

黄河几字弯“四水四定”若干问题探讨

郭旭宁¹, 李云玲¹, 刘为锋¹, 彭少明¹, 邢西刚¹, 李 激¹, 唐世南¹, 苗 平²

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 鄂尔多斯市河湖保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: 围绕“四水四定”的落地实施, 面向黄河几字弯水资源可持续利用、绿色高质量发展及荒漠化防治“歼灭战”等国家重大需求, 以及该区域水资源短缺下“人-水-城-地-产”关系不协调等突出问题, 分析了黄河几字弯水资源保护治理中存在的现实问题和研究需求, 识别了区域需水驱动机制探究与节水潜力挖掘、“四水四定”多要素协同演变规律辨析及调控阈值确定、“四水四定”实施风险识别与预警防控等关键科技问题, 构建了黄河几字弯“四水四定”智能监测、评价预警与适水调控总体研究框架, 分项解析了“四水四定”智能监测、风险评价、实时预警关键技术内容, 明确了区域地下水-河湖系统保护与产业适水调控关键技术集成与优化、水资源刚性约束下水-生-能-粮绿色协调发展集成示范的实施路径, 可为推动黄河几字弯绿色高质量发展与生态文明建设提供科技支撑。

关键词: “四水四定”; 智能监测; 评价预警; 适水调控; 保护修复; 集成示范; 黄河几字弯

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)06-0077-08

Discussion on several issues concerning “Four Principles for Water Management” in Ji-shaped bend of the Yellow River//GUO Xuning¹, LI Yunling¹, LIU Weifeng¹, PENG Shaoming¹, XING Xigang¹, LI Wei¹, TANG Shinan¹, MIAO Ping²(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. Ordos River and Lake Protection Center, Ordos 017010, China)

Abstract: This article analyzes the practical problems and research needs in the protection and management of water resources in Ji-shaped bend of the Yellow River, focusing on the implementation of the “Four Principles for Water Management” policy, in response to major national needs such as sustainable utilization of water resources, green and high-quality development, and the “annihilation war” of desertification prevention and control, as well as prominent issues such as the lack of coordination in the “human-water-city-land-industry” relationship under the shortage of water resources in the region. Key technological issues such as exploring the driving mechanism of regional water demand and tapping into water-saving potential, analyzing the synergistic evolution law of multiple factors in the “Four Principles for Water Management” and the regulation threshold, determining and warning prevention and control of risks in the implementation of the “Four Principles for Water Management” were identified. An overall research framework for intelligent monitoring, evaluation, warning, and water regulation of the “Four Principles for Water Management” in Ji-shaped bend of the Yellow River was constructed, and the key technical contents of intelligent monitoring, risk assessment, and real-time warning of the “Four Principles for Water Management” were analyzed. The implementation path for the integration and optimization of key technologies for regional groundwater river lake system protection and industrial water adaptation regulation, as well as the demonstration of integrated green coordinated development of water production energy grain under rigid constraints of water resources, has been clarified, providing important scientific and technological support for promoting the green and high-quality development in Ji-shaped bend of the Yellow River and ecological civilization construction.

Key words: “Four Principles for Water Management”; intelligent monitoring; evaluation and early warning; water suitable regulation; conservation and restoration; integrated demonstration; Ji-shaped bend of the Yellow River

随着我国城镇化、工业化进程不断加快,水资源供需矛盾日益突出,已成为制约北方缺水地区高质量发展的重要因素^[1]。全面落实“以水定城、以水

定地、以水定人、以水定产”(“四水四定”)要求是应对水资源短缺的关键举措,其核心是科学看待水资源供、需、缺的辩证关系,以区域可用水量 as 最大刚

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3206505);国家自然科学基金项目(52579026)

作者简介:郭旭宁(1983—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利规划与水文水资源研究。E-mail:guoxuning@giwp.org.cn

通信作者:刘为锋(1993—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:weifliu@qq.com

性约束,将有限水资源优化配置给各类用水户,以有限水资源支撑区域生态保护和经济社会高质量发展。现有常规水资源管理技术体系已不适用“四水四定”水资源管理要求。目前,关于“四水四定”的相关研究主要围绕概念内涵^[2]、逻辑框架^[3]、调控模型^[4]、发展评价^[5]、制度体系^[6]、管理模式^[7]、创新实践^[8]等方面,针对“四水四定”水资源管理的技术体系尚未建立。

特殊的地理位置与资源能源储备使黄河几字弯在我国区域经济战略中具有重要地位。该区域是我国乃至世界十分罕见的矿产、风能、太阳能资源富集区,近年来保持高增长态势的城市集群已成为我国经济的重要增长极^[9]。但该区域干旱缺水,分布着库布齐沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地等,加之区域用水竞争激烈、地下水-河湖系统受损严重、水资源与产业发展失衡^[10],将影响区域乃至全国的生态安全、能源安全、粮食安全,严重制约国家重大战略的实施^[11]。面向黄河几字弯区水资源可持续利用、绿色高质量发展及荒漠化防治“歼灭战”等国家重大需求,亟须围绕“四水四定”落地实施,开展关键技术研发与攻关。

为此,本文从全面支撑“四水四定”落地实施出发,分析黄河几字弯区水资源保护与治理中存在的现实问题和研究需求,识别黄河几字弯“四水四定”关键科学问题,提出总体研究框架,分项解析“四水四定”智能监测、风险评价、实时预警等关键技术内容,明确区域地下水-河湖系统保护与产业适水调控关键技术集成与优化、水资源刚性约束下水-生-能-粮绿色协调发展集成示范的实施路径。

1 现实问题与需求

黄河几字弯介于黄河流域上游、中游之间,地处黄土高原,横跨我国中西部地带,是黄河流经甘肃、宁夏、内蒙古、陕西4省区所形成的“几”字形区域。该区域是西部大开发和陆上丝绸之路的战略叠加区,集能源富集区、革命老区、少数民族聚集区、边疆地区、传统农牧区于一体,是国家重要的生态屏障,是新一轮西部大开发的重要引擎,也是我国面向中北亚、向西向北双向开发开放的前沿阵地。考虑黄河干流的分界作用以及鄂尔多斯台地更为凸显的水-生-能-粮关系,结合关注的重点问题,本文的研究范围主要指黄河“几”字形的内部区域,由西南部的六盘山、南部的白于山、东南部的黄龙山以及北部和东部黄河干流四面合围,不包括西南部洮河流域、南部渭河流域和北部的河套地区,研究区概况如图1所示。

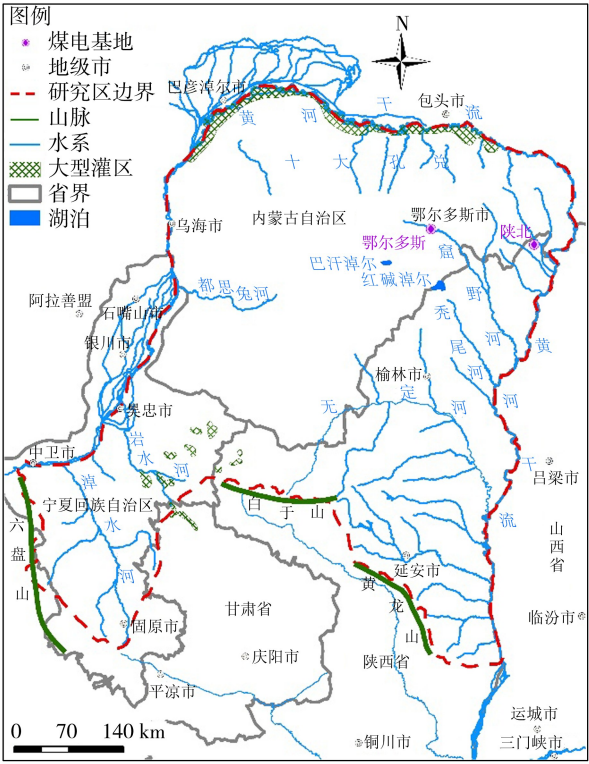


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.1 匮乏的天然水资源难以支撑其被赋予的重要功能任务

黄河几字弯是能源富集区和少数民族聚集区,生态环境脆弱,2010—2020年区域GDP年均增速达到8%,是西北地区经济发展的桥头堡和经济增长的重要引擎^[12]。黄河几字弯处于35°N~40°N农作物黄金种植带,当地土地丰富、光热充足、气候温和,有利于开展大规模农业机械化种植,较大的昼夜温差也有利于农业病虫害防治。但受水资源条件制约,黄河几字弯耕地灌溉率低,扣除城市和现有耕地等已经开发利用的土地,区域具有较大开发潜力的高等级后备耕地资源面积仍有9333 km²^[12],但农业已是区域第一用水大户,农业用水量占总用水量的78.6%,高于全国平均值(62.3%)。同时,黄河几字弯地处西北内陆干旱、半干旱地区,年降水量仅为250~650 mm,且空间分布不均,东多西少,而年蒸发量却高达800~1000 mm。受自然条件的限制,区域面临水资源匮乏、季节性干旱频发、水土流失严重、生态环境脆弱等水资源及水生态安全问题。从几字弯水资源可利用量来看,本地天然水资源匮乏,过境水资源取用水量受黄河“八七”分水方案控制^[13-14],黄河流域水资源开发利用已至极限,水资源与经济社会发展和国家赋予几字弯的战略任务不相匹配,“人-水-城-地-产”关系不协调,水资源利用效率低,水资源供需矛盾十分突出,区域内人均水资源量仅

为全国平均水平的 1/5,但区域内人均用水量(431.7 m³)略高于全国平均水平。水资源短缺是长期制约区域生态保护和高质量发展的重要因素,科学处理几字弯“人-水-城-地-产”关系可以充分激发区域经济活力,释放能源和矿产潜力,提升生态治理能力,不仅使黄河几字弯有望成为黄河重大国家战略的新引擎,带动国家腹地经济持续发展,而且对于保障黄河长治久安以及国家能源安全、生态安全和粮食安全也将发挥巨大作用^[15]。

1.2 健康天然水循环受人类活动影响较大

黄河几字弯矿产资源丰富,能源矿产与水资源的不匹配分布使得煤炭、天然气等开采量受到明显抑制。与此同时,能源矿产资源的集中开采进一步破坏区域地表水、地下水的天然转换路径,影响了天然水循环健康。首先,煤炭等能源资源开采导致区域地表形变和地下含水层结构发生显著变化,地裂缝、采矿涌水等地质灾害破坏地下水环境与水循环稳定,对地下水循环和水环境产生强烈扰动^[16]。以区域内神东矿区为例,1995 年煤矿未大规模开采前与煤矿高强度开采条件下对比,矿区地下水下降幅度超过 8 m,70% 以上的水位明显下降区由高强度煤层开采导致。可见,矿区开采、地表形变、地下水变化三者联系紧密,相互作用,相互影响。其次,黄河几字弯是我国重要的粮食主产区之一,农业灌溉用水占区域总用水量的 80% 以上,在地表水资源有限的情况下,农业灌溉大量开采地下水,地下水位明显下降,形成区域性地下水超采,对地表植被利用土壤水和地下水造成一定影响,进而产生土壤沙化和水土流失,对国家生态安全造成影响^[17]。再次,黄河几字弯天然河湖水量补给一方面靠汛期集中降水产生径流,另一方面在枯水期主要靠地下水排泄。当能源矿产开发破坏地表水和地下水天然转换路径、区域地下水位显著下降后,天然河湖水量补给锐减,造成湖泊水面萎缩和河流生态流量保障能力下降。黄河几字弯作为国家“两屏三带”生态格局中黄土高原生态屏障所在区域,对于维护关中平原、华北平原乃至全国生态安全都具有重要意义。综上所述,黄河几字弯人类活动剧烈,天然水循环健康状况已受到一定影响,进一步发展可能会影响国家能源安全、粮食安全、生态安全等关键安全领域。因此,对于这种地表水、地下水交换频繁的区域,迫切需要将地表水和地下水进行统筹考虑,以流域作为水循环基本单元,对自然-社会水循环过程进行智能监测,对取、用、耗、排等水资源开发利用进行评价预警和适水调控,在维护黄河几字弯健康水循环的基础上,进一步发挥好其对国家、流域、区域能源、生态、粮食

等方面的支撑保障作用^[18]。

1.3 “四水四定”落地实施亟须科技攻关

黄河几字弯地处黄河流域的重要地段,是我国北方生态屏障和经济带的重要区域之一。若要实现区域生态保护和高质量发展,需全面实施“四水四定”,但目前缺乏抓手^[19]。鉴于“四水四定”落地实施涉及的监测要素众多,风险识别难度大,实时预警困难,以往研究多侧重其他领域的监测、评价、预警,“四水四定”方面体系不完善,智慧实时监测程度尤为不足。应在摸清旱区水系统对变化环境的响应及动态补排机理、区域水文-生态互作关系及互馈驱动机制、区域水-生-能-粮协同演变与适水调控原理的基础上,重点辨析确定地下水水位、河湖水域面积与流量、行业取用水量、用水效率等水系统以及植被生产力、工业产值、粮食产量等水经济监测预警要素。重点研发支撑“四水四定”智能监测、风险评价、实时预警技术,建立风险评价-预测-预警-管控一体化序贯模型,开展智能监测、风险评价、保护修复、实时预警、适水调控等技术集成与创新,构建“四水四定”精细化智慧调控平台。创新水资源刚性约束下水-生-能-粮绿色协调发展技术集成体系,综合构建“四水四定”方案制定-管理-实施全过程的政策、技术和规范标准体系,在能源开发、农牧业生产与生态脆弱叠加区建立地下水-河湖复合系统保护修复、生态保护与产业适水调控关键技术的应用示范区,形成黄河几字弯地下水-河湖系统保护修复与产业适水调控范式。这将有力支撑“四水四定”落地实施,推动“黄河流域生态保护和高质量发展”等国家重大发展战略实施,产生显著的经济社会和生态效益。

2 科技问题识别

2.1 需水驱动机制探究与节水潜力挖掘

黄河几字弯作为国家能源基地、粮食主产区、生态安全屏障,承担着重要的能源矿产供给、粮食生产保供和生态环境保护等重要任务,区域用水需求驱动机制涉及经济社会发展和生态环境保护等众多要素,不仅涉及黄河几字弯自身发展,还与国家能源安全、粮食安全、生态安全等密切相关。因此,实现“四水四定”目标需要厘清区域经济社会发展和生态环境保护刚性合理用水需求的主要影响因素和驱动机制,研发水资源高效利用关键技术,充分挖掘区域各行业节水潜力,重点通过对需水次序和等级进行分类界定,开展刚性合理需水分析,便于保障刚性用水需求,遏制不合理用水。在充分节水的前提下,分析刚性需水满足程度以及在可行的条件下是否需要谋划外调水工程以保障刚性需水,其中蕴含的关

键科技问题是黄河几字弯需水驱动机制探究与节水潜力挖掘。

2.2 “四水四定”多要素协同演变规律辨析及调控阈值确定

黄河几字弯地处旱区,地下水-河湖复合系统交互作用强烈,在气候变化和强人类活动影响下的响应更为敏感,补排过程愈趋复杂,以往研究侧重气候变化或人类活动对地表、地下水系统单方面影响及补给和排泄量的确定,复合系统协同响应和动态补排路径及机理研究不足。此外,黄河几字弯水、生、能、粮关系错综复杂且不明晰,产业用水竞争激烈,适水调控难度大。现有技术多针对单部门内部调控或区域宏观配置,多部门协同调控技术缺乏。因此,迫切需要明晰地下水、河湖及复合系统的演变过程与驱动机制,辨识地下水-河湖补排过程、互馈关系及交换通量变化规律,揭示复合系统协同演变规律,辨析系统内外部要素交互作用,识别适水调控关键要素及其关系。基于产业适水调控模型及原理,采用结构优化、模拟分析等手段,突破“四水四定”多要素协同演变与产业适水调控关键科技难题,对城市建设格局与规模、灌溉面积、土地利用格局、人口数量、产业结构、产业规模等要素提出调控意见和方向,确定主要调控阈值。

2.3 “四水四定”实施风险识别与预警防控

黄河几字弯水文生态过程耦合作用与互馈驱动关系复杂,驱动源广且多变,特别是当前气候突变、人类活动加剧,水文生态系统格局、特征及参数均发生了显著变化,“四水四定”实施面临的风险及不确定性增加。根据黄河流域水资源调查评价成果,黄河流域地表水资源量多年均值由第一次评价的662.0 亿 m³ 到第三次评价的 583.6 亿 m³, 减少了 11.8%。推进“四水四定”实施需要对众多要素进行监测,面临风险识别难度大、实时预警困难等难题。“四水四定”实施需重点关注水资源超用情况,科学评价区域水资源承载状况,建立动态评价和预警管控机制,对超载地区进行预警,制定差别化、可操作的限制性措施,扭转不合理的水资源开发利用状况。为破解“四水四定”实施风险识别与预警防控科技难题,需采用多元统计、人工智能等方法,研究筛选地下水位、河湖水量、产量产值等监测要素,系统构建协同监测结构与网络体系,研发立体智能监测技术,科学识别潜在风险,建立风险指标体系及分类分区分时的风险和预警等级,构建风险评价-预测-预警-管控一体化序贯模型,研发智能监测、风险评价、实时预警技术,实现风险准确评价、精准预测、实时预警、跟踪管控。

3 总体研究框架及重点研究方向

3.1 总体研究框架

“四水四定”的核心是把水资源作为最大的刚性约束,以供区域利用的水资源量来约束、控制、指导区域社会经济发展各项要素的空间布局和规模,合理规划人口、农业、城市和产业发展等。针对黄河几字弯健康天然水循环受人类影响较大、匮乏的天然水资源难以支撑区域被赋予的重要功能任务等现实问题,破解区域需水驱动机制探究与节水潜力挖掘、“四水四定”多要素协同演变规律辨析及调控阈值确定、“四水四定”实施风险识别与预警防控等关键科技问题,需要开展多项重点研究任务,总体研究框架如图 2 所示。

a. 第一项研究任务核心内容是研发“四水四定”智能监测技术,具体包括:辨析确定“四水四定”监测要素、研发“四水四定”智能监测技术、编制智能监测标准。第一项研究任务为后续其他研究任务提供实时监测信息源,是后续研究工作的重要基础。

b. 第二项研究任务核心内容是研发“四水四定”风险评价、实时预警技术,具体包括:“四水四定”风险监测及识别技术、风险评价预警及阻断技术。第二项研究任务与第一项研究任务为序贯承接关系,形成智能监测-风险识别-风险评价-预警防控的技术链条。

c. 第三项研究任务核心内容是开展区域地下水-河湖复合系统保护与产业适水调控关键技术集成与优化,具体包括:系统保护与产业适水调控关键技术集成及优化、系统保护与产业适水智能调控系统平台构建。第三项研究任务定位为技术集成与优化,主要对相关技术的协同适用性、效果和实施风险进行评估,并对关键技术参数进行优化,前两项研究任务是第三项研究任务技术集成与优化的重要内容。

d. 第四和第五项研究任务核心内容主要是以上述相关理论技术成果为基础,建设黄河几字弯内地下水河湖系统保护修复示范区和生态保护与产业适水调控示范区,基于需水驱动机制辨析与节水潜力挖掘,开展地下水-河湖复合系统保护修复、生态保护与产业适水调控关键技术的应用示范,综合构建“四水四定”方案制定-管理-实施全过程的政策、技术和规范标准体系,提出可复制、易推广、可持续的技术范式,为黄河流域生态保护和高质量发展提供科技支撑。第四项和第五项研究任务定位均为技术应用示范,但示范内容各有侧重点,第四项研究任务重点对地下水-河湖复合系统保护修复关键技术

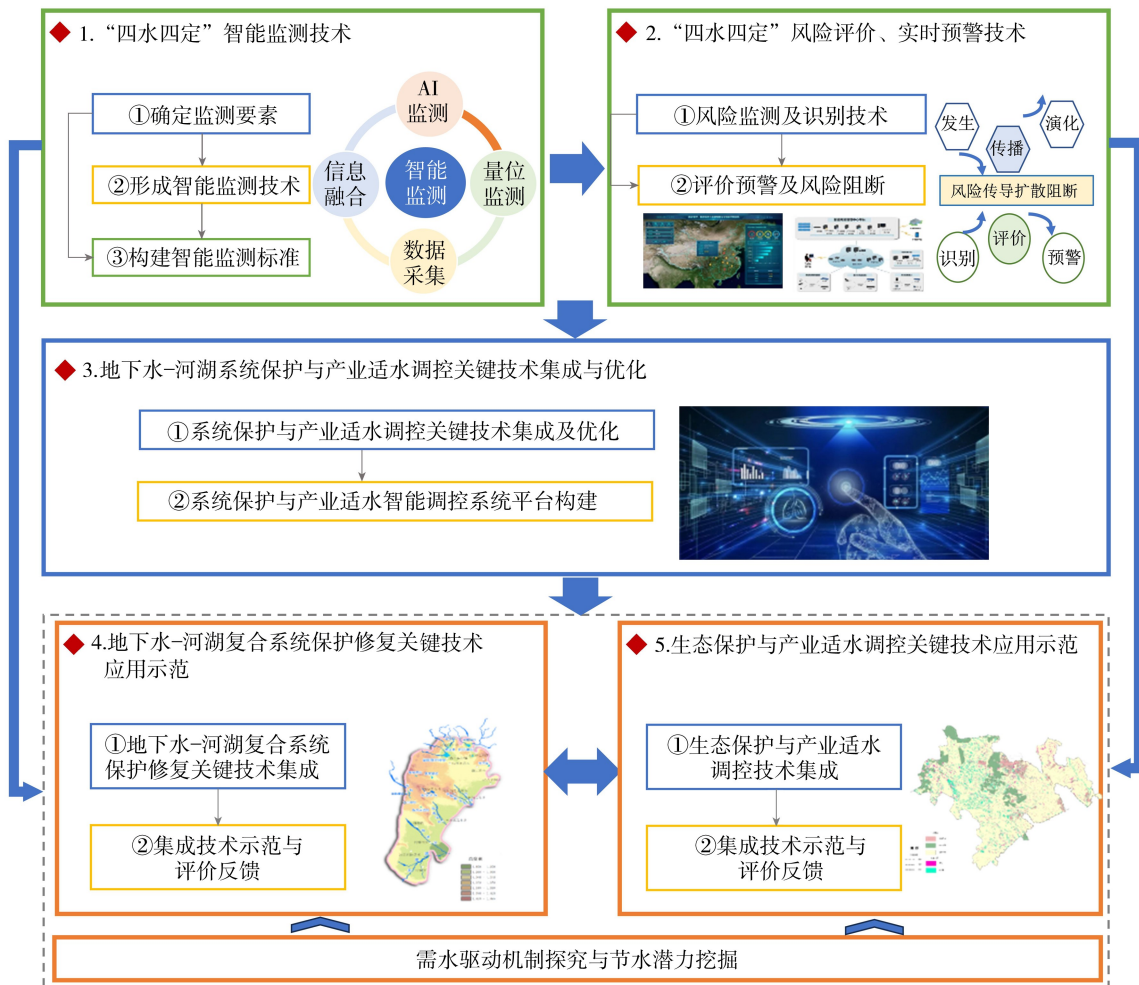


图 2 总体研究框架

Fig. 2 Overall research framework

进行应用示范,第五项研究任务重点对生态保护与产业适水调控关键技术进行应用示范。通过技术应用示范重点对研发技术的应用效果进行实时跟踪、动态评价、修正反馈和优化控制,进而形成可复制、易推广、可持续的技术范式。

3.2 “四水四定”智能监测

目前关于监测感知的研究,从全天候高精度自动降水观测装置研发、深大水体垂向分层精确采样,到基于雷达地基监测、智能无人机及气球空基监测的空天地一体化精细监测体系均取得一定成果^[20],但仍存在监测要素不系统、智能监测标准缺乏的问题。“四水四定”涉及监测要素众多,风险识别难度大且实时预警困难,智慧化、实时化程度尤为不足,研发涵盖智能监测设备、要素-布局-效率协同体系、融合人工智能方法的“四水四定”智能监测技术成为亟须。为此,应重点围绕“四水四定”监测要素、监测技术、智能监测标准开展深入研究,研究框架如图 3 所示。与传统方法相比,本文智能监测技术更加聚焦“四水四定”核心业务需要,从监测要素筛选、智能监测技术研发、监测技术标准制定等方面实

现技术突破。

a. “四水四定”监测要素。以“四水四定”关键环节为监测对象,辨析地下水水位、河湖水域面积与流量、行业取用水量、水质、用水效率等水系统指标以及土地利用、植被生产力、工业产值、粮食产量等水经济指标,采用多元统计、人工智能等方法,确定监测要素。

b. “四水四定”智能监测技术。研发人工智能监测、便携式河湖立体成像数据采集、量质位一体化监测与校正、多源信息融合等设备和系统,构建要素、布局、效率等协同监测结构体系,融合人工智能等方法,形成“四水四定”监测要素的智能监测技术。

c. “四水四定”智能监测标准。建立“四水四定”监测对象要素的密度、频率、精度等方面的技术流程与要求,构建智能监测标准,实施生态、农业、工业、生活等对象用水过程、效率、产出的动态监测。

3.3 “四水四定”风险评价及实时预警

目前关于风险评价的研究,经历了从传统定性评价、侧重自然灾害或社会单方面属性到考虑自然

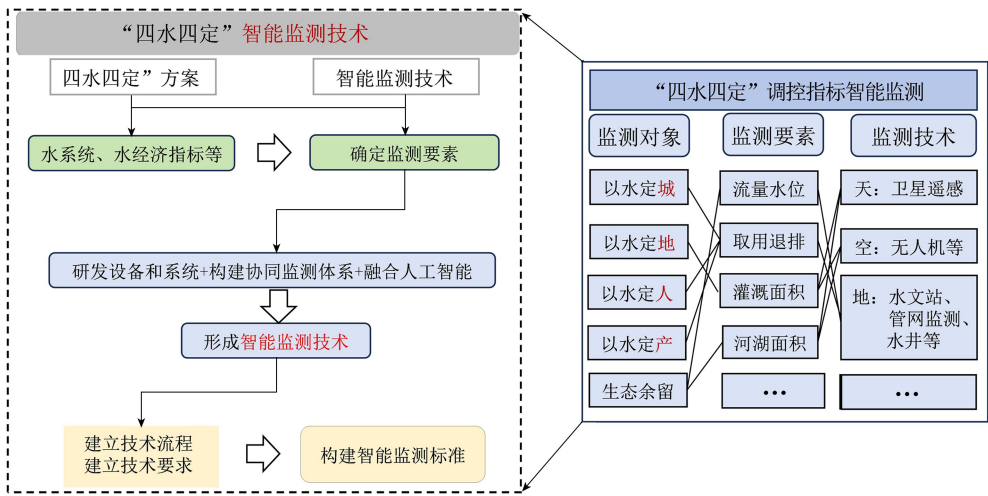


图3 “四水四定”智能监测研究框架

Fig. 3 Research framework of intelligent monitoring for “Four Principles for Water Management”

事件与人工系统互相作用及灾害双重属性的研究过程,先后得到了水旱灾害风险定量评估框架、旱涝灾害风险综合应对的技术体系、水旱灾害风险区划等成果^[21-22],但目前围绕“四水四定”方面的风险评价成果较少。在实时预警方面,围绕长江、黄河等流域水资源和洪水预警取得一些研究成果^[23],但目前实时预警大多将智能监测、风险评价与预警割裂,未实现智能监测-风险评价-实时预警全链条分析,亟须统筹考虑进而突破相关技术瓶颈。与传统方法相比,本文将智能监测-风险评价-实时预警全链条进行整体考虑,识别“四水四定”落地实施中的潜在风

险,揭示风险传导扩散机制,建立风险监测及识别指标体系,研发“四水四定”风险评价预警及传播阻断技术。“四水四定”风险评价及实时预警技术研究框架如图4所示,图中 T 、 U 、 M 、 T_i 、 U_i 、 M_i 、 u_{ij} 、 m_{ij} 分别为技术、用户、管理的不同层级指标。

a. “四水四定”风险监测及识别技术。识别“四水四定”落地实施中的潜在风险,揭示风险传导扩散机制,建立风险监测识别指标体系,确定风险阈值和等级,构建多维风险监测识别模型,提出风险监测、识别技术。

b. “四水四定”风险评价预警及传播阻断技

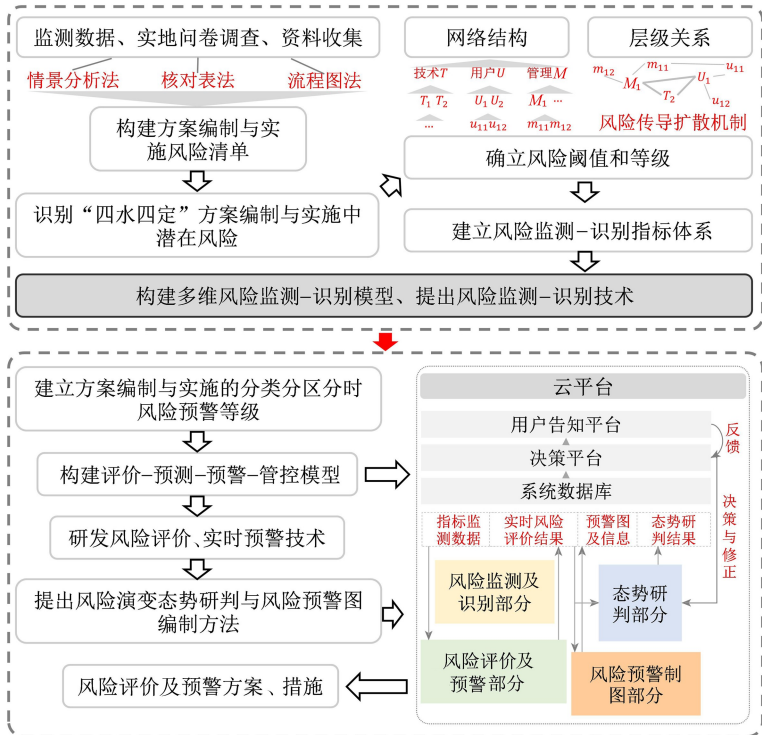


图4 “四水四定”风险评价及实时预警技术研究框架

Fig. 4 Research framework of risk assessment and real-time warning for “Four Principles for Water Management”

术。建立“四水四定”分类、分区、分时风险预警等级,构建评价-预测-预警-管控模型,研发风险评价、实时预警技术,提出嵌套风险演变态势研判与风险预警图编制的方法,搭建具有决策者管控和用户告知等功能的云平台,形成风险评价、预警方案与措施。

3.4 地下水-河湖系统保护与产业适水调控关键技术集成与优化

黄河几字弯地下水-河湖系统保护与产业适水调控涉及领域、部门众多,现有单项技术难以支撑整个系统的协调发展,迫切需要应用协同集成等手段,创新集成地下水-河湖系统保护与产业适水调控关键技术。目前关于涉水风险调控的研究已在多维区域水平衡、多相位水流协同调控、水资源供需双侧联动调控等取得一定成果^[24],但围绕“人-水-城-地-产”体系领域风险调控研究成果缺乏。与传统适水调控技术相比,本文将地下水-河湖复合系统作为完整对象进行考虑,重点针对“四水四定”中人、水、城、地、产等多要素耦合联动关系进行调控,并开展关键技术集成及优化、智能调控系统平台构建等科技攻关。适水调控通过核算区域水、能、粮资源消耗,提出多区域投入产出模型的水(农业用水、工业用水、生活用水、生态用水)-能-粮资源核算框架。构建与区域经济环境特征相适应的多区域投入产出表,针对水资源、生态资源、能源、粮食多个子系统,分别从生产、消费、收入多个视角核算多区域、多部门在贸易往来中隐含的资源消耗及环境排放;通过结构路径分析,辨识资源、排放转移的枢纽区域、关键部门和重点路径。

a. 系统保护与产业适水调控关键技术集成及优化。应用技术协同集成方法,评估水文-生态模拟、复合系统保护修复、产业适水调控、智能监测-风险评价-实时预警等技术的协同适用性、效果和实施风险,优化关键技术参数,设定系统保护与产业适水调控多目标下的技术组合模式,开展智能监测、风险评价、保护修复、实时预警、适水调控等技术集成与创新,提出面向“四水四定”方案制定-管理-实施全过程的政策、技术和规范标准。

b. 系统保护与产业适水智能调控系统平台构建。利用水文生态多元同化大数据集和知识库,采用自学习、自适应、自组织、自控制等先进技术,嵌入智慧感知、智能分析、智慧决策等功能,构建地下水-河湖系统保护与产业适水智慧调控系统平台,并对关键技术进行优化反馈。

3.5 水资源刚性约束下水-生-能-粮绿色协调发展集成示范

黄河几字弯水资源缺乏,而矿产等资源富集,产

业集聚且规模大,伴随气候变化和强人类活动,水、生态、产业发展等方面产生的问题呈现多元层次化、交织融合化、效应连锁化等特征,且水-生-能-粮耦合系统涵盖的区域、部门、要素广泛,而现有技术主要针对单系统或两两系统的可持续发展以及耦合系统的宏观协调分析,技术针对性、全面性和集成度不足,难以实现耦合系统的绿色协调发展,亟须开展集成技术研发与示范优化,为“四水四定”实施提供技术范式。为此,应以水资源为最大刚性约束,在科学辨析区域需水驱动机制与节水潜力挖掘基础上,以水-生-能-粮绿色协调发展为目标,采用协同集成等手段,系统评估水文-生态模拟、地下水-河湖系统保护修复、水-生-能-粮适水调控、智能监测-风险评价-实时预警等技术的协同适用性和效果,优化关键技术参数,构建系统绿色协调发展的多目标技术组合模式,充分考虑南水北调西线、黄河黑山峡河段开发和区域水网构建等有利因素,创新集成智能监测、风险评价、保护修复、实时预警、适水调控技术,构建地下水-河湖复合系统保护修复示范区和生态保护与产业适水调控示范区,开展实时跟踪、动态评价、多重反馈、优化控制,系统修正集成技术,提升地下水位、河湖生态流量、水资源利用效率等指标,提出可复制、易推广、可持续的技术范式,为黄河流域生态保护和高质量发展、国家或地区建立“四水四定”政策与建议提供科技支撑。

4 结 语

黄河几字弯承担着重要的国家粮食安全、能源安全、生态安全保障任务,区域水资源供需矛盾十分突出,亟须通过“四水四定”落地实施进一步修正“人-水-城-地-产”协调发展关系。本文系统分析了黄河几字弯区水资源保护与治理中存在的现实问题和研究需求,识别了关键科学问题,提出了总体研究框架和重点研究方向。核心内容包括:①黄河几字弯天然水资源匮乏,“人-水-城-地-产”关系不协调,天然水循环健康状况受到影响,在有限水资源约束下区域在保障国家粮食安全、能源安全、生态安全保障方面面临一定风险,亟须开展“四水四定”智能监测、评价预警与适水调控等关键科技问题研究;②针对黄河几字弯“四水四定”落地实施,需要重点解决3个科技问题,分别是需水驱动机制探究与节水潜力挖掘、“四水四定”多要素协同演变规律辨析及调控阈值确定、“四水四定”实施风险识别与预警防控;③为破解黄河几字弯“四水四定”关键科技问题,需要围绕“四水四定”智能监测、评价预警与适水调控,开展方法技术、模型平台、集成优化、示范应

用等系统研究,这将有助于提升区域水资源水生态功能及承载力,优化水、生、能、粮健康安全格局,推动区域绿色高质量发展与生态文明建设,助力打赢黄河几字弯“攻坚战”。

参考文献:

[1] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识 [J]. 水科学进展, 2013, 24 (3): 303-310. (ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. Advances in Water Science, 2013, 24 (3): 303-310. (in Chinese))

[2] 王浩,许新发,成静清,等. 水资源保护利用“四水四定”:基本认知与关键技术体系 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 1-7. (WANG Hao, XU Xinfa, CHENG Jingqing, et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 1-7. (in Chinese))

[3] 陈何铠,丁志宏,刘海瑞,等. “四水四定”的概念内涵、逻辑框架与实践体系研究 [J]. 水利规划与设计, 2024 (3): 1-6. (CHEN Hekai, DING Zhihong, LIU Hairui, et al. Research on the conceptual connotation, logical framework and practical system of defining scopes of city, land, population and production with water [J]. Water Resources Planning and Design, 2024 (3): 1-6. (in Chinese))

[4] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 71-77. (WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 71-77. (in Chinese))

[5] 刘海娇,陈学群,刘彩虹,等. 基于 DPSIR 模型的“四水四定”高质量发展协调性评价 [J]. 人民黄河, 2022, 44 (11): 72-77. (LIU Haijiao, CHEN Xuequn, LIU Caihong, et al. Evaluation and application of “basing four aspects on water resources” high-quality development coordination based on DPSIR model [J]. Yellow River, 2022, 44 (11): 72-77. (in Chinese))

[6] 杨研,夏朋,梁宁. “四水四定”制度体系构建思考 [J]. 中国水利, 2023 (9): 51-54. (YANG Yan, XIA Peng, LIANG Ning. Considerations of building a mechanism of “defining city, land, population and production by water” [J]. China Water Resources, 2023 (9): 51-54. (in Chinese))

[7] 褚俊英,李孟泽,周祖昊,等. 水资源保护利用“四水四定”的创新管理模式 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 23-27. (CHU Junying, LI Mengze, ZHOU Zuhao, et al. Innovative management pattern of “four water-based

principles” in water resources protection and utilization [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 23-27. (in Chinese))

[8] 夏朋,杨研. 坚持“四水四定”推动经济社会高质量发展:以宁夏回族自治区“四水四定”创新实践为例 [J]. 水利发展研究, 2024, 24 (3): 81-84. (XIA Peng, YANG Yan. Upholding the “four water-based principles” to promote the high-quality economic and social development: a case study on Ningxia ’ s innovative practice [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24 (3): 81-84. (in Chinese))

[9] 张景翔,王忠静,陈小泽,等. 黄河几字弯能源资源型城市发展需水预测 [J]. 人民黄河, 2025, 47 (5): 72-79. (ZHANG Jingxiang, WANG Zhongjing, CHEN Xiaozhe, et al. Prediction of water demand for the development of energy resources-oriented cities along the Ji-shaped bend region of Yellow River [J]. Yellow River, 2025, 47 (5): 72-79. (in Chinese))

[10] 刘任涛,程静. 黄河“几字弯”的地理界定及主要生态问题 [J]. 应用生态学报, 2025, 36 (2): 383-394. (LIU Rentao, CHENG Jing. Geographical boundary line of the Yellow River ’ s ‘ Ji Zi Bend ’ and its main ecological issues [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36 (2): 383-394. (in Chinese))

[11] 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 Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, 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))

[12] 赵勇,王浩,邓铭江,等. 黄河几字弯水网:南水北调西线配套东延工程构想 [J]. 水利学报, 2023, 54 (9): 1015-1024. (ZHAO Yong, WANG Hao, DENG Mingjiang, et al. Jiziwan water network in the Yellow River Basin: conceptualizing the east extension project of the west route of the South-to-North Water Diversion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (9): 1015-1024. (in Chinese))

[13] 王煜,彭少明,郑小康,等. 黄河“八七”分水方案的适应性评价与提升策略 [J]. 水科学进展, 2019, 30 (5): 632-642. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, et al. Adaptability assessment and promotion strategy of the Yellow River Water Allocation Scheme [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (5): 632-642. (in Chinese))

[14] WANG Yuemeng, ZHANG Shuyu, HUANG Hongwei, et al. A new water allocation scheme considering the optimization of industrial structures in arid areas of the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 49: 101503.

(下转第 94 页)

- [24] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810. (WANG Shujia, KONG Wei, REN Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810. (in Chinese))
- [25] 田世民,王远见,江恩慧,等. 黄河下游多维子系统耦合作用关系研究[C]//中国水利学会 2018 学术年会论文集第一分册. 南昌:中国水利学会, 2018:80-87.
- [26] 江恩慧,王远见,田世民,等. 黄河下游河道滩槽协同治理驱动:响应关系研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 52-58. (JIANG Enhui, WANG Yuanjian, TIAN Shimin, et al. Driving-response relationship on synergistic regulation for floodplain and main channel of the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42(9): 52-58. (in Chinese))
- [27] 彭少明,王煜,蒋桂芹. 黄河流域主要灌区灌溉需水与干旱的关系研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 5-10. (PENG Shaoming, WANG Yu, JIANG Guiqin. Study on the relationship between irrigation water requirement and drought in the main irrigation area of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2017, 39(11): 5-10. (in Chinese))
- [28] 陶洁,任磊,梅晓敏,等. 基于混合指数算法的黄河流域水体面积变化及归因分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 79-86. (TAO Jie, REN Lei, MEI Xiaomin, et al. Analysis of water surface area changes and attribution in the Yellow River Basin based on hybrid index algorithm [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 79-86. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-15 编辑:王芳)

(上接第 84 页)

- [15] 程蕾,陈吕军,田金平,等. “以水定产”驱动的黄河流域可持续水管理策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 187-197. (CHENG Lei, CHEN Lyujun, TIAN Jinping, et al. Sustainable water management in yellow river basin based on balancing water resources and industrial development[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 187-197. (in Chinese))
- [16] 刘志强. 基于 InSAR 和 GRACE 的黄河几字弯区域地表形变与地下水变化关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2024.
- [17] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 608-614. (LIU Changming. Study of some problems in water cycle changes of the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 608-614. (in Chinese))
- [18] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690. (PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 681-690. (in Chinese))
- [19] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等. “四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 111-117. (WANG Ruoyu, ZHAO Zhixuan, HUANG Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 111-117. (in Chinese))
- [20] 林祚顶,刘志雨. 加快构建雨水情监测预报“三道防线”工作思考[J]. 中国水利, 2023(12): 5-10. (LIN Zuoding, LIU Zhiyu. Accelerating construction of “three lines of flood defense” through rainfall monitoring and forecasting and reflections [J]. China Water Resources, 2023(12): 5-10. (in Chinese))
- [21] CASTILLO-RODRÍGUEZ J T, ESCUDER-BUENO I, ALTAREJOS-GARCÍA L, et al. The value of integrating information from multiple hazards for flood risk analysis and management[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(2): 379-400.
- [22] 屈艳萍,郦建强,吕娟,等. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 297-304. (QU Yanping, LI Jianqiang, LYU Juan, et al. A quantitative framework for assessing drought disaster risk and key techniques [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 297-304. (in Chinese))
- [23] SALZANO E, AGREDA A G, DI CARLUCCIO A, et al. Risk assessment and early warning systems for industrial facilities in seismic zones[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(10): 1577-1584.
- [24] 王煜,彭少明,郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 614-624. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 614-624. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-08 编辑:王芳)