

区域水平衡的阈值体系与运用领域

吴青松^{1,2}, 左其亭^{1,2,3}, 马军霞^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室; 3. 郑州市水资源与水环境重点实验室)

摘要:立足于实现健康区域水平衡的重大需求,围绕水平衡阈值体系与运用领域开展了系统探索,阐明了水平衡理论方法、阈值体系、运用领域等的关联,剖析了健康区域水平衡的实现路径。构建了以表征指标和指标阈值为核心的水平衡阈值体系架构,从水收支平衡、经济社会供需水平衡、经济社会与生态用水平衡、人水关系和谐平衡出发,梳理得到了表征指标体系,考虑限值、范围、样式等方面明确了指标阈值的表现形式,并介绍了阈值的确定方式。考虑主题相关程度、理论遵循程度、方法运用程度,分析了区域水平衡的运用领域,给出了四大平衡对应的研究内容和总体性研究思路,选择基于水收支平衡的水资源变化归因分析、基于经济社会供需水平衡的水-能源-粮食-生态协同优化、基于经济社会与生态用水平衡的水资源开发利用潜力计算、基于人水关系和谐平衡的人水关系调控 4 个例子开展了详细解析。

关键词:区域水平衡; 阈值体系; 运用领域; 人水关系; 水循环

Threshold system and application fields of regional water balance//Wu Qingsong^{1,2}, Zuo Qiting^{1,2,3}, Ma Junxia^{1,2}
(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protect; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resources and Environment)
Abstract: Based on the significant demand for achieving healthy regional water balance, systematic exploration has been conducted around the threshold system of water balance and its application fields. The correlation between water balance theory methods, threshold systems, and application fields is clarified, and the implementation path of healthy regional water balance is analyzed. An architecture of the water balance threshold system with characterization indicators and indicator thresholds as the core is constructed. Starting from the perspectives of water budget balance, water supply-demand balance of economic society, water use balance between economic society and ecology, and harmonious balance of human-water relationship, characterization indicator systems are sorted out. The expression forms of indicator thresholds are defined with consideration of limits, ranges, and patterns, and the methods for determining the thresholds are introduced. Considering theme relevance, theoretical compliance, and method applicability, the application fields of regional water balance are analyzed. The research contents corresponding to the four major balances and the overall research ideas are presented. Four examples are selected for in-depth analysis: attribution analysis of water resource changes based on water budget balance, synergetic optimization of water-energy-food-ecology based on the water supply-demand balance of economic society, calculating the potential of water resource development and utilization based on the water use balance between economic society and ecology, and human-water relationship regulation based on the harmonious balance of human-water relationship.
Key words: regional water balance; threshold system; application field; human-water relationship; water cycle

在全球可持续发展的时代浪潮下,人水关系已成为牵涉人类命运的重要议题^[1]。水作为经济社会发展 and 生态安全保障的基础性资源,具有无可替代的重要地位^[2]。21 世纪后,全球气候变化与人类活动的双重影响给水资源利用与保护工作带来严峻的挑战^[3]。人口增长、经济扩张和城市化进程加速,导致对水资源的需求呈爆发式增长,而水资源的

不均匀分布和管理不善则恶化了人水关系^[4-5]。由于地理气候条件的特殊性,我国水资源的时空失衡现象极为显著,问题的复杂性和所面临的挑战性位居世界前列,水安全保障形势愈发严峻^[6],亟须从平衡的视角出发,探索以工程和非工程措施为支撑,推动水资源科学开发利用、经济社会发展布局优化、生态环境治理修复等工作,促进人水和谐共生目标

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211301)
作者简介:吴青松(1997—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wqsec@zzu.edu.cn
通信作者:马军霞(1968—),女,高级实验师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:majx@zzu.edu.cn

的实现。

我国十分重视水安全和人水系统健康问题,水平衡思想长期存在于国家治水思想、政策、制度和规划^[7-9]。2005 年以来,人水和谐思想始终是我国治水思想的核心组成,所追求的人水和谐共生目标与水平衡如出一辙^[10-11]。2007 年发布的《节水型社会建设“十一五”规划》,目的之一就是通过节约用水改善经济社会供需水平衡状态。2012 年发布的《关于实施最严格水资源管理制度的意见》,重要一点就是推动经济社会发展与水资源环境承载能力相协调^[12]。2014 年,习近平总书记提出的“十六字”治水思路中,“空间均衡”蕴含了水平衡的思想^[13],同年的“四水四定”原则也贯穿了以上思想。2023 年印发的《国家水网建设规划纲要》,出发点之一就是解决水资源的时空失衡问题^[14]。区域水平衡研究同样是学界持续关注方向,近年来学者们开展深入探索并取得了诸多成果^[15-17]。李文鹏^[18]介绍了水循环与水平衡的关系,阐述了水平衡研究的必要性并给出重点方向。胡庆芳等^[19]立足于国家水与生产力要素的空间不匹配问题,构建了水平衡与国土空间协调发展战略。张建云等^[20]从基本概念、多重内涵、影响因素、评判准则、实现路径等方面剖析了区域水平衡。左其亭等^[21-22]在 2022 年阐明了区域水平衡的基本原理和理论体系,2024 年提出了区域水平衡及失衡程度度量方法体系。区域水平衡理论能够为开展相关研究提供基础支撑,对应“意指什么”的问题;区域水平衡方法是定量认知水平衡状态的重要手段,对应“如何量化”的问题。但更进一步,还应聚焦“如何全面表征区域水平衡”“基于区域水平衡能够做什么”两个问题,分别对应阈值体系与运用领域两个重要方面。目前采取阈值体系表征系统(河流、功能区、农田等)状态已有一些成果,如刘晓燕等^[23]提出用 8 个定量指标衡量黄河健康程度并给出了健康指标量值;胡春宏等^[24]构建了表征黄河流域水沙平衡的三级指标体系并确定了关键指标阈值,但仍缺乏区域水平衡阈值体系的专项研究。区域水平衡与水文、水资源、生态等领域的诸多研究内容存在紧密关联,将水平衡理论方法应用

于这些研究内容,可显著提升结果的科学性与实用性^[25-26],但基于水平衡开展哪些研究、如何开展研究尚需系统性探索。

综上,本文从水平衡理论方法、阈值体系、运用领域的关联入手,探索区域水平衡的阈值体系架构,从表征指标和指标阈值两个方面展开论述,考虑主题相关程度、理论遵循程度、方法运用程度 3 个方面,框定区域水平衡的运用领域并概述研究思路,并选择代表性的研究内容进行示例解析。

1 健康区域水平衡的实现路径

在理论方面,左其亭等^[21]将区域水平衡解构为水收支平衡、经济社会供需水平衡、经济社会与生态用水平衡、人水关系和谐平衡(即“四大平衡”),揭示了其基本原理并构建了理论体系框架。水平衡度量方法包括两个方面:一是量化方法,包括分布式模型、系统模型、数学公式等,旨在刻画水循环过程和获取水平衡要素的数据;二是评估方法,为用于水平衡状态评估的方法体系^[22],作用在于承接量化方法所得的结果,实现水平衡状态好坏、方向、程度的定量判别。相较于定性认识和量化评估水平衡,阈值体系和运用领域是更高层次的主题,是水平衡理论方法的科学价值的体现,也是“区域水平衡做些什么”这一关键问题的着眼点。水平衡理论方法、阈值体系、运用领域存在紧密关联(图 1),具体为:理论方法为阈值体系构建提供基本遵循,阈值体系驱动运用领域的研究并决定其方向;运用领域的研究目的之一就是以阈值为基准改变指标量值,阈值体系的科学性和有效性对理论方法的合理性提供反馈;理论方法为开展运用领域的研究提供直接和间接支撑,通过运用领域的研究可以不断丰富理论方法;而理论方法的构建、阈值体系的设定、运用领域的实践均需以物理机制为根本遵循,确保不脱离客观规律^[27]。实现健康水平衡状态的主体路径为:在水平衡原始状态下,遵循水循环过程和水平衡机制,基于理论方法确定阈值体系,以指标阈值为基准,开展运用领域相关的研究进行指标调控,最终达到水平衡理想状态。

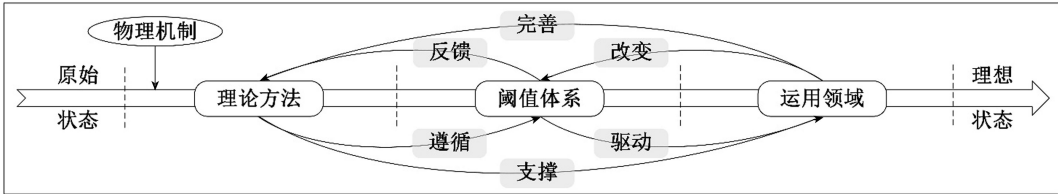


图 1 健康区域水平衡的实现路径

Fig. 1 Realization path of healthy regional water balance

2 区域水平衡的阈值体系架构及表征指标

2.1 阈值体系架构

区域水平衡归根结底是一种状态,理想状况时应为:在人水关系或者人水系统范畴内,各指标、要素、过程、系统、平衡均状态良好并可接受。从数学的角度表达,健康的区域水平衡应为前述方面的表征值均在可控或适宜范围内,其中指标是最基础的表征单元,指标量值则是最直接的表征形式,其他方面均可以通过单个或多个指标进行表征(图2)。水平衡阈值体系包括表征指标和指标阈值两个方面^[28],相应需要开展的研究工作:一是确定关键指标,定性和定量指标皆可,但后者更为合适;二是确定指标阈值,包括阈值形式和具体量值,即进行指标的量化表达。通过阈值体系研究能够更为直接和全面地表现区域水平衡状态和存在问题,为水平衡调控提供方向和支撑。

2.2 表征指标体系

水平衡表征指标按系统划分可归为水资源系统、经济社会系统、生态系统和人水系统,考虑四大平衡的侧重和特点,系统和平衡有较为明确但并不严格的对应关系(图3)。再进一步考虑对平衡的表征能力,指标又可划分为基本指标、核心指标、重要指标、普通指标4类,特性分别为:基本指标直接表征和衡量水平衡;核心指标在反映或刻画平衡上起着至关重要作用;重要指标与平衡紧密相关但不具有显著性;普通指标与平衡确有关联但联系不强。

按照上述原则筛选和归类指标,结果如表1所

示。①水收支平衡方面,主要为直接反映平衡状态、与平衡存在关联或间接影响收支过程的指标。最基本的指标为水收支平衡度,此外如水资源变化率表示水资源增加或衰减的速率,水资源可持续性表示水资源禀赋维持循环利用的能力;核心指标如降水径流系数是反映平衡过程的重要方面,水资源空间均衡度是空间维度的平衡状态刻画;重要指标如低限流量、水域面积率均是改善平衡时需要考虑的指标;普通指标如透水面积率、土壤相对湿度都是平衡涉及的范围。②经济社会供需水平衡方面,主要为涉及经济社会供需水因素、状态、过程、影响等的指标。最基本的指标为经济社会供需水平衡度,此外如水资源承载规模涉及以平衡为参考的经济社会发展体量问题;核心指标如供水能力、水资源开发利用率与平衡状态直接相关;重要指标如用水效率、水功能区水质达标率均是影响平衡的重要方面;普通指标如节水灌溉面积占比、公共供水管网漏损率也对平衡存在一定影响。③经济社会与生态用水平衡方面,主要为表现生态环境状况、经济社会与生态用水关系的指标。最基本的指标为经济社会与生态用水平衡度,此外如经济社会与生态用水占比是学界持续关注的问题;核心指标如水资源开发利用潜力需要在平衡的基础上研究;重要指标如湿地规模、植被覆盖率是判别平衡状态需要考虑的重要方面;普通指标如滩地横比降、陆生生物多样性均与平衡存在特定的关联。④人水关系和谐平衡方面,主要为影响人文系统和水系统发展、表征人水关系状态的指标。最基本指标为人水关系和谐平衡度,此外如水

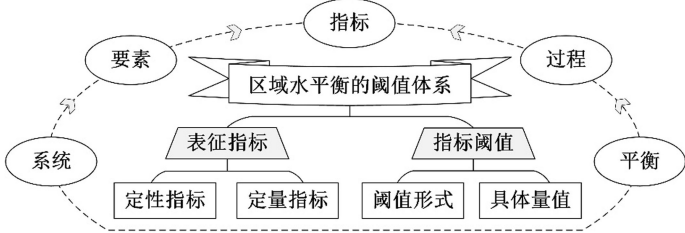


图2 区域水平衡的阈值体系架构

Fig. 2 Threshold system architecture for regional water balance

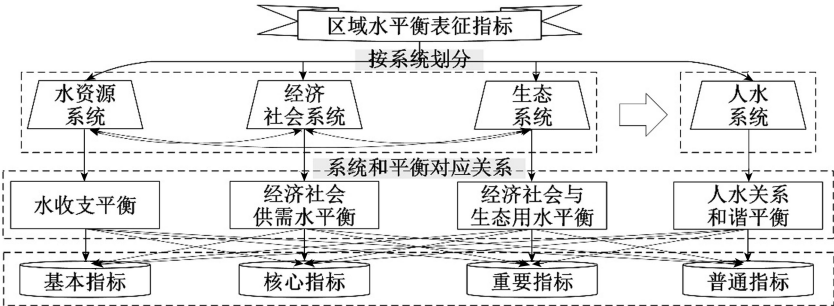


图3 区域水平衡表征指标体系

Fig. 3 Characterization indicators system of regional water balance

表 1 区域水平衡表征指标梳理结果

Table 1 Summary results of characterization indicators for regional water balance

指标类型	水收支平衡	经济社会供需水平衡	经济社会与生态用水平衡	人水关系和谐平衡
基本指标	水收支平衡度、水资源变化率、水资源可持续性	经济社会供需水平衡度、水资源可利用比例、水资源承载规模	经济社会与生态用水平衡度、经济社会与生态用水占比、经济社会发展与生态保护协调度	人水关系和谐平衡度、水安全指数、水资源适应性利用指数、水利高质量发展指数
核心指标	水资源量、降水量、降水强度、蒸发量、蒸发强度、径流深、径流变化率、流量、降水径流系数、水源涵养能力、产水模数、水资源时间集中度、水资源空间均衡度	供水水质状况、地表水供水量、地下水开采量、人均水资源利用量、供水能力、水资源开发利用率、水资源负载指数、供用水结构、用水效率	水环境容量、生态流量、生态补水量、生态需水量、水资源开发利用潜力、河道断流率、河流生态基流满足程度、地表水体水位、地下水位埋深、河湖库面积	水与生产力要素匹配程度、水资源开发利用影响程度、水资源禀赋胁迫指数、人文系统水服务需求满足程度、水资源利用效益、水系统压力指数、洪涝指数、干旱指数
重要指标	流速、低限流量、高限流量、平滩流量、水域面积率、水库调蓄能力、河道产沙量、输沙能力、作物水分亏缺指数、温度	灌溉水有效利用系数、中水回用率、用水普及率、饮用水安全保证率、万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、单位面积灌溉用水量、水功能区水质达标率、饮用水水源地下水水质状况	水环境承载力、生态健康指数、生境质量指数、生态系统服务价值、水生生物多样性、湿地规模、植被覆盖率、通航水深保证率、地下水下降区比例、水体污染物排放量	河网密度与连通性、人均水资源可利用量、防洪排涝达标率、水利工程设施完好率、河岸河床安全稳定程度、自然景观保护利用指数、公众参与水资源管理决策的程度
普通指标	透水面积率、地下含水层构造、降水入渗系数、土壤相对湿度、相对湿度指数、河道最大排洪能力、日照时数、太阳辐射强度、风速	生活节水器具普及率、节水灌溉面积占比、公共供水管网漏损率、公众节水意识、人口规模、作物种植面积和结构、产业结构和规模、水权市场建设、供水价格	滩地横比降、河流健康度、陆生生物多样性、水能资源开发率、耕地盐碱化比例、净初级生产率、污水处理率、地下水矿化度、植被水分利用效率	水土流失治理率、人口密度、城镇化率、土地利用类型、水热耦合平衡指数、水利投资占 GDP 比重、公众对河流保护自觉度、水事纠纷解决机制及程度

资源适应性利用指数、水安全指数均是平衡的直接体现;核心指标如洪涝指数、水与其他要素匹配程度均深刻影响着人水关系;重要指标如河网密度与连通性、防洪排涝达标率都是平衡涉及的重要方面;普通指标如水土流失治理率,在人水关系中体现不那么明显但不可忽视。

2.3 指标阈值确定思路

水平衡表征指标的阈值形式往往各不相同,需要从限值、范围、样式三方面考虑^[29](图 4)。从限值的角度来看,存在上限、下限、中间值 3 种情况;上限阈值表示指标量值不能或最好不要超过某一最高限度,否则会超过系统的承载能力,如高限流量;下限阈值表示指标量值不能或最好不要低于某一最低限度,否则会制约系统的发展进程,如低限流量;中间值表示部分指标的量值并非越大或越小更好,处于某一中间值时更有利于维持系统良好状态,如水资源开发利用率。从范围的角度看,存在点、区间、集合 3 种情况:前者表示指标阈值是一个确定的数据点,指标量值高于或低于该点会发生质的转变,如供水水质状况;中者表示指标阈值是一个包含上界

和下界的区间,主要考虑了人水系统的不确定性,如单位面积灌溉用水量;后者考虑受人为主观性的影响,指标阈值可能是包含多个元素的集合,如生态需水量。从样式的角度看,存在数值、比值、占比 3 种情况:数值表示指标的阈值为具有特定量纲的具体数值,如人均水资源可利用量;比值表示指标的阈值为二者及以上相互之间的比例,如经济社会用水量:生态用水量;占比表示指标的阈值为部分占总体的百分比,如用水普及率。

指标阈值确定是一个复杂和困难的工作,需要考虑时段性、地域性、不确定性、主观性等多方面因素^[30]。时段性体现在对于不同的时期,指标的阈值不同,会随时间呈现波动变化;地域性体现在对于同一指标,不同的地区或流域的阈值不尽相同,需要结合实际确定;不确定性体现在受非稳定因素的影响,最终确定的指标阈值可能并非是最优结果,但一般不会偏差太多;主观性体现在由于行为主体的认知差异,对相同时域空间下的同一指标,不同人或组织确定的阈值也会存在差异。合理确定指标阈值需要进行专项研究,指标阈值的确定方式各异,包括但不

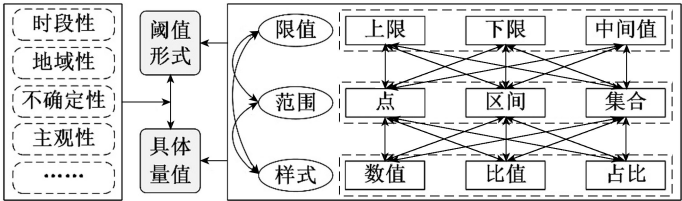


图 4 区域水平衡表征指标阈值框架

Fig. 4 Framework of characterization indicators threshold of regional water balance

限于定性分析、问卷调查、专家座谈、经验公式、趋势分析、情景对比、模型模拟、量化计算。例如,考虑城、地、人、产竞争性用水需求,统筹各方面的发展效益和缺水风险,采用非线性规划模型优化求解,最终确定水资源承载规模阈值^[31]。确定阈值后需要进行指标调控工作,即通过调控手段将实际的指标量值尽可能远离或接近阈值,实现向好的方向发展。

3 区域水平衡的运用领域及示例

3.1 运用领域分析

区域水平衡的运用领域特指需要运用水平衡理论和方法或基于水平衡视角和思路开展的研究,是实现健康水平衡的重要手段^[32]。判断某项研究内容是否与水平衡存在紧密联系,可以从主题、理论、方法三方面来看。主题方面,根据与水平衡主题的相关程度,大致包括极度相关、高度相关、中度相关、轻度相关 4 种情况;理论方面,根据对水平衡理论的遵循程度,大致包括根本遵循、基本遵循、必要遵循、重要遵循 4 种情况;方法方面,根据对水平衡方法的运用程度,大致包括完全运用、大体运用、部分运用、少量运用 4 种情况。不同研究内容在以上三方面的体现程度并不一致,三方面交叉赋予了研究内容明确的水平衡属性。需要注意的是,水平衡运用领域的范畴较为广泛,并非所有研究内容的目标都是对水平衡表征指标进行调控,如基于水收支平衡的水资源可持续性评估,其侧重于状态评价而非指标调控。

在筛选和确定基于区域水平衡的研究内容后开展分类工作,考虑与四大平衡的相关性,主要存在 4 种情况:①与单个平衡主要相关,如开展水资源演变和归因分析主要基于水收支平衡;②与两个平衡相关,如水资源优化配置需要考虑来水情景对水资源进行合理分配,涉及水收支平衡和经济社会供需水平衡;③与 3 个平衡相关,如生态调度主要面向经济社会与生态用水平衡,但研究中无可避免地需要考虑水收支平衡和经济社会供需水平衡问题;④与 4 个平衡均相关,如跨流域/区域调水的前提在于明晰调水区 and 受水区的水资源禀赋、供需水矛盾以及生态用水保障情况,核心目标之一就是改善人水关系。尽管有些研究内容涉及诸多平衡,但往往受某一平衡主导或者二者主要相关,故同样按照四大平衡归类研究内容(图 5)。

需以新的视角探索基于区域水平衡的研究内容,水平衡理论方法为研究提供基础,在为何开展研究上发挥着核心指导作用;阈值体系为研究提供方向,在如何开展研究上发挥着重要促进作用。总体研究思路为:①剖析理论支撑,明确为何基于水平衡视角进行研究、拟解决的问题是什么、涉及哪些理论方法;②明确研究重点和表征指标,确定研究内容关注的主题及对应的指标,二者往往是一体的,是研究的落脚点,有时需要确定指标目前的量值,以及其与阈值的接近或远离程度;③实施研究工作,围绕主题内容选取针对性的方法完成研究工作,过程中可能

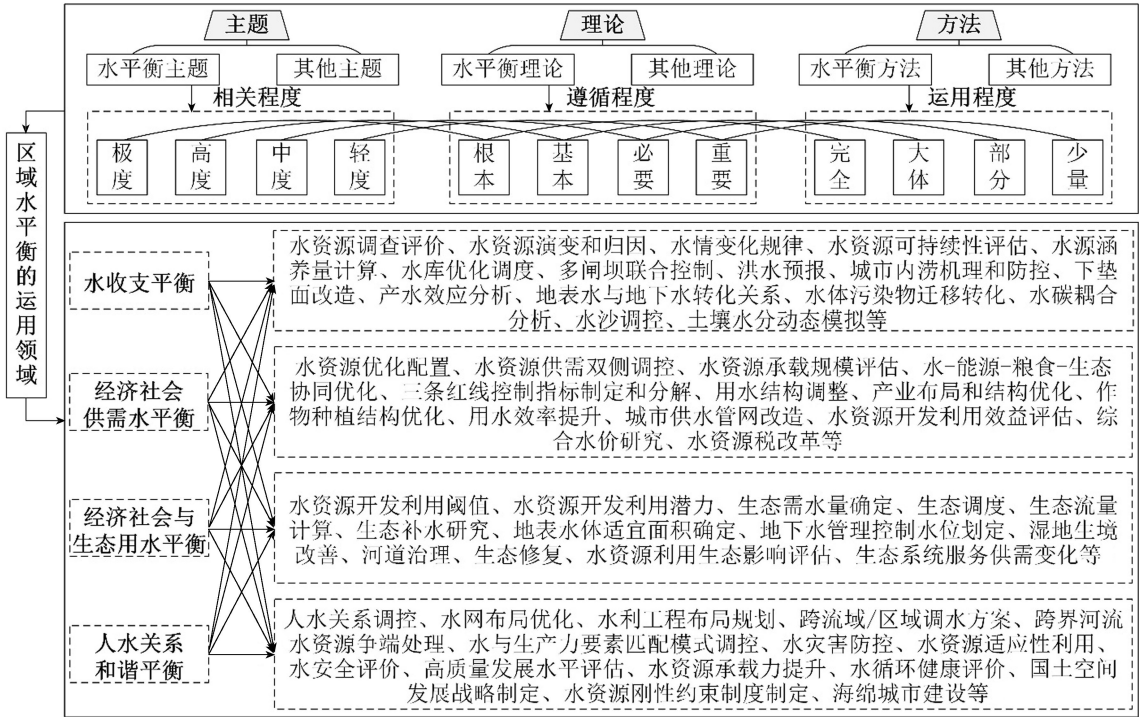


图 5 区域水平衡运用领域的梳理结果

Fig. 5 Summary results of application fields of regional water balance

包括计算、评估、模拟、调控等方面;④成果总结和验证,分析、总结和凝练研究结果,从合理性、优越性等角度进行检验,明确是否有助于提升水平衡状态。阈值体系和研究内容彼此关联、两位一体,存在着对应关系,每个指标都有对应的研究内容,每项研究内容最终也都可以落脚到指标上,单个指标可能涉及多项或多步研究内容,单项研究内容也可能涉及多个或多层次的指标。健康水平衡要求在指标层面实现“万般皆宜”,但现实中,对某个或某些指标进行调控相对简单,很难通过某方面研究,同时将大量指标推向有利的发展方向,这反映了区域水平衡的局部可控性^[33]。下面举4个例子开展示例解析,其并不都以水平衡状态改善为研究目标,但都属于运用领域范畴。

3.2 基于水收支平衡的水资源变化归因分析

水资源衰减或增加的现象广泛存在,主要受自然(降水、蒸发、气温等)和人为(下垫面改造、取用水等)因素的影响,同时存在不确定性和确定性,前者体现在各种因素的作用导致来水量等年际间差异较大,后者在于多因子作用必然会导致水资源衰减或增加的结果^[34]。研究水资源变化特征、量化驱动因子的作用,基本遵循就是水量平衡原理,需要基于水收支平衡理论方法进行探索(图6)。研究过程中考虑4个方面:一是水资源变化的物理机制包括

自然和人为因子的驱动机制、水的天然迁移转化机制、水的社会供用耗排机制等;二是水收支平衡理论方法是水资源变化分析的基础,还需要模型模拟、趋势分析、控制变量等方法的参与;三是应紧抓水收支平衡这一关键点,平衡要素或方程的变化是影响因子驱动水资源变化的具体表现;四是落脚点,一方面在于水收支平衡度、水资源变化率等指标,另一方面在于量化各种驱动因子的作用方向和大小。综上,水收支平衡是水资源变化归因分析的基础支撑,是研究过程中必要考虑的方面,研究成果对水资源规划与管理工作具有重要意义。

3.3 基于经济社会供需水平衡的水-能源-粮食-生态协同优化

经济社会用水部门中生活用水具有优先保证级,工业用水边际效益和回用率均较高,而农业用水具有用水占比高、利用效率偏低、用水效益不明显、波动性强等特点,是水资源利用管理的重点研究对象。农业水资源优化配置不仅应关注水这个单一要素^[35],应基于区域水平衡开展水、能源、粮食、生态等要素的协同优化(图7)。研究过程中考虑4个方面:一是灌区尺度水的输移损耗机制、农田尺度水的供用反馈机制、作物尺度水的吸收利用机制都是研究的物理基础;二是协同优化模型/方法需要融合经济社会供需水平衡理论方法,充分考虑和体现平衡并得到最

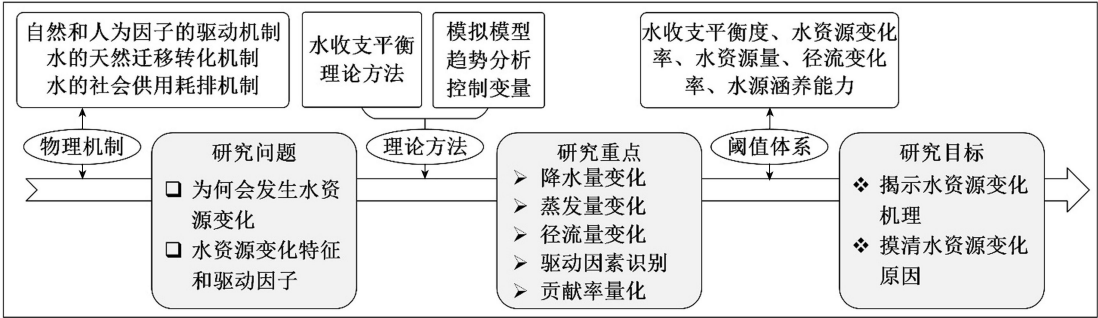


图6 基于水收支平衡的水资源变化归因分析思路

Fig. 6 Ideas for attribution analysis of water resource changes based on water budget balance

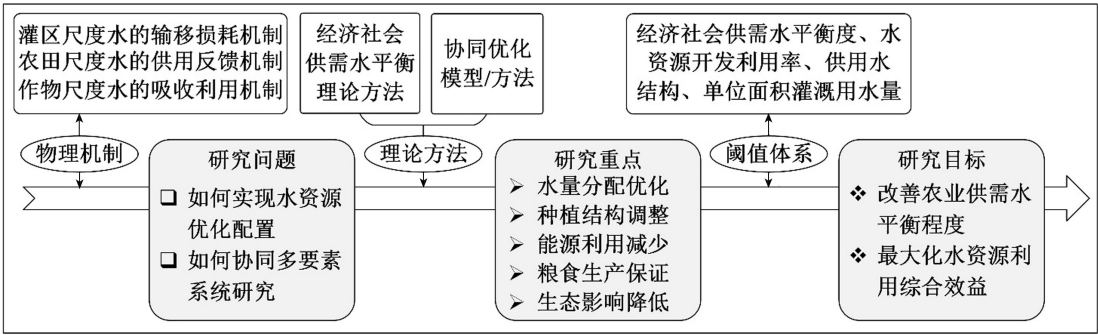


图7 基于经济社会供需水平衡的水-能源-粮食-生态协同优化思路

Fig. 7 Ideas for synergetic optimization of water-energy-food-ecology based on the water supply-demand balance of economic society

终结果;三是研究目标就是实现或趋向农业部门的供需水平衡,过程中同时考虑能源利用最小化、种植结构合理化、生态影响不超限等问题;四是平衡度量方法是检验研究结果的基本方面,即通过协同优化是否改善了供需水平衡状态,此外包括是否优化了种植结构、增大了水资源利用综合效益等方面。综上,水-能源-粮食-生态协同优化需以经济社会供需水平衡作为支撑,是改善平衡状态的重要手段。

3.4 基于经济社会与生态用水平衡的水资源开发利用潜力计算

水资源开发利用潜力已有明确定义,通俗意义上就是指还可供人类开发利用的水资源量,潜力计算的前提是确定“留多少水给生态”这一关键问题^[36]。经济社会与生态用水平衡和水资源开发利用潜力存在最为直接的关联,就是基于平衡点计算潜力(图8)。研究过程中考虑4个方面:一是从物理机制的角度看,经济社会用水和生态用水存在竞争机制,气候变化主要通过影响水循环作用于水资源开发利用潜力,而人类活动则通过工程建设、节水措施等;二是经济社会与生态用水平衡理论方法的主要作用是确定平衡点,后续的潜力计算方法是独立的,但需要前一阶段的输出作为输入;三是潜力确定需要综合考量现状偏离平衡点的程度、开源潜力

和节流潜力等方面,由于平衡的双向性,最终结果可正可负;四是落脚点虽然是水资源开发利用潜力,但与平衡存在密切关联,是平衡的重要应用。综上,从经济社会与生态用水平衡的视角计算水资源开发利用潜力十分必要且重要,能够为水资源利用策略制定提供更加合理的数据支撑。

3.5 基于人水关系和谐平衡的人水关系调控

人水关系一方面按照自然规律和经济社会规律自主演变,历程相对平稳;一方面受到人类活动的干扰被动演变,可能会导致突变现象。调控人水关系首先要摸清现状,其次要明确调控方向、内容、目标等,最后实施调控方案,过程中需以人水关系和谐平衡理论方法作为支撑^[37](图9)。研究过程中考虑4个方面:一是人文和水系统的相互作用机制、外部因素对人水系统的影响机制,造就了人水关系调控的复杂性和联动性;二是人水关系和谐平衡理论贯穿人水关系调控的整个过程,是调控的重要指导和遵循;三是开展人水关系和谐平衡量化分析是人水关系调控的前提,决定着人水关系调控的重点和方向;四是人水关系调控效果验证最为重要的方面就是是否提升了人水系统和谐程度、是否改善了平衡状态。综上,人水关系调控是一个宏大且难解的主题,研究开展需要有坚实的理论方法支撑,需要基于人水关系和谐平衡理论方法解决相关问题。

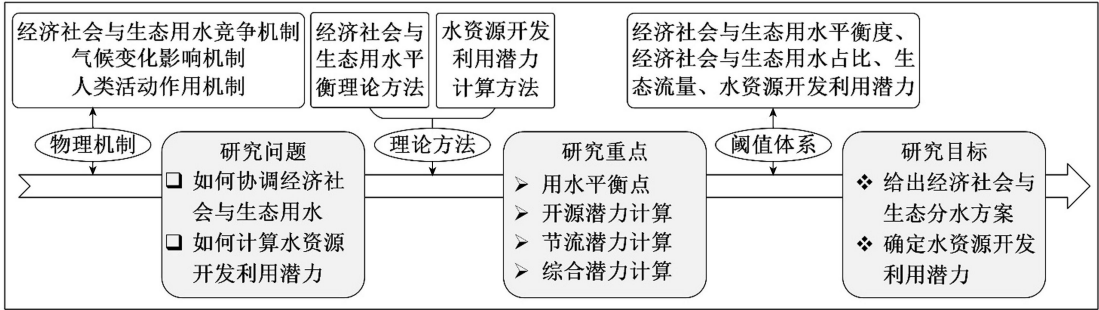


图8 基于经济社会与生态用水平衡的水资源开发利用潜力计算思路

Fig. 8 Ideas for calculating the potential of water resource development and utilization based on water use balance between economic society and ecology

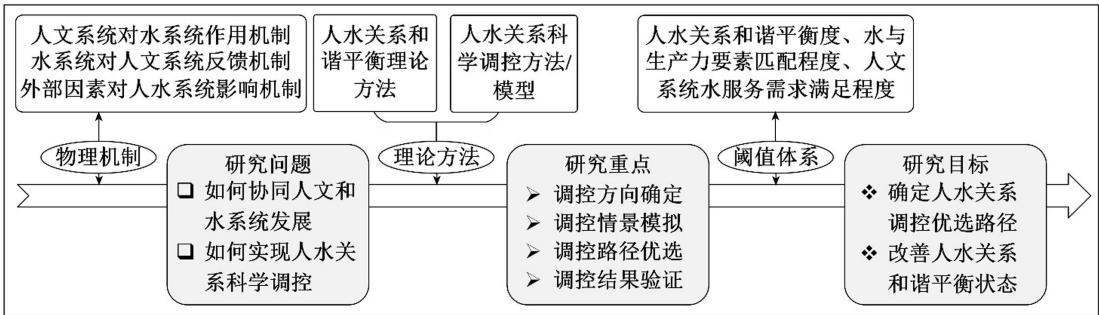


图9 基于人水关系和谐平衡的人水关系调控思路

Fig. 9 Ideas for human-water relationship regulation based on harmonious balance of human-water relationship

4 结 语

本文着眼于“区域水平衡做些什么”的关键问题,阐明了水平衡理论方法、阈值体系、运用领域的关联,论述了健康区域水平衡的实现路径;构建了以表征指标和指标阈值为骨架的水平衡阈值体系,总结得到四大平衡的表征指标体系,明晰了从限值、范围、样式三方面考虑阈值形式,阐述了阈值确定需要考虑的因素和可行方法;对标阈值体系并考虑平衡主导程度,分析了区域水平衡的运用领域,梳理得到四大平衡对应的研究内容体系,概述了水平衡视角下的研究思路,并解析了基于水收支平衡的水资源变化归因分析、基于经济社会供需水平衡的水-能源-粮食-生态协同优化、基于经济社会与生态用水平衡的水资源开发利用潜力计算、基于人水关系和谐平衡的人水关系调控等代表性研究内容。区域水平衡的阈值体系与运用领域是对水平衡问题更高层次的理解和探索。前者以行星边界思想为主导,重在确定各种指标的适宜范围;后者立足科研与实践工作场景,旨在发挥水平衡理论方法的独特价值。本文针对二者搭建了整体性框架并进行基础性描述,为后续水平衡研究提供了方向和借鉴,引导水利工作者以健康水平衡为导向开展工作,助力人水系统健康稳定发展。

参考文献:

[1] 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))

[2] Schwamback D, Amorim Brandão A R, Berndtsson R, et al. Assessment of water fluxes under the dual threat of changes in land cover and climate variability in the Brazilian Cerrado biome [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 61: 102699.

[3] 王梦晗,严登华,张鑫,等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考[J]. 水资源保护, 2025, 41 (1): 35-41. (Wang Menghan, Yan Denghua, Zhang Xin, et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 35-41. (in Chinese))

[4] Wu Qingsong, Zuo Qiting, Zhang Lekai, et al. Quantifying basin water balance considering water-economic society-ecology nexus [J]. Journal of Hydrology, 2025, 657: 133067.

[5] 张梅,郑伊佳. 人类命运共同体视域下跨境水资源的研

究进展与展望[J]. 水利经济, 2024, 42 (1): 34-42. (Zhang Mei, Zheng Yijia. Research progress and prospect of cross-border water resources research from the perspective of a community with a shared future for mankind [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(1): 34-42. (in Chinese))

[6] 王浩,左其亭,蒋云钟. 关于国家水安全学的设立及学科体系构建的探讨[J]. 水科学进展, 2022, 33 (6): 859-867. (Wang Hao, Zuo Qiting, Jiang Yunzhong. Proposition of national water safety discipline and construction of its discipline system [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 859-867. (in Chinese))

[7] 李宁,倪翠娟,李家昕. 中国式现代化视域下中国共产党的治水思路演进及启示[J]. 水利经济, 2025, 43 (2): 1-10. (Li Ning, Ni Cuijuan, Li Jiaxin. Evolution and enlightenment of the Communist Party of China water management ideas from the perspective of Chinese modernization [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(2): 1-10. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 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))

[10] 王亦宁. 对治水工作坚持“两手发力”的哲学思考[J]. 水利经济, 2025, 43 (2): 11-16. (Wang Yining. Philosophical reflection on adhering to the principle of “two-handed efforts” in water control work [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(2): 11-16. (in Chinese))

[11] 陈阿江. 论人水和谐[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2008, 10 (4): 19-24. (Chen Ajiang. A study of harmony of Water-Human Relationship [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2008, 10(4): 19-24. (in Chinese))

[12] 陈嘉健,王宗侠,李升发,等. 中国水资源法律颁布的时空分布特征及影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54 (4): 87-96. (Chen Jiajian, Wang Zongxia, Li Shengfa, et al. Analysis on spatio-temporal distribution characteristics promulgated by water resources laws in China and relevant influencing factors [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(4): 87-

96. (in Chinese))
- [13] 左其亭,韩春辉,马军霞,等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河,2019,41(10):113-118. (Zuo Qiting, Han Chunhui, Ma Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium[J]. Yellow River, 2019,41(10):113-118. (in Chinese))
- [14] 赵勇,何凡,何国华,等. 国家水网基础认知与建构准则[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1049-1054. (Zhao Yong, He Fan, He Guohua, et al. Basic cognition and construction criteria of national water network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6):1049-1054. (in Chinese))
- [15] 邱曦,马军霞,左其亭,等. 基于区域水平衡理论和SWAT模型的沁河流域水收支平衡演变分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):9-15. (Qiu Xi, Ma Junxia, Zuo Qiting, et al. Evolution analysis of water budget balance in Qinhe River Basin based on regional water balance theory and SWAT model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1):9-15. (in Chinese))
- [16] 肖雪,李清清,陈述. 基于高质量供需平衡的区域水资源优化调控方案:以京津冀地区为例[J]. 人民长江,2022,53(8):100-105. (Xiao Xue, Li Qingqing, Chen Shu. Optimal regulation schemes of regional water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region based on high-quality supply and demand balance[J]. Yangtze River, 2022,53(8):100-105. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 李文鹏. 水循环与水平衡研究[J]. 水文地质工程地质,2023,50(6):1-2. (Li Wenpeng. Study on water cycle and water balance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023,50(6):1-2. (in Chinese))
- [19] 胡庆芳,陈秀敏,高娟,等. 水平衡与国土空间协调发展战略研究[J]. 中国工程科学,2022,24(5):63-74. (Hu Qingfang, Chen Xiumin, Gao Juan, et al. Coordinated development between water balance and territory space[J]. Strategic Study of CAE, 2022,24(5):63-74. (in Chinese))
- [20] 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))
- [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,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))
- [23] 刘晓燕,张建中,张原锋. 黄河健康生命的指标体系[J]. 地理学报,2006,61(5):451-460. (Liu Xiaoyan, Zhang Jianzhong, Zhang Yuanfeng. Indicators of the Healthy Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5):451-460. (in Chinese))
- [24] 胡春宏,张治昊,张晓明. 维持黄河流域水沙平衡的调控指标阈值体系研究[J]. 水科学进展,2023,34(5):647-659. (Hu Chunhong, Zhang Zhihao, Zhang Xiaoming. Threshold system of regulation indicators for maintaining the runoff and sediment balance of the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5):647-659. (in Chinese))
- [25] 王宣宣,刘欢,胡鹏,等. 基于水量平衡原理和Budyko假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析[J]. 水资源保护,2024,40(6):165-172. (Wang Xuanxuan, Liu Huan, Hu Peng, et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis[J]. Water Resources Protection, 2024,40(6):165-172. (in Chinese))
- [26] Roth H A, Blanken P D. Controls and rates of evaporation from a water supply reservoir in the Colorado Front Range[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617:129139.
- [27] 王雨洁,李致家,姚成,等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):11-18. (Wang Yujie, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2):11-18. (in Chinese))
- [28] 吴杰峰,王国庆,陈晓宏,等. 两类阈值法识别的东江流域水文干旱形成与演化过程差异[J]. 水资源保护,2024,40(3):52-60. (Wu Jiefeng, Wang Guoqing, Chen Xiaohong, et al. Differences in hydrological drought formation and evolution processes identified by two threshold methods in the Dongjiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2024,40(3):52-60. (in Chinese))

(下转第98页)

2025,45(3):62-69. (in Chinese))

[43] Tang Guoqiang,Clark M P ,Papalexiou S M. The use of serially complete station data to improve the temporal continuity of gridded precipitation and temperature estimates[J]. Journal of Hydrometeorology,2021,22(6):1553-1568.

[44] Nair G S, Karunanidhi D, Subramani T. Hydrological modeling for the Bharathapuzha River Basin of South India using SWAT model [J]. Desalination and Water Treatment,2025,321:100975.

[45] 赵文龙,吕海深,朱永华,等. 额尔齐斯河库威站日尺度的降雨融雪径流模拟[J]. 干旱区研究,2024,41(10):1685-1698. (Zhao Wenlong, Lyu Haishen, Zhu Yonghua, et al. Simulation of rainfall and snowmelt runoff on the daily scale of the Kuwei Station in the Irtysh River [J]. Arid Zone Research,2024,41(10):1685-1698. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-26 编辑:王芳)

+++++

(上接第 64 页)

[29] 王钰,张翔,闫少锋,等. 基于水-经济社会-生态环境协同演变的生态流量阈值适宜性研究[J]. 水资源与水利工程学报,2024,35(4):47-55. (Wang Yu, Zhang Xiang, Yan Shaofeng, et al. Suitability of ecological flow thresholds based on the simulation of coordinated development of water-economic society-ecological environment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2024,35(4):47-55. (in Chinese))

[30] 孟钰,魏剑林,管新建,等. 流域水生态环境补偿研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(6):215-223. (Meng Yu, Wei Jianlin, Guan Xinjian, et al. Research progress in watershed water ecological environment compensation[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):215-223. (in Chinese))

[31] 游进军,贾玲,王彦兵,等. 协调公平与效率的“四水四定”研究Ⅱ:应用[J]. 水利学报,2024,55(3):266-277. (You Jinjun, Jia Ling, Wang Yanbing, et al. Study on “water dominates development” based on equity and efficiency Ⅱ: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(3):266-277(in Chinese))

[32] 陈明,陈睿,任希岩,等. 基于“人-地-水”平衡的流域国土空间格局优化:以长江经济带国土空间规划为例[J]. 城市规划,2024,48(增刊1):44-52. (Chen Ming, Chen Rui, Ren Xiyan, et al. Optimization for territorial space layout of river basin based on population-land use-water resource balance: a case study of territorial and spatial planning of Yangtze River Economic Belt[J]. City Planning Review,2024,48(Sup1):44-52. (in Chinese))

[33] 江恩慧,李洁玉,王远见,等. 黄河流域系统可持续运行的“139+”水沙调控指标体系[J]. 水利学报,2025,56(4):423-432. (Jiang Enhui, Li Jieyu, Wang Yuanjian, et al. Water and sediment regulation index system “139+” for sustainable development of the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(4):423-432. (in Chinese))

[34] 刘宇,辜玉慧,刘炎鑫,等. 泾河流域水文气象演变及其变化归因[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(10):34-48. (Liu Yu, Gu Yuhui, Liu Yanxin, et al. Hydrometeorological evolution and its change attribution in Jinghe River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(10):34-48. (in Chinese))

[35] Ma Yuan, Li Yongping, Zhang Yufei, et al. Mathematical modeling for planning water-food-ecology-energy nexus system under uncertainty: a case study of the Aral Sea Basin [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 308: 127368.

[36] 周洪华,杨玉海,朱成刚,等. 供需平衡视角下昆仑山北坡县域单元地表水资源开发利用潜力初探[J]. 干旱区地理,2024,47(7):1106-1115. (Zhou Honghua, Yang Yuhai, Zhu Chenggang, et al. Development and utilization potential of surface water resources of the counties on the northern slope of Kunlun Mountains from the perspective of supply and demand balance[J]. Arid Land Geography, 2024,47(7):1106-1115. (in Chinese))

[37] 王红瑞,丁雨涵,李敏,等. 黄河流域典型地区人水关系耦合与调控[J]. 水资源保护,2025,41(5):132-141. (Wang Hongrui, Ding Yuhan, Li Min, et al. Coupling and regulation of human-water relationship in typical areas of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025,41(5):132-141. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-18 编辑:王芳)

