

经济社会与生态用水平衡计算规则与方法

左其亭^{1,2}, 全志淼¹, 吴青松¹, 邱曦¹, 秦西¹, 张羽¹

(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:从平衡的概念出发, 针对经济社会与生态用水竞争问题, 提出了经济社会与生态用水平衡的概念, 并论述了其内涵及特性; 构建了经济社会与生态用水平衡计算规则框架, 包括遵循四大规律、基于六大理论、考虑六大因素、符合三大准则; 提出了经济社会与生态用水平衡的计算思路, 包括资料处理、量化计算、结果检验3个步骤, 并给出了其计算方法和计算结果表征方式。以2019年沁河流域为例, 量化了流域经济社会与生态用水平衡; 在求解一次平衡点以及经济社会用水刚性约束、生态用水刚性约束、综合效益刚性约束条件下平衡结果的基础上, 综合考虑六大因素以及总需水量与水资源总量关系, 确定了沁河流域经济社会与生态用水平衡点, 即经济社会用水与生态用水的比例为0.71:0.29。

关键词:经济社会与生态用水平衡; 区域水平衡; 计算规则; 人水关系; 沁河流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)03-0001-10

Calculation rules and methods for water use balance between economic society and ecology//ZUO Qiting^{1,2}, QUAN Zhimiao¹, WU Qingsong¹, QIU Xi¹, QIN Xi¹, ZHANG Yu¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protect, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the balance concept, the definition of water use balance between economic society and ecology was put forward aiming at the competitive issue of water use between economic society and ecology, and its connotation and characteristics were interpreted. A framework for calculation rules of water use balance between economic society and ecology was constructed following four laws and six theories, taking six factors into account, and conforming to three criteria, and calculation ideas, including three steps of data processing, quantitative calculation, and result checking, were put forward. In addition, the calculation method and result representation form were introduced. Taking the representative year of 2019 in the Qin River Basin as an example, quantitative calculation of its water use balance between economic society and ecology was carried out. On the basis of solving the primary equilibrium point and the balance results under the rigid constraints of water use in economic society, water use in ecology, and comprehensive benefit, as well as comprehensive consideration of the six factors and the relationship between total amounts of water demand and water resources, the water use balance point between economic society and ecology in the Qin River Basin was determined, i. e., the ratio of water use of economic society and that of ecology was 0.71:0.29.

Key words: water use balance between economic society and ecology; regional water balance; calculation rules; human-water relationship; Qin River Basin

水资源是人类赖以生存和发展的基础性资源, 在支撑经济社会发展与生态系统保护方面发挥着不可替代的作用。然而, 在“自然-社会”水循环相互作用过程中, 有限的水资源导致经济社会发展与生态保护对水资源的需求存在着突出的竞争关系^[1]。具体表现为, 经济社会快速发展导致对水资源的掠夺性开采, 会挤占用于生态保护的水资源量; 同时, 水资源短缺引发的水环境污染、水生态恶化又会限

制经济社会发展。因此, 协调经济社会用水与生态用水冲突, 提高区域水资源承载能力, 实现健康的区域水平衡是中国重点关注的前沿科学问题。针对上述问题, 协调经济社会与生态用水的竞争关系, 明确区域经济社会与生态用水比例, 以有限水资源最大限度地促进区域经济社会高质量发展和生态系统保护, 对实现健康的经济社会与生态用水平衡状态、推动人与自然和谐共生具有重要意义。

当前,经济社会用水与生态用水之间的冲突已成为世界范围内突出的水危机问题之一,严重威胁着生态安全、经济安全、粮食安全。国内外部分学者考虑经济社会与生态的综合效益,将生态需水量引入优化模型,探究不同用水情景下的水资源优化配置方案,以实现生态保护约束下水资源开发利用效益最大化^[2-4]。也有学者构建定量化模型,通过计算生态保护用水量与经济社会损失的数学关系,权衡经济社会与生态用水的需求,以期实现二者的协同^[5-7]。上述研究大多将生态需水作为约束条件探求经济社会效益最大化的水资源利用方案,较少直接研究经济社会与生态用水的竞争关系和平衡点。而针对经济社会与生态用水平衡,笔者提出的经济社会与生态用水平衡理念是以有限水资源促进经济高质量发展和生态高水平保护达到平衡状态^[8]。张建云等^[9]提出健康的水平衡需协调经济社会发展和生态环境保护,维持经济社会和自然水循环关键通量要素间的适度平衡。Li 等^[10]也提出经济社会与生态系统之间的用水平衡对于维持区域水平衡健康和可持续发展至关重要。可见,国内外围绕水资源、经济社会、生态系统开展了一系列水平衡研究,但是对经济社会与生态用水平衡理论及方法的研究仍较为缺乏。同时,上述研究主要是通过构建评价指标体系对区域经济社会与生态用水平衡进行定量评价,而对于平衡点计算的研究和方法较少。此外,针对经济社会与生态用水的分配问题,目前一些文献将 40% 作为水资源开发利用率阈值^[11],但上述标准并不具有普适性,尤其对我国北方、西北内陆地区等水资源较匮乏的区域^[12]和青藏高原、三江源等重点生态保护区域^[13-15],该阈值并不适用。经济社会与生态用水平衡旨在最大化水资源综合效益,是解决经济社会与生态用水竞争问题的重要途径,其关键在于两方面用水的合理分配。但水资源分配方案或比例不能一概而论,需因地制宜,定性和定量综合考虑区域禀赋、政策导向、用水需求等多方面因素^[16]。已有研究虽在一定程度涉及了上述问题,但缺乏针对经济社会与生态用水平衡理论阐释、量化方法、应用实践等方面的探索,亟待开展相关研究。

基于以上分析,本文着眼于经济社会与生态用水的复杂竞争关系,明确经济社会与生态用水平衡的概念及内涵,提出其计算规则和方法,并以沁河流域为例,论证该方法的科学性和适用性。

1 概念及研究意义

1.1 概念与内涵

1.1.1 概念辨析

经济学中,平衡通常指市场或经济系统中供求

关系、价格水平和资源配置等各要素之间的相对稳定状态。笔者将平衡定义为在特定条件下,使参与各方与整体均受益的一种稳定、和谐、可持续状态^[17]。

经济社会用水旨在满足人类社会经济活动和生产生活需求,如农业灌溉、工业生产、生活供水等,通过高效用水以支持经济发展和提高人民生活水平。生态用水旨在维持生态系统健康稳定,如稀释净化、河口生物、水生植物用水等,确保生态系统用水能够得到必要、合理保障,以确保生态质量、避免生态风险。经济社会用水与生态用水之间存在着竞争与协调的双向反馈。从竞争层面上讲,二者相互制约和冲突,经济社会的高速发展会挤占生态用水,进而导致环境污染、生态退化,而大量生态用水又会影响或制约经济社会的发展方式和产业布局;从协同层面上讲,二者相互支撑和促进,经济社会发展可以优化水资源开发利用方式和效率,提升修复和保护生态系统的功能;而生态系统的健康稳定则有助于降低区域水灾害风险,是经济社会高质量发展的重要内容。现阶段,经济社会与生态系统在水资源的开发利用上更多地表现为矛盾尖锐的竞争关系。为缓解这一冲突,需要定量确定经济社会与生态用水平衡点,并综合运用工程和非工程措施,以实现经济社会与生态用水的平衡状态,即以有限的水资源获得最大的经济社会与生态综合效益。

基于以上分析,经济社会与生态用水平衡指在特定空间、时间和条件下,能够维持生态系统健康稳定,保障经济社会高质量发展,协调经济社会与生态用水需求,促进人水关系和谐演变的状态。

1.1.2 内涵解读

a. 维持生态系统健康稳定。生态系统是人类赖以生存的支撑系统,而水是确保生态系统健康稳定的基本要素之一。人类经济社会取水常常挤占生态用水,影响生态系统的良性循环和稳定状态,进而影响人类的生存环境和发展。因此,必须保证一定的生态用水,以维持生态系统健康稳定。

b. 保障经济社会高质量发展。经济社会发展能够提升区域综合实力、改善民生福祉,而水资源禀赋是经济发展的基础条件。水资源开发利用的重要任务之一就是在满足基本生态用水需求的基础上,支撑经济社会更快发展。因此,要通过调整用水结构、提高用水效率、挖掘用水潜力等方式,尽可能地保障经济社会高质量发展。

c. 协调经济社会与生态用水需求。经济社会与生态用水端对水资源需求有所差异,生态方面需要满足可持续水资源供给和生态系统健康,具备基

本的社会功能;经济社会方面需要满足快速发展导致的持续增长的用水需求。但在现实中往往难以满足二者的所有需求。因此,需要考虑效率、效益、公平等因素,协调经济社会与生态用水需求。

d. 促进人水关系和谐演变。在追求经济社会与生态用水平衡的过程中,能够充分协调水资源、经济社会、生态的关系,改善人水关系,使其朝着更加和谐的方向演变,最终实现人水和谐的目标。

e. 具有动态性、区域性、主观性。经济社会与生态用水平衡是在兼顾经济社会与生态用水需求的基础上,在某一时期、特定条件下实现的平衡状态,故平衡具有动态性;针对不同区域/流域,由于资源禀赋、发展需求等存在差异,相应的平衡点也不同,亦即平衡具有区域性;不同行为主体在不同条件下对平衡的理解和认知存在差异,故平衡具有主观性。

1.2 研究意义

a. 为科学确定经济社会用水阈值提供理论方法。在经济社会发展与生态系统保护竞争关系突出的背景下,确定合理的经济社会用水阈值对区域水资源开发利用方案制定、经济社会发展布局等具有重要意义,经济社会与生态用水平衡研究能够为科学确定经济社会用水阈值提供科学依据和技术方法。

b. 为实现水资源-经济社会-生态系统协同奠定基础。经济社会与生态用水平衡强调水资源、经济社会、生态系统之间的相互关系,旨在以水资源分配为纽带串联经济社会和生态用水端,通过科学合理地配置水资源,最大限度地满足经济社会的需求,保护生态系统的完整性和稳定性,研究成果能够促进水资源-经济社会-生态系统协同发展状态。

c. 为国家/区域水网和生态文明建设提供支撑。国家水网旨在通过对水资源的统一调度和优化配置,实现不同区域之间水资源的互补和共享,提高水资源的利用效率和供水安全程度,推进生态系统修复和保护。经济社会与生态用水平衡研究能够明确区域整体缺/盈水方向、程度、时空差异性及用水保障状况、问题等,助力于从整体性视角合理配置水资源,为水网优化布局和生态文明建设提供科学建议。

2 计算规则

2.1 计算规则框架

基于对经济社会与生态用水平衡概念内涵解读和特性分析,将经济社会与生态用水平衡计算在特定时间、空间条件下按照一定规则展开,框架见图1。经济社会与生态用水平衡计算遵循四大规

律,考虑六大因素的影响,符合三大准则的要求,基于扎实的理论基础。本文融合以上4个方面,按照资料处理、量化计算、结果检验的顺序,计算经济社会与生态用水平衡。

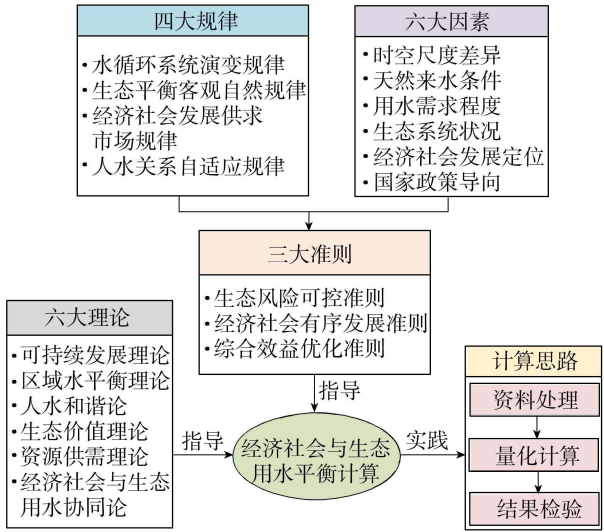


图1 经济社会与生态用水平衡计算规则框架

Fig.1 Framework of calculation rules for water use balance between economic society and ecology

2.2 规则要点

2.2.1 四大规律

a. 水循环系统演变规律。水资源对生态系统具有保护生态本底、维持系统健康稳定的功能,对经济社会系统具有供水、生产、支撑生存发展的功能。经济社会系统与生态系统本身都十分复杂,二者通过水循环耦合形成一个更为复杂的巨系统。因此,水循环是解决经济社会与生态用水竞争问题的基础^[18],用水平衡计算要遵循水循环系统演变规律。

b. 生态平衡客观自然规律。生态平衡指生态系统中各个组分之间相互依存、相互制约的状态,是生态系统稳定运行的基础。生态系统是一个动态的系统,会随着时间和环境条件的变化而发生调整 and 变化。生态平衡是在这种变化中寻求的一种相对稳定状态,以保持生态系统的功能和结构的合理运行。经济社会与生态用水平衡计算要遵循生态平衡客观规律,探求目标条件下的平衡结果。

c. 经济社会发展供求市场规律。经济社会发展供求关系变化会影响经济社会与生态用水需求,市场机制有助于水资源的优化配置,成本效益分析则是评估经济社会与生态用水平衡计算结果优劣的重要因素。因此,用水平衡计算要遵循经济社会发展供求市场规律,通过考虑可持续发展原则、供求关系、市场机制和成本效益分析,探求科学合理的经济社会与生态用水分配方案。

d. 人水关系自适应规律。经济社会与生态用

水的竞争关系是人水关系在水资源保护与经济社会发展方面的具体体现。因此,在研究经济社会与生态用水平衡时,必须遵循人水关系自适应规律^[19],采用人水关系学学科理论体系认识经济社会与生态用水关系^[20],按照经济社会与生态用水竞争关系蕴藏的自身规律开展用水平衡计算。

2.2.2 六大理论

a. 可持续发展理论是实现人与自然和谐共生的基本指导理论之一。可持续发展理论提倡经济增长、社会进步和环境保护之间的协调与平衡,可持续发展思想是我国治水的基本指导思想,在水利工作中发挥着重要作用。经济社会与生态用水平衡计算同样需要运用可持续发展思想和理论研究经济社会与生态用水竞争问题。

b. 区域水平衡理论是专门研究水平衡问题的理论方法体系^[21]。经济社会与生态用水平衡作为区域水平衡的重要方面,主要体现在经济社会发展与生态保护对水资源需求竞争上的协调,开展经济社会与生态用水平衡相关研究均应基于区域水平衡理论。

c. 人水和谐论是研究人水关系和谐问题的理论方法体系,包括系统的理论体系、丰富的研究方法以及广泛的应用实践^[22]。经济社会与生态用水关系作为人水系统至关重要的一对关系,二者平衡点的确定需以人水和谐论为基本指导。

d. 生态价值理论强调生态系统所提供的各种生态服务和资源都具有经济价值^[23]。在经济社会与生态用水平衡计算研究中,可以基于生态价值理论对计算结果的经济社会效益和生态效益进行对比分析,评估不同水资源开发利用方案的优劣性,帮助决策者在经济社会发展和生态保护之间做出权衡和选择。

e. 资源供需理论着眼于资源供给和需求之间的关系,旨在理解和分析资源的稀缺性、分配和利用方式以及资源供需平衡的实现^[24]。在经济社会与生态用水平衡研究中,基于资源供需理论可以明确研究区经济社会与生态用水需求程度和结构,为平衡类型判断提供依据。

f. 经济社会与生态用水协同论是协同论在水资源管理方面的应用和发展,强调针对水资源在经济社会-生态耦合系统中的竞争关系。在经济社会与生态用水平衡研究中需基于协同理念,协调经济社会与生态用水需求,以有限的水资源实现耦合系统的协同良性发展。

2.2.3 六大因素

a. 时空尺度差异。时间尺度上,水资源的供需

情况和生态系统状况存在季节性、年际变化等特征;空间尺度上,地理位置、气候条件、土地利用等因素导致水资源分布和利用存在空间差异。此外,经济社会与生态用水需求程度也存在时空差异性。因此,用水平衡计算需要考虑时空尺度差异。

b. 天然来水条件。来水量直接影响着水资源的可利用性和供应情况,对用水平衡计算结果具有重要影响,因此,需要基于具体的天然来水条件进行分析。

c. 用水需求程度。不同经济社会部门和生态系统对水资源的需求程度不同,这取决于产业结构、技术水平、用水效率等因素,此外,经济社会和生态用水端均存在不同需水层次的问题。因此,需要充分考虑两者不同用水需求程度的差异,以准确评估用水供需关系和平衡状态。

d. 生态系统状况。生态系统状况决定了其对水资源的需求量和经济社会发展的承载能力,因此,需要充分考虑生态系统状况,确保用水平衡计算结果符合生态系统保护的要求。

e. 经济社会发展定位。经济社会发展定位是一个区域在经济社会发展过程中所确定的发展方向和目标,将直接影响经济社会对水资源的需求以及水资源利用方式和效率,间接影响生态保护政策和措施。因此,要充分考虑经济社会发展定位,确保用水平衡计算结果与实际经济社会发展相一致。

f. 国家政策导向。政策导向指国家在区域水资源开发利用、经济社会发展规模、生态系统保护等方面所制定的政策、法规和指导性文件,因此,要充分考虑国家政策导向对经济社会部门用水行为、生态系统保护要求以及水资源管理和规划方面的影响。

2.2.4 三大准则

a. 生态风险可控准则。即生态用水要保证水体不干涸所需的蒸发和渗漏水量、维持水流更新所需的自净能力水量、维持水生动植物栖息和生存所需的水量等^[25],确保不出现不可逆的生态破坏。根据生态保护目标,生态风险可分为:①最大生态风险(ER_{max}),指生态用水保证河段不断流,满足水生生物繁育发育对生境条件的最低需求;②中度生态风险(ER_{med}),指生态用水确保水体较高自净能力,满足生态系统生物多样性及其良好的生存条件,维持河流生态系统结构稳定和动态平衡;③最低生态风险(ER_{min}),指生态用水确保水体最佳自净能力,满足生态系统生物多样性及其优质的生存条件,生态系统的健康稳定不受水资源的限制。

b. 经济社会有序发展准则。即经济社会用水

应在满足经济社会正常运行和基本需求前提下,尽可能支撑经济发展和提高居民生活质量。根据发展目标,发展层次可分为:①最小经济社会发展(ED_{min}),指经济社会用水满足农业、工业、第三产业以及居民生活等方面的基本需求;②适宜经济社会发展(ED_{mod}),指经济社会用水满足较高产业规模和居民良好生活条件的需求,支撑经济正向发展和提高居民生活水平;③最大经济社会发展(ED_{max}),指经济社会用水支撑经济高速发展和居民优质生活条件的需求,经济社会高质量发展不受水资源量的限制。

c. 综合效益优化准则。即在不损害水系统的前提下,以有限的水资源尽可能满足经济社会与生态用水需求,综合考虑两系统的用水效益和缺水损失关系,最大化水资源利用的经济社会及生态效益。

态用水需求,综合考虑两系统的用水效益和缺水损失关系,最大化水资源利用的经济社会及生态效益。

3 计算方法

3.1 计算思路

基于经济社会与生态用水平衡计算规则,提出其计算思路,如图2所示。总体流程为:处理研究区基础资料,摸清研究区特点及发展目标;遵循四大规律,基于六大理论,考虑六大因素,选取用水平衡量化方法,计算得到经济社会与生态用水平衡结果;在计算结果通过验证的前提下,将平衡关系及量化结果通过图表或指标等方式进行表达。

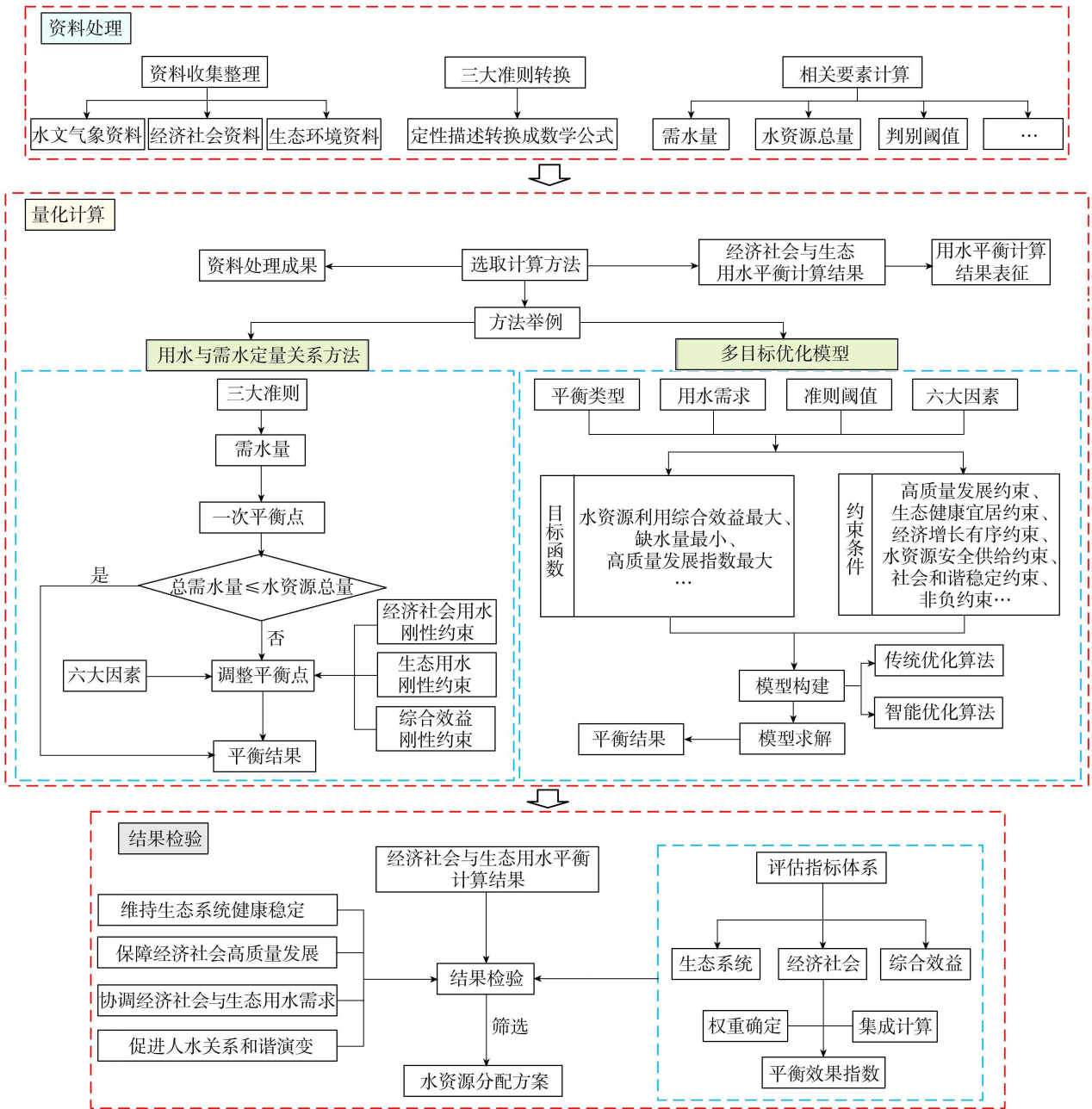


图2 经济社会与生态用水平衡计算思路与方法

Fig.2 Calculation ideas and methods of water use balance between economic society and ecology

3.1.1 资料处理

a. 资料收集整理。收集研究区水文气象、经济社会和生态等方面的资料和数据,对资料和数据进行预处理和统计分析。

b. 三大准则转换。对生态风险可控、经济社会有序发展、综合效益优化三大准则进行定性描述,将其转化为可量化的指标或公式,用于后续定量计算和分析。

c. 相关要素计算。基于收集到的数据和设定的判别准则,计算经济社会与生态用水平衡相关的要素,包括需水量、水资源总量、判别阈值等。

3.1.2 量化计算

基于资料处理成果,在考虑六大因素、符合三大准则的前提下,选择一定的方法计算和分析经济社会与生态用水平衡。

3.1.3 结果检验

结合实际用水效果对经济社会与生态用水平衡计算结果进行验证,检验计算结果是否有助于维持生态系统健康稳定、保障经济社会高质量发展、协调经济社会与生态用水需求、促进人水关系和谐演变等,以证明结果的可靠性。

采用多指标综合评价方法对结果进行反评估,即通过指标体系构建、指标量化、集成计算、结果分析等步骤,从系统的角度对计算结果进行整体性评价。以“单指标量化—多指标综合—多准则集成方法”^[26]为例,其计算思路为:①从生态系统、经济社会、综合效益3个层面构建全面反映用水平衡结果潜在效果的指标体系,确定各指标节点值;②按照单指标量化、多指标综合、多准则集成的步骤,确定指标体系权重,进行集成计算,得到最终的平衡效果指数;③结合既定的判别标准,对比实际用水效果指数和各方案用水平衡效果指数,检验计算结果的合理性及适用性,并筛选出较优的水资源分配方案。

3.2 计算方法及结果表征

3.2.1 用水与需水定量关系方法

基于经济社会与生态用水竞争关系,通过对比平衡两侧用水端的水资源需求与实际情况下多年平均水资源总量,计算和确定经济社会与生态用水平衡点。其关键环节包括:①基于研究区基础资料,初步拟定用水端目标准则,确定平衡两侧用水端在既定准则下的需水量;②计算得到经济社会需水和生态需水在总需水量中的占比,将其作为一次平衡点;③基于统计数据计算研究区多年平均水资源总量,对比一次平衡点的总需水量,以判断平衡点的合理

性;④若总需水量不超过水资源总量,则认为平衡结果适用;若总需水量超过水资源总量,既定准则计算得到的平衡点可能并不具有适用性,需考虑用水效益、缺水风险等因素对其进行适应性调整,确定更加合理和符合实际的平衡点。

在对平衡点二次调整的过程中,存在多种情景:①经济社会用水刚性约束,即在经济社会用水符合最小发展准则的前提下,优先保证生态用水需求;②生态用水刚性约束,即在生态用水符合最大风险可控准则的前提下,优先保证经济社会用水需求;③综合效益刚性约束,即在考虑生态系统状况、经济社会发展定位、国家政策导向等因素的基础上,同时调整用水端两侧的水资源需求。具体计算时可根据实际需求选择合适的约束条件对平衡点进行调整,而二次调整的情景设置和情景阈值的计算可能会导致计算结果存在一定局限性和不确定性,这是后续开展深入研究的重点内容。

3.2.2 多目标优化模型

基于经济社会与生态用水平衡符合的三大准则及其量化转换结果建立优化模型,包括优化目标和约束条件,通过求解该优化模型得到最优经济社会与生态用水分配方案。其关键环节包括:①目标函数建立,可以选择水资源综合效益最大、缺水量最小、高质量发展指数最大等;②约束条件设置,包含高质量发展约束、生态健康宜居约束、经济增长有序约束、水资源安全供给约束、社会和谐稳定约束、非负约束等;③优化算法选择,包含传统优化算法(线性规划、双层规划、两阶段规划、多目标优化等)和智能优化算法(遗传进化算法、粒子群算法、非支配排序遗传算法等)。在实践过程中,可根据具体需求建立目标函数、设置约束条件,并结合优化算法进行求解,研究区实践情况、目标需求、影响因素等的不确定性会造成模型求解结果的不确定性,这是后续构建经济社会与生态用水平衡多目标优化模型的关键内容。

3.2.3 用水平衡计算结果表征

经济社会与生态用水平衡计算结果可以采用具体数值(用水量大小)、经济社会与生态用水比例、百分比(经济社会用水或生态用水所占比例)等多种数学表达形式。用水平衡具有动态性,即在不同时段、不同条件下,用水平衡计算结果存在波动变化,其取值范围可能是一个点,也可能是一个区间或更复杂的集合;用水平衡具有区域性和主观性,针对不同区域,行为主体受多重因素的影响,经济社会端和生态端用水需求程度存在差异,也使得用水平衡计算结果存在多种类型,如表1所示。

表1 经济社会与生态用水平衡计算结果类型

Table 1 Types of calculation results of water use balance between economic society and ecology

类型	考虑因素	表达含义
最大生态风险-最小经济社会发展($ER_{max}-ED_{min}$)	综合效益	水资源利用仅满足生态和经济社会的最低需求
最大生态风险-适宜经济社会发展($ER_{max}-ED_{mod}$)	偏经济社会端	水资源利用满足生态最低需求,并实现适宜经济社会发展
最大生态风险-最大经济社会发展($ER_{max}-ED_{max}$)	偏经济社会端	水资源利用满足生态最低需求,并实现最大经济社会发展
中度生态风险-最小经济社会发展($ER_{med}-ED_{min}$)	偏生态端	水资源利用满足经济社会最低需求,并实现中度生态风险可控
中度生态风险-适宜经济社会发展($ER_{med}-ED_{mod}$)	综合效益	水资源利用可以满足生态和经济社会的适度需求
中度生态风险-最大经济社会发展($ER_{med}-ED_{max}$)	偏经济社会端	水资源利用满足经济社会最大需求,并实现中度生态风险可控
最低生态风险-最小经济社会发展($ER_{min}-ED_{min}$)	偏生态端	水资源利用满足经济社会最低需求,并实现最低生态风险可控
最低生态风险-适宜经济社会发展($ER_{min}-ED_{mod}$)	偏生态端	水资源利用满足经济社会适度需求,并实现最低生态风险可控
最低生态风险-最大经济社会发展($ER_{min}-ED_{max}$)	综合效益	水资源利用可以满足生态和经济社会的最大需求

4 应用实例

4.1 研究区概况

沁河是黄河在三门峡至花园口区间的主要支流,发源于山西省沁源县,自北向南流经山西、河南2省17个县(市)^[27]。沁河干流河道全长485 km,流域总面积约1.35万km²,山西境内占90.54%,河南境内占9.46%。流域多年平均气温5~11℃,多年平均降水量为613.1 mm,年内降水量分配极不均匀,多集中在夏季。沁河流域矿产资源丰富,蕴藏着煤、煤气层、锰铁矿等数十种矿产资源,其煤炭业发展迅速,是流域的支柱性产业,在国家能源战略中的地位十分突出,也是我国能源重化工基地的重要组成部分。沁河流域作为北方典型流域,自然条件复杂,产业丰富,其经济社会与生态用水平衡计算研究结果有助于进一步论证研究方法的可行性和普适性。

4.2 经济社会与生态用水平衡计算流程

以2019年沁河流域为例论证用水平衡计算规则的适用性,其中平衡量化采用用水与需水定量关系方法。计算流程包括:①收集并处理流域水文气象、经济社会和生态等方面的资料和数据;②按照最低生态风险准则和最大经济社会发展准则,计算平衡两侧用水端的需水量;③计算经济社会需水和生态需水在总需水量中的占比,将其作为流域一次平衡点;④根据基础资料,计算获取沁河流域2019年水资源总量,并判断一次平衡点的可行性;⑤根据判断结果,考虑六大因素,分别在经济社会用水刚性约束、生态用水刚性约束、综合效益刚性约束条件下调整平衡点;⑥再次求解,得到不同情景下的流域经济社会与生态用水平衡结果。图3为沁河流域经济社会与生态用水平衡计算流程。

4.2.1 生态需水量计算

基于生态用水的概念及内涵,采用Tennant法根据“很好”“较好”“一般”标准^[28]分别计算生态风

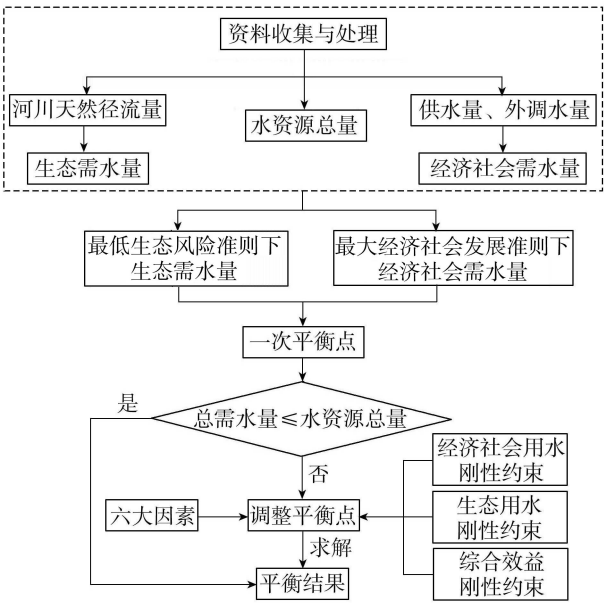


图3 沁河流域经济社会与生态用水平衡计算流程

Fig.3 Calculation process of water use balance between economic society and ecology in the Qin River Basin

险可控准则下不同层次的生态需水量。根据《河南省沁河流域生态流量调整技术方案》统计结果,沁河流域河川天然径流量为11.00亿m³,采用Tennant法求解流域最大生态风险、中度生态风险、最低生态风险准则下的生态需水量分别为4.92亿、7.10亿、9.84亿m³。

4.2.2 经济社会需水量计算

参考水资源供需平衡指数分析方法,按照“轻度短缺”“临界短缺”“供需平衡”标准^[29]分别计算经济社会有序发展准则下不同层次的经济社会需水量。根据《河南省沁河流域生态流量调整技术方案》《2019年河南省水资源公报》《2019年山西省水资源公报》统计结果,沁河流域2019年供水量为9.83亿m³,外调水量为2.22亿m³,采用水资源供需平衡指数分析方法并考虑流域外调水量,计算可得流域最小经济社会发展、适宜经济社会发展、最大经济发展准则下的经济社会需水量分别为

12.05 亿、12.54 亿、14.02 亿 m³。

4.3 结果与分析

参考《河南省沁河流域生态流量调整技术方案》，测算沁河流域 2019 年水资源总量为 13.56 亿 m³，略低于多年平均水资源总量 15.45 亿 m³，选择其作为典型年。采用用水与需水定量关系方法计算流域经济社会与生态水平衡，结果如表 2 所示。

本文初步拟定经济社会端用水符合最大经济社会发展准则，生态端用水符合最低生态风险准则，计算既定准则下的经济社会需水量和生态需水量，分别为 14.02 亿 m³和 9.84 亿 m³，求得一次平衡点经济社会需水量占比为 59%。因一次平衡点总需水量大于水资源总量，故对其进行适应性调整：①在经济社会用水刚性约束条件下，分别按照最低生态风险准则和中度生态风险准则调整生态用水需求，求得经济社会需水量占比分别为 55% 和 63%；②在生态用水刚性约束条件下，分别按照最大经济社会发展准则和适宜经济社会发展准则调整经济社会用水需求，求得经济社会需水量占比分别为 74% 和 72%；③在综合效益刚性约束条件下，分别按照中度生态风险准则与适宜经济社会发展准则或最大生态风险准则与最小经济社会发展准则，同时调整经济社会与生态用水需求，求得经济社会需水量占比分别为 64% 和 71%。

根据表 2 计算结果，考虑沁河流域天然来水条件、用水端两侧需求程度、生态状况、经济发展定位以及国家政策导向等因素，并对比计算方案总需水量与水资源总量，在综合效益刚性约束条件下按照最大生态风险准则与最小经济社会发展准则的计算结果较接近实际情况。根据其计算结果，得到沁河流域 2019 年经济社会与生态水平衡点，即经济社会用水与生态用水比例为 0.71：0.29，经济社会用水与生态用水量分别为 9.63 亿 m³ 和 3.93 亿 m³。然而，该结果的流域总需水量仍然超过流域水资源总量，这是由于流域自身水资源禀赋条件所致。针

对该结果，应通过调水工程、推广节水技术、调整用水结构等多种措施协调流域经济社会和生态用水需求，推动实现流域经济社会与生态水平衡。

根据《河南省沁河流域生态流量调整技术方案》《2019 年河南省水资源公报》《2019 年山西省水资源公报》统计结果，沁河流域 2019 年经济社会用水量为 11.51 亿 m³，生态用水量仅为 2.05 亿 m³。对比本文计算结果可知，沁河流域经济社会与生态水平衡计算结果与实际情况存在明显差距，主要原因是沁河流域水电站开发强度较大，部分电站设计及运行忽略了生态水量下泄，且流域以高耗水的传统重化工业为主，导致经济社会端用水量增加；水利工程运行不当和用水量增加导致生态端用水量被严重挤占，河流生态功能受损。因此，为了改善流域生态状况，需调整流域产业结构，减少无效耗水，优化水利工程运行方式，以实现流域经济社会与生态水平衡。

5 结 语

本文立足于区域水平衡研究与国家水网建设的战略需求，考虑经济社会与生态用水的复杂作用关系，提出了经济社会与生态水平衡的概念并解读其内涵。在此基础上构建了水平衡计算规则框架，包括四大规律、六大理论、六大因素、三大准则，同时提出了经济社会与生态水平衡的计算思路和方法。以沁河流域为例，选取 2019 年为代表年开展了实例应用，求得其一次平衡点为经济社会用水与生态用水的比例为 0.59：0.41，并分别在经济社会用水刚性约束、生态用水刚性约束、综合效益刚性约束条件下求得不同情景下的平衡结果，最后考虑六大因素并对比总需水量与水资源总量，确定沁河流域经济社会与生态水平衡点为经济社会用水与生态用水的比例为 0.71：0.29。

本文是对经济社会与生态水平衡概念内涵、计算规则和计算思路的初步探讨和分析，旨在进一步完善区域水平衡内容，为经济社会与生态水平

表 2 沁河流域 2019 年经济社会与生态水平衡计算结果

Table 2 Calculation results of water use balance between economic society and ecology in the Qin River Basin in 2019							
约束类型	准则	经济社会需水量/亿 m ³	生态需水量/亿 m ³	总需水量/亿 m ³	经济社会需水量占比/%	经济社会用水量/亿 m ³	生态用水量/亿 m ³
既定准则*	最大经济社会发展、最低生态风险	14.02	9.84	23.86	59	7.97	5.59
经济社会用水刚性约束	最低生态风险	12.05	9.84	21.89	55	7.46	6.10
	中度生态风险	12.05	7.10	19.15	63	8.53	5.03
生态用水刚性约束	最大经济社会发展	14.02	4.92	18.94	74	10.04	3.52
	适宜经济社会发展	12.54	4.92	17.46	72	9.74	3.82
综合效益刚性约束	中度生态风险、适宜经济社会发展	12.54	7.10	19.64	64	8.66	4.90
	最大生态风险、最小经济社会发展	12.05	4.92	16.97	71	9.63	3.93

注：* 表示一次平衡点计算的既定准则。

衡计算提供参考。随着国家发展模式变化和研究的深入,经济社会与生态用水平衡概念内涵需进一步完善。针对不同研究对象和任务需求,需进一步丰富计算规则并引入更加科学的研究方法,包括经济社会与生态用水平衡计算总体方法、平衡要素计算方法以及结果检验方法。此外,还应开展广泛的应用实践,确定不同区域的经济社会用水阈值,以期为区域水资源开发利用、配置调控、管理保护等提供科学依据和技术支撑。相关研究成果将进一步深化对人水关系的认识,丰富人水关系学理论体系、研究内容和研究方法,推动学科体系建设。

参考文献：

[1] 焦士兴,李青云,王安周,等. 基于生态位的安阳市用水结构与产业结构动态演化分析[J]. 水资源保护,2021, 37 (1): 79-85. (JIAO Shixing, LI Qingyun, WANG Anzhou, et al. Dynamic evolution analysis of water consumption structure and industrial structure based on niche in Anyang City[J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):79-85. (in Chinese))

[2] FENG Jianghong. Optimal allocation of regional water resources based on multi-objective dynamic equilibrium strategy[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 90: 1183-1203.

[3] 黄晓荣,张新海,裴源生,等. 经济用水与生态用水的优化模拟耦合模型研究[J]. 人民黄河,2006,28(1):44-46. (HUANG Xiaorong,ZHANG Xinhai,PEI Yuansheng, et al. Study on optimized simulation and coupled model of water use for economy and ecology[J]. Yellow River, 2006,28(1):44-46. (in Chinese))

[4] 方创琳,步伟娜,鲍超. 黑河流域水-生态-经济协调发展方案及用水效益[J]. 生态学报,2004,24(8):1700-1707. (FANG Chuanglin,BU Weina,BAO Chao. Options of water-ecology-economy balanced development and water usage analysis in the Heihe Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(8):1700-1707. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 陈军飞,张学友,李远航,等. 考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):18-28. (CHEN Junfei,ZHANG Xueyou, LI Yuanhang, et al. Ecological

compensation contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):18-28. (in Chinese))

[7] ZHANG Yali,LU Yiya,ZHOU Qing,et al. Optimal water allocation scheme based on trade-offs between economic and ecological water demands in the Heihe River Basin of Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2020,703:134958.

[8] 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))

[9] 张建云,胡庆芳,王银堂,等. 区域水平衡与健康水平衡实现路径[J]. 水科学进展,2023,34(3):323-335. (ZHANG Jianyun,HU Qingfang,WANG Yintang, et al. Regional water balance and the path to healthy water balance[J]. Advances in Water Science,2023,34(3):323-335. (in Chinese))

[10] LI Meishu,YANG Xiaohua,DI Chongli,et al. A novel framework for integrative assessment of water balance health in China[J]. Journal of Cleaner Production,2024, 443:141199.

[11] 贾绍凤,柳文华. 水资源开发利用40% 阈值溯源与思考[J]. 水资源保护,2021,37(1):87-89. (JIA Shaofeng,LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):87-89. (in Chinese))

[12] 王西琴,张远. 中国七大河流水资源开发利用率阈值[J]. 自然资源学报,2008,23(3):500-506. (WANG Xiqin,ZHANG Yuan. The allowable exploitation rate of rivers water resources of the seven major rivers in China [J]. Journal of Natural Resources,2008,23(3):500-506. (in Chinese))

[13] 雷静,张琳,黄站峰. 长江流域水资源开发利用率初步研究[J]. 人民长江,2010,41(3):11-14. (LEI Jing,ZHANG Lin, HUANG Zhanfeng. Preliminary study on development rate of water resources in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2010, 41 (3): 11-14. (in Chinese))

[14] 李斌,陈午,许新宜,等. 基于生态功能的水资源三级区水资源开发利用率研究[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1918-1925. (LI Bin,CHEN Wu,XU Xinyi, et al. Research on the utilization ratio of the third class water resources regions based on ecological function[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31 (11): 1918-1925. (in Chinese))

- [15] 张晓璐,刘德地.一种基于生态流量的水资源开发利用率阈值估算方法[J].中国农村水利水电,2023(2):88-100. (ZHANG Xiaolu, LIU Dedi. A method to determine the threshold of water exploitation index based on ecological flow estimation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(2):88-100. (in Chinese))
- [16] 左其亭.净水资源利用率的计算及阈值的讨论[J].水利学报,2011,42(11):1372-1378. (ZUO Qiting. Discussion on the calculation method and threshold of the net-utilization ratio of water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11):1372-1378. (in Chinese))
- [17] 左其亭.和谐论:理论·方法·应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [18] 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))
- [19] 左其亭.水资源适应性利用理论的应用规则与关键问题[J].干旱区地理,2017,40(5):925-932. (ZUO Qiting. Application rules and key issues in theory of adaptive utilization of water resources [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5):925-932. (in Chinese))
- [20] 左其亭.人水关系学[M].北京:中国水利水电出版社,2023.
- [21] 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))
- [22] 左其亭.人水和谐论及其应用研究总结与展望[J].水利学报,2019,50(1):135-144. (ZUO Qiting. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1):135-144. (in Chinese))
- [23] 刘春腊,刘卫东,徐美.基于生态价值当量的中国省域生态补偿额度研究[J].资源科学,2014,36(1):148-155. (LIU Chunla, LIU Weidong, XU Mei. The provincial eco-compensation standard of China based on ecological value equivalents [J]. Resources Science, 2014, 36(1):148-155. (in Chinese))
- [24] WANG Tian, TU Xinjun, SINGH V P, et al. Socioeconomic drought analysis by standardized water supply and demand index under changing environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347:131248.
- [25] LIU Fang, QIN Tianling, YAN Denghua, et al. Classification of instream ecological water demand and crucial values in a semi-arid river basin [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712:136409.
- [26] 左其亭,张云,林平.人水和谐评价指标及量化方法研究[J].水利学报,2008,39(4):440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4):440-447. (in Chinese))
- [27] 纪义虎,左其亭,马军霞.基于Tapio和LMDI模型的沁河流域碳排放与水资源利用脱钩关系分析[J].水资源保护,2023,39(4):94-101. (JI Yihu, ZUO Qiting, MA Junxia. Analysis of decoupling relationship between carbon emissions and water resources utilization in the Qinhe River Basin based on Tapio and LMDI models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4):94-101. (in Chinese))
- [28] 郑志宏,张泽中,黄强,等.生态需水量计算Tennant法的改进及应用[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(2):34-39. (ZHENG Zhihong, ZHANG Zezhong, HUANG Qiang, et al. Improvement and application on ecological water requirement Tennant method [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(2):34-39. (in Chinese))
- [29] 赵维岭,纪义虎,左其亭,等.区域水资源供需平衡指数分析方法:以引沁灌区为例[J].灌溉排水学报,2023,42(3):128-135. (ZHAO Weiling, JI Yihu, ZUO Qiting, et al. Variation in balance between water supply and water demand in Yinqin irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3):128-135. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-23 编辑:施业)

