

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2024.02.001

环境变化的径流效应研究进展及黄河水源 涵养区研究展望

王国庆^{1,2,3,4,5}, 张建云^{1,2,3,4,5}

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 5. 南京水利科学研究院水利部水旱灾害防御重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对变化环境下黄河流域实测径流大幅度锐减, 严重影响流域水资源与生态安全的问题, 面向黄河生态保护和高质量发展的国家重大战略需求, 梳理了变化环境下径流效应研究中亟待解决的关键科学问题与关键技术。以黄河水源涵养区为对象, 以环境变化的径流效应和水资源预测为核心, 细化了数据集构建、机理解析、模型研发、趋势预估 4 项具体研究内容与研究方案。预期研究成果将揭示黄河水源涵养区水文-生态过程的互馈耦合机理、创新变化环境下生态水文的模拟和预测技术, 科学预测变化环境下流域水安全和生态环境风险趋势, 有效支撑流域水资源可持续利用与生态环境保护决策。

关键词: 环境变化; 生态水文过程; 水资源; 生态安全; 黄河水源涵养区

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)02-0001-08

Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area//WANG Guoqing^{1,2,3,4,5}, ZHANG Jianyun^{1,2,3,4,5} (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Research Center of Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 5. Key Laboratory of Flood & Drought Disaster Defense, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The recorded runoff of the Yellow River presented significant decline trend due to environmental change, which has been highly threatening water security and in order to meet the major needs of the national strategy of ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin, this paper formulates key scientific issues and key techniques that urgently need to be solved in runoff effects under changing environments. Taking the water source conservation area of the Yellow River Basin as a case study area, with focusing on runoff response to environmental changes and water resources prediction, four future research contents of data set construction, mechanism analysis, model development, and trend prediction are proposed. The expected research achievements will reveal the coupling mechanisms of hydrological-ecological processes in water conservation area, innovate eco-hydrological simulation and prediction technology, predict the trend of water security and eco-environmental risk under changing environment, and provide strong supports to the decision of sustainable water resources utilization and eco-environmental protection in the Yellow River Basin, which will produce remarkable scientific value, huge socioeconomic and ecological benefits.

Key words: environmental change; eco-hydrological processes; water resources; ecological security; Yellow River water source conservation area

20 世纪以来, 随着全球气候持续变暖、人口迅速增长和经济快速发展, 人类对水资源需求日益增多, 导致水资源供给需求矛盾不断加剧。受环境变

化影响, 黄河花园口站 2000 年以来实测径流量较 1956—2000 年均值减少 33%^[1-2]。2020 年《黄河水资源公报》表明, 黄河流域水资源开发利用率和消

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201100); 国家自然科学基金项目(U2243228, 52121006)

作者简介: 王国庆(1971—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事流域水文及生态水文过程模拟研究。E-mail: gqwang@nhri.cn

耗率均超过 80%,水资源短缺已成为黄河流域生态保护和高质量发展面临的最大挑战^[3]。

环境变化对水资源的影响是关于区域可持续发展的全球性焦点问题。国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS) 2013—2022 年科学研究计划“Panta Rhei-Everything Flows”将“变化环境下的流域水循环过程”作为核心研究主题之一^[4]。联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)在国际水文计划第九阶段(IHP-IX, 2022—2029)研究计划中将“水安全:应对区域及全球挑战”列为重要研究方向^[5]。国际科学理事会(International Science Council, ICSU)在 2012 年发起的“未来地球”(Future Earth 2014—2023)首批研究计划中,“水-能源-粮食-生态”与可持续发展之间的关系为研究的核心内容之一^[6-7]。围绕水安全问题,世界水理事会(World Water Council, WWC)、欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Centre, JRC)、美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)、日本以及一些欧洲国家开展了较为广泛的研究与实践,既强调揭示变化环境下水安全问题的成因,也关注水安全风险评估与调控技术研发^[8-11]。

水资源演变与水安全也是国内水科学研究的热点和重点。中国学者自 20 世纪 90 年代起就开始了水资源承载力、水安全与生态安全评估等方面的研究^[12-14],厘清了中国水资源的自然禀赋,明晰了水资源是影响中国社会经济发展的最大刚性约束,评价了现状条件下中国典型江河的水资源承载力、水安全与生态安全态势。“十三五”期间,科技部实施了“气候变化与应对”“水资源高效开发利用”等重点专项,着重研究了气候变化的影响评估以及如何更加高效地开发利用有限的水资源^[15-16]。以往研究成果为流域综合治理、水资源开发利用以及节水型社会建设等方面提供了重要科学依据。

由于环境变化和生态水文系统的复杂性,目前有关生态水文机理、生态水文过程的模拟预测,尤其是对资料缺乏地区的影响预估等方面的研究尚存一定局限性,具体表现在以下方面:①资料欠缺地区水资源及生态分析评价是生态水文学面临的挑战,基于“空-天-地”监测体系的多源数据融合技术及应用研究亟待加强;②变化环境下水文生态过程机理是国际前沿科学问题,气候和下垫面变化条件下地表-地下水文过程与生态过程的互馈耦合机制,作为生态水文科学的核心内容,需要进一步强化和完善;③科学预测水资源与生态安全趋势是国家战略实施的

重要支撑,具有自主知识产权的水资源模拟系统的创新构建是解决国家水利卡脖子技术的关键。

为保障变化环境下区域水安全及生态安全,本文拟从环境变化及生态水文的视角,系统梳理区域水资源研究中亟待解决的主要科学问题和关键技术;以黄河水源涵养区为例,重点剖析研究目标,提出具体的研究内容和研究思路,以期为黄河流域生态保护及高质量发展提供科学支撑,也为我国其他流域相关研究提供借鉴。

1 环境变化径流效应的关键科学问题与关键技术

1.1 关键科学问题

a. 气候和下垫面变化对水资源变化的协同驱动机制。气候变化是区域水资源变化最直接的驱动要素,其通过影响降水、蒸发、下渗等过程对区域水循环产生重要影响^[17];流域地形、地貌、植被、冰川、积雪、冻土等下垫面条件则通过改变产汇流过程及其机制进而影响区域水资源^[18]。同时,区域植被、冰川、积雪、冻土等下垫面条件对全球变暖的响应也非常敏感。全球气候变化驱动与区域下垫面响应,二者共同引起水循环过程和水资源时空格局发生改变。深入理解气候变化对区域下垫面的影响,探究气候与下垫面变化对水循环和水资源的协同驱动机制是解析环境变化的径流效应、明晰水资源演变机理亟待解决的科学问题。

b. 地表-地下水文过程与生态过程的多维多尺度互馈耦合机理。一方面,陆地生态过程通过冠层截留、蒸腾、根系吸水等直接影响地表-地下水文过程;另一方面,地表-地下水文过程从时间、空间等不同维度上制约着植被的类型、空间格局及生长状况等。通过改变流域水热条件空间分布,生态系统格局与地表-地下水文过程在不同尺度上相互作用和影响^[19-20]。科学解析不同尺度生态过程与地表-地下水文过程之间的互馈机制,是评估不同尺度水资源系统与生态系统健康、积极应对气候变暖对生态水文系统不利影响的重要理论基础和科学问题。

c. 基于健康水平衡目标的流域水安全与生态环境风险调控机制。我国水资源禀赋条件有限,且存在水资源与人口分布、生产力布局不相匹配等客观问题。健康水平衡目标是指通过对水平衡要素在总量和时空分布上的相互协调和匹配,实现“水资源-经济社会-生态环境”耦合系统稳定良性发展^[21-23]。水资源、经济社会、生态环境三大系统之间的互馈关系复杂且受气候和下垫面变化影响明显。如何基于未来变化环境下流域水资源演变趋

势,通过科学调控保障水安全和生态环境安全,实现兼顾流域水安全保障和生态环境保护的健康水平衡目标,是亟待研究的重要科学问题。

1.2 关键技术

a. 基于“空-天-地”立体监测的多源数据融合技术。基础数据的多寡及质量是影响流域生态水文过程模拟和预测精度的关键之一。目前一些地区地面监测站点稀少、生态水文资料匮乏的情况依然存在^[24]。遥感、遥测技术的快速发展为生态水文过程模拟及评价提供多渠道来源、多时空尺度、多时相特征的监测数据。然而,不同来源数据的质量控制标准不同,不同要素监测时序长短不一,在一定程度上限制了多源数据在生态、水文等模拟和评价中的应用^[25-27]。因此,充分利用地面、卫星、雷达、无人机等多源监测数据,研究基于“空-天-地”立体监测的多源数据融合技术是资料匮乏地区开展水资源评价及预测的关键技术。

b. 基于地表-地下水文过程的多维多尺度流域生态环境变(退)化诊断技术。在全球气候变化和人类活动等多种因素的共同影响下,陆地生态环境要素在不同时空尺度上发生了显著变化。一方面,流域生态环境在格局分布、服务功能等方面的变化通过影响区域水源涵养能力与涵养量,进而影响区域水安全;另一方面,全球气候变化驱动下流域地表-地下水文过程的响应导致了生态环境不同尺度的时空演变态势和多尺度特征^[28-29]。因此,充分利用卫星、雷达遥感遥测技术,结合野外原型生态水文科学试验,获取不同维度、不同尺度的生态系统与水文过程变化信息,解析生态-水文过程互馈机制,研发基于地表-地下水文过程的多维多尺度流域生态环境演变诊断技术,这是支撑流域生态环境演变归因解析的重要内容和关键技术。

c. 基于多源数据驱动的分布式水循环与生态过程自适应耦合模型。水文过程与生态过程相互作用且紧密耦合,同时,二者均具有显著的时空异质性和多尺度属性^[30-31]。地面有限的观测数据难以体现流域空间异质性,对生态过程与水文过程的交互作用机制考虑的欠缺是生态水文过程模拟不确定性的主要来源。以地面观测、遥感观测等多源数据为驱动,研发基于多源数据驱动的分布式水循环与生态过程自适应耦合模型是实现流域水资源与生态演变过程高分辨率、精细化模拟的重要支撑和关键技术。

d. 变化环境下水资源与生态环境安全评估和风险调控技术。受气候变化、下垫面改变以及经济社会发展等多方面的影响,未来水资源安全与生态

环境安全风险可能进一步加剧。目前,水资源安全与生态环境安全评估更多考虑自然属性,而社会属性量化困难,该方面的考虑相对不足;对未来水安全和生态风险调控,缺乏对水资源保障与生态保护的协同性考虑^[32-34]。因此,应从短缺性、波动性、脆弱性等方面,构建多层次、多维度水安全与生态环境安全评估指标体系;从水源涵养能力提升、水资源承载能力优化、健康水平衡目标实现和生态环境保护等多角度出发,构建不同功能分区定位下水安全和生态环境风险综合调控技术。这是支撑流域生态保护和高质量发展的战略需求和关键技术。

2 黄河水源涵养区研究展望

2.1 黄河水源涵养区

黄河流域多年平均径流量 490 亿 m^3 ,以全国 2% 的水资源量支撑了全国 13% 的粮食产量和 25% 的煤炭资源。受环境变化的影响,黄河花园口站 2000—2020 年实测径流量较 1980 年之前减少 35%。水资源短缺是黄河流域高质量发展的最大刚性约束,也是生态保护面临的最大挑战。在中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护与高质量发展规划纲要》中明确将三江源、秦岭、祁连山、六盘山、若尔盖等重点生态功能区作为构建黄河流域生态保护“一带五区多点”空间布局中的重要水源涵养区^[35]。结合流域气候水文特点,将黄河水源涵养区界定为兰州以上、渭河华县以上(不包括泾河和北洛河)和伊洛河流域(图 1),该区域面积 30.43 万 km^2 ,占黄河流域面积的 37%,多年平均年径流量为 412.3 亿 m^3 ,水量约占黄河天然径流量的 84%^[36]。该区域的生态环境质量和径流量的丰枯变化直接影响到黄河流域的水安全及生态安全。

2.2 研究目标

面向变化环境下国家水资源与生态安全保障的重大需求,以支撑黄河流域生态保护和高质量发展这一国家重大战略为总体目标,具体研究目标包括:构建融合“空-天-地”立体监测数据的生态水文基础数据集,为缺资料地区的生态水文研究提供数据支持;揭示水源涵养区水文-生态过程互馈耦合机理,完善生态水文学理论;研发基于多源数据驱动的分布式水资源模拟系统,提升变化环境下生态水文过程模拟和预测能力;解析黄河水源涵养区水资源和生态环境演变成因,预测变化环境下流域水安全和生态环境风险趋势,为流域水资源可持续利用与生态环境保护提供关键理论和技术支持。

2.3 研究内容

a. 构建水源涵养区水循环参数集及生态水文

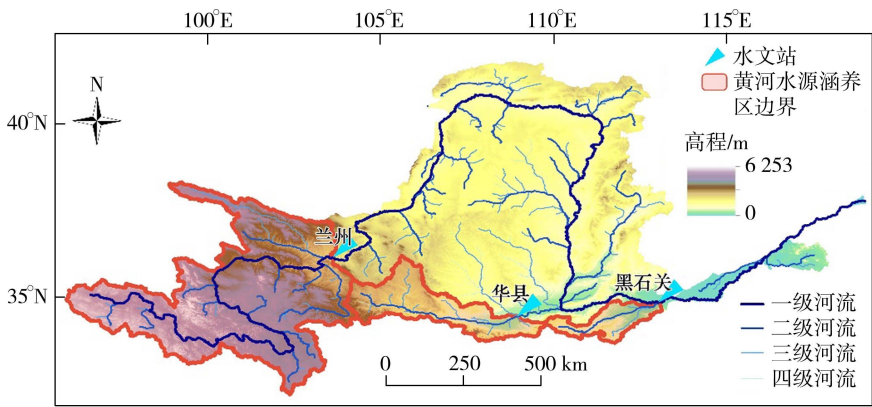


图1 黄河水源涵养区概况

Fig. 1 Overview of water conservation area of the Yellow River

关键要素数据集,揭示变化环境下水资源与生态环境演变规律。基于卫星遥感、雷达遥测和地面台站观测等多源数据,研发基于“空-天-地”立体监测的多源数据融合技术,构建黄河水源涵养区水循环参数数据集和生态水文关键要素数据集;分析变化环境下水源涵养区水源涵养能力和涵养量的变化^[37],研究黄河水源涵养区水循环要素和生态要素时空格局和演变规律。

b. 揭示气候和下垫面变化对生态水文过程的协同驱动机理,解析变化环境下水资源和生态环境演变成因。研究黄河水源涵养区冻土水文过程和植被等下垫面对全球变暖的响应机理,辨识不同类型区域水文过程的气候响应机理模式,揭示气候和下垫面变化对水资源的协同驱动机制;揭示变化环境下地表水与地下水的交互作用及径流效应,研究地表-地下水文过程时空变异与流域生态过程变化的多维多尺度耦合互馈机理,研发水资源与生态环境演变归因识别方法,解析变化环境下水资源和生态环境演变成因。

c. 构建多源数据驱动的分布式水资源模拟系统,预测未来区域水资源趋势。基于生态过程与水文过程的耦合互馈机理,结合多源数据融合产品,构建基于多源数据驱动的分布式水循环与生态过程自适应耦合模型,研发分布式水资源模拟软件系统;构建基于多气候模式和不同排放路径的未来气候情景和下垫面情景,预测未来水源涵养能力和水资源变化趋势,量化气候变化及水资源预测的不确定性。

d. 评估变化环境下区域水安全和生态环境趋势及风险,研究水安全保障和生态风险调控策略。发展变化环境下水资源承载力评价方法,结合黄河水源涵养区未来水资源变化趋势,分析未来黄河流域水资源承载力;构建水安全与生态环境安全评估指标体系,研发基于健康平衡目标的流域水

安全和生态环境风险综合评价方法,预估水安全与生态环境演变趋势及风险;研究水资源与生态环境风险调控技术,提出黄河水源涵养区水源涵养能力提升、水资源承载力优化、黄河流域水安全保障和生态风险调控策略。

2.4 研究思路与研究任务设置

围绕总体研究目标,针对拟解决的关键科学问题和关键技术,以“环境变化的径流效应和水资源预测”为核心,按照“数据集构建-机理解析-模型研发-技术应用”的总体思路开展研究。①在基础数据集构建层面,通过系统收集基于“空-天-地”立体监测的生态水文要素数据,利用多源数据融合技术,构建形成具有系统性、完整性、可靠性和针对性的水循环参数数据集及生态水文关键要素数据集,为整个研究提供坚实的数据基础。②在科学问题解析层面,重点揭示气候和下垫面变化对水资源变化的协同驱动机制,解析地表水-地下水-生态过程之间的互馈与耦合机理,研究“基于健康平衡目标的流域水安全与生态环境风险调控机制”,为研究提供理论支撑。③在关键技术研发层面,重点研发基于“空-天-地”立体监测的多源数据融合技术、基于地表-地下水文过程的多维多尺度流域生态环境演变(退化)诊断技术、基于多源数据驱动的分布式水循环与生态过程自适应耦合模型、水安全与生态环境风险综合评估和调控技术,建立具有自主知识产权的分布式水资源模拟软件系统,为研究提供有效工具。④在影响评估和综合调控层面,重点预测未来水资源趋势,评估未来水安全和生态环境风险,提出黄河水源涵养区水源涵养能力提升和生态风险防控策略,支撑流域治理开发及国家战略的实施。

围绕总体研究目标,根据研究内容,科学问题和关键技术,设置5个研究任务。研究任务1为数据基础;研究任务2与研究任务3为技术研发提供

理论依据;研究任务4为研发分布式水资源模拟软件系统,为水资源影响评价及预测提供方法;研究任务5基于评估和预测结果,提出水源涵养能力提升和生态环境保护策略,直接服务于黄河流域治理开发与生态环境保护。各研究任务之间的关联关系如图2所示。

3 预期创新与未来展望

a. 资料欠缺地区水资源及生态分析评价是生态水文学面临的挑战^[11]。基于现有地面站点的水文气象监测资料、遥感观测资料、科学试验资料以及历史文献资料等多源数据,利用多源数据融合技术,构建黄河水源涵养区生态水文关键要素数据集和水循环参数数据集。该数据集可为流域水资源评价、生态环境评价、流域水文模拟等提供数据支撑。

b. 变化环境下水文生态过程机理是国际前沿科学问题^[29-30,38]。通过解决“气候和下垫面变化对水源涵养区水资源变化的协同驱动机制”“地表-地下水文过程与生态过程的多维多尺度互馈耦合机理”“基于健康水平衡目标的流域水安全与生态环境风险调控机制”三大科学问题,形成重要理论成果,可在一定程度上促进水文学和生态学的深入交叉融合和学科发展,并进一步完善生态水文学理论体系。

c. 变化环境为水文生态模拟及预估技术带来挑战^[39-40],创新构建具有自主知识产权的水资源模拟系统是解决国家水利卡脖子技术关键。通过创新“基于‘空-天-地’立体监测的多源数据融合技术”“基于地表-地下水文过程的多维多尺度流域生态环境演变(退化)诊断技术”“基于多源数据驱动的水循环与生态过程自适应耦合模型”“水资源与生态环境安全评估与风险调控技术”四大关键技术,可在一定程度上完善变化环境下生态水文模拟与评估关键技术体系,提升变化环境下生态水文过程的模拟预测能力。

d. 科学预测水资源与生态安全趋势是国家战略实施的重要支撑^[22-23]。预测水源涵养区未来水资源趋势,并分析水安全和生态安全情势,给出2035年、2050年黄河水源涵养区水资源定量预测结果和黄河流域未来15~30年水资源情势分析研判结果,为流域水资源开发利用、管理规划和生态环境保护决策等方面提供科技支撑。

4 结语

环境变化的水文效应是国际水文科学研究的前沿核心,气候和下垫面变化对水资源变化的协同驱动机制、地表-地下水文过程与生态过程的多维多尺度互馈耦合机理和基于健康水平衡目标的流域水安

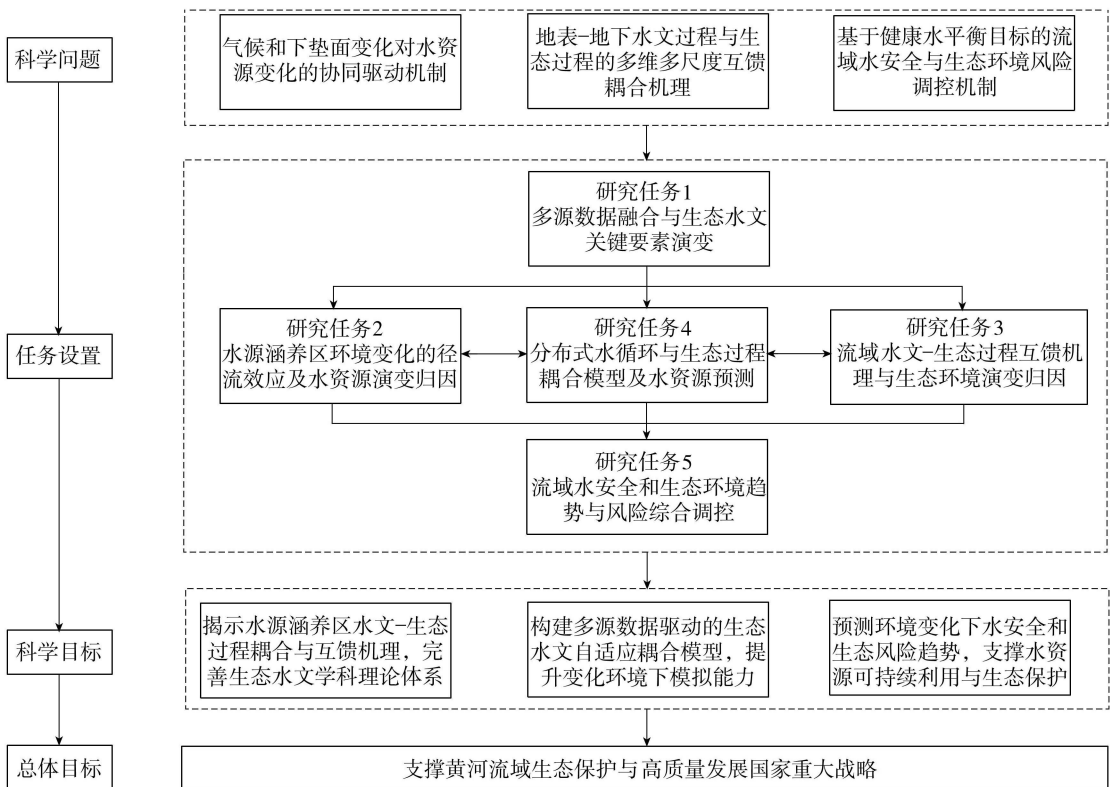


图2 研究方案与研究任务设置

Fig. 2 Study scheme and research tasks

全与生态环境风险调控机制是未来生态水文研究的关键科学问题。未来水资源趋势是全球性关注的焦点,基于“空-天-地”立体监测的多源数据融合技术、基于地表-地下水文过程的多维多尺度流域生态环境变(退)化诊断技术、基于多源数据驱动的分布式水循环与生态过程自适应耦合模型和变化环境下水资源与生态环境安全评估和风险调控技术是变化环境下生态和水资源趋势预估中的关键技术。

黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略,黄河水源涵养区水循环参数集及生态水文关键要素数据集、气候和下垫面变化对生态水文过程的协同驱动机理、多源数据驱动的分布式水资源模拟系统和变化环境下水安全和生态环境趋势及风险调控是未来气候变化下保障黄河流域水安全和生态安全亟待研究的核心内容。

致谢:金双彦、张永勇、连炎清、牛存稳、杨勤丽、王妍、孙高霞、宁忠瑞、王乐扬等为本研究付出了辛勤劳动,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 刘晓燕. 关于黄河水沙形势及对策的思考[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 34-40. (LIU Xiaoyan. The water and sediment situation and countermeasure[J]. Yellow River, 2020, 42(9): 34-40. (in Chinese))

[2] 王乐扬, 李清洲, 王金星, 等. 变化环境下近 60 年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 36-42. (WANG Yueyang, LI Qingzhou, WANG Jinxing, et al. The variation characteristics of recorded runoff and its annual distribution in north China during the recent 60 years in the context of environment change[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 36-42. (in Chinese))

[3] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))

[4] BLÖSCHL G, BIERKENS M F P, CHAMBEL A, et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH): a community perspective [J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(10): 1141-1158.

[5] UNESCO-IHP. IHP-IX strategic plan: science for a water secure world in a changing environment (2022-2029) [R]. Paris: United Nations Educational, Scientific and

Cultural Organization (UNESCO), 2022.

[6] ICSU. Future earth initial design: report of the transition team [R]. Paris: International Council for Science (ICSU), 2013.

[7] MILLER M P, CLARK B R, EBERTS S M, et al. Water priorities for the nation-US geological survey integrated water availability assessments[R]. Washington D. C.: US Geological Survey, 2020.

[8] WILSON T S, SLEETER B M, CAMERON D R. Future land-use related water demand in California [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(5): 054018.

[9] POKHREL Y, FELFELANI F, SATOH Y, et al. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(3): 226-233.

[10] DRÜKE M, VON BLOH W, PETRI S, et al. CM2Mc-IPJmL v1. 0: biophysical coupling of a process-based dynamic vegetation model with managed land to a general circulation model[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(6): 4117-4141.

[11] PENG J, ALBERGEL C, BALENZANO A, et al. A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications-confronting product characteristics with user requirements[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 252: 112162.

[12] LIU H, JIA Y W, NIU C W, et al. Development and validation of a physically-based, national-scale hydrological model in China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125431.

[13] YANG Q L, ZHANG H, PENG W S, et al. Assessing climate impact on forest cover in areas undergoing substantial land cover change using landsat imagery[J]. Science of The Total Environment, 2019, 659: 732-745.

[14] 高玉琴, 李媛媛, 高见, 等. 虚拟水影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 22-27. (GAO Yuqin, LI Yuanyuan, GAO Jian, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under influence of virtual water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 22-27. (in Chinese))

[15] 严登华, 任立良, 王国庆, 等. 关于陆地水循环演变及其在全球变化中的作用研究设想[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 935-942. (YAN Denghua, REN Liliang, WANG Guoqing, et al. Initiatives on evolution of terrestrial water cycle and its role in global change [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 935-942. (in Chinese))

[16] 何大明, 刘恒, 冯彦, 等. 全球变化下跨境水资源理论与方法研究展望[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 928-934. (HE Daming, LIU Heng, FENG Yan, et al. Perspective on theories and methods study of transboundary water resources under the global change[J]. Advances in Water

- Science, 2016, 27(6): 928-934. (in Chinese))
- [17] QIAO C P, NING Z R, WANG Y Y, et al. Impact of climate change on water availability in water source areas of the South-to-North Water Diversion Project in China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 747429.
- [18] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [19] 徐丽丽, 束龙仓, 李伟, 等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 79-85. (XU Lili, SHU Longcang, LI Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 79-85. (in Chinese))
- [20] CAMPORESE M, PANICONI C, PUTTI M, et al. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: W02512.
- [21] LI X, LIU C S, WANG G Q, et al. Evaluating the collaborative security of water-energy-food in China based on symbiotic system theory [J]. *Water*, 2021, 13(8): 1112.
- [22] 刘晶, 刘翠善, 李潇, 等. 中国水-能源-粮食关联系统协同安全评价 [J]. *水利水运工程学报*, 2020(4): 24-32. (LIU Jing, LIU Cuishan, LI Xiao, et al. Security evaluation of water-energy-food nexus system in China [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(4): 24-32. (in Chinese))
- [23] 郭旭宁, 郦建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))
- [24] 胡文韬, 余钟波, 陈松峰, 等. 长江上游卫星及再分析降水数据的适用性评估 [J/OL]. *河海大学学报 (自然科学版)*. [2023-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20230731.1842.014.html>. (HU Wentao, YU Zhongbo, CHEN Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in the upper Yangtze River Basin [J/OL]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*. [2023-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20230731.1842.014.html>. (in Chinese))
- [25] LIU Z Y, YANG Q L, SHAO J M, et al. Improving daily precipitation estimation in the data scarce area by merging rain gauge and TRMM data with a transfer learning framework [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, B(613): 128455.
- [26] SHI J Y, WANG B, WANG G Q, et al. Are the Latest GSMaP satellite precipitation products feasible for daily and hourly discharge simulations in the Yellow River source region? [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4199.
- [27] 何涯舟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 145-151. (HE Yazhou, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 145-151. (in Chinese))
- [28] 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 Qingsong, MA Junxia, ZUO Qiting, 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))
- [29] 刘昌明, 刘璇, 于静洁, 等. 生态水文学兴起: 学科理论与实践问题的评述 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 58(3): 412-423. (LIU Changming, LIU Xuan, YU Jingjie, et al. Ecohydrology on the upsurge: history and prospect of its theory and application [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(3): 412-423. (in Chinese))
- [30] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(11): 2105-2138. (LI Zhongkai, LI Xiaoyan, ZHOU Sha, et al. Comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022, 52(11): 2105-2138. (in Chinese))
- [31] 江善虎, 刘亚婷, 任立良, 等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 9-14. (JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 9-14. (in Chinese))
- [32] 韩宇平, 许拯民. 区域水资源短缺风险调控研究 [J]. *河北工程大学学报 (自然科学版)*, 2007(4): 81-84. (HAN Yuping, XU Zhengmin. Study on risk control of regional water resources shortage [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2007(4): 81-84. (in Chinese))
- [33] 金菊良, 宋占智, 崔毅, 等. 旱灾风险评估与调控关键技

- 术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 398-412. (JIN Juliang, SONG Zhanzhi, CUI Yi, et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 398-412. (in Chinese))
- [34] 井云清, 张飞, 陈丽华, 等. 艾比湖湿地土地利用/覆被-景观格局和气候变化的生态环境效应研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3590-3601. (JING Yunqing, ZHANG Fei, CHEN Lihua, et al. Investigation on eco-environmental effects of land use/cover-landscape pattern and climate change in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9): 3590-3601. (in Chinese))
- [35] 中共中央, 国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要 [EB/OL]. (2021-10-08) [2023-10-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm.
- [36] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. 水文, 2022, 42(2): 65. (WANG Guoqing. Definition of water conservation area in the Yellow River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(2): 65. (in Chinese))
- [37] 周冰玉, 李志威, 田世民, 等. 黄河源区水源涵养能力研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 87-93. (ZHOU Bingyu, LI Zhiwei, TIAN Shimin, et al. A review on water conservation capacity in Yellow River source region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 87-93. (in Chinese))
- [38] 杨海, 姜月华, 周权平, 等. 太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 506-514. (YANG Hai, JIANG Yuehua, ZHOU Quanping, et al. Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 506-514. (in Chinese))
- [39] 王乐扬, 李清洲, 王艳君, 等. 海河南拒马河流域水文特性及HBV模型的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 70-75. (WANG Yueyang, LI Qingzhou, WANG Yanjun, et al. Hydrological characteristics and application of the HBV model in the South Juma River catchment in the Hai River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 70-75. (in Chinese))
- [40] GUAN X X, ZHANG J Y, ELMAHDI A, et al. The capacity of the hydrological modeling for water resource assessment under the changing environment in semi-arid river basins in China [J]. Water, 2019, 11(7): 1328. (收稿日期: 2023-11-04 编辑: 王芳)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊。《水资源保护》以水资源、水环境、水生态为论述主题,以推动水科学技术进步为办刊宗旨,反映在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境和水生态等领域中科学技术的最新成就、重要进展和发展趋势,交流新的科研成果、技术经验和科技动态。收稿范围:水文水资源、水环境、水生态、水安全等相关文章。本刊开设的栏目有特约专家论坛、水文水资源、水环境水生态等。

《水资源保护》1985年创刊,经过近40年的努力,办刊成绩斐然,现为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊,已被美国《工程索引》(Ei)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等国外重要数据库收录,是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊数据库统计源期刊。据中国科学文献计量评价研究中心最新出版的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2023版)》,《水资源保护》复合影响因子为6.155,位居79种水利工程类期刊的第1位。

《水资源保护》一直以来都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,是国内较有影响的水利期刊之一,主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科研技术人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊,160页,30元/册,全年共计180元,每逢单月20日出版,全国公开发行,邮发代号:28-298。

地址:210098 南京市西康路1号 电话:(025)83786642

电子信箱:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn