

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.03.001

编者按：西南河流源区是亚洲水塔，是中国的水资源涵养区和战略储备区，但其未来水资源的演变趋势不明，厘清气候变化下源区径流的变化规律是水资源合理开发利用的基础，对中国长期的水安全保障具有战略意义；同时，西南河流源区位于地球第三极和亚洲诸大河的发源地，该地区水文过程复杂，对气候变化响应敏感，生物地球化学物质循环变异强烈，其径流变化和适应性利用是国际学术研究的热点与难点问题，但中国学者在国际学术界的声量还不多、不强。为厘清气候变化下的西南河流源区径流变化规律以开展适应性利用，为国家重大需求提供科学支撑，国家自然科学基金委员会于2015年启动了“西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划，目前已进入集成研究阶段，已构建了源区天空地一体化监测体系，并在径流变化机理、河流全物质通量理论、梯级水库适用性利用技术等方面形成了一批高水平研究成果。

为进一步提升研究成果的影响力，本刊设立“西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划专栏，陆续报道重大研究计划及相关研究团队成果，增强中国学者在第三极水领域的话语权和成果的国际影响力。

“西南河流源区径流变化和适应性利用” 重大研究计划进展综述

胡春宏¹，郑春苗²，王光谦³，张建云⁴，王超⁵，姚檀栋⁶，
王焰新⁷，赖明勇⁸，倪广恒³，王雨春¹，张弛⁹，田富强³

- (1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100048；2. 南方科技大学环境科学与工程学院，广东 深圳 518055；3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084；4. 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；5. 河海大学环境学院，江苏 南京 210098；6. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室，北京 100101；7. 中国地质大学(武汉)环境学院，湖北 武汉 430074；8. 长沙理工大学经济与管理学院，湖南 长沙 410114；9. 大连理工大学水利工程学院，辽宁 大连 116023)

摘要：西南河流源区是中国的水资源战略储备区，但其未来水资源演变趋势不明，为厘清气候变化下的径流变化规律以开展适应性利用，国家自然科学基金委于2015年启动了“西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划，本文对重大研究计划的总体情况和主要进展进行综述。重大研究计划实施以来取得了一系列研究成果：构建了西南河流源区天空地一体化监测体系，有效提升了西南河流源区的监测能力；创新了高原寒区径流水源组成的多元综合解析方法，揭示了高原寒区典型径流水源的形成机理及气候驱动下流域下垫面与水文系统的协同变化机理；创建了综合冰雪冻土寒区水文过程和示踪过程的分布式同位素水文模型，揭示了雅鲁藏布江径流变化的历史规律和未来趋势；提出了河流全物质通量概念，开展了大量取样检测，揭示了高原河流生源物质循环及生物响应规律，量化了澜沧江梯级水库运行的环境累积效应；发展了多目标互馈系统理论，从水量、水能、水质3个方面创新了梯级水库适用性利用技术，为西南水电消纳、澜沧江-湄公河水资源合作等国家重大需求提供了支撑。

关键词：径流变化；适应性利用；生源物质循环；西南河流源区

中图分类号：TV11；P343

文献标志码：A

文章编号：1001-6791(2022)03-0337-23

收稿日期：2021-12-01；**网络出版日期：**2022-04-29

网络出版地址：<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220429.1022.002.html>

基金项目：国家自然科学基金资助项目(92047000)

作者简介：胡春宏(1962—)，男，山西榆次人，中国工程院院士，主要从事江河治理领域研究。E-mail: huch@iwhr.com

在气候变化和人类活动的耦合影响下,全球水循环发生了显著变化,引发资源环境等一系列问题。近半个世纪中国地表水资源总量呈减少趋势、旱涝事件趋多趋强,支撑经济社会可持续发展和生态文明建设的水资源保障面临很大挑战。作为中华水塔和亚洲水塔,西南河流源区的径流影响到下游 14 亿人口的供水,也是中国及周边地区的重要生态屏障,同时地处地球第三极,积雪丰富,冰川和冻土发育,水文过程复杂,开展西南河流源区径流变化和适应性利用研究具有重要的实践意义和科学价值。为厘清气候变化下的西南河流源区水文水环境变化规律并开展适应性利用,为国家重大需求提供科学支撑,培养水文水资源和水环境研究的中青年领军人才,推动中国水利、地学、管理学等相关学科发展,国家自然科学基金委于 2015 年启动了“西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划(以下简称重大研究计划),是中国在青藏高原区域组织实施的聚焦水科学领域的首批国家级研究计划,在相关领域取得了系列重要进展。

1 重大研究计划总体情况

1.1 立项背景

西南河流源区是亚洲水塔,是长江、黄河、怒江、澜沧江、雅鲁藏布江等亚洲主要大河的发源地,水量供给下游 14 亿人口^[1]。西南河流源区也是中国水资源的战略储备区,怒江、澜沧江和雅鲁藏布江干支流每年的出境水量约为 5 000 亿 m^3 ,接近中国 6 000 亿 m^3 的年总用水量^[2]。由于该区域对气候变化响应敏感,水资源量未来演变趋势不明^[3],在中国水资源供需日益紧张的形势下,厘清气候变化下源区径流的变化规律是战略储备区水资源合理开发利用的基础,是国家“十四五规划”确定的雅鲁藏布江下游水电工程规划设计的重要科学依据,对中国长期的水安全保障具有战略意义。

西南河流源区也是中国的水电能源基地,西南水电占全国可开发量的 68%,水电是中国最大的清洁能源,西南水电的开发利用对中国能源安全和节能减排均有重要意义^[4],是实现“双碳”战略目标的重要途径。根据国家能源规划,西南河流源区水能开发将在今后 10 ~ 30 a 进入新的高潮期。中国水能开发在经历了以技术约束、资金约束和市场约束为主的发展期后,已进入以生态环境约束为主的时期。西南河流源区多样的河流生境涵养了多样的生物物种,科学评估径流变化下河流环境质量的演变对水电站的科学规划和合理调度具有重大意义。同时,在跨越国境的澜沧江、雅鲁藏布江等国际河流上则需要从外交层面上考虑水电的规划和运行调度,开展水文、水环境变化和径流适应性利用研究,从科技方面支撑中国“澜湄合作机制”等周边外交和“一带一路”战略的实施。

西南河流源区地处地球第三极,其径流变化和适应性利用是国际学术研究的热点与难点问题。该地区气候严寒,水的多态相变导致水文过程复杂、对气候变化响应复杂;同时,青藏高原的快速隆升导致生物地球化学物质的循环变异十分强烈,这对全球物质循环的影响非常显著;另外,该区域包含较多国际河流,径流开发利用涉及跨境影响。因此,该区域水文、水环境和水资源问题受到国际学术界广泛关注。据统计,近些年来 *Nature* 和 *Science* 等国际学术期刊发表的水文水资源类文章有较高比例聚焦该区域,但受基础数据和理论方法的限制,研究结果相互间矛盾较多。中国在该区域开展相关研究具有得天独厚的优势,但中国学者在国际学术界的声量仍不多、不强。

1.2 国内外研究现状

径流演变是气候变化和流域下垫面变化综合作用的结果。来源于不同水源的径流对于气候变化的响应特点不同,导致气候变化下的径流演变极为复杂,成为国内外研究的热点和难点,且不同研究的结果差异较大,亟待不断深入。如对于西南河流源区水储量的问题,Yao 等^[5]根据典型冰川数据的观测结果,发现近 20 a 源区水储量呈下降趋势,这与先前 Jacob 等^[6]根据 GRACE 卫星观测数据所得到的水储量增加的结论完全相反。又如,关于西南河流源区径流演变趋势的预估也存在显著差异,如 Lutz 等^[3]解析近 20 a 来雅鲁藏布江奴下站以上流域的融冰径流比例高达 16%,而 Wang 等^[7]的解析结果仅为 3.8%。要获得更准确的结

果,可能的突破途径是通过耦合多源数据和方法解析径流水源组成,通过历史径流系列识别未来百年径流的周期和随机性,通过气候变化和下垫面的协同演化提高气候变化影响下的预测精度。

大中型水库既具有水体温度和营养盐分层等湖沼学特点^[8],又具有底层泄水和反季节蓄水等人为调控的特点,水库的梯级建设更增加了问题的复杂性,显著改变了相关物质在河流水环境中的迁移特征。生源物质在水库群的多级利用以及再生循环表现出高度非线性累积变化^[9]。中国水电环境保护管理始于20世纪80年代初,大型水库在流域水文过程和生态过程中的重要作用已得到广泛认同,但是目前关于水库“新生”生态系统的湖沼学理论研究依然十分有限,尤其缺乏对梯级水库群累积效应方面的研究,当前相关研究的理论基础还主要基于传统的“河流连续体概念”和“洪水脉动概念”,亟需进行突破,建立适用于新生人工湖泊体系的新概念和新方法^[10]。

20世纪以来,以大坝水库为基础支撑的径流利用经历了从单库到流域、从单目标到多目标、从单一自然到自然-社会耦合的过程。动态规划方法在水资源问题的广泛成功应用使得研究延伸至多库、多目标调度问题,方法上主要是改进动态规划以降维。计算机技术和智能算法的发展使得系统仿真模拟与快速优化计算成为可能,同时不确定性分析的研究增多,流域管理研究应运而生^[11]。流域管理不仅关注径流利用的自然物理过程,还涉及经济博弈和政策制定。然而随着系统规模发生了数量级的增加、人与自然相互作用的增强,径流不确定性和极端气象水文事件频率增加,用水模式和资源分配方法极大地不同于过去,需要新的系统模型、系统方法以实现智能化、适应性径流利用。目前多智能体、自适应方法是研究热点^[12],各种耦合关系是国际前沿的活跃方向,研究目标在于更好地模拟、处理自然-社会耦合系统,以优化配置有限资源,适应不断变化的气候条件和日益复杂的多利益主体用水需求。同时,智能监测、大数据处理、云计算平台及移动通信设备等技术为水文预测和水资源管理提供了新的研究思路 and 手段^[13]。当前的研究趋势是从系统多维时空尺度揭示供水-发电-环境间的互馈关系,研究自然和社会对多利益主体的交互影响,提高变化环境下径流利用的科学认知以支撑径流规模利用,为水资源适应性利用提供新的理论和方法基础。

1.3 关键科学问题

重大研究计划聚焦西南河流源区的径流变化及其适应性利用开展研究,包括长江、黄河、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江的源区,并着重在澜沧江和雅鲁藏布江2条国际河流进行集成。拟解决以下3个关键科学问题:

第一,不同水源的径流对气候变化的响应机理。不同径流成分对气候变化的响应特性不同,为更好预测气候变化下西南河流源区的径流演变,需要对径流成分进行解析,并揭示不同水源的径流对气候变化的响应机理。重点开展以下关键问题的研究:建立多种示踪物质的径流成分解析能谱,识别解析能力强的示踪物质,建立基于多示踪元素组合的径流成分解析理论,揭示气候和下垫面协同变化的径流效应,探究流域水文系统演化的速率及遵循的原理。

第二,径流变化下生源物质循环的变异规律。径流变化下河流泥沙通量和生源物质迁移转化表现出多要素、多过程、高度不确定性的复杂特征,需要突破经典连续河流理论或单一水库模拟分析方法,以揭示梯级水库强烈扰动下的河流生源物质迁移转化过程。重点开展以下关键问题的研究:揭示河流-水库复合系统生源物质“源/汇”及通量变异的动力学机制,构建梯级开发河流多要素、多过程、多尺度耦合的非线性生态动力学模型,提出梯级河流环境质量变化累积效应及风险阈值的定量表征方法。

第三,基于多目标互馈的径流适应性利用。气候变化和社会经济发展加剧了用水矛盾,凸显了更广泛的竞争性用水需求,需要建立径流适应性利用的理论和方法。重点开展以下关键问题的研究:揭示供水-发电-环境协同竞争机制,揭示复杂水资源系统的动态演进机理,识别复杂系统风险及径流适应性利用安全阈值,提出基于多利益主体协同的径流适应性利用对策。

1.4 组织管理

重大研究计划自2015年10月正式发布指南、接收申请,截至2020年12月总计收到申请书共计522

份。经专家通讯评审和会议评审,资助项目共计 88 项,其中,培育项目 44 项,重点支持项目 35 项,集成项目 5 项,战略研究项目 4 项。申请项目涉及国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、地球科学部、管理科学部、化学科学部、生命科学部和信息科学部等 6 个学部。

指导专家组和管理工作组严格按照国家自然科学基金委员会重大研究计划管理的有关规定和办法实施重大研究计划。在实施过程中,遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的基本原则,通过指导专家组和管理工作组的有效协同来实施管理。在组织和管理工作方面主要有以下几方面的特点:

(1) 开展野外考察和当地调研,致力于解决国家重大需求。针对研究区域资料缺乏和前期研究基础薄弱的特点,指导专家组和管理工作组对接当地主管部门,每年组织 1 次研究区域的野外考察,并引导试验观测、数据集成和水库调度等类型项目与当地实践单位进行合作,加强了项目的试验观测工作基础,并增强了项目研究与实际工作的结合。通过野外考察及与当地单位的合作,增进了重大研究计划人员对区域的深入认知,对西南河流源区在水电消纳、跨境河流涉外管理以及堰塞湖应急除险等方面的重大需求有了深刻理解,进而指导天空地一体化监测体系的构建和理论研究的落地应用,有效推动了监测项目、科研工作与区域重大需求的结合。

(2) “走出去”与“引进来”结合,多渠道加强国际交流与合作。重大研究计划的研究区域和关键科学问题是国际研究热点,有必要加强国际交流与合作,确保重大研究计划成果的前沿性。为此,专家组通过多种措施推动实质性国际合作,组织 2 次针对国际学术前沿的交流与考察活动,赴北美、北欧就水资源管理、寒区水文水生态机理等问题开展调研研讨,特邀多位国际知名学者参与年度学术交流会和战略项目研讨会,持续在国际会议上组织重大研究计划的专场会议,在欧洲地理联合会的水文杂志 *Hydrology and Earth System Sciences* 组织专辑,全面介绍重大研究计划的重要进展,提升国际影响。

(3) 及早启动集成布局的战略研究,做好顶层设计。为更好开展重大研究计划后期的集成升华,指导专家组紧密围绕重大研究计划的总体目标和核心科学问题,及早开展集成思路的战略研究。同时,根据重大研究计划所取得的重要进展及国际调研获得的最新发展趋势,结合国家重大需求不断完善重大研究计划的顶层设计和集成思路,将关于集成的顶层设计反映在项目的立项和研究任务布局中,确保重大研究计划集中资源解决关键科学问题,服务国家重大需求。

2 进展一:西南河流源区天空地一体化监测体系

西南河流源区气象水文地面观测站点稀疏、空间分布不均衡、监测不连续、资料系列短,严重制约了水文水资源及相关领域的科学研究和对经济社会发展的支撑。重大研究计划构建了西南河流源区气象水文要素天空地一体化监测体系,提升了西南河流源区的监测能力。在此基础上,广泛收集并融合同化多源数据,建立了西南河流源区数据集和数据共享服务平台,初步揭示了近几十年来西南河流源区冰川、湖泊、储水量、径流以及空中水资源变化的时空特征。

2.1 西南河流源区天空地一体化监测体系

西南河流源区位于青藏高原,地势高亢、山高谷深、交通不便,大气条件具有低气温、低含氧量、低气压和强紫外线等“三低一强”的特点,地面条件具有比降陡、易滑坡、易侵蚀等特点,导致常规监测设备在高原寒区不适用、地面监测站建设和运维保障难度大等问题。重大研究计划研发了高原寒区地面监测系列新设备,提出了高原寒区河道流量遥感监测新技术,构建了空中水资源天空地一体化监测和试验系统,为空中水资源的定量监测、作业调度及作业效果评估提供数据支撑。

2.1.1 高原寒区地面监测系列新设备

在新设备方面,刘九夫、刘宏伟等课题组研发了全天候高精度自动降水观测装置,解决了雨雪无法兼顾、计量误差受雨强影响大等问题,将单层翻斗雨量设备在高原寒区的计量误差由 $\pm 4\% \sim \pm 8\%$ 降低到

±2% 范围内, 精度达到国际领先水平^[14-19]。刘九夫课题组还研发了雷达水位计, 改进了压力水位计, 通过研发干扰物排除算法、滤波算法、超声波清洗等技术, 提升其在高原寒区的适应性。刘九夫、王雨春等课题组研发了适用于高原寒区的流量、水质在线监测新型成套设备, 发展了大尺度视频流速场测量 LSPIV 新技术, 测流误差为 ±10% (中国专利号: CN106908218A、CN106768155A、CN105447883A 等)。陈求稳课题组自主研发了 300 m 级深大水库的采样监测设备, 在高原深大水库水体垂向分层精确采样的同时, 实现了关键理化参数同步监测和无扰动沉积物柱芯采集, 取得了 10 余项中国和美国发明专利^[20-21] (中国专利号: CN108827687A、CN110398397A 等; 国际专利号: US16297454)。刘九夫、刘宏伟等课题组针对高原寒区供电困难、公共通信覆盖不足、冰冻条件下无法监测等难题, 研发了风光联合供电装置, 建立了物联网-公网-北斗相结合的通讯方式, 设计实施了设备紫外线防护方案, 开展融雪雨量计电加热系统试验, 改进加热方法实现降水全天候监测, 有效提高了监测设备的供电、通信和防护水平 (中国专利号: CN207730910U)。上述设备的研发可提升高原寒区全天候监测能力, 降低水文监测站点对专业人员的依赖程度和运维难度, 促进西南河流源区水文监测站网的优化和完善。

2.1.2 高原寒区河道流量遥感监测新技术

龙笛课题组基于光学和雷达卫星进行河宽信息提取, 解决了 300 m 级窄河道距离改正的难题, 相比国际上主要针对 1 000 m 级大河的水位监测方法有较大突破; 通过对对流层、电离层等各种影响因素进行物理改正, 提出了新的波形重定方法 TIC^[22], 实现高山区窄河道水位反演 (图 1), 提出了多个径流计算公式, 在高山区窄河道径流遥感反演方法方面取得了重要进展^[23-24], 为实现空基或天基的水位流量监测提供了可能的技术方法。

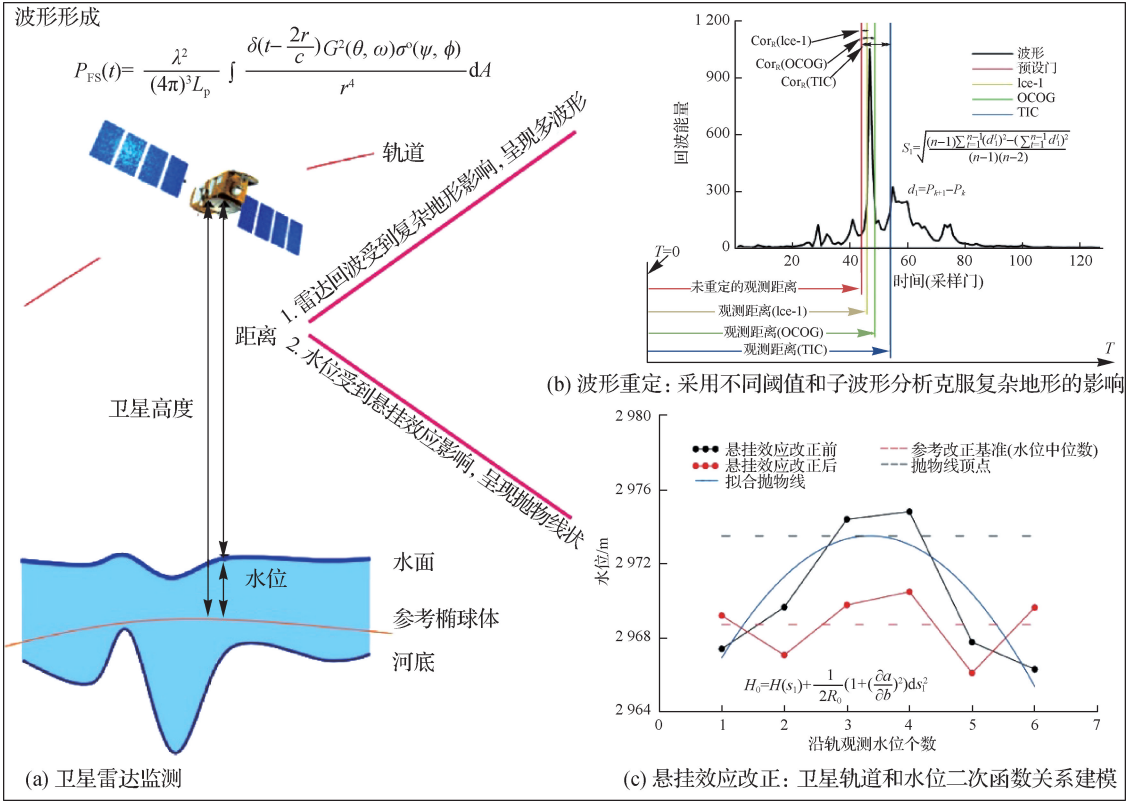


图1 基于卫星雷达的高山区河流水位反演

Fig.1 River water level retrieving algorithm in high mountainous areas based on satellite radar

2.1.3 空中水资源天空地一体化监测和试验系统

在空中水资源监测方面,构建了多种频段互补、多扫描模式协同的地基雷达监测体系,实现了云雨特征参数、云雨时空分布特征、晴雨转换过程的连续、快速、大范围监测;研发了无人机及气球智能协同控制技术、智能取样及水汽探测技术与设备,与地基雷达及天基卫星监测手段互补,完成西南源区难抵达区域的取样及监测任务;基于多系列云雨监测雷达地基监测体系、智能无人机及气球空基监测体系、现有风云系列卫星及资源卫星监测体系,构建了空中水资源天空地一体化精细监测体系,为空中水资源的定量监测、作业调度及作业效果评估提供了数据支撑。

钟德钰课题组在空中水资源评估研究方面,建立了空中水资源形成、迁移和转化理论,提出了空中水资源的资源量评估、源解析和转化率分析方法,形成了系统的空中水资源开发潜力评估方法^[25-27]。裘钧课题组在空中水资源开发技术方面,研发了脉冲式低频强声增雨雪技术及设备(中国专利号:CN109740173A、CN109740174A、CN108600908A、CN211550160U、CN211525349U等),采用双金属无油轴承技术实现高压气体密封/发射双状态瞬时切换,低频声压上限为 160 dB,低频强声发射能力国际领先。在声波增雨空中水资源开发技术机理方面,陈骥课题组通过试验发现了声波对云雾沉降的促进效应、声波对云雾粒径的调制作用,基于力学模型揭示了声波作用下云滴运动及碰并的动力学机制^[28-31]。在林芝、德令哈、青海大学、玉珠峰、都兰、达日等声波增雨雪外场试验基地开展了新型空中水资源开发利用核心技术验证试验。目前累计开展试验 200 余场,累计参与 2 500 余人次,对试验过程中的云层雷达回波强度、含水量、云滴平均粒径和地面雨强等参数进行了全面监测,完成了新型增雨雪装置的可靠性及有效性验证任务,揭示了声波对云物理参数的影响模式^[32]、声波对小流域降水时空分布特性的影响特征^[33],初步形成了西南河流源区空地耦合空中水资源开发原理验证试验体系。

2.2 西南河流源区数据集

在监测基础上系统收集各项目数据,通过质量评估、数据加工、数据融合及数据整编等流程对监测数据进行集成,形成了成套数据产品,揭示了西南河流源区多项水文要素的变化规律,并建立了西南河流源区数据共享平台。

2.2.1 青藏高原地面和空中水文要素数据集

多源卫星、地面监测和再分析数据等不同来源的数据在时间空间分辨率、监测精度和准确性上都存在较大差异,也存在数据缺失等问题。重大研究计划建立了包括偏差修正模型、特征融合、成分替换融合等的时-空-谱一体化和天空地跨尺度数据融合方法,提出了点面结合、多要素关联的数据质量评估与加工技术方案,研发了时空重建、数据融合、深度学习等方法,构建了青藏高原地面和空中水文要素数据集。目前,数据集涵盖了降水、蒸散发、河湖水位、径流、冰川质量、雪水当量、湖泊水储量、总水储量以及干支流关键断面水环境数据^[34-36]。特别是,傅旭东、陈峰等课题组通过树轮以及古洪水沉积分析,反演重建了近 3 500 a 雅鲁藏布江降水序列、过去 512 a 怒江年径流量序列和过去 472 a 拉萨河月径流量序列^[37-38]。这些数据集为揭示西南河流源区水循环时空演变及其预测提供了重要的基础。

2.2.2 西南河流源区水文要素的分布和变化规律

龙笛、王磊、盛煜等课题组揭示了西南河流源区多种水文要素的变化规律。近数十年来青藏高原冰川和冻土退化显著,1976—2013 年雅鲁藏布江流域冰川面积减少 747.58 km²(减幅为 -8.30%),1990—2013 年黄河源区汤岔玛平原多年冻土面积减少近 60%^[34-35]。20 世纪 60 年代到 2015 年青藏高原湖泊面积和蓄水呈增加趋势,52 个大型湖泊 2000—2017 年累积增加蓄水 983 亿 m³;重力卫星 GRACE 监测的陆地储水量变化明显,雅鲁藏布江流域的陆地水储量显著减少^[36]。钟德钰课题组的研究表明,青藏高原多年平均空中水资源量为 120.75 亿 m³/d,年径流可增加潜力为 4.26% (171 亿 m³/a),其中,雅鲁藏布江平均空中水资源量为 18.32 亿 m³/d,年径流可增加潜力为 4.11% (45 亿 m³/a),澜沧江平均空中水资源量为 5.01 亿 m³/d,年径

流可增加潜力为 6.32% (14 亿 m^3/a)^[25-27]。

3 进展二:高原寒区径流变化机理

针对重大研究计划第 1 个关键科学问题“不同水源的径流对气候变化的响应机理”,创新了高原寒区径流水源组成的多元综合解析方法,揭示了高原寒区不同水源径流的形成机理及气候变化驱动下流域下垫面与水文系统的协同变化机理,创建了综合冰雪、冻土等下垫面要素和示踪过程的同位素水文模型,揭示了雅鲁藏布江径流变化的历史规律和未来趋势。

3.1 高原寒区径流的多元综合水源解析方法

示踪元素是水源解析的重要工具,传统水源解析方法依赖于单一的氢氧稳定同位素进行示踪,难以充分识别不同水源之间的差异,不适用于水源多样、路径复杂的高原寒区。重大研究计划构建了多元示踪图谱和多元综合解析方法,揭示了雅鲁藏布江径流的水源组成。

3.1.1 多元示踪图谱和多元综合解析方法

利用不同同位素具有来源和地球化学行为差异的特点,可以更加准确地对降水-融冰径流、地表-地下水交互等多种主导径流过程进行解析。严登华、孔彦龙、李宗省等课题组利用氢氧稳定同位素 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 在那曲、明勇河、长江源等多个流域开展研究,表明氢氧稳定同位素具有良好的解析冰雪融水、冻土层上水等径流端元的性能^[39-41];徐志方课题组发现了次生碳酸盐形成对河流 $\delta^{26}\text{Mg}$ 同位素的重要影响,完善了应用 $\delta^{26}\text{Mg}$ 同位素指示不同流域水体物质源迁移转化过程的证据链,提出了 C-Mg 同位素联用反映环境变化下风化输入及其对水体物质来源和迁移转化影响的解析方法^[42];陈喜课题组综合利用氢氧同位素和对地下水具有较强解析能力的示踪元素²²²Rn,解析了雅鲁藏布江中游地表径流中地下水的贡献,提出青藏高原大型南北向张性活动断裂构成了地下水深循环及向河流排泄的导水通道,为青藏高原地下水通过大型张性活动断裂向大河排泄提供了同位素证据^[43];匡星星课题组探索了²²⁸Ra、¹¹B 等多种非传统同位素在不同环境中地下水解析中的应用^[44-45],并采用²²²Rn 和¹⁸O 相结合的方法对冰前湖的湖底地下水排泄和营养盐输入进行定量评估,揭示了湖底地下水排泄量在向湖泊输送溶解无机氮方面具有重要作用^[46]。

3.1.2 雅鲁藏布江径流的水源组成

水文模型和基于示踪元素的端元混合模型是水源解析的 2 类方法,由于模型的异参同效性和端元同位素的空间变异性,2 类方法在高寒区大尺度流域均具有很强的不确定性。田富强课题组提出了耦合同位素示踪和分布式水文模型的水源解析方法,揭示过去 15 a 间(2001—2015 年)雅鲁藏布江径流的多年平均水源组成为:降雨径流占比 78%,融雪径流占比 16%,融冰径流占比 6%;利用积雪面积及深度数据计算得到年均融雪水当量约为 70.9 mm^[47],与解析得到的年均融雪径流深 70.6 mm 非常接近;构建了雅鲁藏布江流域的冰川消融模型,得到雅鲁藏布江流域的年均冰川物质平衡为 -0.542 m,与 Hugonnet 等^[48]发布的数据集估算的结果 -0.546 m 较为接近,表明了水源解析结果的合理性。

3.2 高原寒区径流形成和变化机理

下垫面条件决定了流域的水文功能,是影响径流变化的重要因素,传统的径流变化研究多独立考虑气候变化和下垫面条件,亟需揭示下垫面和水文系统协同变化的机理。同时,下垫面因素中冰雪是影响高原寒区径流变化的重要因素,且对气候变化敏感,传统的冰雪消融模拟方法以温度为变量,具有参数依赖率定、计算过程复杂、计算精度低等缺点。通过对典型冰川及下垫面的集中观测,创建了基于焓的冰雪物质能量平衡模型,建立了冻土消融及冻土区地下水过程模拟方法,发展了气候驱动下的土壤协同变化理论,揭示了高原寒区径流形成和变化机理。

3.2.1 高原寒区不同水源径流的形成机理

准确认知冰雪及冻土消融机理对于径流模拟与预测具有重要的意义。李宗省课题组的研究成果显示,高

原寒区水体存在多相态加速转换的特征,在显著的升温趋势下,冰雪消融剧烈,多年冻土地下冰加速融化,对径流总量及组成产生重要影响^[49]。冰雪消融机理方面,对典型冰川表面消融量及其能量组分空间分布特征的分析表明,冰川表面反照率对消融具有至关重要的作用,对反照率的模拟直接影响对冰雪消融及水文效应过程的模拟和预测。杨威课题组基于对不同典型区大量冰川的观测,构建了分布式冰雪消融模型,提出了基于云量纠正的冰雪表面长短波辐射空间计算方案,发展了基于积雪老化和雨雪分隔的表面反照率参数化方案,较好地捕捉了冰川表面积雪演化的空间变化过程,较好解决了以往度日模型冰雪消融参数难以确定的问题,提高了计算精度^[50-51]。

在冻土消融机理方面,冻土消融不仅会形成直接的融水径流,还会通过改变水流路径而对径流产生影响。王根绪课题组基于对冻融区冻土层上水的观测,揭示了冻土对径流形成的影响和作用机制:冻土层之上的地下水及径流过程与活动层的地温高度相关,且温度对地下水运动的影响存在阈值效应,阈值大小受冻结过程、地形与生态因素等的控制而存在时空变化。据此建立了多年冻土区蒸散发、土壤入渗和地下水运动的模拟方法,开发了冻土流域变源产流模型,识别了冻土融化条件下地下水路径的变化趋势,增强了对不同冻融季节产流过程的识别能力^[52-54]。

3.2.2 气候变化驱动下流域下垫面与水文系统的协同变化机理

气候变化驱动下流域关键带结构与水文系统的协同变化是径流变化机理研究的关键和难点。徐宗学课题组的成果显示,近 60 a 来雅鲁藏布江流域植被及土壤含水量变化显著,然而植被及水分的变化是表象,水文循环变化的深层次原因在于土壤结构及水力特性的变化,后者直接影响流域对降雨的蓄持能力^[55]。刘金涛课题组从地貌演化原理出发,基于地貌演化动力学模型和地质构造稳定的有关假说导出了土壤厚度演化的非稳态解析解,建立了土壤演化生成速率等地球化学参数确定的数学物理方法,并将所建立的土壤厚度演化模型应用于高原寒区典型小流域揭示其土壤特性的演变规律,推导了表征山坡地貌结构特征(地形、土壤厚度等)与径流响应特征值(如流域蓄水容量)之间关系的解析函数,有助于水文模型关键参数的动态模拟与预测^[56-57]。

3.3 雅鲁藏布江径流变化的历史规律与未来趋势

径流变化的历史规律和未来趋势与生源物质的变异性高度相关,是径流适应性利用的重要输入条件。径流的年际变化具有多年尺度的周期特征,对其变化规律的分析需要基于长时间序列的数据。同时,流域水文模型是理解和预测径流过程的必要工具,传统的水文模型未考虑流域下垫面的动态特征,且对高原寒区的关键过程刻画不足。重大研究计划重构了万年尺度的古洪水,创建了耦合冰雪冻土消融、下垫面变化以及同位素示踪等过程的同位素水文模型,揭示了雅鲁藏布江径流变化的历史规律和未来趋势。

3.3.1 适用于高原寒区的分布式同位素水文模型

田富强课题组基于对径流形成和变化机理的认知,将水文模型与冰川冻土消融模型和同位素示踪模型耦合,创建了适用于高原寒区的分布式同位素水文模型;模型基于多源遥感数据驱动、率定和验证,可以对融雪径流、融冰径流和总径流进行有效模拟,并利用多元示踪数据对模型参数进行约束,降低了模型的异参同效性和径流模拟的不确定性,为大尺度高原寒区流域径流过程的模拟和预测提供了新工具^[47,58]。匡星星课题组在雅鲁藏布江及其典型子流域拉萨河建立了三维地下水数值模型,模拟了区域地下水流场、地下水补给排泄规律以及气候变化影响下的未来趋势^[59-60];在长江源区冬克玛底冰川流域建立了三维冰川-地下水数值模型,模拟了冰下融水对地下水的下渗补给并预测其未来变化趋势^[61]。

3.3.2 源区主要河流径流变化的历史规律

重建了雅鲁藏布江流域的古洪水过程。傅旭东课题组通过对格嘎古堰塞湖 2 个沉积剖面的多指标分析,确认了其至少发生过 4 次溃决洪水。其中,果若剖面厚 28.5 m,3 个砂层指示了 3 次溃决事件;玉松剖面厚 8.75 m,指示了 1 次溃决事件,估计每次溃决洪水规模约 50 万 m³/s。完成雅鲁藏布江加查—米林河段典型

砾石和砂洲洪水沉积、洪水滞流沉积序列采样工作, 利用光释光测年技术(OSL)基于石英颗粒的释光特性分析构建了雅鲁藏布江干流高能古洪水的年代框架(图2), 识别了至少存在2次溃决洪水事件, 分别发生于12.14~11.05 ka和5.26~3.20 ka。

揭示了源区主要河流的历史径流变化。徐宗学课题组分析了雅鲁藏布江过去60 a(1956—2015年)的径流变化特征: 雅鲁藏布江年径流量呈现先减少后增加的变化趋势, 转折点在20世纪90年代初, 即年径流量在转折点前以2.715 mm/a的速率呈现显著的下降趋势, 在转折点后呈现不显著的上升趋势, 且径流年内分配规律呈“坦化现象”, 即径流量最大值出现时间推迟且年内分配更加均匀, 降水变化是径流变化的主导因素^[62-63]。缪驰远课题组分析了三江源地区过去30 a的径流变化特征, 该地区除黄河源军功站径流呈减小趋势外, 在长江源、澜沧江源和黄河源吉迈站均呈增加趋势, 气候变化是影响径流变化的主要因素, 其中在澜沧江源和长江源1980—2012年间的径流增加过程中, 气候变化的定量贡献分别超过90%和88%^[64]。

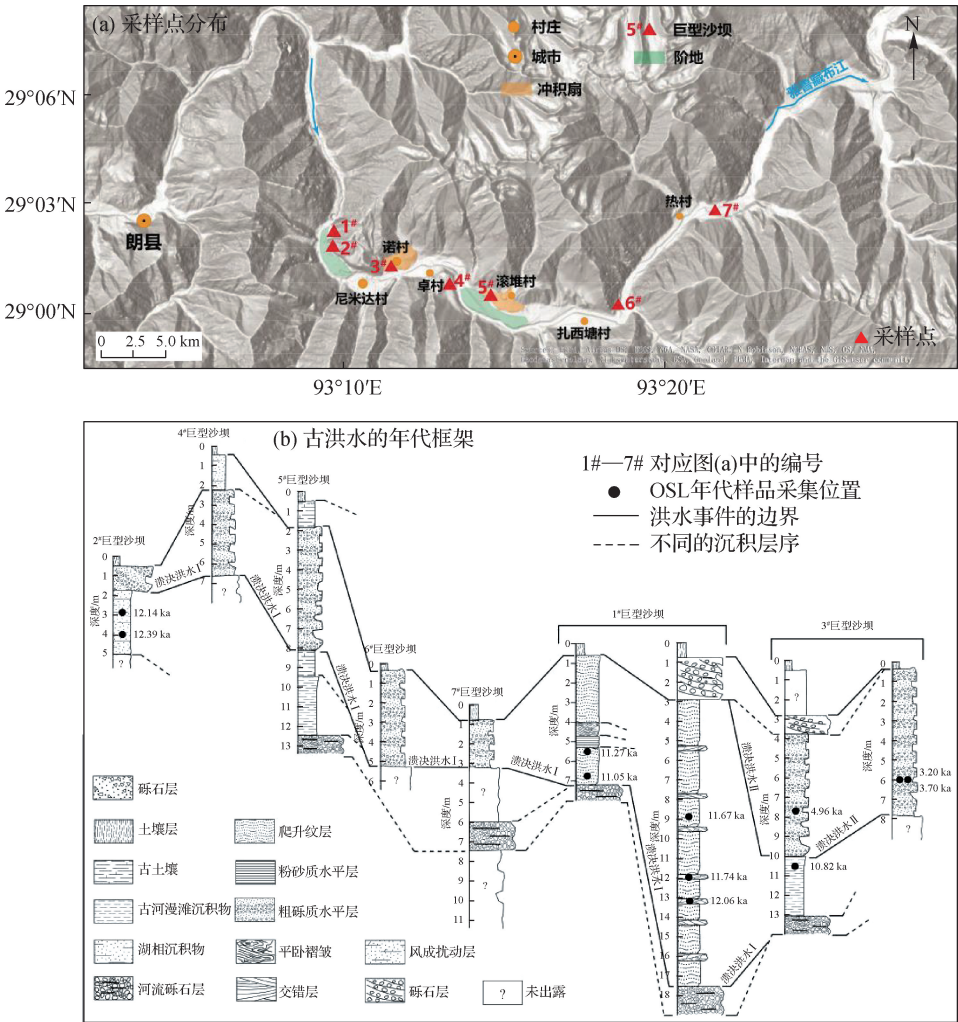


图2 雅鲁藏布江干流溃决古洪水的年代框架

Fig.2 Chronological sequence of outburst paleo-flood in the mainstream of Yarlung-Tsangpo River

3.3.3 源区主要河流的未来径流变化趋势

田富强课题组基于耦合冰雪过程的水文模型以及第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6), 分析了不同升温背景下青藏高原7条主要河流(黄河、长江、澜沧江、萨尔温江、雅鲁藏布江、恒河和印度河)的径流响应。结果表明: 未来气温上升1.5℃、2.0℃和3.0℃分别发生在2030 s、2050 s和2070 s, 在不同增温水

平下, 青藏高原主要河流径流对气候变化的响应具有非单调性, 除印度河以外, 其他河流的径流量在 1.5 °C 和 2.0 °C 升温水平下变化不显著(变化率为 -2.6% ~ 2.2%), 黄河、长江、雅鲁藏布江和恒河径流量预计在 3.0 °C 升温水平下将增加 8.7% ~ 11.3%, 对印度河来说不同的升温水平下径流预计增加 11.4% ~ 34.3%。组分分析显示降水量增加是黄河、长江、雅鲁藏布江和恒河径流增加的主要原因, 冰川融化是印度河径流增加的主要原因^[65]。

4 进展三: 河流全物质通量理论

聚焦重大研究计划第 2 个关键科学问题“径流变化下生源物质循环的变异规律”, 首次提出了河流全物质通量概念, 建立了全要素监测-检测方法体系, 揭示了高原河流生源物质循环及生物响应规律, 量化了澜沧江梯级水库运行的环境累积效应。

4.1 河流全物质通量理论

水沙及其负载的无机元素、天然有机物、新型有机污染物、微生物、藻类、底栖动物、鱼类等构成了河流物质谱系。在流域尺度上, 国内外相关研究多围绕河流主要物质与常规水质的监测、分析测试、物质间相互作用等方面的科学问题展开。由于河流系统中多种共存物质密切相关, 单一物质要素难以反映复杂的时空分布、相互作用及生物响应, 因而有必要从河流物质具有普遍联系的认识出发, 建立河流全要素同步监测-检测体系, 开展河流物质的时空分布规律、物质之间的相互作用机理研究, 通过全息地认识河流达到科学地保护河流、长久地利用河流的目的。

4.1.1 河流全物质通量概念

以水-沙作为载体的非生物(生源物质、无机元素、有机物等)与生物(微生物、藻类、底栖动物、鱼类等)的全谱系通量过程的整合研究, 对于认识高原河流物质运动及其相互作用机制具有重要意义。水沙是河流物质的重要组成部分, 是河流物质与能量输运转化的重要载体, 从根本上决定了河流水沙介质中物质的赋存形态。水沙变化将会导致负载的生源物质、无机元素、新型有机污染物等非生物物质状态的变化。在各类河流物质中, 营养元素是关键的生源物质, 传统上的八大离子及 Fe、Al、Cu、Zn 等常量与微量元素是河流水化学的重要组成部分。一方面, 在气候和下垫面变化及人类活动等的共同影响下, 能够伴随径流运动为河流生物群落多样性及河流生态系统的稳定性提供物质条件; 另一方面, 鱼类、底栖动物、浮游植物和浮游微生物等生物组成是河流生态系统健康的直观体现, 也能够一定程度上反映生境变化的影响。因此, 基于河流全物质通量概念考虑各类物质的合理时空配置与调控是实现流域可持续管理的重要基础。

4.1.2 河流全物质通量监测-检测方法

河流全物质通量研究要求各类物质的监测必须在时空上相互匹配。倪晋仁课题组近年来结合试点监测, 开发了大系统、全要素同步监测-检测体系, 探索了河流水体、悬浮物、沉积物、温室气体、底栖动物采样方法, 构建了无机元素、新型有机物(如抗生素、全氟化合物、PAHs 等)、同位素的分析测试方法, 以及微生物高通量测序方法、底栖动物快速分类鉴定方法以及相关生信统计分析方法等。例如, 在河流藻类研究方面, 传统形态学鉴定方法难以对尺寸较小的超微藻、纳藻、微藻等准确识别, 受主观因素影响大。倪晋仁课题组采用高通量测序方法, 建立了硅藻分子生物分析检测方法, 找到了硅藻分子生物鉴定所需的通用引物和最佳 PCR 条件。与传统形态学鉴定方法相比, 分子生物学的高通量测序方法找回了漏计的 97.5% Chao1 丰富度, 为精确分析大河硅藻群落结构及生源物质响应关系奠定了基础^[66]。

4.2 生源物质循环及生物响应规律

生源物质的浓度分布、组成及赋存形态受地表径流、大气沉降及人类活动等多方面的影响, 生源物质的转化过程与微生物、藻类及底栖动物的活动密不可分。借助高通量测序技术及显微观察技术获得的生物图

谱,能够深入研究高原河流微生物与底栖动物的特殊性及生物反应过程,对于探讨高原河流生源物质循环的作用过程及其对水环境演化的影响具有重要的意义。

4.2.1 生源物质来源解析

生源物质来源的精确解析对于揭示其生物地球化学过程极为重要。流域生源物质受自然及人类活动共同影响,夏星辉、李嘉、王根绪、王雨春、周孝德等课题组创新了物源解析分析方法,综合考虑了下垫面、不同介质的水化学过程及同位素分馏效应,阐明了生源物质的来源。以碳为例,王根绪课题组发现长江源DOC(溶解性有机碳)分别有55.3%和27.7%来自活动层和冻土层古老有机碳,仅有17%来自表土层新碳;DIC(溶解性无机碳)有高达38.5%来自古老无机碳,且青藏高原冻土流域老碳的输出通量远高于北极冻土流域,这与青藏高原夏季季风气候引起的水热同期现象有关^[67]。针对生源物质氮,水中 NO_3^- 的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值能够弥补 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素范围宽从而溯源不准确的不足,是研究大气源硝酸根含量的有效手段。夏星辉课题组基于高海拔地区降水的 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{atm}}$ 的系统观测数据,揭示了对流层 OH^- 、 O_2 的增加以及 O_3 的降低对大气 NO_3^- 生成路径的影响,同时发现青藏高原区域降水的 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{atm}}$ 平均值为16.4‰,小于低海拔降水中的值(19‰~30‰)^[68];在此基础上提出了 ^{15}N 、 ^{17}O 和 ^{18}O 3种同位素相结合的方法解析河水氮的来源,弥补了以往方法不能定量确定大气沉降贡献的缺陷,揭示了动物粪便是西南源区河水硝酸盐的主要来源之一(黄河源47%±10%,长江源33%),该结果与非高原河流存在显著差异。

4.2.2 微生物-生源物质相互作用机制

生源物质的迁移转化与生物作用联系密切。倪晋仁课题组基于微生物高通量数据库,绘制了完整的大河浮游与底栖细菌群落时空分布图谱,包括2124个和563个持续的细菌OTUs(分类操作单元),隶属于13个细菌门^[69]。基于图谱揭示了高原、山地、丘陵、盆地和平原地区的优势种群,探讨了河流氮转化的新途径,通过组装一步硝化菌基因组,发现了过去未曾报道的新菌,构建了河流硝化菌菌群系统发育树,并证实硝化菌在高原、山地和丘陵环境中具有偏好性^[70]。夏星辉课题组发现高海拔河流是甲烷释放的热点地区,其甲烷冒泡速率为11.9 mmol/(m²·d),是全球平均值的7倍,相当于 CO_2 释放速率的20%,其释放速率与海拔、气压、河流级别、SOC(沉积物有机碳)含量等密切相关^[71]。他们还发现源区氮循环微生物(AOA(氨氧化古菌)与AOB(氨氧化细菌))的群落结构具有明显高海拔河流特征,冷适应物种在AOB群落中比重较大(34%~50%),上覆水体中厌氧氨氧化细菌几乎全部以泥沙结合态的形式存在,悬浮泥沙促进了耦合硝化反硝化和厌氧氨氧化作用,突破了以往研究认为脱氮作用只发生在沉积相的传统认识^[72-73]。此外,张宝刚课题组研究了澜沧江小湾水库硫元素的生物地球化学过程及其生态环境效应;李轶课题组解析了长江源区河流底质氮循环关键微生物对氮转化的作用机制;陈娟课题组研究了澜沧江硅形态及硅藻、硅细菌的相互作用;吕喜玺课题组研究了黄河源区河流碳输移过程。这些研究都阐明了细菌作为关键分解者对生源物质循环的贡献^[74-76]。

4.2.3 硅藻-生源物质响应机制

王佳文等基于硅藻高通量数据库,绘制了大河浮游与底栖硅藻群落时空分布图谱,揭示了河流光合有效辐射(PAR)、河流坡度、营养水平等关键要素对硅藻群落时空格局影响的机制^[66]。例如,不同的浮游和底栖硅藻物种,适合在不同光强条件下生存:Caloneis、Cymbella、Fistulifera和Fragilaria属更喜欢极高的光强;Papiliocellulus属更喜欢中等光强;而Conticribra和Cyclotella喜欢较弱的光强。此外,在不同PAR条件下,生物标志物在空间上经历了从优势运动型硅藻物种向浮游型硅藻物种群落的显著演替;硅藻的光合作用和新陈代谢过程离不开生源物质的参与,研究发现浮游硅藻Shannon多样性与TN/TP有很好的相关性,解释了硅藻作为生源物质初级生产者的贡献。陈娟课题组发现澜沧江硅藻物种多样性在自然河段与梯级水库河段差异显著,扩散限制是浮游硅藻和底栖硅藻地理分布的主导驱动因子,弥补了大型河流硅藻地理生态分布的认知不足^[77]。

4.3 梯级水库的环境累积效应

生源物质的生物地球化学循环涉及到水、沉积物、大气等不同的介质,梯级水库的建设改变了水深、流速、底质类型与悬浮物含量,使河流“湖库化”,进而影响了生物的生存环境和生源物质的转化条件。传统梯级水库累积效应的研究多关注特定物质的形态及含量,基于全物质通量理论的研究则综合考虑了生源物质含量与形态、生物群落结构、沉积物组成等的耦合关系,并对比了自然河段、梯级水库河段及下游河段生源物质的特征差异,为面向生源物质健康循环的水库调度技术提供了参考。

4.3.1 梯级水库对生源物质的拦截效应

陈求稳、王雨春、刘德富等课题组揭示了梯级水库对生源物质的拦截效应,体现在:较大程度拦截了入库的颗粒态有机碳、颗粒态磷和氮,对总氮和总磷的截留率达到 20%~95%^[78]。但是,水库强化了碳、氮、磷的形态转化,尤其加强了沉积物有机氮、磷向生物可利用氮、磷的转化以及泥沙矿物成分的结构。

4.3.2 梯级水库对微生物群落的抑制效应

陈求稳、王沛芳、刘德富、周孝德等课题组基于微生物高通量数据库揭示了自然河段与梯级水库河段中微生物群落结构的显著差异性,自然河段比水库河段有更多的浮游细菌种类,且群落多样性丰富,微生物生态系统更稳定,而水库河段比自然河段具有更稳定的沉积物微生物生态系统^[79-82]。河流尺度上,沿程水温梯度是导致细菌群落空间差异的关键因子;水库尺度上,由于异重流的作用,库内浮游细菌的垂直分布无明显分层^[79]。此外,李轶课题组分别从纵向(河流区—过渡区—湖相区)和垂向(湖上层—变温层—深水层)综述了河流—水库系统中的氮转化过程及关键影响因素,提出了多营养级微生物及其相互作用在氮转化过程中的直接(如同化、反硝化)和间接(如捕食、排泄、生物扰动)作用^[83]。

4.3.3 梯级水库累积效应的生态响应

梯级水库对沉积物组成影响显著且差异化明显。例如,刘德富课题组发现澜沧江梯级水库对白云石、黄铁矿有显著的拦截作用,且出境断面无恢复,但其他矿物成分均恢复到接近自然河道水平^[84];水库沉积有机质与沿程矿物质的联合作用促进了沉积物磷-铁耦合循环,导致沉积物磷主要形态从钙磷向生物有效磷(Fe-P 和 Org-P)转变(沉积物活性磷是自然河道的 2~4 倍),梯级水库内磷呈现“滞留—活化—输送”机制,在温度梯度的共同作用下,藻类呈现硅藻—绿藻—蓝绿藻的演替,指出梯级水库富营养化的生态风险^[85-87]。

4.3.4 梯级水库累积效应对河流温室气体减排的作用机制

陈求稳课题组发现澜沧江梯级水库建设促进了温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的排放,然而其释放通量显著低于世界其他水库水平。首级水库是 CH_4 和 CO_2 的释放热点(比下游库区分别高 13.1 倍、1.7 倍),且 CH_4/CO_2 比值最高,具有较高的增温潜能^[20]; N_2O 释放通量沿水流方向呈现递增趋势,该递增并非由于梯级水库所致,而是由于沿程人类活动加剧导致氮素输入增加以及沿程水温上升共同作用所致^[21]。梯级水库运行增强了潜流带与水库之间侧向潜流交换,在潜流路径上产生了氧化还原梯度,调控了产甲烷菌与甲烷氧化菌等功能微生物群落结构,洲滩边缘在抑制甲烷产生的同时促进了甲烷消耗,降低了甲烷温室气体释放通量,实现了水陆交错带甲烷的自削减^[88],且高 CH_4 释放区仅占洲滩总面积的 0.2%^[89]。同时,大坝的建设与运行改变了碳酸盐平衡,促进光化学合成以及 CO_2 的消耗,显著降低温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的排放通量和入海通量^[20,90],该结果揭示了以发电为首要目标的水库同时具备脱碳、脱氮和温室气体自削减等正面环境效应。

5 进展四:梯级水库适应性利用技术

聚焦重大研究计划第 3 个关键科学问题“基于多目标互馈的径流适应性利用”,发展了多目标互馈系统理论,从水量、水能、水质 3 个方面创新了梯级水库适应性利用技术,为西南水电消纳、澜沧江-湄公河水资源合作等重大需求提供了理论和技术支撑。

5.1 水-风-光等清洁能源联合调度技术

根据国家宏观规划,能源结构调整是国家能源战略的核心。目前,中国清洁能源装机比例占35%,但消费比例仅占12%,如何增加清洁能源消纳是关键。以云南省为例,小水电、风、电、光电等间歇性电源较多,传统的调控方式下,风电、光电、水电等清洁能源各自参与电网调度,缺乏能源系统的整体性优化,发电过程不稳定;特别是小水电,由于其调节能力较差,在汛期集中发电,挤占送电通道,影响其他清洁能源消纳。重大研究计划突破了传统调度方式的边界,开展跨区域、多元电力大系统联合调度,充分利用调节性能强的梯级水电站群与其他能源进行互补,有效解决清洁能源消纳难题。

5.1.1 水-风-光多种清洁能源互补调度技术

覃晖课题组基于高斯混合回归、变分贝叶斯深度学习等模型,提出了径流、太阳辐射、风速的预测方法^[91-92]。畅建霞课题组提出了一种将模拟和优化模型相结合的方法,建立了考虑梯级水库联合调度的最优自适应调度规则^[93]。陈晓宏课题组评估了西南梯级水电基地在未来气候变化下的发电潜力和可持续性的变化^[94]。以上研究对水-风-光不同能源特点进行分析,并预测能源的未来变化趋势,为西南源区开展能源互补调度研究提供了有力支撑。在此基础上,杨洪明课题组基于西南河流源区水-风-光数据以及云南、西藏电网数据,借助高级量测体系(AMI)数据分析方法,确定了流域水-风-光发电资源在不同时间尺度下断面来水量、风速、光照等因素的累积概率分布,并基于数据包络分析的模糊综合评价方法,确定适合水-风-光互补开发的区域以及可再生能源的最大消纳量^[95-96]。进一步考虑水-风-光-荷的时空耦合、水电机组调控能力以及并网接入特性,以风光最大消纳、水库弃水量最小为目标,提出了水-风-光-荷互补的电力系统多目标优化调度模型^[97]。程春田课题组在大水电与其他清洁能源互补调度方面,针对大规模风电并网消纳困难的现状,提出了基于厂网协调机制的风电-抽水蓄能跨区域打捆送电模式及联合调度策略,能够有效抑制风电的出力波动,显著提高风电-抽蓄电站联合体的发电收益^[98];针对云南电网小水电消纳问题^[99],提出大、小水电联合优化调度模型,充分利用调节能力较大的水电站在非汛期增发电量对小水电进行补偿,增加小水电消纳量^[100]。彭勇课题组针对水电站“窝电弃能”的问题,建立了水电站的制氢调度图和制氢规模、水电站发电制氢双目标2阶段协调控制优化对冲模型,提出通过利用水电制氢储能的方式来实现水电消纳。

5.1.2 水-风-光复杂电力系统降维求解技术

在水电系统的优化求解方面,武新宇课题组针对多个局部最优解限制水库调度求解精度的问题,提出了梯级水电站优化调度的多点寻优随机动态规划方法,有效规避了多个局部最优解造成的决策曲面突变问题,同时节省了计算时间^[101]。覃晖课题组还提出一种基于区域搜索策略的进化算法来处理不同类型的基准问题,在不丧失收敛性的前提下提高种群的多样性,以解决电力系统多目标调度的区域搜索问题^[102]。同时,周建中、覃晖课题组提出了考虑参数和径流不确定性的贝叶斯深度学习方法,综合考虑当前水库运行情况与未来径流变化,提取了多目标水库优化调度规则^[103]。

将风、光纳入考虑后构建水-风-光联合调度系统,由于涉及范围广、涵盖电站多,且风、光出力具有较大不确定性,水-风-光联合调度是一个高维的随机优化问题,降维求解是关键问题。程春田课题组针对水电系统,从工程实际出发,提出了精简优化可行域以缩减优化求解范围的方法(图3),采用时间维广度优先迭代搜索的优化思路,并在搜索中根据调度问题的时间尺度、水库调节性能、调度要求的特点降低参与计算的电站数目,并提出正交状态保留策略以减少优化迭代过程中的决策变量和状态数目,将优化空间进一步大幅度缩减^[104],通过多种优化技术组合应用,能够大幅削减传统算法的内存占用与寻优空间,使系统时空计算复杂度从指数级简化到二次和线性级,切实保证超大规模水电系统调度问题的高效求解^[105]。

5.1.3 面向电力市场的水电中长期交易与竞价技术

在实现清洁能源消纳的同时,如何保障各电力系统(水、风、光)的利益平衡与共享是联合调度的另一难点,亟需市场调节手段。云南电力市场化改革经过近几年持续建设和完善,已经形成了“中长期交易为主,日

前交易为辅”的市场结构。在此背景下，电网公司如何设计合理的竞价上网政策、水电企业如何参与竞价交易是关键问题。对此，杨洪明课题组以全流域梯级水电站参与现货市场以及跨区域合约市场交易综合效益最大为目标，考虑交易价格波动和跨区域交易阻塞的不确定性，构建中长期交易月度决策模型，设计了兼顾水利部门规定、水电企业效益和电网公司的电力市场交易策略^[106]。针对水电企业的交易计划制定难题，在电力市场及径流的双重不确定影响下，程春田课题组提出了水电参与中长期竞价关键技术，量化了当前电力市场条件下的月度、日前市场风险组合关系，研发了交易计划出清算法、水电站月交易计划分解等模型，给出了水电参与中长期竞价决策方式^[107]，为发电企业、交易监管部门提供了快速制定交易计划的工具手段。

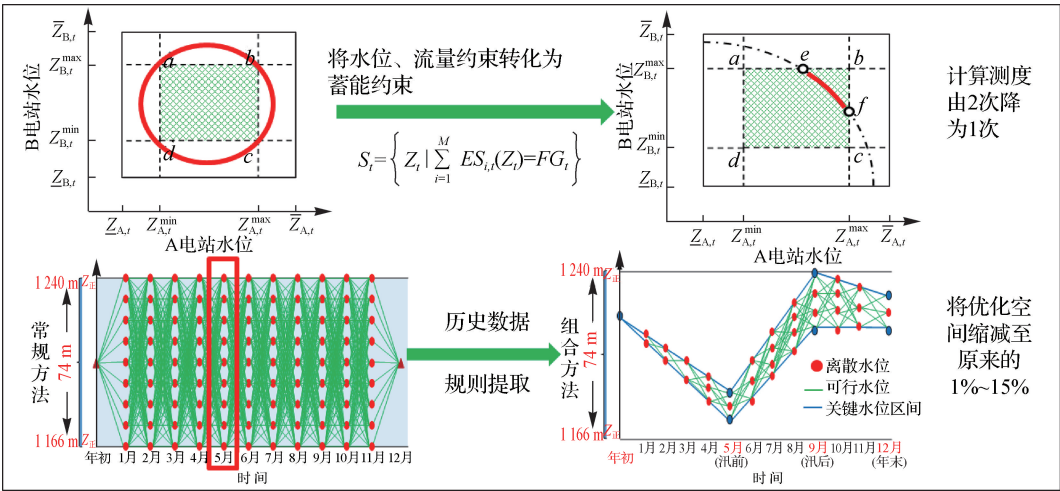


图3 精简优化可行域以缩减优化求解范围的方法示意

Fig.3 Schematic diagram of the optimization method to reduce solution space

5.2 西南河流源区水库生态调度技术

生态环境健康是径流开发利用中的关键目标之一，随着澜沧江流域梯级水电开发，环境条件发生显著变化，亟需研发平衡水电与环境的生态调度方法。生态环境目标的选择和量化是水库生态调度面临的关键问题。传统调度方法往往以水文、水力及生物等因素作为表征水库生态环境的目标，而对于生源物质输移考虑较少；该区域的监测数据表明，部分水电强干扰河段的氮沿程累积量达到自然河段氮含量的3倍，磷的滞留率高达40%，氮磷比严重失调，由自然状态下的16:1改变为70:1，营养盐的组成已远偏离自然状态。因此，营养盐的迁移转化同样是不可忽略的生态环境目标。重大研究计划在河流全物质通量科学认知的基础上，将地球化学领域的生源物质循环理论与水库调度模型相结合，发展了面向生源物质的调度方法。

5.2.1 西南河流源区水库生态调度技术研究进展

河流的水文情势、水动力条件或水生及陆生生物的生长情况等是表征水库生态环境的重要指标。畅建霞课题组探讨了澜沧江下游梯级水库建设对水文生态条件和自然灾害风险的影响，表明上游地区的水文生态指标对大坝建设的响应较敏感^[108]。刘丙军课题组进一步考虑水沙与径流关系，探讨了澜沧江-湄公河流域泥沙负荷对水文变化的响应，分析了年降水量、径流、峰值流量、低流量、最大水位和泥沙负荷的变化趋势，发现径流对泥沙负荷变化影响最大^[109]。在此基础上，尹心安课题组针对水库建设后鱼类的洄游问题进行研究，通过模拟大型水库的水动力和温度条件，探究鱼类迁徙适宜的流量和温度条件^[110]。覃晖课题组探讨了水温、流速和水深对鱼类生境适宜性的综合影响，并给出了相应的流量阈值，认为当水库入库流量大于60 m³/s、出库流量大于100 m³/s时，草鱼产卵的生态流量满足基本需求；当水库出库流量为120 m³/s时，生境生态适宜性最好^[111]。

5.2.2 考虑生源物质输移的水库生态调度技术

生源物质处于连接水文、水力条件和生物作用的关键环节,生源物质的通量变化、形态组分转化更是库区水质变化的重要原因。将生源物质的输移转化作为生态环境核心目标,建立其与水沙条件、水温、水力滞时、水位波动频率等可调度指标的对应关系,可以弥补传统生态目标(生态水文指标等)无法体现生态环境营养盐形态组分转变的缺陷,实现水库生态调度指标体系由“水量”到“水质”的拓展。张弛课题组以磷为例,探究了澜沧江梯级水电建设运行对磷输移的影响,结果表明:天然情况下,河道每年平均约有1.42万t总磷流出境断面,约占下游湄公河三角洲入海通量的4.2%;建设水库后,大约有50%~59%的总磷会被拦截在梯级水库中,与已建成的水库相比,正在建设和等待建设许可的水库不会进一步加剧总磷的滞留^[112]。在此基础上,进一步揭示了梯级水库对总磷拦截的空间分布规律,确定了水库位置和水库库容特性是决定各梯级水库环境累积效应的重要控制因素。对于澜沧江梯级水电站而言,小湾、糯扎渡的年调节特征导致其水力滞留时间长,拦截率高;水库位置(区域特征)影响了区间汇入的总磷负荷量级与状态,功果桥水库位于梯级电站龙头位置,总磷负荷大部分为未经沉积的颗粒态磷,其总磷拦截率远大于其他水库^[113-114]。之后,在传统发电量最大、发电保证率最高的调度目标基础上,加入生源物质调控目标,构建了水库发电-总磷输出双目标生态优化调度模型,揭示了发电与排磷之间的竞争关系,并据此提出了缓解水库磷滞留的水库生态调度方案,给出了该方法与考虑水文情势变化生态调度方法的适用条件^[115]。

5.3 多利益主体合作博弈的跨境水资源调度技术

跨境水资源调度和利益分配是国际河流的研究焦点。以西南河流域源区的澜沧江-湄公河为例,目前的跨境合作方式以保证澜沧江最小出境流量($504\text{ m}^3/\text{s}$)和应急补水为主(2016年湄公河大旱,中国向下游应急补水)。然而,这种应急合作机制往往以降低中方水库发电效益为代价,国际舆论与相关研究缺乏对此方面的客观评价。在中国“一带一路”新外交战略的背景下,澜沧江-湄公河命运共同体建设对航运等级、下游灌溉需求、能源基础设施互联互通都提出新的要求。以往研究缺乏对跨境河流利用中各国家利益分配机制的深入分析,无法为跨境水资源的合理分配提供支撑。为此,重大研究计划在满足国内发电目标、环境可持续要求的基础上,发展了多利益主体合作博弈的跨境水资源调度技术,为澜沧江-湄公河水资源合作提供支撑。

5.3.1 跨境河流多利益主体合作博弈模型

唐加福与方德斌课题组针对跨境水资源开发利用中的博弈问题,系统考虑了澜沧江-湄公河跨境流域达成水资源分配合作的关键时空约束特征(地理区位和季节需求)和各方最大的利益冲突点(农业用水需求),提出不同水文条件下跨境水资源合作利用的梯级水库系统效应的解析方法,构建了耦合水文-水库调度-水资源利用-经济效益分析-合作博弈的流域国家间多利益主体博弈演化模型^[116],分析了水库调度、水文条件、利益共享机制对澜沧江-湄公河流域国家间多主体合作博弈与径流适应性利用的影响,评估了各国的合作收益,分析了合作联盟形成的条件和稳定性^[117]。陈晓宏课题组利用数学表达量化了澜沧江流域来水-发电-生态-航运-出境水互馈博弈纳什均衡关系,并给出基于该关系的最优策略^[118];在此基础上,考虑变化环境下流域需水不确定性增加,改进了传统水资源配置方法,提出了“假设-模拟-反馈-调整”回路的水资源实时反馈校正优化配置模式,以提高跨境水资源综合利用率^[119-120]。同时,黄涛珍课题组采用复杂网络演化博弈理论,描述多个博弈主体之间的博弈演化关系和演化情景,分析不同情境下的博弈均衡结果和均衡转换条件,提出了合作博弈的基本条件和主要模式,设计了各利益主体共赢的合作机制^[121]。

5.3.2 跨境河流水资源调度技术

基于上述博弈模型,耦合梯级水库的调度,唐加福课题组证明了中国作为上游国家运用水库群等季节性调节措施,在枯水季节为下游东南亚国家让渡部分水资源权益,能够实现整个流域的用水效益最大化,确定了考虑全流域收益最大的梯级水库调度方案^[117]。周惠成课题组提出了梯级水电站在满足保证出力以及调度期末水位约束下的合作补水极限阈值推求方法,建立了应急补水条件下的梯级水电站优化调度模型,采用

“协同-独立”联合优化法求解得到了梯级水电站补水量与发电损失的定量关系^[122]。赵建世课题组定量阐明了不同来水条件下的合作收益情况,干旱年份合作增量收益更大,且干旱程度越高跨界合作产生的系统增量效益越大,其中枯水年合作的增量收益是丰水年的 2 倍以上;虽然 Shapley、Nucleolus 以及 Nash-Harsanyi 等不同利益分配方法导致各利益相关者的合作收益有所差异,但跨境的全流域大合作模式仍是最佳选择^[123-124]。

6 学术影响与成果应用

重大研究计划实施以来,取得了大量的成果。截至 2019 年 9 月,发表重要国际期刊论文 1 009 篇;申请国家发明专利 169 件,授权 87 件;申请国际发明专利 8 件,授权 2 件;制定国家标准 1 部;取得软件著作权 37 件;实现成果转化 3 项;获国家科技进步二等奖 2 项、国家科技进步奖创新团队 1 个,获省部级自然科学一等奖 4 项、省部级科技进步一等奖 8 项;培养国家自然科学基金委创新研究团体带头人 1 人,杰出青年基金项目获得者 4 人,教育部长江学者 3 人,万人计划人才 4 人,优秀青年、青年长江学者、青年拔尖人才获得者共 7 人,美国地球物理联合会 AGU 会士 2 人,博士后和研究生 1 190 余人。

重大研究计划提升了中国学者的国际学术影响,并有力支撑了多项国家重大需求:相关研究成果得到国际重要学术期刊(包括 *Nature*, *Nature Climate Change* 等)的引用和重要媒体(包括 NatureAsia 网,《光明日报》等)的广泛报道,多位学者获得国内外重要科研奖励和重要学术兼职,增强了中国在第三极水领域的话语权;“河流全物质通量”形成了一个新的多学科交叉研究方向,创办了相关的系列国际学术会议,引领国际大河生源物质循环规律研究前沿;相关成果为云南电网水电消纳、电力市场改革、2016 年越南应急补水、2018 年加拉堰塞湖应急除险等工作提供了重要科技支撑;在西南源区增加监测试验点约 39%,填补了多个区域的监测和数据空白,部分监测设备和技术应用于国家第二次青藏高原综合科学考察研究、西藏冰川和冰湖变化监测调查与综合评估等重大科研工作。

7 总结与集成研究布局

“西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划实施以来,构建了西南河流源区多水文要素的天空地一体化监测体系,围绕径流变化机理、生源物质循环变异规律和径流适应性利用 3 个科学问题取得了重要进展,推动了高原寒区水文、水环境、水资源领域的理论技术发展,相关成果为中国西南径流利用中的水利水电规划和外交等国家重大需求提供了重要的科技支撑,提升了中国在第三极水领域的话语权,产生了重要的国际影响。

根据重大研究计划所取得的重要进展、国际调研获得的最新发展趋势以及国家重大需求,聚焦 3 个关键科学问题设立 5 个方面的集成项目:

(1) 西南河流源区水文-环境监测体系及数据集成平台。构建源区天空地一体化监测体系,建立水文-环境主题数据集,研发多源多尺度数据管理与可视化平台,分析源区水文、环境和社会经济要素的时空变化特征和相互影响关系。

(2) 西南河流源区空-地水资源联合调控理论与技术研究。揭示空中水资源转化机理、空-地水循环过程耦合机理,评估空中水汽可资源化潜力,提出空-地水资源联合利用及调控模式,建立系统、高效、经济、环保的人工影响天气新技术及可信度评估技术。

(3) 西南河流源区径流变化机理和未来趋势。揭示高寒区土壤、冰雪、植被等关键地表要素对气候变化的协同响应特征,以及水文过程对地表变化的响应机制,阐明源区径流和洪水的演变规律和未来趋势。

(4) 西南河流源区全物质通量与梯级开发下的累积效应。构建高原河流系统全要素同步监测-检测范式,揭示源区主要河流水沙及其负载的全要素时空分布格局,阐明生源物质时空演变的微生物地理学驱动机制,

揭示梯级水库开发对河流生源物质循环的累积作用及河流生态系统健康的临界响应。

(5) 西南河流径流适应性利用与调控。构建基于供水-发电-环境互馈关系的径流开发利用方法体系,定量辨识西南源区河流多目标开发利用的区域影响,服务于澜沧江梯级水电调度、澜沧江-湄公河合作机制、雅鲁藏布江规划等国家重大需求。

参考文献:

- [1] IMMERZEEL W W, PELLICCIOTTI F, BIERKENS M F P. Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(9): 742-745.
- [2] 徐冉. 雅鲁藏布江径流形成和演变规律的模型解析研究[D]. 北京: 清华大学, 2019. (XU R. Modeling study on runoff in Yarlung Tsangpo River basin[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019. (in Chinese))
- [3] LUTZ A F, IMMERZEEL W W, SHRESTHA A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 587-592.
- [4] 郑度, 赵东升. 青藏高原的自然环境特征[J]. *科技导报*, 2017, 35(6): 13-22. (ZHENG D, ZHAO D S. Characteristics of natural environment of the Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(6): 13-22. (in Chinese))
- [5] YAO T D, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [6] JACOB T, WAHR J, PFEFFER W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise[J]. *Nature*, 2012, 482(7386): 514-518.
- [7] WANG Y, WANG L, ZHOU J, et al. Vanishing glaciers at southeast Tibetan Plateau have not offset the declining runoff at Yarlung Zangbo[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(21): e2021GL094651.
- [8] WANG F S, YU Y X, LIU C Q, et al. Dissolved silicate retention and transport in cascade reservoirs in Karst area, Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(7): 1667-1675.
- [9] FRIEDL G, WÜEST A. Disrupting biogeochemical cycles- consequences of damming[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(1): 55-65.
- [10] STRAŠKRABA M, TUNDISI J G, DUNCAN A. Comparative reservoir limnology and water quality management[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [11] MCKINNEY D, CAI X L, ROSEGRANT M, et al. Modeling water resources management at the basin level: review and future directions[M]. Colombo: IWMI Books, International Water Management Institution, 1999.
- [12] GIACOMONI M H, BERGLUND E Z. Complex adaptive modeling framework for evaluating adaptive demand management for urban water resources sustainability[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(11): 04015024.
- [13] MAESTRE J M, RIDAO M A, KOZMA A, et al. A comparison of distributed MPC schemes on a hydro-power plant benchmark[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2015, 36(3): 306-332.
- [14] LIAO M H, LIAO A M, LIU J F, et al. A novel method and system for the fast calibration of tipping bucket rain gauges[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 125782.
- [15] 廖爱民, 刘九夫, 张建云, 等. 实验小流域尺度下高精度水位计的比测分析[J]. *水科学进展*, 2019, 30(3): 337-347. (LIAO A M, LIU J F, ZHANG J Y, et al. Intercomparison of high-accuracy water level gauges in the scale of small experimental catchment[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(3): 337-347. (in Chinese))
- [16] 李薛刚, 刘九夫, 廖爱民, 等. 八种国内翻斗式雨量计翻斗计量误差测评分析[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(6): 160-163, 79. (LI X G, LIU J F, LIAO A M, et al. Evaluation of measurement errors for eight domestic tipping bucket rain gauges[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(6): 160-163, 79. (in Chinese))
- [17] 廖敏涵, 刘九夫, 廖爱民, 等. 三种 JDZ 型翻斗式雨量计性能比对实验研究[J]. *水文*, 2020, 40(1): 29-34. (LIAO M H, LIU J F, LIAO A M, et al. Experimental comparison between three types of JDZ tipping bucket rain gauges[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(1): 29-34. (in Chinese))
- [18] 蔡钊, 刘九夫, 李薛刚, 等. 风场对雨量计收集降水影响的流体动力学研究[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(6): 17-23. (CAI Z, LIU J F, LI X G, et al. CFD simulation of wind field impact on gauge precipitation[J]. *Advances in Science and*

- Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 17-23. (in Chinese))
- [19] 廖敏涵, 刘九夫, 廖爱民, 等. 翻斗式雨量计翻斗旋转时间特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 119-126. (LIAO M H, LIU J F, LIAO A M, et al. Analysis of tipping time characteristics of tipping bucket rain gauge[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 119-126. (in Chinese))
 - [20] SHI W Q, CHEN Q W, YI Q T, et al. Carbon emission from cascade reservoirs: spatial heterogeneity and mechanisms[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(21): 12175-12181.
 - [21] SHI W Q, CHEN Q W, ZHANG J Y, et al. Nitrous oxide emissions from cascade hydropower reservoirs in the Upper Mekong River[J]. Water Research, 2020, 173: 115582.
 - [22] HUANG Q, LONG D, DU M D, et al. An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 211: 112-128.
 - [23] HUANG Q, LONG D, DU M D, et al. Discharge estimation in high-mountain regions with improved methods using multisource remote sensing: a case study of the Upper Brahmaputra River[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 219: 115-134.
 - [24] CHEN X, LONG D, HONG Y, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: how snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin? [J]. Water Resources Research, 2017, 53(3): 2431-2466.
 - [25] WANG G Q, ZHONG D Y, LI T J, et al. Study on sky rivers: concept, theory, and implications[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2018, 21: 109-117.
 - [26] 李家叶, 李铁键, 王光谦, 等. 空中水资源及其降水转化分析[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2785-2796. (LI J Y, LI T J, WANG G Q, et al. Atmospheric water resource and precipitation conversion[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(26): 2785-2796. (in Chinese))
 - [27] ZHANG Y, HUANG W Y, ZHONG D Y. Major moisture pathways and their importance to rainy season precipitation over the Sanjiangyuan region of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 2019, 32(20): 6837-6857.
 - [28] CAO H, LI F F, ZHAO X, et al. Micro-droplet deposition and growth on a glass slide driven by acoustic agglomeration[J]. Experiments in Fluids, 2021, 62(6): 1-17.
 - [29] QIU J, TANG L J, CHENG L, et al. Interaction between strong sound waves and cloud droplets: cloud chamber experiment[J]. Applied Acoustics, 2021, 176: 107891.
 - [30] LI F F, JIA Y H, WANG G Q, et al. Mechanism of cloud droplet motion under sound wave actions[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020, 37(9): 1539-1550.
 - [31] JIA Y H, LI F F, FANG K, et al. Interaction between strong sound waves and cloud droplets: theoretical analysis[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2021, 60(10): 1373-1386.
 - [32] WEI J H, QIU J, LI T J, et al. Cloud and precipitation interference by strong low-frequency sound wave[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(2): 261-272.
 - [33] 裘钧, 路后亮, 赵智丰, 等. 基于降雨时间结构分析的黄河源区声波增雨外场试验效果评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 691-702. (QIU J, LU H L, ZHAO Z F, et al. Evaluation the effect of acoustic raining field experiments in the Source region of the Yellow River based on the analysis of the time structure of rain[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 691-702. (in Chinese))
 - [34] SHENG Y, MA S, CAO W, et al. Spatiotemporal changes of permafrost in the Headwater Area of the Yellow River under a changing climate[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(1): 133-152.
 - [35] MENG F C, SU F G, LI Y, et al. Changes in terrestrial water storage during 2003—2014 and possible causes in Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(6): 2909-2931.
 - [36] LONG D, CHEN X, SCANLON B R, et al. Have GRACE satellites overestimated groundwater depletion in the Northwest India Aquifer? [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24398.
 - [37] CHEN F, YUAN Y J, FAN Z X, et al. A winter precipitation reconstruction (CE 1810—2012) in the Southeastern Tibetan Plateau and its relationship to Salween River streamflow variations[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018, 175(6): 2279-2291.
 - [38] WANG H Q, CHEN F. Increased stream flow in the Nu River (Salween) basin of China, due to climatic warming and increased precipitation[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 2017, 99(4): 327-337.

- [39] 董国强, 翁白莎, 严登华, 等. 怒江源区那曲流域夏季降水与河水稳定同位素特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 15-20, 24. (DONG G Q, WENG B S, YAN D H, et al. Variation characteristics of stable isotopes in summer precipitation and river water in Naqu River basin, Tibetan Plateau[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 15-20, 24. (in Chinese))
- [40] KONG Y L, WANG K, PU T, et al. Nonmonsoon precipitation dominates groundwater recharge beneath a monsoon-affected glacier in Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(20): 10913-10930.
- [41] LI Z J, LI Z X, SONG L L, et al. Hydrological and runoff formation processes based on isotope tracing during ablation period in the source regions of Yangtze River[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(8): 4169-4187.
- [42] ZHAO T, LIU W J, XU Z F, et al. The influence of carbonate precipitation on riverine magnesium isotope signals: new constraints from Jinsha River basin, Southeast Tibetan Plateau[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019, 248: 172-184.
- [43] TAN H B, CHEN X, SHI D P, et al. Base flow in the Yarlungzangbo River, Tibet, maintained by the isotopically-depleted precipitation and groundwater discharge[J]. Sci Total Environ, 2020, 759: 143510.
- [44] WANG Q Q, ZHANG X L, WANG X J, et al. Quantification of the water age and submarine groundwater discharge in a typical semi-enclosed bay using stable oxygen (^{18}O) and radioactive radium (^{228}Ra) isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127088.
- [45] ZHANG X L, LUO X, JIAO J J, et al. Hydrogeochemistry and fractionation of boron isotopes in the inter-dune aquifer system of Badain Jaran Desert, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125984.
- [46] LUO X, KUANG X X, JIAO J J, et al. Evaluation of lacustrine groundwater discharge, hydrologic partitioning, and nutrient budgets in a proglacial lake in the Qinghai-Tibet Plateau: using ^{222}Rn and stable isotopes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(10): 5579-5598.
- [47] 田富强, 徐冉, 南熠, 等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 324-336. (TIAN F Q, XU R, NAN Y, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 324-336. (in Chinese))
- [48] HUGONNET R, MCNABB R, BERTHIER E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. Nature, 2021, 592(7856): 726-731.
- [49] LI Z X, FENG Q, LI Z J, et al. Climate background, fact and hydrological effect of multiphase water transformation in cold regions of the Western China: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 33-57.
- [50] DING B H, YANG K, YANG W, et al. Development of a water and enthalpy budget-based glacier mass balance model (web-gm) and its preliminary validation[J]. Water Resources Research, 2017, 53(4): 3146-3178.
- [51] ZHU M L, YAO T D, YANG W, et al. Differences in mass balance behavior for three glaciers from different climatic regions on the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(9/10): 3457-3484.
- [52] WANG G X, MAO T X, CHANG J, et al. Processes of runoff generation operating during the spring and autumn seasons in a permafrost catchment on semi-arid plateaus[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 307-317.
- [53] YANG Y, HOPPING K A, WANG G X, et al. Permafrost and drought regulate vulnerability of Tibetan Plateau grasslands to warming[J]. Ecosphere, 2018, 9(5): e02233.
- [54] HUANG K W, DAI J C, WANG G X, et al. The impact of land surface temperatures on suprapermafrost groundwater on the central Qinghai-Tibet Plateau[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6): 1475-1488.
- [55] LI X Y, LIU L, LI H, et al. Spatiotemporal soil moisture variations associated with hydro-meteorological factors over the Yarlung Zangbo River basin in Southeast Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(1): 188-206.
- [56] LIU J T, HAN X L, CHEN X, et al. Prediction of soil thicknesses in a headwater hillslope with constrained sampling data[J]. CATENA, 2019, 177: 101-113.
- [57] HAN X L, LIU J T, MITRA S, et al. Selection of optimal scales for soil depth prediction on headwater hillslopes: a modeling approach[J]. CATENA, 2018, 163: 257-275.
- [58] NAN Y, TIAN L D, HE Z H, et al. The value of water isotope data on improving process understanding in a glacierized catchment on the Tibetan Plateau[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(6): 3653-3673.
- [59] YAO Y Y, ZHENG C M, ANDREWS C B, et al. Role of groundwater in sustaining Northern Himalayan rivers[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(10): e2020GL092354.

- [60] CHEN J C, KUANG X X, LANCIA M, et al. Analysis of the groundwater flow system in a high-altitude headwater region under rapid climate warming: Lhasa River basin, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 36: 100871.
- [61] HE Q, KUANG X, CHEN J, et al. Subglacial meltwater recharge in the Dongkemadi River basin, Yangtze River source region [J]. *Groundwater*, 2022, 60(3): 434-450.
- [62] 李浩, 牛乾坤, 王宣宣, 等. 1961—2015 年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 110-115. (LI H, NIU Q K, WANG X X, et al. Variation characteristics of runoff in the Yarlungzangbo River basin from 1961 to 2015[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 110-115. (in Chinese))
- [63] XIN J L, SUN X Y, LIU L, et al. Quantifying the contribution of climate and underlying surface changes to alpine runoff alterations associated with glacier melting[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(3): e14069.
- [64] XI Y, MIAO C Y, WU J W, et al. Spatiotemporal changes in extreme temperature and precipitation events in the three-rivers headwater region, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(11): 5827-5844.
- [65] XU R, HU H, TIAN F, et al. Projected climate change impacts on future streamflow of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 175: 144-159.
- [66] WANG J W, LIU Q X, ZHAO X F, et al. Molecular biogeography of planktonic and benthic diatoms in the Yangtze River[J]. *Microbiome*, 2019, 7(1): 153.
- [67] SONG C L, WANG G X, HAGHIPOUR N, et al. Warming and monsoonal climate lead to large export of millennial-aged carbon from permafrost catchments of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(7): 074012.
- [68] XIA X H, LI S L, WANG F, et al. Triple oxygen isotopic evidence for atmospheric nitrate and its application in source identification for river systems in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 270-280.
- [69] LIU T, ZHANG A N, WANG J W, et al. Integrated biogeography of planktonic and sedimentary bacterial communities in the Yangtze River[J]. *Microbiome*, 2018, 6(1): 16.
- [70] LIU S F, WANG H Y, CHEN L M, et al. Comammox nitrospira within the Yangtze River continuum: community, biogeography, and ecological drivers[J]. *The ISME Journal*, 2020, 14(10): 2488-2504.
- [71] ZHANG L W, XIA X H, LIU S D, et al. Significant methane ebullition from alpine permafrost rivers on the East Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(5): 349-354.
- [72] ZHANG S B, XIA X H, LI S L, et al. Ammonia oxidizers in high-elevation rivers of the Qinghai-Tibet plateau display distinctive distribution patterns[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(22): e01701-e01719.
- [73] ZHANG S B, QIN W, XIA X H, et al. Ammonia oxidizers in river sediments of the Qinghai-Tibet Plateau and their adaptations to high-elevation conditions[J]. *Water Research*, 2020, 173: 115589.
- [74] XIA X H, JIA Z M, LIU T, et al. Coupled nitrification-denitrification caused by suspended sediment (SPS) in rivers: importance of SPS size and composition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 212-221.
- [75] XIA X H, LIU T, YANG Z F, et al. Enhanced nitrogen loss from rivers through coupled nitrification-denitrification caused by suspended sediment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 47-59.
- [76] XIA X H, LI Z H, ZHANG S B, et al. Occurrence of anammox on suspended sediment (SPS) in oxic river water: effect of the SPS particle size[J]. *Chemosphere*, 2019, 235: 40-48.
- [77] 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 等. 澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5458-5469. (SUN S H, CHEN J, WANG P F, et al. Biogeographic distribution patterns of diatoms in Lancang River and their key drivers [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5458-5469. (in Chinese))
- [78] 望雪, 程豹, 杨正健, 等. 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2126-2134. (WANG X, CHENG B, YANG Z J, et al. Differences in diffusive fluxes of nutrients from sediment between the natural river areas and reservoirs in the Lancang River basin[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2126-2134. (in Chinese))
- [79] CHEN Q W, CHEN Y C, YANG J, et al. Bacterial communities in cascade reservoirs along a large river[J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(12): 4363-4374.
- [80] CHEN J, WANG P F, WANG C, et al. Dam construction alters function and community composition of diazotrophs in riparian soils across an environmental gradient[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 132: 14-23.
- [81] WANG X, WANG C, WANG P F, et al. How bacterioplankton community can go with cascade damming in the highly regulated

- Lancang-Mekong River basin[J]. *Molecular Ecology*, 2018, 27(22): 4444-4458.
- [82] 程豹, 望雪, 徐雅倩, 等. 澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3649-3659. (CHENG B, WANG X, XU Y Q, et al. Bacterioplankton community structure in the Lancang River basin and the analysis of its driving environmental factors[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3649-3659. (in Chinese))
- [83] YANG N, ZHANG C, WANG L Q, et al. Nitrogen cycling processes and the role of multi-trophic microbiota in dam-induced river-reservoir systems[J]. *Water Research*, 2021, 206: 117730.
- [84] GUO X J, ZHU X S, YANG Z J, et al. Impacts of cascade reservoirs on the longitudinal variability of fine sediment characteristics: a case study of the Lancang and Nu Rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124343.
- [85] CHEN Q W, SHI W Q, HUISMAN J, et al. Hydropower reservoirs on the Upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream[J]. *National Science Review*, 2020, 7(9): 1449-1457.
- [86] YAN H L, CHEN Q W, LIU J H, et al. Phosphorus recovery through adsorption by layered double hydroxide nano-composites and transfer into a struvite-like fertilizer[J]. *Water Research*, 2018, 145: 721-730.
- [87] 郝文超, 王从锋, 杨正健, 等. 氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 640-648. (HAO W C, WANG C F, YANG Z J, et al. Speciation and transformation of phosphorus in sediments during the redox cycle[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 640-648. (in Chinese))
- [88] SHI W Q, PAN G, CHEN Q W, et al. Hypoxia remediation and methane emission manipulation using surface oxygen nanobubbles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(15): 8712-8717.
- [89] SHI W Q, CHEN Q W, ZHANG J Y, et al. Spatial patterns of diffusive methane emissions across sediment deposited riparian zones in hydropower reservoirs[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(3): e2020JG005945.
- [90] WANG J W, WU W, ZHOU X D, et al. Nitrous oxide (N_2O) emissions from the high dam reservoir in longitudinal range-gorge regions on the Lancang-Mekong River, Southwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113027.
- [91] LIU Y Q, QIN H, ZHANG Z D, et al. Ensemble spatiotemporal forecasting of solar irradiation using variational Bayesian convolutional gate recurrent unit network[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113596.
- [92] LIU Y Q, QIN H, ZHANG Z D, et al. Probabilistic spatiotemporal wind speed forecasting based on a variational Bayesian deep learning model[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114259.
- [93] CHANG J X, WANG X Y, LI Y Y, et al. Hydropower plant operation rules optimization response to climate change[J]. *Energy*, 2018, 160: 886-897.
- [94] ZHONG R D, ZHAO T, HE Y H, et al. Hydropower change of the water tower of Asia in 21st century: a case of the Lancang River hydropower base, Upper Mekong[J]. *Energy*, 2019, 179: 685-696.
- [95] LI Z W, YU G A, BRIERLEY G, et al. Vegetative impacts upon bedload transport capacity and channel stability for differing alluvial planforms in the Yellow River source zone[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(7): 3013-3025.
- [96] WANG Z, LI Z, XU M, et al. Geomorphology of the Qinghai-Tibet Plateau[M]//*River Morphodynamics and Stream Ecology of the Qinghai-Tibet Plateau*. Boca Raton: CRC Press, 2016: 11-54.
- [97] YANG H M, ZHANG Y X, WANG S, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering the correlation of multiple wind farm outputs[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2016, 44(6): 616-627.
- [98] SU C G, CHENG C T, WANG P L, et al. Optimization model for long-distance integrated transmission of wind farms and pumped-storage hydropower plants[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 285-293.
- [99] CHENG C T, YAN L Z, MIRCHI A, et al. China's booming hydropower: systems modeling challenges and opportunities[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(1): 02516002.
- [100] CHENG C T, WU H J, WU X Y, et al. Power generation Scheduling for integrated large and small hydropower plant systems in Southwest China[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(8): 04017027.
- [101] WU X Y, CHENG C T, LUND J R, et al. Stochastic dynamic programming for hydropower reservoir operations with multiple local optima[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 712-722.
- [102] LIU Y Q, QIN H, ZHANG Z D, et al. A region search evolutionary algorithm for many-objective optimization[J]. *Information Sciences*, 2019, 488: 19-40.
- [103] LIU Y Q, QIN H, ZHANG Z D, et al. Deriving reservoir operation rule based on Bayesian deep learning method considering

- multiple uncertainties[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124207.
- [104] FENG Z K, NIU W J, CHENG C T, et al. Optimizing hydropower reservoirs operation via an orthogonal progressive optimality algorithm[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018, 144(3): 04018001.
- [105] 程春田, 武新宇, 申建建, 等. 亿千瓦级时代中国水电调度问题及其进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 112-123. (CHENG C T, WU X Y, SHEN J J, et al. A state-of-the-art review of China's hydropower operations and the recent advances in the era of gigawatts[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 112-123. (in Chinese))
- [106] ZHANG X H, YANG H M, YU Q, et al. Analysis of carbon-abatement investment for thermal power market in carbon-dispatching mode and policy recommendations[J]. *Energy*, 2018, 149: 954-966.
- [107] 李亚鹏, 赵志鹏, 于申, 等. 计及风险的多尺度电力市场下梯级水电月度发电计划制定方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2525-2535. (LI Y P, ZHAO Z P, YU S, et al. Risk constrained monthly generation scheduling of cascade hydropower plants in multiple time scale markets[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2525-2535. (in Chinese))
- [108] YANG J, YANG Y C E, CHANG J X, et al. Impact of dam development and climate change on hydroecological conditions and natural hazard risk in the Mekong River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124177.
- [109] HE Y H, GUI Z H, SU C J, et al. Response of sediment load to hydrological change in the upstream part of the Lancang-Mekong River over the past 50 years[J]. *Water*, 2018, 10(7): 888.
- [110] XU Z H, YIN X N, SUN T, et al. Labyrinths in large reservoirs: an invisible barrier to fish migration and the solution through reservoir operation[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1): 817-831.
- [111] LI J, QIN H, PEI S Q, et al. Analysis of an ecological flow regime during the ctenopharyngodon idella spawning period based on reservoir operations[J]. *Water*, 2019, 11(10): 2034.
- [112] XU B, LI Y, HAN F, et al. The transborder flux of phosphorus in the Lancang-Mekong River basin: magnitude, patterns and impacts from the cascade hydropower dams in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125201.
- [113] ZHANG C, CHEN X X, LI Y, et al. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 625-639.
- [114] CHEN X X, XU B, ZHENG Y, et al. Nexus of water, energy and ecosystems in the Upper Mekong River: a system analysis of phosphorus transport through cascade reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 1179-1191.
- [115] DENG J H, LI Y, XU B, et al. Ecological optimal operation of hydropower stations to maximize total phosphorus export[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(9): 04020075.
- [116] DONG Q J, ZHANG X, CHEN Y L, et al. Dynamic management of a water resources- socioeconomic- environmental system based on feedbacks using system dynamics[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(6): 2093-2108.
- [117] LIU D H, JI X X, TANG J F, et al. A fuzzy cooperative game theoretic approach for multinational water resource spatiotemporal allocation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 282(3): 1025-1037.
- [118] HE Y H, LIN K R, ZHANG F, et al. Coordination degree of the exploitation of water resources and its spatial differences in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1117-1127.
- [119] HE Y H, YANG J, CHEN X H, et al. A two-stage approach to basin-scale water demand prediction[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(2): 401-416.
- [120] LI S L, CHEN X H, SINGH V P, et al. Assumption-simulation-feedback-adjustment (ASFA) framework for real-time correction of water resources allocation: a case study of Longgang River basin in Southern China[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(12): 3871-3886.
- [121] YU Y, TANG P Z, ZHAO J S, et al. Evolutionary cooperation in transboundary river basins[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 9977-9994.
- [122] DENG J H, LI Y, DING W, et al. Upper limit and power generation loss of water supplement from cascade hydropower stations to downstream under Lancang-Mekong cooperation[J]. *Water*, 2021, 13(20): 2826.
- [123] YU Y, ZHAO J S, LI D N, et al. Effects of hydrologic conditions and reservoir operation on transboundary cooperation in the Lancang-Mekong River basin[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(6): 04019020.
- [124] LI D N, ZHAO J S, GOVINDARAJU R S. Water benefits sharing under transboundary cooperation in the Lancang-Mekong River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123989.

Reviews of the major research plan “runoff change and its adaptive management in the source region of major rivers in Southwestern China” *

HU Chunhong¹, ZHENG Chunmiao², WANG Guangqian³, ZHANG Jianyun⁴, WANG Chao⁵, YAO Tandong⁶,
WANG Yanxin⁷, LAI Mingyong⁸, NI Guangheng³, WANG Yuchun¹, ZHANG Chi⁹, TIAN Fuqiang³

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 4. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 5. *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 6. *Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 7. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*; 8. *School of Economics and Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China*; 9. *College of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

Abstract: The source region of major rivers in Southwestern China (MRSC), featured by prevalence of glacier, snow, and frost, serve as the strategic reserves of water resources for the people in the region and downstream. Its hydrological and biogeochemical processes have been subject to rapid change driven by warming climate. However, its driving mechanism and future trend remain unclear especially when compounded by human activities. To gain a better understanding of the hydrological and biogeochemical change in this region to facilitate sustainable management, the National Natural Science Foundation of China launched the major research plan “runoff change and its adaptive management in the source region of major rivers in Southwestern China” in 2015. Since the implementation of the Major Research Plan, substantial progresses have been achieved: an integrated monitoring system was established based on innovative ground based and remote sensing technologies, which significantly improved the monitoring capability in this region; the runoff generation mechanisms and the co-evolution of water-vegetation-soil system on the plateau were investigated; an isotope-aided hydrological model coupling snow, glacier and frost processes was established; the historical change and future pattern of runoff of the major rivers were explored; an all-material-flux theory for river ecosystem study was proposed, and an integrated monitoring and detecting approach was established for all-material-flux study. The biogeochemical cycle of the source region and the cumulative effect of the cascade reservoirs on this cycle were quantified; a water-food-energy-ecosystem nexus approach was developed with the aim to better operate hydropower plants in a sustainable and cooperative manner. This article reviews the above main progress and achievements of the major research plan.

Key words: runoff change; adaptive management; biogeochemical cycle; the source region of major rivers in Southwestern China

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 92047000).