严格的配水比例和轮灌制度以确保不同灌溉单元都能均匀受水^[7]。现代以来,国内外学者针对竞争性用水相关问题开展了多方面研究,但大多聚焦于水资源可持续利用^[8-9]、水资源模拟和配置^[10-11]、多目标水库调度^[12-13]、跨界河流分水^[14-15]、国际水资源冲突^[16-17]、经济社会与生态用水竞争^[18-19]、经济社会供需水平衡^[4,20]等特定领域的探讨,如左其亨等^[14,18]针对空间维度的跨界河流水资源分配问题提出一套系统的跨界河流分水计算方法,并应用该方法制定了黄河分水新方案;针对系统维度的经济社会与生态用水竞争问题,从区域水平衡视角构建了其计算规则与方法,确定了沁河流域经济社会与生态水平衡点。竞争性用水问题复杂,涉及研究领域多,上述研究中聚焦的特定问题也仅仅属于竞争性用水在不同维度的具体体现。虽然竞争性用水现象普遍存在于生活和生产的各个方面,但基于中国知网、维普、Web of Science 等中英文数据库的文献调研结果显示,以竞争性用水为主题的研究非常少,缺乏对其概念、内涵、基本原理、类型划分、问题本质和解决途径等关键内容的有效探讨,限制了竞争性用水问题量化分析和实践应用研究的深入开展。

面向上述背景和研究需求,本文着眼于竞争性用水问题复杂的内部作用关系,深入辨析竞争性用水的概念内涵,在类型划分的基础上系统解析竞争性用水问题本质,总结解决竞争性用水问题应遵循的基本原理,多维度探讨解决问题的有效途径和方法,并介绍应用实例。

1 竞争性用水概念、内涵及类型

1.1 竞争性用水概念及内涵

竞争性用水问题的研究对象是人水系统,即以水循环为纽带,由人文系统和水系统相互联系形成的耦合系统^[21]。不同用水主体之间动态、复杂的竞争性关系交织于人水系统内部,逐渐演化为各类竞争性用水问题,其影响范围广、驱动因素多,想要从本质上解决竞争性用水问题尤为困难。

水资源是生物生存和生产活动必不可少的基础资源,而有限性是水资源的基本特性^[22],该特性使水资源成为一种极具竞争价值的珍贵资源。在文献调研和相关概念辨析的基础上,结合水资源基本特性和前期相关研究工作积累,给出竞争性用水定义:竞争性用水是指在人水系统中,由水资源有限性引发的时间、空间、系统等不同维度下的用水竞争状

态。竞争性用水在人水系统中广泛存在,无论哪种维度,在水资源利用过程中存在竞争状态,均可被识别为竞争性用水。当这种状态发展到一定程度,可能对经济社会发展和生态环境保护产生一系列负面影响,此时需要采取合理方法去干预和解决。

进一步地,结合区域水平衡内涵^[20],可以从时间、空间和系统 3 个维度解读竞争性用水的内涵:①时间维度下,竞争性用水体现为年代、年份、时期以及时段间的用水竞争状态,突出的是水资源在时间序列上的有限性,问题关键是水资源时间过程供需不平衡。②空间维度下,竞争性用水体现为国家、流域、地区以及空间单元间的用水竞争状态,突出的是水资源在地理空间上的有限性,问题关键是水资源空间布局供需不平衡。③系统维度下,竞争性用水体现为人与自然、区域、部门、个体等系统的用水竞争状态,突出的是水资源在不同系统间的有限性,问题关键是水资源系统整体供需不平衡。这里的“系统”是看待竞争性用水问题的一种视角,不局限于人文系统和水系统这种宏观系统,还包括区域、部门等中微观系统,甚至每个个体也可以被视为独立系统,参与系统间的竞争性用水活动。

1.2 竞争性用水类型划分

基于对竞争性用水概念及内涵的解读和基本情况的总结,可以从时间、空间和系统 3 个维度将竞争性用水划分为 12 种类型。

时间维度下的竞争性用水类型包括但不限于代际竞争性用水、年际竞争性用水、年内竞争性用水、时段竞争性用水;空间维度下的竞争性用水类型包括但不限于国际竞争性用水、流域竞争性用水、地区竞争性用水、空间单元竞争性用水;系统维度下的竞争性用水类型包括但不限于人与自然竞争性用水、区域间竞争性用水、部门间竞争性用水、个体间竞争性用水。3 个维度下的竞争性用水相互交织、互相影响,共同构成时间-空间-系统维度下竞争性用水层级结构,如图 1 所示,这里的“层级”可以理解为特定维度下竞争性用水问题的研究尺度。

2 竞争性用水问题本质及解决问题应遵循的基本原理

2.1 竞争性用水问题本质

水资源的有限性是竞争性用水问题的最根本原因,但不同类型竞争性用水问题的本质有所不同,对问题本质的科学解析是探索合理解决途径和方法的前提。

2.1.1 时间维度下竞争性用水问题本质解析

当代人与后代人的纵向用水竞争体现在当代人

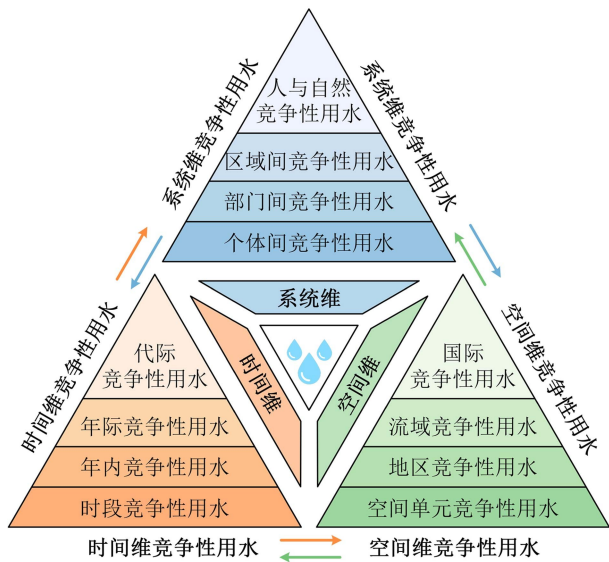


图1 时间-空间-系统维度下竞争性用水层级结构
Fig.1 Hierarchical structure of competitive water use in temporal-spatial-systemic dimensions

用水是否顾及后代人用水,即代际竞争性用水问题本质。可持续发展要求以资源环境保护为条件谋求当代人与后代人的共同繁荣和持续发展,满足世代人类的用水需求是水资源可持续利用的重要内涵^[9]。如果当代人仅考虑自身发展而不顾及后代人用水,采取不可持续的水资源开发利用模式,可能会导致后代人用水需求被动缩减,这是代际竞争性用水问题的具体体现。

不同年份的用水竞争体现在年际用水是否协调,即年际竞争性用水问题本质。水资源的天然供给在不同年份可能存在显著差异,丰水年降水充沛,而枯水年则面临干旱风险。若经济社会用水需求缺乏年际协调性,难以动态匹配不稳定的水资源供给条件,可能会引发年际竞争性用水矛盾。

年内不同时期的用水竞争体现在水资源丰枯变化与用水需求是否同步,即年内竞争性用水问题本质。年内水资源供给通常具有显著的季节性丰枯变化特点,如我国的降水大多集中在夏季和秋季,而在旱季天然来水量显著减少;年内用水需求并非全部集中在丰水期,如农业灌溉用水高峰期集中在春夏时期,水资源供给和需求在年内的不同步会引发不同季节或月、旬之间竞争性用水问题。

不同时段的用水竞争体现在供水能力与时段间用水波动是否匹配,即时段竞争性用水问题本质。用水需求在较小时间尺度也可能产生较大波动,如早晨和傍晚的用水高峰时段,供水系统能力不足或者管道破裂等突发事件会导致在不同时段波动变化的用水需求无法得到持续满足,进而引发时段间用水竞争问题。

2.1.2 空间维度下竞争性用水问题本质解析

不同国家的用水竞争体现在对跨国水资源权属、分配和利用的国际博弈,即国际竞争性用水问题本质。全球水资源在国家尺度的分布极不均匀,当涉及国际河流、湖泊等水资源分配时,不同国家尤其是水资源匮乏的国家总是希望分配到更多的跨国水资源以缓解国内用水压力,不合理的国际博弈可能会引发国家间的竞争性用水争端。

不同流域的用水竞争体现在跨流域水资源调配的利益分歧,即流域竞争性用水问题本质。在自然地理条件和人类活动影响下,不同流域在水资源供给条件和用水需求方面存在显著差异,如长江流域水资源承载力较高,而黄河、淮河、海河等北方流域长期存在严峻的水资源供需矛盾。跨流域调水工程可以实现流域间的水资源调配,缓解北方流域发展用水瓶颈问题,但同时也在流域间产生了潜在利益分歧,水资源调入流域对调出流域造成了不同程度的用水竞争。

不同地区的用水竞争体现在对共同水源开发利用目标的非一致性,即地区竞争性用水问题本质。很多情况下不同地区会依赖于同一水源,如同一河流的上下游地区、同一湖泊或水库的周边供水地区。但为了尽可能满足本地区经济社会发展和生态环境保护的用水需求,不同地区在共有水资源分配和使用过程中可能会产生冲突,进而引发地区竞争性用水问题。

不同空间单元的用水竞争体现在各单元对有限水资源的直接争夺,即空间单元竞争性用水问题本质。在明确且局部的空间范围内,水资源是有限的,可能无法同时满足所有空间单元的用水需求,进而引发不同空间单元对局部空间范围内用水优先权的竞争。

2.1.3 系统维度下竞争性用水问题本质解析

人与自然的用水竞争体现在人文系统和自然生态系统对水资源的需求是否协调,即人与自然竞争性用水问题本质。自然水循环与社会水循环过程相互交织,经济社会发展对水资源的不合理开发利用会挤占生态环境保护用水需求,而生态用水不足带来的生态环境影响会进一步限制经济社会发展^[18]。水资源的有限性导致人文系统和自然生态系统之间产生不协调的用水关系,进而引发人与自然竞争性用水问题。

不同区域的用水竞争体现在水资源空间分布与区域系统需水格局是否匹配,即区域间竞争性用水问题本质。区别于空间维度下的4类竞争性用水问题,系统维度下的区域间竞争性用水是从系统性视

角分析不同区域的用水竞争。这里的“区域”涵盖非常广泛,包含各级流域、各级行政区、各类灌区以及水利工程影响覆盖区域等所有可能产生竞争性用水的区域系统。当区域系统水资源供给能力难以匹配自身用水需求,就会与其他区域系统产生直接或间接的竞争性用水关系。

不同部门的用水竞争体现在国民产业布局供需水结构是否平衡,即部门间竞争性用水问题本质。在水资源供给侧整体供水能力有限的前提下,工业、农业、生活、生态等不同用水部门都想尽可能获取用水优先权以确保自身系统正常运转,部门系统间的用水竞争关系由此产生。水资源供给侧和需求侧之间存在复杂的联动结构,不合理的国民产业布局供需水结构会进一步加剧这种竞争关系进而引发部门间竞争性用水问题。

不同个体的用水竞争体现在个体用水需求满足程度是否一致,即个体间竞争性用水问题本质。不同个体获取水资源的能力和条件存在差异,个体用水需求满足程度不一致现象普遍存在,如城市居民和农村居民、高收入人群和低收入人群、供水优先保障地区居民和缺水地区居民。当个体最低用水需求得不到满足时,就会引发个体间竞争性用水问题。

2.2 解决竞争性用水问题应遵循的基本原理

竞争性用水涉及因素复杂,揭示其基本原理能够为竞争性用水问题研究和相关方案制定提供科学依据。基于对用水竞争现象的观察和实践研究,结合竞争性用水特征分析,归纳总结了解决竞争性用水问题应遵循的4个最基本原理如下。

a. 水量平衡原理。水量平衡原理是所有水循环过程的基本遵循,指地球上任一系统在任一时段内水量保持守恒,即系统内蓄水量的变化量必然等于进入系统的水量与离开系统的水量之差^[23],具体表现为水量平衡基本方程。水量平衡基本方程又可进一步细化为全球水量平衡方程、流域水量平衡方程、区域水量平衡方程、特定水系统水量平衡方程等。水量平衡原理和上述水量平衡方程是研究竞争性用水问题的基础。

b. 供需平衡原理。供需平衡原理最初属于经济学的基本原理范畴,即当商品或服务的供给量与需求量相等时,市场达到一种平衡状态,市场不再具有供给或需求的调整动力。在水资源研究领域,这种市场的供需平衡状态可进一步引伸为水资源供需两侧的匹配关系^[20]。供需平衡原理是竞争性用水问题中追求水资源供需平衡状态的基本遵循,合理运用供需平衡原理能够缓解多元化用水竞争矛盾,保障水资源可持续利用。

c. 和谐平衡原理。和谐平衡是指和谐参与者考虑各自利益和总体和谐目标而呈现的一种相对静止、和谐参与者各方暂时都能接受的平衡状态^[24]。这种状态相对静止但并非恒定不变,变化环境对平衡状态施加的影响力达到一定程度后,和谐平衡可能会被打破,后经过循环演化形成适应变化环境的新的和谐平衡状态,即为和谐平衡原理^[24]。竞争性用水是多方参与的动态性竞争问题,其内部蕴含了不同层次的和谐平衡状态,需要和谐平衡原理作为其问题分析的重要支撑。

d. 人水关系原理。人水关系原理主要包括人水关系交互作用原理、人水系统自适应原理、人水系统平衡转移原理和人水关系和谐演变原理^[21]。人水关系交互作用是指存在于人水系统内部的交互作用关系及其变化规律;人水系统自适应是指在外界或内部营力的作用下人水系统呈现的自适应能力和应变特征;人水系统平衡转移是指人水系统在变化环境下从一种平衡状态向另一种平衡状态转移的普遍现象;人水关系和谐演变是指人水关系向良性演变并最终走向和谐状态的基本特性和规律。人水关系原理能够为传统竞争性用水问题提供更科学合理的分析思路和解决途径。

3 竞争性用水问题的解决途径及方法

基于对12种类型竞争性用水问题本质的解析,结合解决竞争性用水问题应遵循的4个最基本原理,探讨竞争性用水问题的潜在解决途径及部分代表性方法,如表1所示。

3.1 时间维度下竞争性用水问题解决途径及方法

水资源可持续开发、利用和管理是解决代际竞争性用水问题的有效途径。在当代水资源开发模式中,应融入可持续发展理念,通过科学规划与合理分配,确保当代人用水需求得到满足的同时,不损害后代人水资源的可用性,实现代际用水公平共享。部分代表性方法包括国家中长期水资源规划原则和方法、水资源可持续利用理论与方法等。

综合工程和非工程措施的年际用水协调性优化是解决年际竞争性用水问题的有效途径。通过多年调蓄工程建设、水库年际调度等工程措施,结合需水调控、用水计划管理等非工程手段,协调年际用水需求,确保不同年份水资源供需关系稳定,实现年际用水供需平衡。部分代表性方法包括多年调节水库优化调度理论与方法、气候变化情景分析方法等。

经济社会用水需求和和谐调控是解决年内竞争性用水问题的有效途径。基于对年内不同时期来水丰枯变化的准确预测,结合对用水需求的和谐调控,科

表 1 不同类型竞争性用水问题的解决途径及代表性方法

Table 1 Resolutions and representative methods for different types of competitive water use issues

维度	类型	问题本质	解决途径	代表性方法
时间	代际竞争性用水	当代人与后代人的纵向用水竞争体现在当代人用水是否顾及后代人用水	运用可持续发展思想规范当代人对水资源的开发、利用和管理	水资源可持续利用理论与方法 ^[9]
	年际竞争性用水	不同年份的用水竞争体现在年际用水是否协调	综合运用工程和非工程措施优化水资源利用的年际协调性	多年调节水库优化调度理论与方法 ^[25]
	年内竞争性用水	年内不同时期的用水竞争体现在水资源丰枯变化与用水需求是否同步	通过对来水丰枯变化预测和用水需求调控优化年内供需水关系	经济社会供用水预测方法与调控模型 ^[26]
	时段竞争性用水	不同时段的用水竞争体现在供水能力与时段间用水波动是否匹配	通过提升供水系统实时响应和调控能力保障时段间供需水平衡	供水系统智慧化监测技术和智能化决策模型 ^[27]
空间	国际竞争性用水	不同国家的用水竞争体现在对跨国水资源权属、分配和利用的国际博弈	建立公平合理的跨国水资源分配机制,避免出现国际用水争端	跨国水资源管理多目标博弈模型 ^[17]
	流域竞争性用水	不同流域的用水竞争体现在跨流域水资源调配的利益分歧	科学论证跨流域调水方案,保障不同流域的生态和社会效益	跨流域调水影响分析和方案优化理论与方法 ^[28]
	地区竞争性用水	不同地区的用水竞争体现在对共同水源开发利用目标的非一致性	制定地区间和谐分水方案,实现各地区用水需求的协调统一	跨界河流和谐分水理论和计算方法 ^[14]
	空间单元竞争性用水	不同空间单元的用水竞争体现在各单元对有限水资源的直接争夺	结合水资源模拟,提升空间单元间精细化用水分配和管理能力	高空间分辨率分布式人水关系模拟模型 ^[29]
系统	人与自然竞争性用水	人与自然的用水竞争体现在人文系统和自然生态系统对水资源的需求是否协调	解析两系统用水需求的交互作用关系,促进人与自然和谐共生	经济社会与生态用水平衡计算规则与方法 ^[4,18]
	区域间竞争性用水	不同区域的用水竞争体现在水资源空间分布与区域系统需水格局是否匹配	提高区域系统间水资源配置合理性,改善供需水空间匹配关系	多区域系统水资源优化配置理论与方法 ^[10]
	部门间竞争性用水	不同部门的用水竞争体现在国民产业布局供需水结构是否平衡	优化各部门用水结构,提升国民产业布局供需水平衡状态	经济社会供需水平衡理论与度量方法 ^[4,20]
	个体间竞争性用水	不同个体的用水竞争体现在个体用水需求满足程度是否一致	通过基础设施建设和经济调控手段缓解个体间用水不公平	水资源价税改革理论及阶梯水价模型 ^[30]

学优化年内供需水关系,确保年内不同时期的水资源合理分配与高效利用,实现年内用水供需平衡。部分代表性方法包括经济社会供用水预测方法与调控模型、短期水资源调度优化模型等。

时段间供需水平衡保障是解决时段竞争性用水问题的有效途径。通过提升供水系统实时响应和调控能力,增强供水系统对需求波动的动态适应性,保障时段供水的连续与稳定,确保时段用水需求得到及时满足,实现时段间用水供需平衡。部分代表性方法包括供水系统智慧化监测技术和智能化决策模型、供需水平衡动态调控云计算模型等。

3.2 空间维度下竞争性用水问题解决途径及方法

公平合理的跨国水资源分配机制建设是解决国际竞争性用水问题的有效途径。通过加强国际涉水事务合作、协商和信息共享,建立互信透明的跨国水资源分配机制,确保各国的用水需求得到合理满足,促进利益共赢与和谐发展,实现国际用水和谐平衡。部分代表性方法包括跨国水资源管理多目标博弈模型、国际虚拟水贸易理论与方法等。

跨流域调水方案的科学论证是解决流域竞争性用水问题的关键途径。通过综合评估跨流域调水方案对经济社会和生态环境的潜在影响,科学论证其可行性,在满足缺水流域需求的同时,最大程度保障供水流域的生态和社会效益,实现不同流域用水和谐平衡。部分代表性方法包括跨流域调水影响分析和方

案优化理论与方法、水资源经济效益评估模型等。

地区间和谐分水方案制定是解决地区竞争性用水问题的有效途径。基于对各地区供水条件、用水需求、经济状况及承载能力的全面评估,制定地区间和谐分水方案,在满足各地区最低用水需求保障的前提下确保分水目标协调统一,实现不同地区用水和谐平衡。部分代表性方法包括跨界河流和谐分水理论和计算方法、生态补偿机制与水权交易模型等。

空间单元间水资源精细化分配和管理是解决空间单元竞争性用水问题的有效途径。基于高分辨率水资源监测和模拟技术的应用,提升空间单元间精细化用水分配和信息管理能力,确保有限的水资源供应能力与各空间单元用水需求的最优匹配,避免空间单元间用水争端,实现不同空间单元间用水和谐平衡。部分代表性方法包括高空间分辨率分布式人水关系模拟模型、高精度水资源管理信息系统技术等。

3.3 系统维度下竞争性用水问题解决途径及方法

人文系统和自然生态系统之间用水关系的协调是解决人与自然竞争性用水问题的有效途径。通过对人文系统和自然生态系统间的交互作用关系解析,协调两系统用水关系,在自然生态系统健康稳定的前提下尽可能满足经济社会发展需求,促进人与自然和谐共生。部分代表性方法包括经济社会与生态用水平衡计算规则与方法、人水关系模拟与调控模型等。

区域系统间水资源合理配置是解决区域间竞争性用水问题的有效途径。基于对各区域系统水资源供需状况与空间分布特征的分析,提高区域系统间水资源配置合理性,建立公平高效的供水空间匹配关系,推动不同区域系统协调发展。部分代表性方法包括区域系统水资源承载力分析模型、多区域系统水资源优化配置理论与方法等。

国民产业布局供需水结构优化是解决部门间竞争性用水问题的有效途径。通过科学调整各部门的用水结构,强化国民产业布局中的水资源刚性约束,改善经济社会供需水平衡状态,形成部门系统间和谐用水关系,促进水资源节约集约利用。部分代表性方法包括经济社会供需水平衡理论与度量方法、产业水资源利用效率评估技术等。

缓解个体间用水不公平程度是解决个体间竞争性用水问题的有效途径。通过城乡水利基础设施建设、水资源经济调控和系列节水行动,促进水资源在个体间的公平分配和高效利用,在确保个体基本用水需求前提下减少用水不公平现象,推动社会和谐稳定发展。部分代表性方法包括水资源价税改革理论及阶梯水价模型、个体用水定额分配机制与方法等。

3.4 竞争性用水计算方法应用实例

基于上述分析,可以确定竞争性用水一般性计算思路:①面向特定竞争性用水问题本质,确定其决策变量(一般为分水比例或分水量,可根据特定竞争性用水问题研究需求灵活调整)和目标函数集;②以问题为导向确定水量平衡、供需平衡、和谐平衡3个基本约束条件的各级阈值;③根据研究需求构建竞争性用水特殊约束集合;④对该竞争性用水问题计算求解。竞争性用水一般性表达式为

$$\max [F_i(x)] \text{ 或 } \min [F_i(x)] \quad (1)$$

$$\begin{cases} W_{k_in} - W_{k_out} = \Delta W_k & \text{水量平衡约束} \\ \sum_k D_k \leq \sum_k S_k & \text{供需平衡约束} \\ H_k \geq H_0 & \text{和谐平衡约束} \\ L_j \leq C_j \leq U_j & \text{特殊约束} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为决策变量; $F_i(x)$ ($i=1,2,\dots,I$)为针对该竞争性用水问题的第*i*个目标函数集合; I 为目标函数索引集,根据不同竞争性用水问题需求,如和谐程度最高、经济效益最大、供水保障最强、水量损失最小等,目标函数个数和方向可以灵活调整; W_{k_in} 、 W_{k_out} 、 ΔW_k ($k=1,2,\dots,K$)分别为第*k*个竞争性用水单元的水资源收入量、支出量和蓄水量变化量; K 为竞争性用水单元索引集; D_k 、 S_k 分别为第*k*个竞争性用水单元的用水需求和可供水量; H_k 和 H_0 分别为

第*k*个竞争性用水单元的实际分水和和谐度和可接受的最低和谐度; C_j ($j=1,2,\dots,J$)为特定竞争性用水问题的第*j*个特殊约束条件集合; J 为特殊约束条件索引集; L_j 、 U_j 分别表示第*j*个特殊约束条件的下限和上限,其值结合该竞争性用水问题相关的资源、环境、政策等因素综合确定。

水量平衡、供需平衡、和谐平衡约束构成了竞争性用水问题的基本约束。此外,可根据特定问题研究需求添加特殊约束条件,如区域用水优先级、时段用水优先级、部门用水优先级和相关技术因素等。式(1)(2)为竞争性用水计算方法的最基本形式,具体应用时需根据不同竞争性用水问题特征对通式进行适应性改进或补充。

基于上述竞争性用水计算思路和方法,选取黄河分水问题作为应用实例。黄河为青海、四川、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、山东、河北和天津11个省(区、市)提供用水保障,如何合理分配黄河水一直是备受争议的难题。从系统维度看,黄河分水问题属于区域间竞争性用水问题;从空间维度看,黄河分水问题属于地区竞争性用水问题,但黄河分水问题的整体需求是一致的,即有限的可供水量在不同供水区的合理分配。按照现状用水并考虑未来需水可以初步确定黄河基本分水方案(方案1),如表2所示。

在此基础上,以分水量为决策变量,以总体和谐度最大为分水目标,以水量平衡、供需平衡、和谐平衡3个基本约束为竞争性用水约束,不再另设特殊约束,求解得到370亿 m^3 水量下的黄河和谐分水新方案(方案2)。此外,综合考虑以往分水经验和核心要素,分别按照实际用水人口(方案3)、地区GDP(方案4)、地区内流域面积(方案5)确定了另外3种分水方案,再结合黄河“八七”分水方案得到方案6,最终形成了包含6种方案的黄河分水方案集,未来用水需求确定流程、和谐度计算方法以及完整分水方案集见文献[14]。为了广泛综合不同学者的意见,通过专家咨询法确定各分水方案的权重,共收到180份调查问卷,得到方案1~6的综合权重,分别为0.255、0.275、0.130、0.090、0.080、0.170,基于各方案权重最终得到370亿 m^3 水量下黄河综合分水方案(表2),为该竞争性用水问题的合理解决提供了新视角。该分水方案是动态的,随可分配水量变化而同比变化,可根据实际情况结合动态校正公式进行调整。

从综合分水方案可以看出,分水量最大的3个省区依次是山东、内蒙古、河南,合计分水量超过了总分配水量的50%,四川、青海分水量较少。从人

表 2 370 亿 m ³ 水量下的黄河分水新方案								单位: 亿 m ³
Table 2 New water allocation schemes of the Yellow River with total volume of 37 billion m ³								unit: 10 ⁸ m ³
省(区、市)	原方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	综合分水方案
青海	14. 51	10. 71	9. 99	9. 95	7. 90	68. 97	14. 51	15. 47
四川	0. 41	0. 25	0. 21	1. 56	0. 88	7. 70	0. 41	1. 09
甘肃	31. 29	25. 99	32. 94	38. 54	17. 81	64. 89	31. 29	32. 81
宁夏	41. 17	44. 21	38. 12	11. 33	10. 39	23. 29	41. 17	33. 03
内蒙古	60. 32	67. 13	74. 25	21. 04	33. 34	68. 42	60. 32	59. 00
山西	44. 36	38. 66	31. 88	61. 55	44. 36	44. 00	44. 36	41. 68
陕西	39. 11	46. 67	43. 51	53. 26	57. 67	60. 40	39. 11	47. 46
河南	57. 02	50. 58	53. 7	73. 10	79. 35	16. 40	57. 02	55. 31
山东	72. 05	76. 04	75. 64	89. 91	108. 54	6. 17	72. 05	74. 39
河北、天津	9. 76	9. 76	9. 76	9. 76	9. 76	9. 76	9. 76	9. 76

水关系学视角出发,考虑多因素得到的黄河综合分水方案与目前黄河流域用水格局和地区发展定位比较契合^[14],能够在一定程度上促进不同地区的公平用水,推动黄河流域高质量发展。当然,该分水方案仅仅是基于理论探讨计算得到,尽管结合多种方案对其合理性进行了对比分析,对多种实际分水因素的考虑可能还不够完善。

4 结 语

立足于我国提升水安全保障的迫切需要和解决竞争性用水问题的现实需求,本文首次辨析了竞争性用水的概念及内涵,从时间、空间、系统 3 个维度划分出 12 种竞争性用水类型,并逐一解析了不同类型竞争性用水问题的本质,总结了解决问题应遵循的基本原理。在此基础上,系统研判了不同竞争性用水问题的潜在解决途径和部分代表性方法,并给出了一般性计算通式,对黄河分水问题进行了实例分析。本文是对竞争性用水类型、问题本质、解决途径与方法的初步探讨,可为后续竞争性用水量化研究和实践工作的开展提供基础参考和思路借鉴。

参考文献:

[1] UNESCO, UN-Water, World Water Assessment Programme. The United Nations world water development report 2023:partnerships and cooperation for water[R]. Paris:UNESCO,2023.

[2] ROCKSTRÖM J,STEFFEN W,NOONE K,et al. A safe operating space for humanity [J]. Nature, 2009, 461 (7263):472-475.

[3] Department of Economic and Social Affairs, United Nations. The sustainable development goals report 2023 [R]. New York:United Nations,2023.

[4] 左其亭,吴青松,纪义虎,等. 区域水平衡及失衡程度度量方法[J]. 水利学报,2024,55(1):1-12. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JI Yihu, et al. Methods for measuring regional water balance and imbalance degree[J]. Journal

of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (1): 1-12. (in Chinese))

[5] 新夫,于会森,生然. 可持续发展背景下企业水安全评价指标体系构建与应用[J]. 水利经济,2024,42(6): 84-90. (XIN Fu, YU Huimiao, SHENG Ran. Construction and application of corporate water security evaluation index system in context of sustainable development [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (6): 84-90. (in Chinese))

[6] 姚汉源. 中国水利史纲要[M]. 北京:水利电力出版社, 1987.

[7] 水利水电科学研究院中国水利史稿编写组. 中国水利史稿(上、中、下册)[M]. 北京:水利电力出版社,1989.

[8] ROCKSTRÖM J, GUPTA J, QIN Dahe, et al. Safe and just earth system boundaries [J]. Nature, 2023, 619 (7968): 102-111.

[9] 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))

[10] 夏军,占车生,曾思栋,等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53 (5): 505-514. (XIA Jun, ZHAN Chesheng, ZENG Sidong, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River simulator construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (5): 505-514. (in Chinese))

[11] LI Zhehao, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Multi-objective double layer water optimal allocation and scheduling framework combing the integrated surface water-groundwater model[J]. Water Research, 2024, 262: 122141.

[12] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21 (4): 496-503. (GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems[J]. Advances in Water Science, 2010, 21 (4): 496-503. (in Chinese))

- 496-503. (in Chinese))
- [13] 王宗志,谈丽婷,耿敏,等. 考虑调水和供水规则的水库优化调度[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 15-21. (WANG Zongzhi, TAN Liting, GENG Min, et al. Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 15-21. (in Chinese))
- [14] 左其亭,吴滨滨,张伟,等. 跨界河流分水理论方法及黄河分水新方案计算[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 37-45. (ZUO Qiting, WU Binbin, ZHANG Wei, et al. A method of water distribution in transboundary rivers and the new calculation scheme of the Yellow River water distribution [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 37-45. (in Chinese))
- [15] WHEELER K G, HALL J W, ABDO G M, et al. Exploring cooperative transboundary river management strategies for the Eastern Nile Basin[J]. Water Resources Research, 2018, 54(11): 9224-9254.
- [16] YUAN Liang, WU Xia, HE Weijun, et al. Using the fuzzy evidential reasoning approach to assess and forecast the water conflict risk in transboundary rivers: a case study of the Mekong River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130090.
- [17] BERNAUER T, BÖHMELT T. International conflict and cooperation over freshwater resources [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(5): 350-356.
- [18] 左其亭,全志淼,吴青松,等. 经济社会与生态用水平衡计算规则与方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 1-10. (ZUO Qiting, QUAN Zhimiao, WU Qingsong, et al. Calculation rules and methods for water use balance between economic society and ecology [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 1-10. (in Chinese))
- [19] 倪红珍,王浩,汪党献. 经济社会与生态环境竞争用水的水价研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 73-76. (NI Hongzhen, WANG Hao, WANG Dangxian. Water pricing model of competitive water use for the economy, society and environment[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(3): 73-76. (in Chinese))
- [20] 左其亭,吴青松,金君良,等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 165-173. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JIN Junliang, et al. The basic principle and theoretical system of regional water balance [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 165-173. (in Chinese))
- [21] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 1-6. (in Chinese))
- [22] 左其亭,张志卓,马军霞. 水资源分类方案及学科体系[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2215-2223. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, MA Junxia. Classification scheme of water resources and its disciplinary system [J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2215-2223. (in Chinese))
- [23] 粟晓玲,康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 740-744. (SU Xiaoling, KANG Shaozhong. Concept of ecological water requirement and its estimation method [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 740-744. (in Chinese))
- [24] 左其亭,赵衡,马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese))
- [25] 王煜,尚文绣,彭少明. 基于水库群预报调度的黄河流域干旱应对系统[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 175-185. (WANG Yu, SHANG Wenxiu, PENG Shaoming. Yellow River Basin drought response system based on the prediction and operation of cascade reservoirs [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 175-185. (in Chinese))
- [26] 赵勇,李海红,刘寒青,等. 增长的规律: 中国用水极值预测[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 129-141. (ZHAO Yong, LI Haihong, LIU Hanqing, et al. The law of growth: prediction of peak water consumption in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 129-141. (in Chinese))
- [27] 左其亭. 中国水利发展阶段及未来“水利 4.0”战略构想[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 1-5. (ZUO Qiting. Development stage of Chinese water conservancy and strategic concept of future “water conservancy 4.0” [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4): 1-5. (in Chinese))
- [28] 郭潇,方国华,章哲恺. 跨流域调水生态环境影响评价指标体系研究[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1125-1130. (GUO Xiao, FANG Guohua, ZHANG Zhekai. Index system of eco-environment impact assessment for inter basin water transfer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1125-1130. (in Chinese))
- [29] 左其亭,秦西,马军霞. 黄河模拟器建设框架设计及发展布局[J]. 人民黄河, 2023, 45(9): 18-23. (ZUO Qiting, QIN Xi, MA Junxia. Framework design and development layout of Yellow River simulator construction [J]. Yellow River, 2023, 45(9): 18-23. (in Chinese))
- [30] 张巍,韩军,周绍杰. 中国城镇居民用水需求研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(3): 99-109. (ZHANG Wei, HAN Jun, ZHOU Shaojie. Water consumption of Chinese urban residents: from perspectives of micro data [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(3): 99-109. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-09-02 编辑: 施业)