

引用格式:左其亭. 人水关系研究的理论、方法及实践需求[J]. 资源科学, 2025, 47(3): 433-444. [Zuo Q T. Theories, methods, and practical needs of human-water relationship research[J]. Resources Science, 2025, 47(3): 433-444.] DOI: 10.18402/resci.2025.03.01

人水关系研究的理论、方法及实践需求

左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 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, 郑州 450001)

摘要:人水关系是人类与自然界关系中最基本的关系之一,人水关系研究是科学认识水问题、探索治水之路的重要基础,也是人类社会发展的实践需求。基于前期研究工作和不同时期成果梳理,从“萌芽、起步、形成”3个阶段综述了人水关系的研究历程,总结了每个阶段的发展特征;从“系统、子系统、研究视角”3个层面提出了人水关系分类方案;阐述了发展人水关系学的目的和优势,介绍了人水关系学的主要内容、理论体系和研究方法;从“对人水关系的认识、分析、调控”3个层面阐述了人类治水实践需求,包括思想-理念需求、方程-度量需求、模型-策略需求,并详细给出3个层面对应的研究重点,共18个具体研究方向。本文能够为进一步完善人水关系学理论体系、探索人水关系研究实践需求及关键科学技术问题提供支持。

关键词:人水系统;人水关系;人水关系学;理论方法;实践需求

DOI: 10.18402/resci.2025.03.01

1 引言

人水关系是人类与自然界之间永恒的、不可逾越的一种基本关系。人类自出现就与水打交道,一方面认识洪水过程、积累防洪经验以尽力躲避洪水的危害,另一方面探索开发利用水资源的途径以用于生活饮用和生产发展。可以说,人类发展的历史也是治水的历史,同时也是处理人水关系的历史^[1]。

基于以上认知,人类开发利用水资源、防治洪涝和干旱灾害等工作均可纳入人水关系研究范畴中,且研究历史悠久,相关成果不胜枚举。按照左其亭^[2]对人水关系研究内容的分类,目前研究成果主要包括:①人水关系作用机理研究,如农田灌溉与地下水位之间的作用关系^[3]、水库调度运用与河道下游水系统变化之间的相互作用机理^[4];②人水关系变化过程研究,如特大型水利工程建设带来河流下游水质变化^[5]、土地利用/覆被变化带来水系统的变化^[6];③人水关系模拟模型研究,如退耕还林还

草工程产水效应模拟^[7]、城市化建设背景下水文过程模拟^[8];④人水关系科学调控研究,如城市水资源优化配置^[9]、多目标水库优化调度^[10];⑤人水关系相关政策制度研究,如数字孪生流域共建共享政策^[11]、最严格水资源管理制度^[12]。

人水关系相关研究成果很多,但近几年才逐渐形成一门学科。左其亭^[1]于2021年首次提出人水关系学的概念及学科体系,随后提出了人水关系学的基本原理及理论体系框架^[13,14],逐渐形成了总体框架相对完善的新学科体系^[2,15]。由于人水关系学提出时间不长,针对性研究尚显不足,目前仍缺少对人水关系理论及实践的系统总结。综上,本文总结人水关系研究历程及分类,阐述人水关系学的理论体系和研究方法,并明确其实践需求及研究重点。

2 人水关系研究历程及分类

2.1 人水关系研究历程

按照一般学科的形成和发展规律,左其亭^[2]把

收稿日期:2024-12-25;修订日期:2025-03-05

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);国家重点研发计划课题(2024YFC3211301);国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介:左其亭,男,河南固始人,教授,研究方向为水文水资源。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

人水关系学的发展历程分为3个阶段,即萌芽阶段(2005年之前)、起步阶段(2006—2020年)、形成阶段(2021年之后)。基于3个发展阶段,再进一步细化描述人水关系的研究历程(图1)。

(1)萌芽阶段

在2005年之前,人水关系学发展处于萌芽阶段,该阶段偏重人水关系单项研究。具体表现在:①19世纪末之前,为了满足生产生活需要,人们对河流水位、雨量等水文要素进行观测,对水文现象进行推理和描述,并发现一些基本原理。对水的认知由定性描述逐步发展到定量表达,水文科学基本理论初步形成。这一漫长时期主要是对水系统认识不断积累的过程。②20世纪初—60年代,伴随着经济社会发展和生产力提高,水利、交通、电力等工程建设需求显著扩大,需要科学处理工程建设相关的水问题;同时,伴随实测水文资料的增长、水文站网的扩展以及对水问题认识的不断加深,出现了许多水文和水资源计算公式和新方法,水文学体系逐步完善。这一时期主要是对水系统的定性认识和定量研究,偏重解决实践中遇到的水问题。③20世纪70年代—90年代末,随着水利科技进步以及对水系统认识的积累,特别是经济快速增长背景下众多水问题凸显,迫使人们加大对水问题的研究深度,出现了新的理论方法和技术手段,也派生出许多新的学科分支,水资源学基本形成^[16]。该时期偏重研究人类活动影响下的水文效应以及水资源开发利用模式。④20世纪90年代末—2005年,由于人类活动影响加剧,水资源短缺、洪涝灾害、环境污染等一系列水问题愈发严峻,水问题综合对策研究开始

得到关注。同时,计算机和信息技术的发展应用也促进了水科学的蓬勃发展,涌现了一系列新的专业词汇和理论方法^[17]。该时期偏重研究水资源可持续利用以及水资源与经济社会、生态环境的协调发展,为开启人水关系研究奠定了重要基础。

(2)起步阶段

2006—2020年,人水关系学发展处于起步阶段,该阶段偏重人水关系综合研究。具体表现在:①伴随着人类活动和气候变化的叠加影响,水问题的不确定性和复杂性显著提升,更多学者开始关注多系统交叉问题,比如,水-能源-粮食纽带关系及调控研究^[18]、水量-水质-水生态耦合系统研究^[19]、水资源-经济社会-生态环境耦合模拟与协调发展研究^[20]。上述示例均属于人水关系综合研究,且都是该时期的热点研究方向,极大地推动了人水关系的理论及应用扩展。②我国在该时期提出了最严格水资源管理制度、习近平生态文明思想、海绵城市建设、河湖长制、水资源税改革、人与自然和谐共生思想等一系列治水思路和方案,在提升治水能力的同时,极大地丰富了处理人水关系的理论方法及实践经验。③从2006年起,人水关系和谐问题逐渐被水利科技工作者所关注。2006年举办的第四届中国水论坛的主题是“人水和谐理论与实践”,会议论文集《人水和谐理论与实践》的正式出版体现了人水和谐研究的兴起。2009年“人水和谐论”一词被首次提出^[21],2019年人水和谐论体系框架完成构建^[22],2020年人水和谐论体系基本形成^[23],人水关系的理论及应用研究内容持续完善,为人水关系学的提出奠定了重要基础。

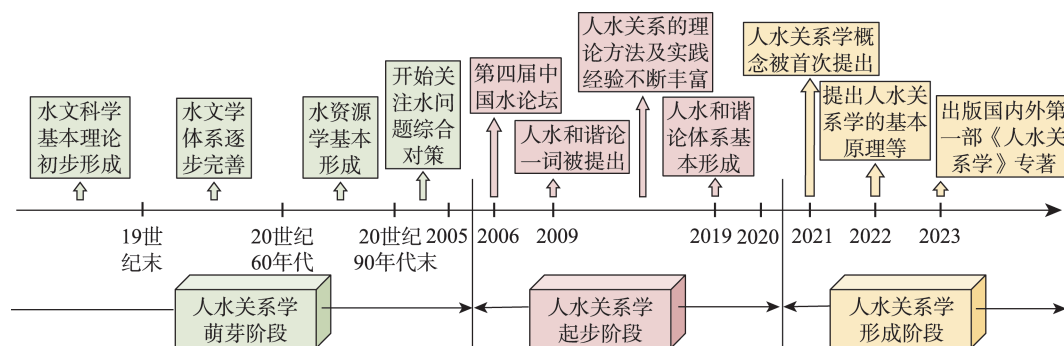


图1 人水关系研究历程概览

Figure 1 Overview of the evolution of research on human-water relationship

(3)形成阶段

2021年之后,人水关系学发展处于形成阶段,偏重人水关系整体化、智慧化研究。具体表现在:①人水关系研究具有明确的研究对象、丰富的理论方法和应用实践,已具备形成学科体系的基本条件。2021年,人水关系学的概念被首次提出,阐述了人水关系学的构建思路和学科体系^[1];2023年,国内外第一部《人水关系学》专著正式出版^[2],标志着人水关系学基本形成。②近年来我国大力倡导河流系统治理、综合治理思路,需要把人水系统看成一个大系统,从整体的视角来分析、研究和调控人水关系问题,人水关系的整体化研究趋势逐渐呈现。比如,针对长江、黄河流域提出的重大国家战略,需兼顾开发与保护,综合考虑上中下游、左右岸、多区域以及水资源-经济社会-生态环境系统的协同发展,采用水资源-水环境-水生态-水灾害协

同的综合治理思路。③随着水利现代化建设、国家水网建设和孪生流域建设的逐步推进,我国水利事业已步入“智慧时代”,表现出人水关系智慧化研究趋势。针对复杂的人水系统,需要构建人水关系模拟器,才能合理模拟其内部结构、变化过程与趋势。比如,为了回答国家水网建设伴随的潜在影响,传统的统计分析或系统计算难以预测未来若干年的影响变化,需要研发耦合“水循环过程、物质循环过程、生物过程、人文过程”的国家水网模拟器^[24]。

2.2 人水关系分类及研究举例

为系统展示人水关系的研究范畴,可以按照研究对象对人水关系进行分类(表1),第一层按“系统层面”分为3类,第二层按“子系统层面”对第一层3类进行细化,第三层按“研究视角层面”分为宏观和微观两个类别,代表人水关系两种相对的研究视角。水科学的10个分支学科中广泛存在人水关系

表1 人水关系分类一览表

Table 1 Classification of human-water relationship

第一层 (系统层面)	第二层 (子系统层面)	第三层 (研究视角层面)	研究举例
人文系统 对水系统 作用关系 (HW1)	人口对水系统作用关系(HW11)	宏观:区域人口对水系统作用关系(HW111) 微观:人口单指标对水系统单指标作用关系(HW112)	全国或区域人口变化对水资源的影响 居民小区/家庭人口数对生活用水量的影响
	工业对水系统作用关系(HW12)	宏观:区域工业对水系统作用关系(HW121) 微观:工业单指标对水系统单指标作用关系(HW122)	全国或区域工业布局对水系统的影响 工厂技术改造对工业用水效率的影响
	农业对水系统作用关系(HW13)	宏观:区域农业对水系统作用关系(HW131) 微观:农业单指标与水系统单指标作用关系(HW132)	区域退耕还林还草政策对水系统的影响 田间农业耕种方式对灌溉用水量的影响
	工程建设对水系统作用关系(HW14)	宏观:区域建筑业或工程建设对水系统作用关系(HW141) 微观:单一工程建设对水系统单指标作用关系(HW142)	全国或区域水网布局对水系统的影响 水库建设对下游水质的影响
	城市建设对水系统作用关系(HW15)	宏观:区域城市建设对水系统作用关系(HW151) 微观:城市建设单指标对水系统单指标作用关系(HW152)	城市建设背景下的水系统演变 城市下垫面变化对洪水洪峰的影响
	其他人类活动对水系统作用关系(HW16)	宏观:区域其他人类活动对水系统作用关系(HW161) 微观:其他人类活动对水系统单指标作用关系(HW162)	土地利用/覆被变化对水系统的影响 河道疏浚对输沙能力的作用
	人类活动综合对水系统作用关系(HW17)	宏观:区域人类活动综合对水系统作用关系(HW171) 微观:人类活动综合对水系统单指标作用关系(HW172)	流域水资源配置方案对水系统的作用 人工取水或灌溉作用下地下水位变化
	地表水系统对人文系统作用关系(HW21)	宏观:流域地表水系统对人文系统作用关系(HW211) 微观:某地表水体对人文系统单指标作用关系(HW212)	地表水资源开发利用对经济社会发展的作用 水库引水对农田灌溉的作用
	地下水系统对人文系统作用关系(HW22)	宏观:区域地下水系统对人文系统作用关系(HW221) 微观:某地下水水体对人文系统单指标作用关系(HW222)	地下水开采布局对产业结构的影响 地下水开采量对生活饮用水安全保障的作用

接下页

续上页

第一层 (系统层面)	第二层 (子系统层面)	第三层 (研究视角层面)	研究举例
水系统对人文系统作用关系(HW2)	水系统对人口作用关系(HW23)	宏观:区域水系统对人口系统作用关系(HW231)	水系统演变对人口变化的作用
		微观:水系统某因素对人口单指标作用关系(HW232)	某污染物浓度对人体健康的影响
	水系统对工业作用关系(HW24)	宏观:区域水系统对工业系统作用关系(HW241)	区域水系统对工业发展的影响
		微观:水系统某因素对工业单指标作用关系(HW242)	工厂供水量对工业产值的影响
	水系统对农业作用关系(HW25)	宏观:区域水系统对农业系统作用关系(HW251)	区域水系统对农业发展的影响
		微观:水系统某因素对农业单指标作用关系(HW252)	灌区农业分配水量对农业生产量的作用
	水系统对工程建设作用关系(HW26)	宏观:区域水系统对工程建设作用关系(HW261)	水资源优化配置对水网建设的需求
		微观:水系统某因素对工程建设单指标作用关系(HW262)	水力学冲击条件下水闸安全性
	水系统对城市建设作用关系(HW27)	宏观:区域水系统对城市建设作用关系(HW271)	城市水系统对生态文明建设的作用
		微观:水系统某因素对城市建设单指标作用关系(HW272)	城市洪水对地下工程的影响
水系统对其他人类活动作用关系(HW28)	水系统对城市建设作用关系(HW27)	宏观:区域水系统对城市建设作用关系(HW271)	城市水系统对生态文明建设的作用
		微观:水系统某因素对城市建设单指标作用关系(HW272)	城市洪水对地下工程的影响
	水系统对其他人类活动作用关系(HW28)	宏观:区域水系统对其他人类活动作用关系(HW281)	水资源利用对国家生态文明建设的作用
		微观:水系统某因素对其他人类活动单指标作用关系(HW282)	干旱区地下水位对人工林生长的影响
	水系统对人类活动综合作用关系(HW29)	宏观:区域水系统对人类活动综合作用关系(HW291)	水资源条件对国民经济可持续发展的作用
		微观:水系统对人类活动单指标综合作用关系(HW292)	供水水量、盐分含量对棉花生长的影响
	水系统与人口相互作用关系(HW31)	宏观:区域水系统与人口系统相互作用关系(HW311)	水资源分布与社会发展格局的关系
		微观:水系统某因素与人口单指标相互作用关系(HW312)	人口数与水资源量分布匹配的关系
	水系统与工业相互作用关系(HW32)	宏观:区域水系统与工业系统相互作用关系(HW321)	工业布局与用水结构的关系
		微观:水系统某因素与工业单指标相互作用关系(HW322)	工业技术改造与节水效果的关系
人文系统与水系统相互作用关系(HW3)	水系统与农业相互作用关系(HW33)	宏观:区域水系统与农业系统相互作用关系(HW331)	区域水与粮食纽带关系与调控
		微观:水系统某因素与农业单指标相互作用关系(HW332)	灌溉水量与农业产值的关系
	水系统与工程建设相互作用关系(HW34)	宏观:区域水系统与工程建设相互作用关系(HW341)	国家水网建设与水资源配置方案
		微观:水系统某因素与工程建设单指标相互作用关系(HW342)	水利工程建设运用与水系统相互作用
	水系统与城市建设相互作用关系(HW35)	宏观:区域水系统与城市建设相互作用关系(HW351)	城市化与水生态系统的关系
		微观:水系统某因素与城市建设单指标相互作用关系(HW352)	城市河湖水系连通与水系健康的关系
	水系统与其他人类活动相互作用关系(HW36)	宏观:区域水系统与其他人类活动相互作用关系(HW361)	人类主导下的水资源管理制度
		微观:水系统某因素与其他人类活动单指标相互作用关系(HW362)	碳排放量与水资源利用量的关系
	水系统与人类活动综合相互作用关系(HW37)	宏观:区域水系统与人类活动综合相互作用关系(HW371)	水资源与经济社会、生态环境和谐发展
		微观:水系统某因素与人类活动单指标综合相互作用关系(HW372)	流域水资源供需双侧调控

研究实例,甚至一个复杂的人水关系研究实例贯穿多个分支学科。对每种人水关系分类均提供了简单示例,每个示例均有大量相关文献支撑,就不再列举具体实例。采用三层编码方式对各分类进行编码,HW代表Human-Water,第一层中第1类为“HW1”,其第二层第1类为“HW11”,其第三层第1类为“HW111”,其他编码以此类推。

3 发展人水关系学的目的及优势

发展人水关系学的目的是:①站在人水关系学科高度认识具体问题。从学科的整体视角全面

认识旱涝灾害、供需矛盾等具体人水关系问题,有助于形成更科学全面的治水理念,是对水问题传统认知的有效提升。②基于人水关系多学科交叉研究难点问题。人水关系多学科理论方法的交叉融合突破了传统单一学科局限,为水科学复杂难题攻关提供集成创新思路 and 路径。③采用人水关系全系统调控制定解决对策。人水关系全系统调控能够协调兼顾人水系统的多维要素,提升水问题对策制定的整体性、科学性和高效性。

人水关系学在以下方面具有明显优势:①立足

整体视野。人水关系学的研究对象是复杂的人水系统,往往由于人们认识上的局限性,其作用机理和作用关系难以辨识清楚。因此,需要从整体的视角认识问题、分析问题,这是发展人水关系学的主要动力,也是人水关系学在问题认识方面的优势。②融合学科交叉。复杂水问题的解决需要多学科的共同努力,为了融合多学科的理论方法,人水关系学学科体系应运而生。可以认为,人水关系学就是融合多学科来研究水科学问题。③坚持以人为本。在人水关系中,人存在理性而占主动地位,应科学认识和积极处理人与水的关系。相反,人类对自然规律的任何忽视和干预以及对人与自然协调状态的任何破坏,都不可避免地祸及人类自身。④倡导和谐

关系。人水关系学提倡用“以和为贵”的理念来看待各种人水关系,主张用和谐的态度来处理人水关系中各种不和谐因素和问题,能够理性地认识人水关系中存在的矛盾和冲突。⑤综合解决问题。人水关系学提倡采用系统理论方法来分析人水关系问题,不提倡就水论水、就人论人,能够将人水关系纳入一个系统中进行整体研究,综合解决相关问题。

4 人水关系学的主要内容框架及理论方法

4.1 主要内容框架

把人水关系学的主要内容归纳为图2所示。其主要内容框架包括:①研究对象。人水关系学的研究对象是由人文系统和水系统组成的人水系统。

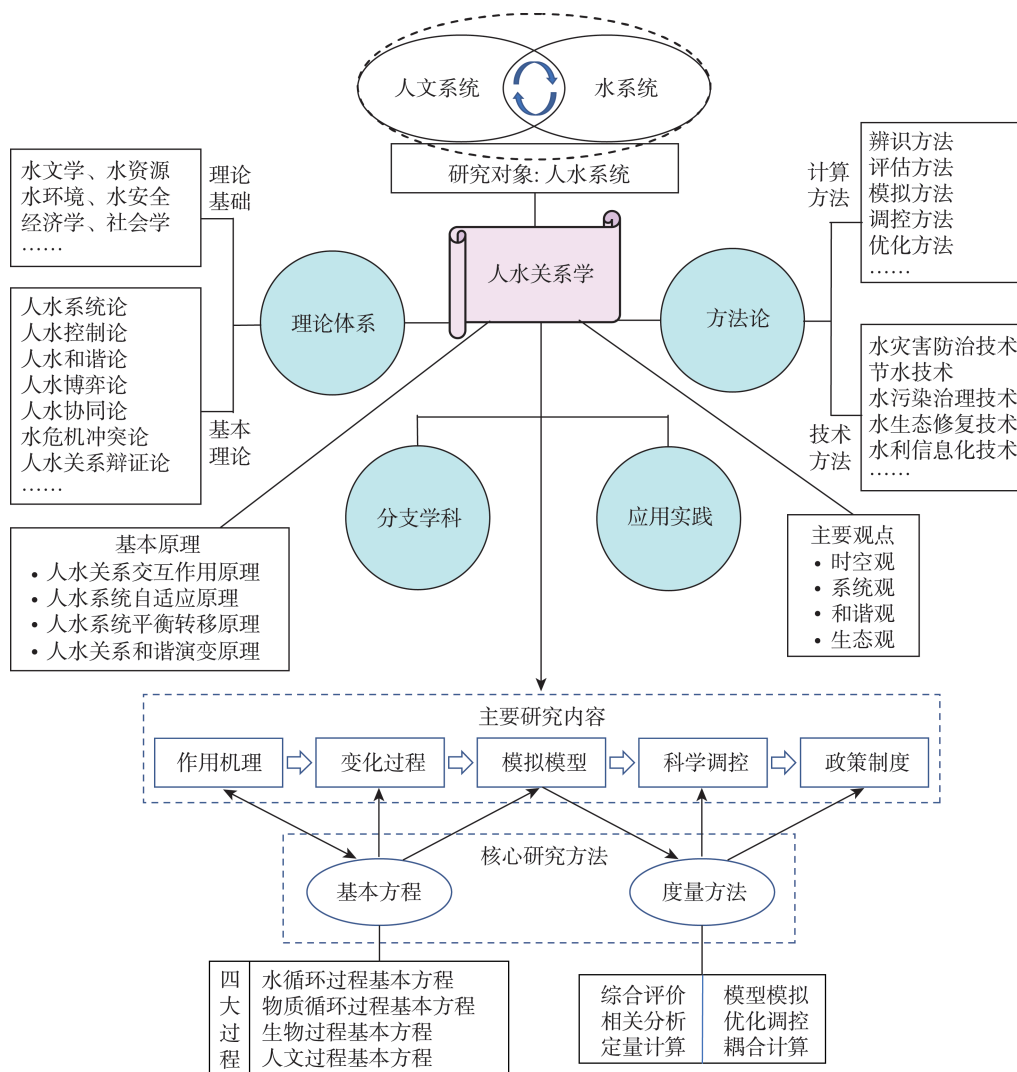


图2 人水关系学的主要内容框架图

Figure 2 A main content framework of human-water relationship discipline

②分支学科。按照研究分区、专题、方法、技术、视角等,人水关系学可派生出许多分支学科。③理论体系。人水关系学有一套理论体系,包括理论基础和基本理论。④方法论。人水关系学具有丰富的方法论,包括计算方法和技术方法,其核心方法主要是基本方程和度量方法。⑤应用实践。人水关系学具有广泛的应用实践,主要研究内容可以划分为五大方面:作用机理、变化过程、模拟模型、科学调控、政策制度。⑥基本原理和观点。人水关系学倡导时空观、系统观、和谐观、生态观,通过4个基本原理来诠释人水关系的各种机理和现象,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、人水关系和谐演变原理。

4.2 理论体系

人水关系学是一门学科,与其他学科一样拥有一套理论体系。在长期的研究积淀中,人水系统的某些研究方向或内容已经形成了一系列学科或理论体系,比如,研究水文循环相关的水文学,研究水资源开发利用与保护相关的水资源学,研究水环境模拟与治理相关的水环境学,研究水安全保障相关的水安全学,以及研究水的经济、社会、法律等相关内容的经济学、社会学、法学等。此外,系统科学、物理学、化学、生物学等学科的理论方法也经常应用于人水系统研究中。人水关系学是基于上述学科发展起来的交叉学科,这些学科的理论体系都应列为人水关系学的理论基础。

同时,针对人水关系问题专门形成了一系列理论,比如:①人水系统论。研究人水系统的结构、功能、行为、规律以及系统间的联系,并对其进行数学描述的知识体系。其主要内容包括人水系统分析、模拟、评价、预测、优化五大方面,广泛应用于水资源系统分析、水资源开发利用综合评价、水资源系统优化配置、水库群优化调度、地表水-地下水联合调度、水-能源-粮食耦合分析、水灾害治理路径优化、国家水网规划方案优选等研究中。②人水控制论。研究人水系统中的控制问题,形成的以控制论为主体的理论体系。其主要内容包括:人水系统信息和反馈理论研究、人水控制论的方法研究、人水系统的控制应用研究。人水控制论具有广阔的应用领域,如水资源调控、水力控制、多水源联合优化

配置、调水工程自动控制系统、水库和闸坝调度、多级水力发电站联合调度、智慧水网调度等。③人水和谐论。研究人水和谐问题的理论方法,也是一门研究人水系统以实现人水和谐目标的知识体系。其主要内容包括:人水和谐论的理论、方法及应用研究。人水和谐论应用广泛,包括流域/区域人水和谐评估、典型水问题对策分析,水资源规划与管理、水战略布局、水资源与经济社会和谐发展辨识等方面。④人水博弈论。基于博弈论思想研究人水关系中“竞争”“矛盾”“排斥”等问题的理论方法。其主要内容涵盖人水博弈理论、方法及应用研究。人水博弈论在水资源分配、水权分配、水-风-火电收益分配、调水工程水源区与受水区利益分配、跨界河流分水、生态补偿价格制定、部门间或区域间用水冲突与合作、流域开发与保护协调、水旱灾害防御方案选择、水环境污染治理方案选择等领域得到广泛应用。⑤人水协同论。基于协同论思想研究人水系统中不同事物的共同特征及其协同机理的理论方法。人水协同论为水资源-经济社会-生态环境协同发展、水问题协同解决路径和方案、水污染多部门协同治理和立法保护、水-能源-粮食-生态协同调控、河流或流域协同开发与保护、人与自然和谐共生途径协同优化、人水系统协同调控等问题的探讨提供了重要支撑。⑥水危机冲突论。借鉴冲突论思想,针对人水系统中水供给或水灾害防御出现危机时,研究水危机冲突的本质、根源、类型和预防的理论方法。水危机是常见的危机事件,可以由自然灾害或经济社会突发事件导致,发生时间快且危害程度大。水危机冲突论在自然灾害、突发性水体污染、供水危机、水工程或设施破坏、国际河流分水争端等相关水危机处理中发挥着不可替代的作用。⑦人水关系辩证论。运用自然辩证法来认识、调控、研究人水关系而形成的一种理论方法。人水系统往往较为复杂,认识和研究人水系统和人水关系需要运用自然辩证法的思想。人水关系辩证论能够充分应用于水工程建设利弊分析和决策、洪水灾害与洪水资源辩证认识和分析、水资源开发与保护关系分析、水体污染治理投入与效益分析、节水与用水辩证分析等问题的研究实践。⑧人水系统可持续发展论。运用可持续发展思想来研究

2025年3月

人水关系问题,形成的以可持续发展思想为指导、以协调人水关系为核心的理论方法体系。其主要内容包括:人水系统可持续发展理论、可持续发展量化方法体系及其应用研究。可持续发展思想是我国现代治水的重要指导思想,在水资源可持续利用规划与管理、流域综合治理、水战略布局、生态文明建设、国家水网建设等多个领域得到适应性发展和应用。

4.3 研究方法

开展人水关系研究需要一系列研究方法,包括计算方法、技术方法两大类。计算方法涉及辨识方法、评估方法、模拟方法、调控方法、优化方法等,技术方法涵盖水灾害防治技术、节水技术、水污染治理技术、水生态修复技术、水利信息化技术等。其中,多数方法发展成熟于其他学科或以往研究中,人水关系学的核心研究方法有两大类:①描述人水关系的“基本方程”。人水关系复杂,一般存在“四大过程”,即水循环过程、物质循环过程、生物过程、人文过程^[24]。根据水量平衡原理,可以归纳出水循环过程的基本方程;根据水体中水流连续性原理、能量守恒原理、物质转化与平衡原理等,可以归纳出物质循环过程的基本方程;根据生物生存和发展规律,由生物学家或相关专业人员提出生物过程的基本方程;根据人类活动和经济社会发展关键指标的变化规律,可以归纳出表征人口、产业发展以及工程建设等人文过程的基本方程,详见文献[24]。在特定流域或区域,人水系统“四大过程”相互作用、互为参数,可耦合表征人水系统的作用机理和变化过程。当然,并非所有人水关系问题均涉及完整的“四大过程”,有些问题可能仅涉及一个或两、三个特定过程。②刻画或评估人水关系的“度量方法”。通过科学的计量手段,对人水系统进行定量分析与评估。其方法可归纳为6类,即定量计算、相关分析、综合评价、模型模拟、优化调控和耦合计算。定量计算方法是针对关键指标进行定量描述得到该指标度量结果,相关分析方法是通过对要素间的相互关联程度计算得到度量结果,综合评价方法是通过多指标综合评估得到综合度量结果,模型模拟方法是通过构建模拟模型来模拟得到度量结果,优化调控方法是通过构建优化模型及其优化算法

寻找最优或较优计算结果,耦合计算方法是采用多种方法进行耦合计算得到综合度量结果。

5 实践需求及研究重点

多数水问题的根源是人水关系出现矛盾。如某时期“来水”环节突然增强而导致水量过多或水位过高,可能形成洪涝灾害;某时期“来水”环节突然减弱而导致用水短缺,容易形成干旱灾害。协调好人水关系是破解多数水问题的本质需求。一方面,人水关系处理不当会导致一系列水问题,因此需要从协调人水关系的角度来解决水问题;另一方面,水利工作几乎都是为了改善人水关系^[23],防洪、抗旱、调水、灌溉、防渗、用水保障、农田排水等工作,都是从特定方面或途径来协调人水关系。2024年9月在兰州市召开的“全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会”上提出,“要精心做好‘人水关系’这篇大文章”,深入研究和探索人水关系具有重要现实意义。

本文从对人水关系“认识、分析、调控”3个层面阐述其实践需求,并提出其研究重点,概括如图3,为具体实践中合理运用人水关系学理论方法、科学探索人水关系提供参考。

5.1 对人水关系认识的思想-理念需求及研究重点

从古至今大量的实践表明,水资源开发利用与保护、洪涝灾害防御、抗旱保生产等实践的关键是对其认识的“思想”“理念”的科学性。思想决定其发展方向,理念引导其具体实施。早期大禹的治水思路由“堵”转变为“顺势疏导”而成功治理黄河水患;现代“系统治理、综合治理”的思路在黄河治理中取得了显著成效。相反,处理人水关系过程中出现的诸多问题,其本质也是源于思想理念的局限性。比如,水资源开发利用中忽视生态用水效益,导致河流生态系统破坏;对地下水认识不足而过度开采,引发地面沉降问题;河流治理中过度人工化改造而忽视其自然属性,致使河流生态功能和防洪能力下降。因此,对人水关系形成科学的认知和先进的思想理念至关重要。

水系统本身的复杂性以及人类主观意识的局限性,构成了许多人水关系研究的系统性科学难题。比如,地表水-地下水转换过程、大气-水文耦合机制、植被-水分相互作用等机理研究中仍存在

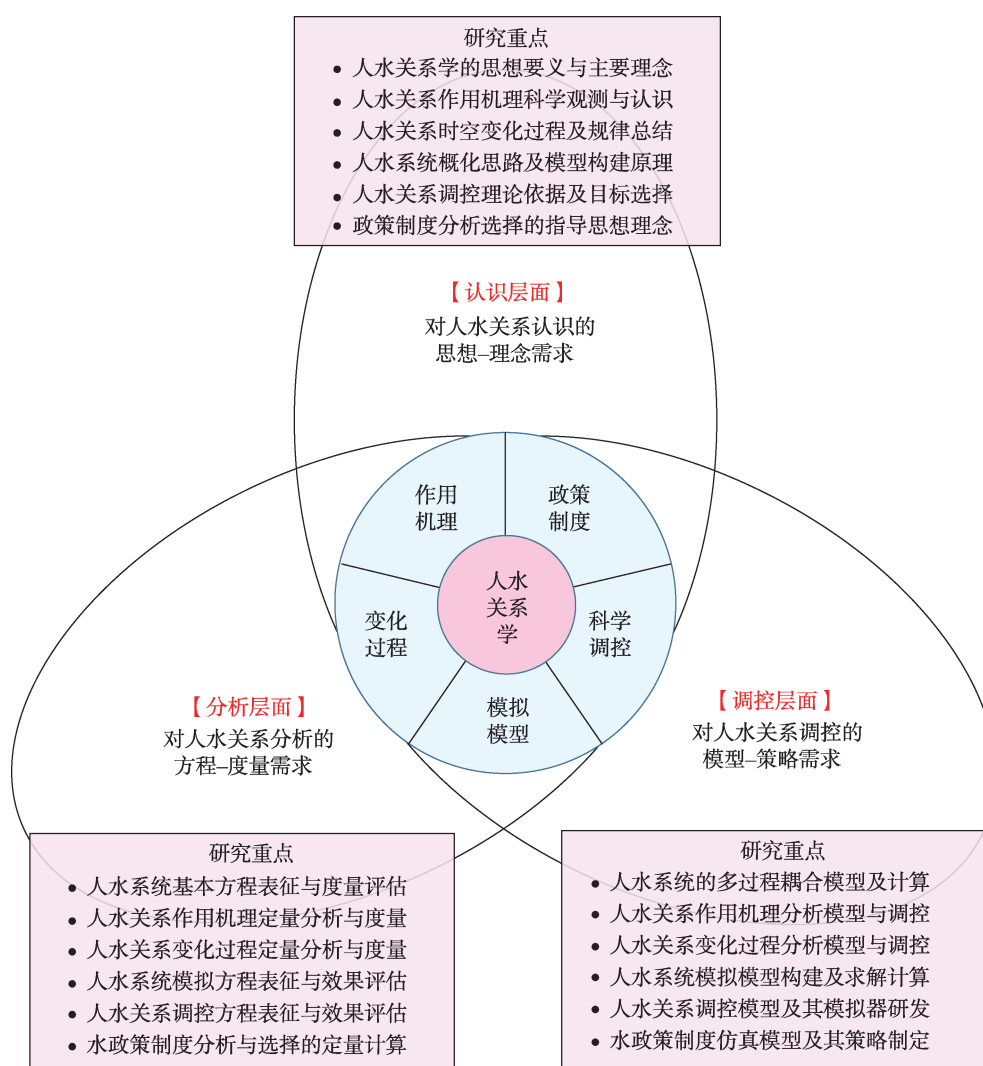


图3 人水关系学实践需求及研究重点示意

Figure 3 Practical needs and research focus of the human-water relationship discipline

认知盲区^[25],复杂的人水系统变化模拟方程表征和模型构建存在大量概化和精度不足问题,人水关系调控的目标函数构建、约束条件设定等存在主观干扰和认知差异,水管理政策制度制定与实施效果分析中人为影响突出。

综上,对目前人水关系认知的研究重点总结归纳为:①人水关系学的思想要义与主要理念。包括:人水关系研究的基本原理、理论体系,时空观、系统观、和谐观、生态观等研究观念,处理人水关系的指导思想、目标选择与思路理念,微观上揭示作用机理、分析变化过程、概化计算过程、选择调控方案以及分析政策制度的主要思想和研究路径等。②人水关系作用机理科学观测与认识。包括:宏观

上流域或区域“天-空-地”一体化观测,微观上地表水-地下水-土壤水-植物水的实验观测、自然-社会水循环实验,以及农田、林地、冰川等专项监测、重大工程或其他人类活动影响监测;对全球气候变化、人类活动影响、水圈层演变、水循环转化的认识,对各种人类活动与水系统交互关系的认识等。③人水关系时空变化过程及规律总结。包括:千年尺度人水关系演变过程及评估,水资源-经济社会-生态环境系统耦合变化过程及规律,水-能源-粮食-生态系统变化过程及作用关系分析,工程建设伴随的水系统变化分析,灌溉作用下地表水地下水变化分析等。④人水系统概化思路及模型构建原理。包括:人水系统模拟计算模型的概化思路,模

2025年3月

型表征的基本过程,模型模块结构架构及原理,模型构建与认知匹配性分析等。⑤人水关系调控理论依据及目标选择。包括:人水关系调控的指导思想、理论依据、实现目标,调控理论具体实施分析,国家战略与治水思路的释义及应用等。⑥政策制度分析选择的指导思想理念。包括:政策制度制定的指导思想和主要理念,特定政策制度(如水资源刚性约束制度、退耕还林还草制度)的实施路径和方案,水资源开发利用模式、水利工程运行模式选择思路等。

5.2 对人水关系分析的方程-度量需求及研究重点

人水系统涉及人文系统与水系统多维度和多层次的相互作用、变化过程、人为调控,对人水关系的分析需要一系列的定量分析方法提供支撑。其中,建立基本方程是表征人水关系的核心手段,即通过数学方程对人文系统与水系统以及两者之间的互动关系进行量化。同时,度量或评估人水系统在不同时间、空间尺度上的作用机理、变化趋势、调控效果等也是研究关键。

目前关于人水关系分析度量方法的研究成果较为丰富。比如,水资源-经济社会-生态环境协调分析、洪涝灾害对人类影响风险识别分析、人类活动与水生态系统服务关系分析、水源涵养能力与人类活动关系分析、经济社会与生态用水平衡分析等。随着新技术发展,人水关系分析将会进一步精细化、智能化、系统化。然而,由于人水关系本身复杂,其基本方程的构建与求解表现出高度的复杂性、非线性、不确定性,对其度量和评估也具有多因素、多指标、多交互特性。比如,人类活动和气候变化对人水系统的影响作用辨识、不同时空尺度下水系统变化趋势研判、复合系统概化及模拟效果评估、科学调控目标选择及约束分析、政策制度定量表征与仿真分析等均是研究难题。

总结目前关于人水关系分析的研究难点,对其研究重点归纳为6点:①人水系统基本方程表征与度量评估。包括:宏观尺度上人水系统基本方程构建,如人口迁移、产业布局、水资源利用系统动力学方程;微观尺度上人水系统关键过程方程构建,如河流水动力方程、地下水流微分方程、河流泥沙水动力方程、污染物质迁移转化方程、洪水过程演变

方程;人水系统状态度量评估指标、标准和方法,各种基本方程的效果评估等。②人水关系作用机理定量分析与度量。包括:作用机理的定量分析方法,如统计分析、实验模拟、数字模型、智能算法等;宏观尺度人水关系的作用分析,如水-能源-粮食-生态耦合关系、水资源-经济社会-生态环境协调关系等;微观尺度人水关系的作用分析,如闸坝对水量-水质-水生态的影响、田间灌溉对地下水影响分析等;各种作用机理分析的度量,如最小生态流量、水资源开发利用率、供水保证率的确定等。③人水关系变化过程定量分析与度量。包括:水文、气象、人类活动影响等多要素变化过程分析方法,如时间序列法、相关分析法、模型推演法等;各种变化过程分析的度量,如线性或非线性趋势判别、周期性判别、突变点辨识等。④人水系统模拟方程表征与效果评估。包括:各种模拟方程的定量表征与计算,如污染物质迁移转化计算、地下水运动模拟计算、农田排涝模拟计算、输水渠涵水力学计算等;模拟方程的效果评估,如供水管道水动力模拟、水沙运动过程数值模拟、暴雨洪水过程模拟、农田土壤水运移模拟、矿井水化学特征模拟等效果评估等。⑤人水关系调控方程表征与效果评估。包括:各种调控方程的定量表征,如水沙调控运动方程计算、土壤水盐调控运移方程计算、城市内涝排水方程计算等;调控效果评估,如水库水温分层调度、跨区域洪水调度、突发水污染事故应急调度、生态补水调度等效果评估。⑥水政策制度分析与选择的定量计算。包括:应用于水政策制度分析的各种定量计算方法,如政策综合评估方法、政策工具优化方法、动态模拟方法、博弈论分析方法、和谐论分析方法、系统动力学方法、政策推演方法、水足迹计算方法等。

5.3 对人水关系调控的模型-策略需求及研究重点

人类治水史也是一部探索人水关系的历史。水资源开发、水生态保护、水灾害防治等治水工作均是基于人的理性思维,通过一系列措施来调控人水关系。因此,人水关系调控在水利工作中具有重要的理论和实践意义。

人水关系调控的相关研究涉及多个领域。比如,抵御洪涝灾害,即通过人工筑坝、兴建防洪水库等

措施来降低灾害损失;解决干旱问题,即通过引水、调水、节水等措施提高供水保障水平;缓解供需水矛盾,即通过水资源合理分配促进用水模式与经济社会布局相匹配。更微观的例子包括:通过水库调度来提升综合效益、通过闸坝调控改善下游河道水生态、通过改善农田用水条件以提高粮食产量等。

总结目前关于人水关系调控的研究难点,对其研究重点归纳为6点:①人水系统的多过程耦合模型及计算。包括:水循环过程、物质循环过程、生物过程、人文过程的耦合计算及模型构建。如传统水文模型是基于单一过程(水循环过程)构建的模型;生态-水文模型主要是基于2个过程(水循环过程与生物过程)构建的模型;水量-水质-水生态模型是基于3个过程(水循环过程、物质循环过程、生物过程)构建的模型;水资源-经济社会-生态环境耦合系统模型是基于以上4个过程构建的模型。②人水关系作用机理分析模型与调控。包括:用于分析人水关系作用机理的各种模型,如季节冻土水热演变模型用于分析冻融条件下水热作用机理,基于河网水动力模型分析防洪排涝工程建设作用,基于分布式水沙模型分析流域水沙与土地利用相互作用;基于模型的人水关系作用调控,如基于水-岩作用线性规划模型开展的水电工程水文地质场景选择,基于区域水平衡模型开展的经济社会与生态用水分配调度。③人水关系变化过程分析模型与调控。包括:用于分析人水关系变化过程的各种模型,如水化学-微生物场数学模型用于矿井水质演化分析,决策树模型用于预测河流水沙变化趋势;基于模型的人水关系变化调控,如基于长短期记忆神经网络模型研究气候变化下水资源优化配置,基于水力学模型研究河道淤泥形成过程并制定清淤方案,基于优化配置模型开展的生产用水变化调控。④人水系统模拟模型构建及求解计算。包括:宏观上全球、区域、流域各种人水系统模拟模型,如水-能源-粮食-生态系统耦合模拟、南水北调工程涉及区水资源利用影响模拟、大尺度分布式水资源-经济社会-生态环境耦合模拟;微观上各种人水关系相互作用模拟,如地表水-地下水转化关系模拟、工程建设条件下水系统变化模拟、农田灌溉系统模型、矿井开发区水系统演变模拟。⑤人水关系调控模型

及其模拟器研发。包括:宏观上研究水-风-光多能互补调控、跨流域调水工程影响调控、面向高质量发展的水资源优化配置;微观上研究水工程闸泵站智能调控、田间灌溉系统调控、供水系统供水分配调控;以及适应各种需求的人水关系模拟器研发,如国家水网模拟器、南水北调西线工程模拟器、水资源管理政策分析模拟器、大气水-地表水-地下水-植物水-生产用水循环过程模拟器等。⑥水政策制度仿真模型及其策略制定。包括:用于分析水政策制度的各种仿真模型,如取水权交易制度匹配模型、水资源刚性约束制度优化模型、“四水四定”制度分析模型、生态流量保障方案论证模型、跨界河流分水效果分析模型等;基于仿真模型的水策略制定,如全国或区域水网建设方案制定、重大水利工程布局方案制定、水生态文明建设策略制定等。

6 结论

本文从人水关系学的萌芽阶段(2005年之前)、起步阶段(2006—2020年)、形成阶段(2021年之后)回顾了人水关系的研究历程,主要目的是向读者展示人水关系研究的历史渊源和演变过程。从系统层面、子系统层面、研究视角层面提出了人水关系分类方案,并给出每个类型的示例,以彰显人水关系研究具有众多实践领域及广阔的应用前景。从认识问题、解决问题、制定对策3方面阐述了发展人水关系学的主要目的,分析了人水关系学的显著优势。总结了人水关系学的主要内容框架,包括研究对象、分支学科、基本原理、主要观点、理论体系、方法论、应用实践。从理论基础和基本理论介绍了人水关系研究的理论体系,从计算方法和技术方法介绍了人水关系研究的主要方法,并重点介绍了人水关系学的两类核心研究方法,即描述人水关系的“基本方程”和刻画人水关系的“度量方法”。

人水关系研究是水科学的核心内容,也是治水实践的重要抓手,实践中需要精心做好“人水关系”这篇大文章。本文从对人水关系“认识、分析、调控”3个层面阐述其实践需求以及18个研究重点方向,为人水关系深入研究和实践应用提供参考。人类活动和气候变化影响加剧导致人水系统更加复杂,但随着社会进步和智慧化技术的发展应用,人类对人水系统的观测能力和认识程度也在不断提

2025年3月

升,对科学处理人水关系的期望值也在升高,期待多学科学者从更宽的视野开展人水关系研究。

参考文献(References):

- [1] 左其亨. 人水关系学的学科体系及发展布局[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 1-5. [Zuo Q T. Discipline system of human-water relationship and its development layout[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(3): 1-5.]
- [2] 左其亨. 人水关系学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023. [Zuo Q T. Human-water Relationship Discipline [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2023.]
- [3] 侯永浩, 王楠, 丁蓓蓓, 等. 灌溉总量限制下灌水频率对冬小麦产量及地下水变化的影响: 以河北省太行山山前平原为例[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 1-9. [Hou Y H, Wang N, Ding B B, et al. Adjusting irrigation frequency to ameliorate winter wheat yield reduction due to restricted groundwater extraction for irrigation: A case study of the Piedmont Plain of Taihang Mountains, Hebei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 1-9.]
- [4] Yan X C, Thieu V, Wu S J, et al. Reservoirs change pCO₂ and water quality of downstream rivers: Evidence from three reservoirs in the Seine Basin[J]. Water Research, 2022, DOI: 10.1016/j.watres.2022.118158.
- [5] 张光贵, 王丑明, 田琪. 三峡工程运行前后洞庭湖水质变化分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 734-742. [Zhang G G, Wang C M, Tian Q. Changes of water quality in Lake Dongting before and after Three Gorges Project operation[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 734-742.]
- [6] Dash S S, Naik B, Kashyap P S. Assessment of land use/land cover change derived catchment hydrologic response: An integrated parsimonious hydrological modeling and alteration analysis based approach[J]. Journal of Environmental Management, 2024, DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120637.
- [7] 包玉斌. 陕北黄土高原退耕还林还草工程产水效应[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 49-56, 64. [Bao Y B. Water yield effects of the Grain for Green Program in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(6): 49-56, 64.]
- [8] Tafazzoli M. Hydrologic responses to urbanization: Towards a holistic approach for maximizing green roofs' performance in controlling urban precipitations[J]. Urban Climate, 2023, DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101352.
- [9] 陈红光, 王中君, 王琼雅, 等. 基于区间两阶段-部分信息模型的城市水资源优化配置[J]. 资源科学, 2019, 41 (8): 1416-1426. [Chen H G, Wang Z J, Wang Q Y, et al. An interval-parameter two-stage partial information programming model for optimal urban water resource planning[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1416-1426.]
- [10] Chen L, Ge L S, Wang D W, et al. Multi-objective water-sediment optimal operation of cascade reservoirs in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2022, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127744.
- [11] 钱峰, 周逸琛. 数字孪生流域共建共享相关政策解读[J]. 中国水利, 2022, (20): 14-17, 13. [Qian F, Zhou Y C. Interpretation of policies related to co-construction and co-sharing of digital twin basins[J]. China Water Resources, 2022, (20): 14-17, 13.]
- [12] Zhang L, Ma Q, Zhao Y, et al. China's strictest water policy: Reversing water use trends and alleviating water stress[J]. Journal of Environmental Management, 2023, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127744.
- [13] 左其亨. 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 Q T. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 1-6.]
- [14] Zuo Q T, Zhang Z Z, Ma J X, et al. Solutions to difficult problems caused by the complexity of human-water relationship in the Yellow River Basin: Based on the perspective of human-water relationship discipline[J]. Water, 2022, DOI: 10.3390/w14182868.
- [15] Zuo Q T. Human-Water Relationship Discipline[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2025.
- [16] 陈家琦, 王浩. 水资源学概论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. [Chen J Q, Wang H. Introduction to Water Resources Science[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1995.]
- [17] 陈志恺. 中国水利百科全书(水文与水资源分册)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. [Chen Z K. Encyclopedia of China Water Resources (Volume on Hydrology and Water Resources)[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.]
- [18] Barik B, Ghosh S, Sahana A S, et al. Water-food-energy nexus with changing agricultural scenarios in India during recent decades[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6): 3041-3060.
- [19] Wang Y M, Yang J, Chang J X. Development of a coupled quantity-quality-environment water allocation model applying the optimization-simulation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 944-955.
- [20] Alexandratos S D, Barak N, Bauer D, et al. Sustaining water resources: Environmental and economic impact[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(3): 2879-2888.
- [21] 左其亨. 人水和谐论: 从理念到理论体系[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 25-30. [Zuo Q T. Human-water harmony theory: From idea to theory system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 25-30.]
- [22] 左其亨. 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 hu-

- man-water harmony theory and its application research[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 135–144.]
- [23] 左其亭. 人水和谐论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. [Zuo Q T. Human-Water Harmony Theory and Its Applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.]
- [24] 左其亭. 人水关系学的基本方程及模型构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (5): 1–12. [Zuo Q T. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 1–12.]
- [25] Wagener T, Dadson S J, Hannah D M, et al. Knowledge gaps in our perceptual model of Great Britain's hydrology[J]. Hydrological Processes, 2021, DOI: 10.1002/hyp.14288.

Theories, methods, and practical needs of human-water relationship research

ZUO Qiting^{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: Human-water relationship is one of the most fundamental relationships between humans and nature. Research on the human-water relationship is a crucial foundation for scientifically understanding water issues and exploring solutions to water management, as well as a practical necessity for the development of human society. Building on previous research and synthesizing results from various periods, this study provided a comprehensive review of the development of human-water relationship research in three stages: emergence, initiation, and formation, and summarized the developmental characteristics of each stage. A classification scheme for human-water relationships was proposed from three perspectives: system, subsystem, and research perspective. This study elaborated on the purpose and advantages of developing the human-water relationship discipline, and introduced the main contents, theoretical system, and research methods of the human-water relationship discipline. The practical needs of water control were elaborated from three levels: understanding, analyzing, and regulating human-water relationships, including the needs for ideology-concept, equation-measurement, and model-strategy. Furthermore, the research priorities corresponding to the three levels were given in detail, with a total of 18 specific research directions. This study supports further improving the theoretical system of the human-water relationship discipline and exploring the practical needs and key scientific and technological issues in human-water relationship research.

Key words: human-water system; human-water relationship; human-water relationship discipline; theories and methods; practical needs