

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.001

区域水平衡基本原理及理论体系

左其亭^{1,2}, 吴青松¹, 金君良³, 马军霞^{1,2}, 陶洁^{1,2}

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 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; 3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 实现健康的区域水平衡是中国水利工作的重要内容和挑战, 对保障国家水安全、国民经济和社会持续稳定发展具有重要意义。在总结前期水平衡理解和认识的基础上, 定义了区域水平衡的概念, 从水收支平衡、经济社会供需水平衡、经济与生态用水平衡、人水关系和谐平衡4个方面和时间、空间、系统3个维度解读其内涵。提出了区域水平衡的基本原理, 包括水量平衡原理、供需平衡原理、协同平衡原理及和谐平衡原理, 分析了以基本原理支撑实现区域水平衡需要重视的科学问题。从理论基础和基本理论2个方面论述了区域水平衡的理论体系, 其中, 理论基础包括水文学、水资源学、生态学、经济学、社会学等理论, 基本理论包括水资源收支时空均衡理论、水资源供需优化配置理论、经济与生态用水协同论、人水和谐论等, 并展望了基本理论的应用前景。研究成果可进一步拓展区域水平衡研究思路, 为今后开展区域水平衡管控与实践提供研究框架和理论基础。

关键词: 区域水平衡; 基本原理; 理论体系; 人水关系; 基本理论

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)02-0165-09

水资源是保障经济社会发展和维持生态环境健康的重要物质基础, 人类社会的快速发展不断趋紧水资源压力, 实现水资源可持续利用已经成为必须面对的现实问题^[1]。中国长期存在水多、水少、水脏三大水问题, 近年来气候变化和人类活动的复杂性导致新老水问题交织, 洪涝灾害、水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等现象频发, 国家水安全保障面临着严峻挑战^[2]。针对上述问题, 中国政府高度重视并提出了“十六字”治水思路, 其中就蕴含了水平衡的思想和理念^[3]。2020年8月, 中国科协发布了十大前沿科学问题, 其中之一就是“如何优化变化环境下中国水资源承载力, 实现健康的区域水平衡状态”^[4]。2021年, 科技部设立了国家重点研发计划项目“区域水平衡机制与国家水网布局优化研究”。研究和实现区域水平衡是国家发展重大需求和民族复兴重要手段, 有助于保障国民经济和社会持续稳定发展, 实现人与自然和谐相处, 具有不可替代的战略意义。

目前国内外学者针对水平衡问题开展了诸多方面的研究, 在水利工程、生态学、医学等学科和农业、生物、化工等领域^[5-10]均有所涉及。其中, 最早和最多研究的是水量平衡问题, 大体可以分为2类: 一是对水量平衡原理的概念内涵和理论方法进行拓展^[11-12], 二是将水量平衡原理应用于解决现实问题^[13-14], 研究成果能够很好地阐释某个区域或系统水资源本身的数量变化和迁移转化过程。但实际上, 水资源、经济社会、生态环境系统间存在紧密的相互联系和复杂的互馈机制^[15], 水资源的平衡状态不仅是水资源系统本身健康状态的表现, 而且影响和受制于生态环境和经济社会系统的正常运转和有序发展^[16]。例如, 当干旱状况发生并累积时, 各类水工程将出现长时间和大范围的供水不足, 会破坏经济社会的供需水平衡, 出现供不应求的情况^[17]。在自然-社会二元水循环过程中, 经济发展和生态保护均需要水资源作为支撑, 其有限性决定了二者之间必然存在竞争关系^[18]。因此, 在研究区域水平衡时, 需综合考虑上述3个系统之间的交互作用,

收稿日期: 2021-12-06; 网络出版日期: 2022-03-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220305.1804.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3200201); 河南省重大公益性科技专项(201300311500)

作者简介: 左其亭(1967—), 男, 河南固始人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

注重保护和发展的系统性、整体性、协同性,进而达到能够兼顾多系统、多方面、多环节、多要素的理想状态^[19]。目前虽有研究一定程度考虑了以上方面^[20-21],但由于缺乏对区域水平衡的全面认识和完善的理论基础,只能部分反映和解决某些问题。总体来看,当前还需要研究区域水平衡的基础科学问题,需要对区域水平衡基本原理和理论体系进行系统梳理和深入挖掘,以支撑水网布局优化、智慧水利建设等国家重大需求。

基于以上分析和认识,本文从人与自然和谐目标出发,着眼于人水系统间复杂的相互作用关系,明确区域水平衡的概念及内涵,总结区域水平衡的基本原理,提出区域水平衡的理论体系并展望其应用前景。

1 区域水平衡概念及内涵

区域水平衡的研究对象是人文系统和水系统交融而成的人水系统,是水与社会、经济、生态、环境等诸多要素相互作用、协同耦合而成的复合巨系统^[22],系统内部存在着复杂、动态的竞争关系,使得处理好人水关系、实现人与自然和谐共生尤为困难。在人水系统中,由于水循环的不断进行,水资源的收入和支出是持续存在的,在经济社会系统和生态环境系统间存在流动交换过程,三者之间的关键互馈点主要是水资源的取-用-耗-排等环节,其中经济社会发展和生态环境保护对水资源需求之间的竞争关系尤为明显。探索区域水平衡,首先需要解决最基本的问题,即什么是区域水平衡、如何对其进行定义。笔者在上述分析的基础上,结合文献总结和自身理解,给出“区域水平衡”如下定义:区域水平衡是以人水系统为研究对象、以水循环为纽带、顺应人水关系作用演变规律、遵循水收支平衡、统筹经济社会供需水平衡及经济与生态用水平衡、促进人水关系和谐平衡而达到的一种水系统状态。

从内容上看,区域水平衡可分为狭义和广义2种,狭义区域水平衡包括水收支平衡、经济与生态用水平衡、经济社会供需水平衡3个方面;广义区域水平衡在狭义的基础上再增加人水关系和谐平衡,见图1。其中,水收支平衡侧重于表现区域水资源收入项(降水、径流补给、内调水等)和支出项(蒸散发、外流径流、外调水等)的均衡关系,其根本依据为水量平衡原理,是区域水平衡的“内在定律”;经济社会供需水平衡是指水资源可供量与经济社会需求量相匹配,遵循“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的原则,是区域水平衡的“刚性约束”;经济与生态用水平衡主要体现在经济发展和生态保护对水资源需求竞争上的协调,旨在达到以有限水资源促进经济高质量发展和生态高水平保护的平衡点,是区域水平衡的“基本遵循”;人水关系和谐平衡是指人文系统和水系统的相互关系经过循环演变达到和谐状态,包含上面3个平衡,同时还包括水旱灾害有效防治、水污染有效治理等诸多外在表现,是区域水平衡的“主体目标”。由上可知,区域水平衡的4个方面之间并非彼此独立,而是有着明显的层次性和内在联系,框架见图1。具体来看,区域水平衡以水循环为纽带连接人水系统和不同方面的平衡,其中水收支平衡是最为根本的要求,也是研究实现其他平衡的基础,经济社会供需水平衡和经济与生态用水平衡是区域水平衡需要统筹的2个重要部分,人水关系和谐平衡是较高层次的目标,它的实现以其他3个平衡的实现为前提。

从不同维度上看,区域水平衡的内涵体现在时间、空间和系统3个维度。其中,在时间维度上,区域水平衡体现水资源在年内、年际、年代际等多尺度之间的平衡,特点是统筹不同季节和丰枯年份水资源禀赋的差异性,解决时间上的集中性、冲击性、不均匀性,是“水资源时间过程”上的平衡;在空间维度上,区域水平衡体现水资源在水陆空域、不同圈层、不同地区等多载体之间的平衡,特点是通过人工干预或其他措施重新塑造水资源的地理分布,在空间上具有良好的协调性、均衡性、适配性,是“水资源空间布局”上的平衡;在系统维度上,区域水平衡既体现在区域内微观、中观、宏观上每个对象都是一个平衡系统,也表现为不同系统之间以及多个系统构成大系统具有的平衡,可以用系统思维来分析区域水平衡问题,是“水资源系统整体”上的平衡。

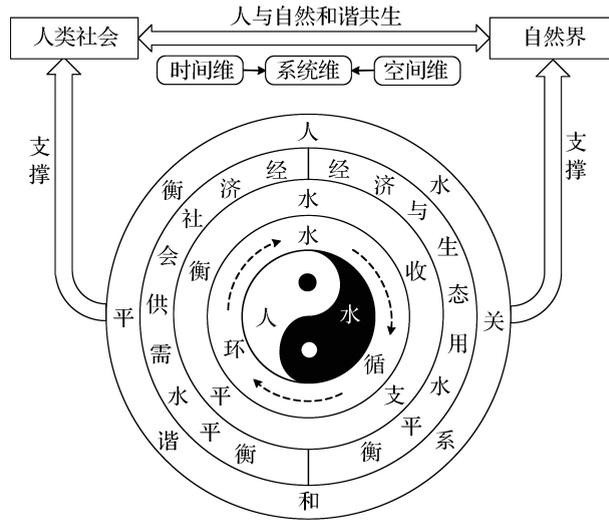


图1 区域水平衡概念和内涵框架

Fig.1 Concept and connotation framework of regional water balance

2 区域水平衡基本原理

2.1 基本原理架构

基本原理可以简述为具有普遍意义的基本规律，区域水平衡的基本原理是对平衡状态中的基本规律和作用机制的科学诠释^[23]。区域水平衡的实现问题复杂、涉及方面较多，需要揭示其内含的复杂关系应该遵循的基本原理，作为分析、研究、调控以及各种相关工作的科学依据。本文基于对人水系统内部的基本规律、作用机理以及演变特征分析，总结出区域水平衡的基本原理，包括水量平衡原理、供需平衡原理、协同平衡原理、和谐平衡原理，其关联结构如图2。

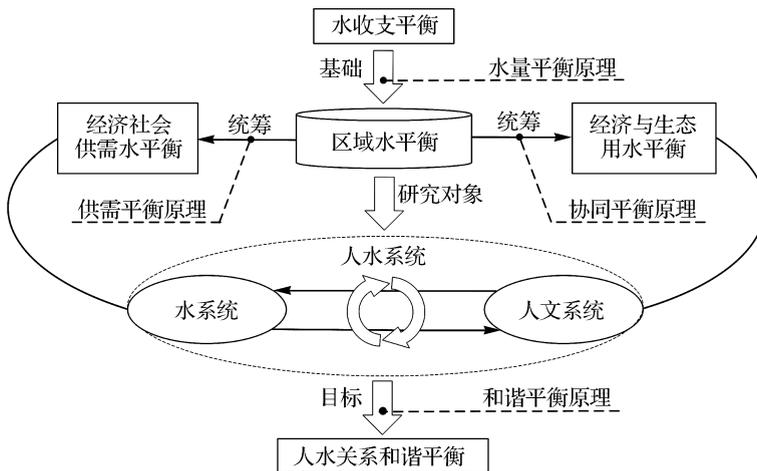


图2 区域水平衡的基本原理示意

Fig.2 Schematic of basic principles of regional water balance

2.2 水量平衡原理

(1) 水量平衡原理是指地球上任一区域任一时段内, 收入的水量与支出的水量之差必然等于该区域内蓄水量的变化量。即在任意的时域空间中, 水资源数量始终遵循上述定律, 具体表现为水量平衡基本方程, 是水循环的数量表示, 也是水收支平衡现象和过程分析的研究基础。基于水量平衡原理研究水收支平衡, 能够明晰各种水收支要素的分布、转化、消耗过程与规律, 明确区域水资源禀赋和刚性约束规模, 优化调控水资源时空分布。

(2) 基于水量平衡原理, 研究水收支平衡, 需重点关注以下科学问题: ① 水收支要素的本底状况及平衡方程构建。即要明确水收入和支出要素有哪些, 它们各自的本底状况如何, 在此基础上, 考虑人类活动、气候变化及陆面变化等驱动因素, 构建通用性水收支平衡方程。② 水收支要素的转化关系及物理机制。探究水收支要素在水循环过程中的迁移转化过程, 既要考虑区域整体层面又要考虑局部特性, 同时要深入分析水收支要素在各个环节、不同单元、多个层级间转化的物理机制。③ 水收支平衡的判别准则及实现路径。基于水量平衡原理, 综合确定水收支平衡的判别准则。在判别准则的指引下, 从时间、空间、系统 3 个维度上探索实现路径。

2.3 供需平衡原理

(1) 供需平衡是指消除供需之间的不适应、不平衡现象, 使供应与需求相互适应、基本相等。从资源的角度上来看, 供需平衡原理包括 2 个平衡维度: 一是稳定性, 即波动的幅度和频率; 二是充分性, 即获得需求的比例。水资源供需平衡是指水资源供给与人们对特定用途水资源的需求之间的匹配关系。供需平衡原理是实现区域经济社会供需水平衡的根本准则, 针对经济社会系统, 水资源供给侧主要是地表水、地下水、再生水、外调水等多种水源, 需求侧主要是生活、生产等不同用水类型, 同时衔接二者之间有诸多“杠杆”要素。基于供需平衡原理实现上述结构的匹配状态, 有助于缓解区域多元化供需水矛盾、保障经济社会的稳定向好发展。

(2) 基于供需平衡原理, 研究区域经济社会供需水平衡, 需重点关注以下科学问题: ① 经济社会供需水关系及平衡方程构建。分析供给侧要素(水源、水质类别、方式)和需水侧要素(部门、产业、规模)之间的关联性网状结构, 进而基于区域经济社会与水资源时空变化特征及前述供需关系, 构建经济社会供需水平衡方程。② 经济社会供需水演变驱动机制。针对某一特定区域, 基于已有资料摸清经济社会供需水的演变过程和规律, 全面考虑气候变化和人类活动等诸多驱动因素, 研究经济社会供需水演变的驱动机制。③ 经济社会供需水平衡理论方法及方案优选。经济社会供需水平衡研究涉及内容繁杂, 存在尖锐的协调难题, 需要一套完善的理论方法作为基础, 探索应对复杂不确定性及各种突发危机的供需水方案。

2.4 协同平衡原理

(1) 协同平衡是指 2 个或 2 个以上具有辩证统一的系统, 通过各种调控措施达到的能够实现共同良性发展的相对平衡状态。协同平衡原理是实现经济与生态用水平衡的基本原理, 从目的协调性看, 当局部和整体发生矛盾时, 局部利益必须服从整体利益; 从功能整体性看, 系统要素的功能必须服从复合系统整体的功能。在水资源开发利用上, 经济和生态系统存在着正负双向反馈, 从竞争层面上讲, 二者存在难以协调的制约关系, 经济发展会导致环境污染、生态退化, 生态保护又会反过来限制经济的发展; 但同时又存在彼此支撑的促进关系, 经济的发展能够更多地投入资金, 研发高新技术应用于生态保护, 生态健康稳定是经济高质量发展的基石。实现经济和生态用水的协同平衡状态, 能够以有限的水资源获得最大的综合效益, 助力区域协调发展和生态文明建设。

(2) 基于协同平衡原理, 研究区域经济与生态用水平衡, 需重点关注以下科学问题: ① 经济与生态用水的互扼关系及作用机制。经济和生态系统在水资源利用上更多地表现为竞争关系, 为缓解这一冲突, 首先要明确二者之间到底存在怎样的互扼关系, 在此过程中要充分考虑 2 个系统的组成部分, 从反馈关系和关联结构出发分析它们之间的相互作用机制。② 经济与生态用水平衡方程构建。基于协同平衡理念, 结合经济-

生态综合指数与用水定量关系, 构建经济与生态用水平衡方程。③ 经济与生态用水的优化配置及综合调控。未来水资源的有限性将会更加凸显, 在此背景下实现经济与生态用水平衡的重要措施之一就是优化配置水资源, 运用工程措施和非工程措施进行综合调控, 以应对外部条件变化的影响。

2.5 和谐平衡原理

(1) 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。和谐平衡状态是相对静止而非一成不变的, 当外界条件发生变化时, 平衡被打破而丧失, 其后经过循环演化又形成新的相对平衡状态, 这就是和谐平衡原理^[24]。人水关系和谐平衡状态的实现是具有动态性、空间性、层次性的复杂问题, 需要和谐平衡原理作为支撑。相应地, 人水关系和谐平衡的实现, 不仅意味着人文系统的稳定发展, 而且表征着水系统的健康发展, 以人水系统和谐发展为前提。

(2) 基于和谐平衡原理, 研究人水关系和谐平衡, 需重点关注以下科学问题: ① 人水关系和谐平衡演变规律及内在机理。和谐平衡状态是经过不断地循环演变得到的相对静止状态, 需要辨析其演变规律及内在机理。② 人水关系和谐平衡制约因素识别及调控。人水关系和谐平衡涉及因素众多, 各因素对平衡状态的促进和制约效果及其作用大小可能不同, 需辨识出主要制约因素, 以支撑制定针对性应对策略, 通过调控措施使其快速达到新的平衡状况。

3 区域水平衡理论体系及应用前景

3.1 理论基础

区域水平衡内涵丰富且涉及问题复杂, 针对其研究需要涉及水文学、水资源、水环境、水安全、经济学、社会学、生态学等多门学科或领域。这些基础学科都是区域水平衡的理论基础, 且解决相关问题时需交叉融合, 见图3。鉴于以上学科均为传统的学科, 相关理论介绍较多, 在此不再赘述。

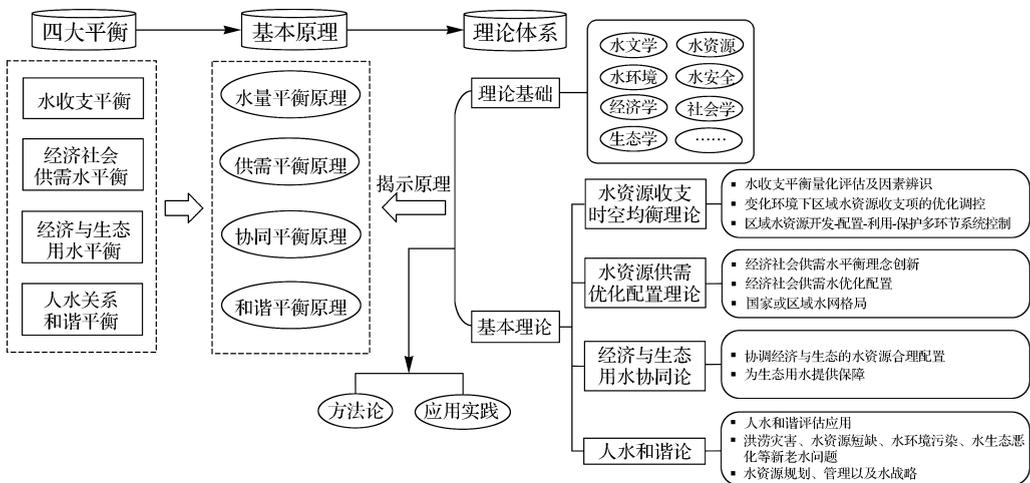


图3 区域水平衡的理论体系框架

Fig.3 Theoretical framework of regional water balance

3.2 基本理论及应用前景

根据区域水平衡的基本原理和主要研究内容, 对应提出以下4个基本理论, 部分为相对成熟的理论, 部分为笔者首次提出, 在本文中, 仅简要概述各个理论并初步分析其应用前景。应当注意的是, 以下理论皆为对应平衡的最基本理论, 实际上每个平衡的实现都需要多个理论共同参与, 并非单一的对对应关系, 这是人水系统的复杂性所决定的。

3.2.1 水资源收支时空均衡理论

“均衡”的概念广泛应用于许多学科或领域。笔者曾对“均衡”与“平衡”的关系进行过论述^[3]，简而言之，“均衡”是一种相对稳定的平衡状态。水资源时空均衡是指，考虑实际可能发生的各种变化，在时间演进和空间分布上，水资源开发、利用与保护的一种相对稳定的平衡状态^[25]。水资源收支时空均衡理论是以时空均衡理论为基础、处理水资源收支平衡问题而形成的一种理论。

水资源收支时空均衡理论的应用包括但不局限于以下 3 个方面：① 水收支平衡量化评估及因素辨识。用于计算水收支各要素，评估水收支平衡程度，辨析主要影响因素。② 变化环境下区域水资源收支项的优化调控。为应对条件变化，可以从收支项入手进行优化调控，如人工降雨、跨流域调水等。③ 区域水资源开发-配置-利用-保护多环节系统控制。从水资源开发-配置-利用-保护多环节系统角度，以实现水资源收支时空均衡为目标，进行科学调控。

3.2.2 水资源供需优化配置理论

水资源供需优化配置理论是经济社会供需水平衡的基本理论，与传统的水资源优化配置理论一脉相承但又有所区别。水资源供需优化配置理论是以工程措施与非工程措施为主要手段、以水资源可持续利用为基本准则、以综合效益最大化为总体目标，公平高效地调配水资源以满足经济社会发展需求。

水资源供需优化配置理论的应用包括但不局限于以下 3 个方面：① 经济社会供需水平衡理念创新。在以需定供、以供定需之间寻找一种更科学的供需平衡状态。② 经济社会供需水优化配置。在经济社会供需水平衡思路的指引下，通过优化模型寻求经济社会供需水最优“平衡点”。③ 国家或区域水网格局。通过经济社会供需水平衡分析和优化配置，制定用水格局，支撑国家或区域水网布局。

3.2.3 经济与生态用水协同论

协同论是系统科学的分支理论，已在水利工程、自然地理、物理、生物、经济、管理等诸多学科得到了广泛应用。在解决经济与生态用水竞争问题时，需要以协同论为基础形成和发展经济与生态用水协同论，主要理念是综合考虑 2 个系统的特性和水资源在 2 个系统间的博弈关系，通过协同作用将复合系统的无序结构转变为时间、空间和功能上的有序结构，为实现经济与生态用水平衡状态提供理论支撑。

经济与生态用水协同论的应用包括但不局限于以下 2 个方面：① 协调经济与生态的水资源合理配置。经济用水和生态用水具有竞争性，需要协调好二者之间的关系，合理分配水资源。② 为生态用水提供保障。相对经济用水而言，生态用水居被动地位，在经济与生态用水协同论的指引下，实现经济与生态用水平衡。

3.2.4 人水和谐论

人水和谐论是基于和谐理论，处理人水关系问题而形成的一种理论^[26]，具有丰富的内涵和独特的理念，包括一套系统的理论体系、具体的方法论和广泛的应用实践。

人水和谐论在区域水平衡中的应用包括但不局限于以下 3 个方面：① 人水和谐评估应用。包括大尺度(如国家、省)、小尺度(如城市区、灌区、开发区)人水和谐评估，以及基于某一方面或其他类型的人水和谐评估等。② 在洪涝灾害、水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等新老水问题解决中的应用。在节水抗旱、防汛抗洪、治理水环境和水生态中，人水和谐论均可提供相应思路和策略，区域内可能同时存在不同的水问题，在系统分析、统筹兼顾、综合治理的需求下，人水和谐论具有独特的优势。③ 在水资源规划、管理以及水战略中的应用。如水资源综合规划、水战略制定、国家水网建设、最严格水资源管理制度考核、水生态文明建设、农村水利建设、海绵城市建设、河长制实施等。

4 结 语

立足于中国水资源分布不均的显著特点和解决新老水问题的迫切需求，考虑人水系统的复杂交互作用，

提出了区域水平衡的定义,从狭义、广义2个角度,时间、空间、系统3个维度解读了区域水平衡的内涵。对应广义区域水平衡的4个方面内容,总结了4个基本原理以揭示其内含的复杂关系和基本特征,在此基础上提出了实现区域水平衡应该重点关注的科学问题。阐明了区域水平衡的理论体系,包括理论基础和基本理论两部分,从研究对象和内容出发探讨了具体涉及的理论基础,提出了4个基本理论并分别展望了其应用前景。

本文是对区域水平衡概念内涵、基本原理和理论体系的初步探讨和分析,是一个框架性的总结,旨在为进一步完善区域水平衡内容、研究实现健康的区域水平衡提供参考。文中主要以定性分析和论述为主,缺乏具体的量化方法和实例应用,部分内容基于作者理解和文献总结而来,可能还不够完善,未来有待进一步探索,欢迎广大学者交流探讨。

参考文献:

- [1] 尚文绣,彭少明,王煜,等. 缺水流域用水竞争与协作关系:以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 897-907. (SHANG W X, PENG S M, WANG Y, et al. Competition and cooperation relationship of water utilization in water shortage basins: a case study of Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(6): 897-907. (in Chinese))
- [2] 左其亭,郝明辉,姜龙,等. 幸福河评价体系及其应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 45-58. (ZUO Q T, HAO M H, JIANG L, et al. Happy River evaluation system and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 45-58. (in Chinese))
- [3] 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 Q T, HAN C H, MA J X, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium [J]. *Yellow River*, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))
- [4] 2020 十大前沿科学问题[J]. 中国科技奖励, 2020(9): 68-71. (Top 10 frontier science questions for 2020[J]. *China Awards for Science and Technology*, 2020(9): 68-71. (in Chinese))
- [5] le MESNIL M, CHARLIER J B, MOUSSA R, et al. Interbasin groundwater flow: characterization, role of Karst areas, impact on annual water balance and flood processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124583.
- [6] ZHANG X Y, XU D Y, WANG Z Y, et al. Balance of water supply and consumption during ecological restoration in arid regions of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 186: 104406.
- [7] 杨文忠,郑瑞茂. 肝细胞 FGF21: 新发现的机体水平衡调控因子[J]. 生理科学进展, 2019, 50(2): 87. (YANG W Z, ZHENG R M. Hepatocyte FGF21: a newly discovered regulator of body water balance[J]. *Progress in Physiological Sciences*, 2019, 50(2): 87. (in Chinese))
- [8] 赵敏,郭萍,张妍. 考虑土壤水平衡的灌区水资源优化配置研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(7): 91-102. (ZHAO M, GUO P, ZHANG Y. Study on the water optimal allocation in irrigation district based on considering soil water balance[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(7): 91-102. (in Chinese))
- [9] BRITO C, DINIS L T, FERREIRA H, et al. The role of nighttime water balance on *Olea europaea* plants subjected to contrasting water regimes[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 226: 56-63.
- [10] 何晓波,詹志刚,张洪凯,等. 基于水平衡的 PEM 燃料电池大电流运行优化控制[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(9): 1994-2000. (HE X B, ZHAN Z G, ZHANG H K, et al. The optimal control of PEM fuel cell operating at large current density based on water balance[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(9): 1994-2000. (in Chinese))
- [11] GHANDHARI A, MOGHADDAM S M R A. Water balance principles: a review of studies on five watersheds in Iran[J]. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, 4(5): 465-479.
- [12] 张奇. 湖泊流域水文学研究现状与挑战[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1559-1573. (ZHANG Q. Hydrology of lake catchment: research status and challenges [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1559-1573. (in Chinese))
- [13] 毛龙富,刘宏,陈瑞永,等. 基于水量平衡模型的喀斯特石漠化区集雨水窖分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 218-225. (MAO L F, LIU H, CHEN R Y, et al. Analysis of rainwater collection cellar in Karst rocky desertification area based on water balance model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 218-225. (in Chinese))

- [14] OSPINA-NOREÑA J E, DOMÍNGUEZ-RAMÍREZ C A, VEGA-RODRÍGUEZ E E, et al. Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia[J]. *Atmósfera*, 2017, 30(1): 63-76.
- [15] 左其亭, 韩淑颖, 韩春辉, 等. 基于遥感的新疆水资源适应性利用配置-调控模型研究框架[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(8): 52-57. (ZUO Q T, HAN S Y, HAN C H, et al. Research frame of adaptive utilization allocation-regulation model of water resources in Xinjiang region based on RS[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(8): 52-57. (in Chinese))
- [16] 黄昌硕, 耿雷华, 颜冰, 等. 水资源承载力动态预测与调控: 以黄河流域为例[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 59-67. (HUANG C S, GENG L H, YAN B, et al. Dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity: a case study on the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 59-67. (in Chinese))
- [17] 屈艳萍, 杨晓静, 苏志诚, 等. 现状防御条件下历史极端大旱重演影响分析: 以明崇祯大旱为例[J]. *水利学报*, 2021, 52(7): 862-872. (QU Y P, YANG X J, SU Z C, et al. Impact analysis of historical extreme drought recurrence under the current defense conditions: taking Chongzhen drought in the Ming Dynasty as an example[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(7): 862-872. (in Chinese))
- [18] 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, 109. (JIAO S X, LI Q Y, WANG A Z, 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, 109. (in Chinese))
- [19] 吴青松, 马军霞, 左其亭, 等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 55-62. (WU Q S, MA J X, ZUO Q T, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River basin[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 55-62. (in Chinese))
- [20] 陈立华, 黄舒萍, 关昊鹏, 等. 用水效率红线下钦州市水资源三次供需平衡分析[J]. *中国农村水利水电*, 2019(1): 97-101, 107. (CHEN L H, HUANG S P, GUAN H P, et al. Research on water resources supply and demand balance in Qinzhou based on three balance theory and water efficiency under the red line[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(1): 97-101, 107. (in Chinese))
- [21] ZHANG Y L, LU Y Y, ZHOU Q, 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.
- [22] 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 Q T, ZHANG Y, LIN P. Index system and quantification method for human-water harmony[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese))
- [23] 周祖昊, 刘扬李, 李玉庆, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: I: “积雪-土壤-砂砾石层”连续体水热耦合模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 20-32. (ZHOU Z H, LIU Y L, LI Y Q, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: I: hydrothermal coupling simulation of “snow- soil- sand gravel layer” continuum[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 20-32. (in Chinese))
- [24] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 和谐度方程(HDE)评价方法及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(12): 3281-3288. (ZUO Q T, HAN C H, MA J X, et al. Evaluation methodology of harmony degree equation(HDE) and its application [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2017, 37(12): 3281-3288. (in Chinese))
- [25] 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 Y F, GONG S X, WANG H R, 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))
- [26] 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 Q T. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 135-144. (in Chinese))

The basic principle and theoretical system of regional water balance*

ZUO Qiting^{1,2}, WU Qingsong¹, JIN Junliang³, MA Junxia^{1,2}, TAO Jie^{1,2}

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Achieving a healthy regional water balance is an important content and challenge of China's water conservancy work, which is of great significance to ensure national water security and the sustainable and stable development of the national economy and society. This study defined the concept of a regional water balance based on a summarization of the fundamental understanding of a water balance, then its connotation was interpreted from four aspects: ① water budget balance; ② water supply-demand balance of economic society; ③ water use balance between the economy and ecology; ④ harmonious balance of human-water relationship, and three dimensions of time, space, system. This study proposed the basic principles of a regional water balance, including water balance principle, supply and demand balance principle, synergistic balance principle and harmonious balance principle. The important scientific challenges for realizing a regional water balance supported by basic principles were analyzed. The theoretical system of regional water balance was discussed in terms of two aspects of theoretical basis and basic theory. The theoretical basis includes hydrology, science of water resources, ecology, economics, sociology and other theories. The basic theory includes the spatiotemporal equilibrium theory of water resources budget, the optimal allocation theory of water resources supply and demand, the synergy theory of water use between the economy and ecology, and the human-water harmony theory. This study also discussed the prospect of applying the basic theory. The results of this study can act as a reference for future studies of the regional water balance and can provide a research framework for management of the regional water balance in the future.

Key words: regional water balance; basic principle; theoretical system; human-water relationship; basic theory

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3200201) and The Major Science and Technology Projects for Public Welfare of Henan Province, China (No. 201300311500).