

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.001

黄河源区水文预报的关键科学问题

雍斌^{1,2}, 张建云^{1,3}, 王国庆^{1,3}

(1. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098;
3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098)

摘要: 黄河源区水文预报对龙羊峡、刘家峡等黄河上游梯级水库群的洪水资源化调度乃至整个黄河流域的水旱灾害防御都起着举足轻重的作用。然而, 由于降水的地面观测严重匮乏、且缺少适用于高寒山区的专用水文模型, 源区水文预报成为长期困扰黄河洪水/径流业务预报的难题。在回顾国内外相关研究的基础上, 从高海拔缺资料地区的降水观测与降水预报、寒区水文模型构建与气象水文耦合系统集成、高原降水发生的气象成因与形成机制3个方面, 评价了黄河源区水文预报的当前现状与技术水平, 提出了黄河源区水文预报面临的关键科学问题; 指出新一代多源降水信息融合与同化、高寒区特殊产汇流模型构建、无缝隙气象水文集合预报、强降水与连阴雨的多影响天气系统解析等, 是当前黄河源区水文预报的研究重点与发展方向。

关键词: 水文预报; 降水; 水文模型; 天气系统; 气象水文耦合; 黄河源区

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)02-0159-13

黄河源区是黄河流域重要产流区, 素有“黄河水塔”之称^[1]。源区集水面积12.2万km², 仅占黄河流域总面积的15%, 但多年平均径流量为205.2亿m³, 占黄河总径流量的38%, 上游源区来水对整体资源性缺水的黄河流域来说至关重要^[2]。源区出口站唐乃亥水文站是龙羊峡水库的入库站, 而龙羊峡是黄河干流上最大的多年调节水库。因此, 黄河源区水文预报对龙羊峡、刘家峡等黄河上游梯级水库群的洪水资源化调度, 乃至整个黄河流域的水旱灾害防御都起着举足轻重的作用。

目前, 黄河源区水文预报主要包括短中期洪水预报与中长期径流预测。未来1~7d业务化的短中期预报主要采用站点观测降水与模式预报降水的拼接, 然后驱动水文模型, 进行洪水预报^[3]。以唐乃亥站为例, 2019—2021年1~3d的预报精度约为85%, 4~7d的预报精度仅为50%, 预报精度不能完全满足防洪调度需求(预报精度数据来自黄河水利委员会水文局汛期径流预报记录)。另一方面, 中长期预测目前仍以旬、月尺度的经验统计分析为主, 未来8~45d的日径流预测仍为空白(龙羊峡水库在当月中旬必须确定下一个月的调度方案, 生产需求的预见期为45d)。预见期短导致上游来水无法准确预测, 每年汛期弃水的经济损失巨大。以龙羊峡为例, 2019年汛期弃水导致的直接经济损失超过了40亿元(数据来自龙羊峡水电站未用于发电的汛期弃水记录); 而且, 经大坝泄水道排泄的弃水会产生大量雾雨, 严重侵蚀龙羊峡对面的虎山坡, 易于形成山体滑坡, 从而威胁大坝安全。因此, 提高预报精度、延长预见期是黄河源区水文预报的关键, 科学意义与工程价值重大。

1 高海拔缺资料地区的降水观测与降水预报

降水是水文预报的重要驱动要素, 也是影响水文预报精度与预见期的关键因子^[4]。尤其是在缺资料地

收稿日期: 2022-04-01; 网络出版日期: 2023-03-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230328.1122.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201100); 国家自然科学基金资助项目(U2243229)

作者简介: 雍斌(1975—), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 博士, 主要从事遥感水文学、缺资料流域水文模拟预报等研究。

E-mail: yongbin@hhu.edu.cn

通信作者: 王国庆, E-mail: gqwang@nhri.cn

区,降水对预报结果的影响程度甚至超过了模型结构。多年的黄河上游水文作业预报指出:降水是影响黄河源区水文预报精度最主要、最直接的因子。水文预报系统的输入降水主要包括观测降水和预报降水,观测降水的获取方式通常包括雨量计、雷达和卫星3种,而预报降水则来自各种短中期数值天气预报模式和中长期气候预测模式。

1.1 观测降水

黄河源区位于青藏高原东北部,流域面积为12.2万 km^2 ,隶属典型的高寒山区地貌,巴颜喀拉山、阿尼玛卿山、岷山等高大山脉分布其间,平均海拔约4000m(图1)。由于山体阻隔,流域内没有安装地基雷达(最近的多普勒气象雷达部署在西宁,远离源区)。因此,降水的地面观测主要依赖雨量站。然而,复杂的高山地形和多变的高寒气候,使得雨量计安装与维护极为困难。国家气象局在流域内布设的雨量站仅有12个,黄河水利委员会水文局布设有52个雨量站(其中位于极高海拔区的边塞加隆站尚未实现数据传输,图1),平均约2500 km^2 1个雨量站,离水文预报需求的500多个差了近10倍。而且,已有站点大多分布在地势平缓的河谷地带,空间上不具代表性,难以捕捉局地降水的小尺度变异特性。因此,地面观测降水获取困难,严重制约了黄河源区水文预报精度。

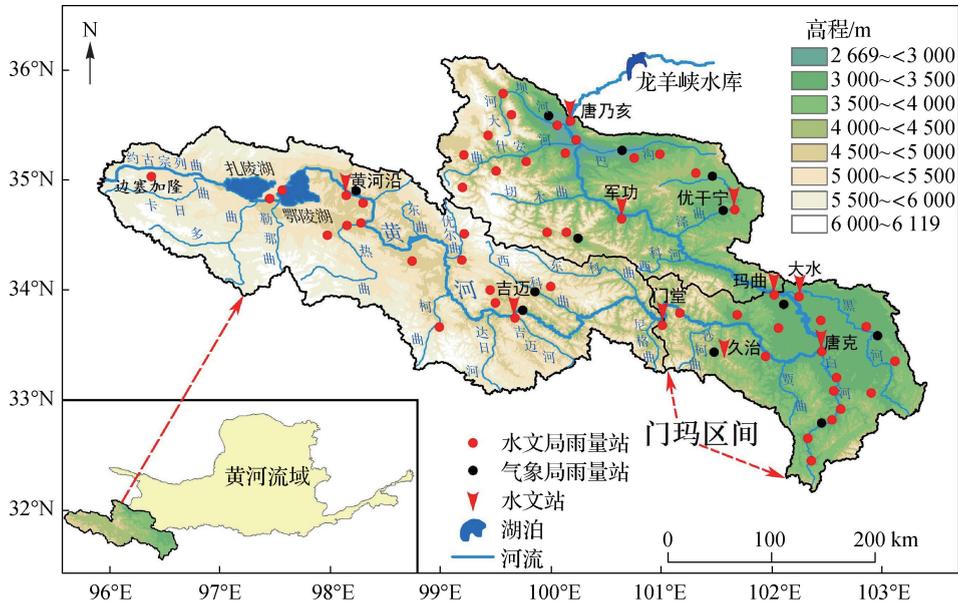


图1 黄河源区雨量站与水文站的空间分布(唐乃亥站以上流域)

Fig. 1 Map of rainfall gauges and hydrological stations in the headwater area of the Yellow River (upstream basin with the outlet of Tangnaihai station)

观测降水是短中期水文预报的关键,在作业预报中主要有3个作用:一是预热水文模型,确定水文预报的前期状态变量;二是直接驱动水文模型,进行洪水/径流的短临预报;三是在滚动预报中动态校正模式输出的预报降水,进一步提高径流预报精度。黄河上游大量作业预报结果表明:源区预报的径流量经常被低估,其主要原因是观测降水偏低。由于地面雨量站点稀疏,流域内部分区域降水未被观测到,从而导致汛期的预报径流经常低于观测径流。因此,如何获取高精度、高分辨率的观测降水成为黄河源区水文预报亟待解决的关键技术瓶颈。

除了地面站点,卫星反演是从空中快速获取大范围降水信息的一种重要手段。在卫星降水领域,近年来国际上主要围绕热带降水观测计划(TRMM, 1997—2014年)和全球降水观测计划(GPM, 2014年—)开展,即依托覆盖全球的降水卫星族群,综合运用多平台(地球同步轨道与近地轨道卫星)、多传感器(星载雷达、

微波、红外)、多模式(主动和被动)、多通道的卫星数据,发展基于多卫星的联合反演降水系统^[5]。围绕 TRMM 和 GPM,国际降水工作组(IPWG)的科研人员已经开展了大量研发工作,其中最具代表性的新一代多卫星联合反演降水系统包括 IMERG、CMORPH 和 GSMaP 等^[6]。这些系统的基本原理是一致的,即采用精度最高的星载雷达去校正微波,再用精度较高、但时空覆盖度低的微波去校正时空覆盖度高、但精度低的红外,然后实现红外与微波的相互插补,再用地面站点进行订正融合,最终产生时空连续的高精度多源降水融合产品。其中,星载雷达是关键变革性技术,该技术将测雨雷达小型化,并用卫星搭载,可直接从空中获取高精度降水信息。例如,GPM 主卫星搭载的星载双频降雨雷达(GPM-DPR)具有很强的云层穿透能力,可精准探测降水的三维空间信息,并准确判识降水的结构和相态,为全球微波星和红外星的降水反演提供了大范围、高精度的空中标定基准,有效降低了多卫星联合反演降水的系统误差^[6]。

与国际相比,国内的卫星降水研究起步稍晚,近年来主要集中在风云系列卫星的降水反演^[7-8]。2000年初,全国水文部门开始采用风云2C热红外遥感反演的云顶亮温来估算面降水量,而云顶亮温与降水量之间缺少直接物理联系,加之风云2C本身数据精度与分辨率的限制,导致反演降水精度不高;2016年,中国成功发射的风云四号卫星搭载了先进的静止轨道辐射成像仪和大气垂直探测仪,风云4A红外数据(4 km × 4 km)比原先的风云2C(10 km × 10 km)具有更高的空间分辨率,卫星数据的整体质量也得到显著提升^[7];2023年,中国发射了风云降水卫星(FY-3RM),这是中国首颗、也是全球第3颗降水监测卫星,FY-3RM搭载了国产的星载双频降雨雷达(DPR)和17通道微波成像仪(MWRI),填补了中国星载主动式气象遥感载荷技术的空白,为国内高精度卫星降水观测奠定了重要基础,国产卫星已展现出越来越广阔的气象水文应用前景^[9]。另一方面,部分学者也在积极探索国际卫星反演与中国高密度地面观测网的多源降水信息融合技术,例如Shen等^[10]采用概率密度函数匹配与最优插值的融合算法(PDF-OI)将美国CMORPH卫星反演与中国3万多个自动雨量站的小时降水数据进行融合,研制了中国小时降水融合产品CMPA(1 h, 0.1° × 0.1°),该产品已被国内外气象水文用户广泛使用。

综上所述,构建高精度、高时空分辨率的高原寒区实况雨量场,是黄河源区水文预报的关键科学难题。然而,现行的多源降水融合与同化系统大多面向全球尺度或区域尺度,流域尺度上还达不到水文预报需求的精度。尤其是在高海拔复杂气候背景下的黄河源区,多源降水融合过程除了充分利用卫星反演和地面观测,还需综合考虑地形、冰雪、季节特性、气候分区等多种因素的影响。因此,进一步加强基于新一代星载雷达、微波和红外数据的多卫星联合反演降水技术,增加雨量站点密度并改进地面观测手段(如地基雷达),发展考虑多要素的高寒区多源降水融合与同化算法,提高流域(或计算单元)面降水量的估算精度,是解决缺资料黄河源区观测降水获取困难的可行方式。

1.2 预报降水

除了观测降水,预报降水是水文预报的另一个关键驱动,对提高水文预报精度和延长预见期都起着决定性作用。但是,由于降水本身具有显著的非线性、随机性和复杂性,使得降水预报成为一项极具挑战性的科学难题。近年来,中国气象局逐步将美国MM5、GFS、CFS,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)预报产品和国内GRAPES等国内外主流模式的天气预报数据实时推送给水文部门,有效提升了各大流域机构的气象水文预报水平。以黄河流域为例,目前已采用多种模式的天气预报结果进行汛期气象水文会商分析,但实际作业预报中仍依赖单一模式的预报降水驱动水文模型进行未来1~7 d的水文预报。这种基于单一模式的水文预报精度不高、预见期短,且缺少不确定性信息。尤其是在高海拔复杂气候条件下的黄河源区,单一模式无法准确表达高原降水发生的气候学成因,其预报降水的不确定性更大,从而严重影响了短中期洪水预报精度和中长期径流预测能力。

与单一模式预报不同,集合预报可综合多个模式的特点和优势,实现更高精度、更长预见期的气象水文

预报,并提供不确定性信息^[11]。最早的业务化集合预报雏形始于20世纪90年代,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和ECMWF首先发布了业务气象集合预报产品^[12-13]。2000年后,集合预报进入快速发展期,其中最具代表性的是世界气象组织发起的全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX),该项目建立了交互式全球超级集合预报资料库TIGGE,涵盖了全球10多个预报中心未来1~14 d的集合预报数据,为世界各国的气象水文预报研究提供了重要的数据支撑^[14]。此外,传统的气象数值预报一般侧重在1~14 d的短中期预报和1~12个月的中长期预报,往往忽视了3~10周的次季节预报,而这个时间尺度对中长期径流预测与水资源优化调度至关重要(例如,龙羊峡调度需求的预见期约为7周)。2013年,世界气象组织发起了次季节至季节预报研究项目(S2S),该项目建立了包含全球11个气候模式的次季节实时预报资料库^[15],这些次季节气候预报模式的发展与应用,为实现短中期与中长期的无缝隙气象水文预报提供了重要途径^[16]。

中国数值天气预报的研发工作稍晚于欧美,但近年来发展迅速。1996年,中国气象局建立了中国第一代气象集合预报实验系统,并于1999年实现了气象集合预报的业务化试运行^[17]。2001年,中国气象局开展了全球/区域通用数值天气预报系统GRAPES(现在是CMA-GFS/MESO系统)的研发工作^[18];2016年,CMA-GFS投入业务化运行,并面向全国气象和水文部门下发产品;2018年,CMA-GFS升级为四维变分同化天气预报系统,标志着中国业务数值天气预报技术迈入国际前列;2019年,中尺度天气数值预报系统CMA-MESO实现了全国3 km \times 3 km 高分辨率业务化运行,成为中央气象台气象水文预报会商的支撑系统,该系统能够快速循环同化风云4A成像仪辐射率、卫星云导风、卫星GNSSRO、雷达径向风、风廓线雷达、地面雨量站等多源数据。2020年汛期实时业务预报的检验结果表明:最新的CMA-MESO系统对中国汛期降水的预报准确率,总体上超过了ECMWF模式的预报结果^[19]。此外,在中长期降水预测方面,国家气候中心于2003年开始推动气候预测业务系统的自主创新,至今已演进到第3代,最新的CMA-CPS系统已实现“次季节-季节-年际”的多尺度气候预测一体化,其中降水、大气环流等预测能力优于美国和日本的现有业务系统^[20],被科技部推选为国家“十三五”重大科技创新成果。国家级业务数值天气预报模式与气候预测模式的快速发展,为水文部门构建高分辨率预报雨量场提供了重要的气象业务支撑,但气象部门与水文部门之间的前沿技术交叉研究亟待加强,气象预报与水文预报之间的关键技术壁垒亟待打通。

综上所述,加强水文气象的学科交叉与融合,开展定量降水预报的研究与应用,进一步延长预见期,将是中国水文预报未来发展的一个重要方向^[4]。目前,国内外先进的数值天气预报模式与气候预测模式,已为实现短中期与中长期高精度定量降水预报提供了基础条件,这也是提高黄河源区水文预报精度并延长预见期的关键所在。未来应进一步加强中国自主研发的国家级数值天气预报模式和气候预测模式在水文预报领域的应用实践,着力发展无缝隙集合预报、WRF动力降尺度、预报降水的实时校正与误差溯源等关键技术,构建多尺度气象水文耦合预报系统,从而有效提高不同尺度流域的洪水/径流预报精度并延长预见期。

2 寒区水文模型构建与气象水文耦合系统集成

2.1 黄河流域水文预报模型的发展历程

20世纪60—70年代,黄河流域早期洪水作业预报主要采用上下游相应水位及降水径流相关的经验预报方法,预报精度很大程度上依赖于首席预报员的经验。20世纪80年代,黄河水利委员会水文局建立了“黄河三花间(三门峡—花园口区间)实时洪水联机预报系统”,该系统针对三花间不同子流域的水文地理特点,采用了多模型预报方案,选用的水文模型包括新安江模型、霍顿模型、坦克模型、包夫顿下渗模型及经验预报模型等^[21]。2000年以来,在国家防汛抗旱指挥系统一期/二期工程等项目支持下,黄河水利委员会水文局研发了“黄河洪水预报系统”,该系统包含了一系列适用于黄河流域不同区域产汇流特性的水文模型库,在

黄河洪水预报的实际业务中得到了广泛应用^[22]。其中,在渭河中下游、三花区间、大汶河流域等湿润半湿润地区,主要采用以蓄满产流为主的新安江模型;在黄土高原等干旱半干旱地区,主要采用霍顿模型、陆浑模型、双超产流模型及河北雨洪模型等^[23]。近年来,黄河水利委员会水文局与国内高校联合开展了黄河流域分布式水文模型预报实践研究,其中具有代表性的是“黄河小花间(小浪底—花园口区间)分布式水文模型预报系统”,该系统同时采用分布式三水源新安江模型与分布式 TOPKAPI 模型,在小花间取得了较好的实际预报效果^[24]。目前,黄河水文预报系统根据实际作业预报需求,采用了多模型/多方案组合的方式,集成了黄河流域 72 个预报断面的 93 套预报方案,为黄河流域防洪减灾与水资源调度提供洪水/径流实时滚动预报。然而,由于高寒区独特的下垫面特征和复杂的产汇流机制,源区水文模型构建一直是黄河水文预报系统的短板。

2.2 寒区水文模型研究进展与现状

黄河源区隶属中国西北典型的高寒山区,流域下垫面由于冻土的存在从性质上改变了土壤水分运移规律,造成产汇流的不稳定,冻土水文的复杂性给流域径流模拟与预报带来很大困难。因此,构建能客观表征冻土条件下特殊产汇流机制且简单实用的寒区水文模型,成为黄河源区乃至整个中国北方寒区水文作业预报的关键科学难题。

20 世纪 80—90 年代,中国学者在寒区水文过程及其模型构建方面开展了大量研究,并取得了一系列重要成果。如杨针娘等^[25]系统阐述了中国典型寒区的冰川水文、冻土水文及雪水文过程,并根据水量平衡原理建立了中国早期的高山冻土区产流模型;郑秀清等^[26]详细解析了水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动规律,建立了冻融土壤水分入渗预报方法与水分迁移数值模型;肖迪芳等^[27]针对冻土条件下的降水—径流关系和地下水分割方法,开展了一系列观测试验与数值模拟工作。然而,由于复杂的冻土水分运移规律与水热耦合特性,加之冻土实测资料极其匮乏,生产实践中可直接应用于中国北方地区的寒区水文模型相对较少。近年来,随着全球变化研究的深入与拓展,寒区水文模型研究得以快速发展,其主要研究进展分 3 类阐述如下:

(1) 非冻土区水文模型的改进。由于缺乏通用的寒区水文模型,最简单便捷的方法就是根据目标流域的气候分区与水文特性,选择较合适的非冻土区水文模型进行改进,这类模型包括新安江模型、SWAT、TOP-MODEL、Sacramento 和水箱模型等。如关志成等^[28]针对中国东北寒区产汇流特点,将气温因子引入新安江模型,扩展了新安江模型的积雪与融雪出水模拟、土壤水分运移模拟、冻土冻结与融化过程模拟等功能,并将改进后的模型应用于牡丹江上游季节性冻土流域的水文预报实践中;俞鑫颖等^[29]基于 DEM 数据与 GIS 技术改进新安江模型,并利用不同网格的热量和水分状态计算产汇流,构建了分布式冰雪融水-雨水混合水文模型,在乌鲁木齐河山区流域得到应用;Fontaine 等^[30]通过改进 SWAT 模型的融雪径流模块,有效提升了 SWAT 模型在高寒山区的径流模拟精度。以上非冻土区水文模型及其改进型的优点是简单实用,通过调参可获得较好的模拟效果;但缺点是不能充分考虑冻土水文的物理过程,而且模型参数大多是静态输入,只适用于稳态条件,不适用于动态条件。因此,构建能够表达动态的融冰融雪过程与冻土水分运移过程的寒区专用水文模型是十分必要的。

(2) 寒区专用水文模型。目前,国际上已经研发了多种融冰融雪径流模型,其中代表性模型包括斯坦福模型、PROMET、PRMS 及 SRM 模型等。相对融冰融雪模型,综合性寒区水文模型的研制更加困难,其中比较成功的是加拿大气候与气象委员会研发的 CRHM 模型^[31],该模型集成了多个寒区水文过程模块,可定量表达辐射交换、风吹雪、积雪升华、积雪融化、土壤冻融、冻土水分迁移和冻土坡面汇流等主要寒区水文过程,CRHM 模型在中国北方部分寒区流域得到了模拟与验证^[32]。此外,中国学者针对西北内陆河与青藏高原也开展了寒区专用水文模型研究的探索与实践,如康尔泗等^[33]根据 HBV 模型原理,构建了一个适用于西

北干旱区内陆河的概念性水文模型,将黑河山区流域划分为高山冰雪冻土带和山区植被带,对莺落峡上游的月出山径流进行了模拟预报;陈仁升等^[34]针对中国内陆河高寒山区特点,构建了分布式水热耦合模型DWHC,该模型针对冻土水热耦合问题,采用土壤水热连续性方程将流域产流、入渗和蒸散发等过程集成起来,实现了冻土过程的分布式流域水文模拟;周祖昊等^[35]、刘扬李等^[36]针对青藏高原气候和地质特点,构建了耦合“积雪-土壤-砂砾石层”连续体和“积雪-冰川”水热过程模拟的青藏高原分布式水文模型WEP-QTP,并在尼洋河流域进行了逐日和逐月径流模拟。然而,现有寒区专用水文模型的缺点是通用性不强、适用范围有限且模拟精度不高,离实际水文作业预报需求仍有较大差距。

(3) 寒区陆面过程模型。陆面过程模型主要是模拟发生在陆气界面上的物理、化学和生物过程,其最终目标是实现陆-气耦合过程模拟,寒区陆面过程模型的研究重点则是冻土-植被-大气的水热交换过程。目前,国际上主流的寒区陆面过程模型包括 CoupModel、CLM、SHAW、EASS、HydroSiB2 等模型及其改进版本。例如, Jansson 等^[37]研发的 CoupModel 整合了辐射、蒸散发、截留、融雪、土壤水热运移及冻土的冻融过程等寒区陆面过程的各个环节, CoupModel 在北欧地区得到广泛应用,但在中国北方寒区流域的应用相对较少; Wang 等^[38]、Song 等^[39]采用焓的理论,解决了传统临界温度法计算冻土中冰水相变中的不稳定问题,构建了寒区陆面过程模型 HydroSiB2-SF,并在黑河上游、阿里地区、黄河源区等地依托野外观测开展了模拟验证。已有研究表明,现行寒区陆面过程模型的优点是能够精细描述垂向的冻土水热交换过程和辐射过程,但这类模型通常是一维点尺度动态模型,在表达二维下垫面不均匀性和水分侧向运移规律方面存在明显缺陷,很难直接应用于寒区流域的径流模拟与水文预报。因此,实现一维寒区陆面过程模型与二维分布式水文模型的耦合、开发分布式寒区陆面水文过程模型,是开展寒区流域水文研究的迫切需要。

综上所述,以上3类建模方式各具特色,为未来寒区水文预报模型发展提供了重要的理论与技术支撑,研制能准确刻画冻土过程且简单高效的寒区专用水文模型是寒区水文预报研究的必然趋势。然而,该领域一些关键科学难题尚未解决,有待进一步开展深入研究,例如,寒区流域“降雨-蒸发-径流”的三水转换关系、不同植被类型覆盖下的冻土水文变化特性,以及季节性冻土的蓄水调节作用与抑制蒸发作用的相互关系等。另外,现有模型大多是对寒区水文过程基本规律的表征,缺少对寒区水文热力学与动力学的本质研究,包括水热耦合内在机理、水分“固-液-气”的相态转换机制、冰川融雪径流的动力学过程等,这方面研究将进一步加深模型构建者对寒区水文物理过程的科学认知。

2.3 黄河源区水文模型构建的关键科学问题

目前,黄河上游水文作业预报采用了多模型/多方案的对比预报方式,选用的水文模型包括新安江模型、垂向混合产流模型、霍顿模型及“吉迈-玛曲-唐乃亥”经验预报方案等^[24]。然而,黄河源区的洪水/径流预报一直是黄河上游水文作业预报的短板,目前尚未研制出针对黄河源区独特的下垫面特征和产汇流特性的寒区专用水文模型,已有研究也仅限于对非冻土区水文模型的改进^[40-41],模型的模拟精度离实际水文作业预报需求仍存在较大差距。

黄河源区包括了冰川、积雪、湖沼、高寒草甸及低矮灌木林等不同类型下垫面,其间又广泛分布着冻土,流域产汇流过程十分复杂,具有独特的高寒山区混合产流特性。目前,黄河源区的冻土类型以季节性冻土为主,多年冻土仅分布在西北部源头区及小范围高山地带。近66 a的径流模数计算表明:占黄河源区总面积22%的门玛区间(源区中游门唐站至玛曲站之间的子流域,见图1)产生了44%的径流量,是源区的主要产流区,该区间下垫面以高寒草甸和季节性冻土为主。门玛区间高寒草甸的厚度约为5~30 cm,草甸下部主要是由土壤和大孔隙砂砾石层构成的季节性冻土。随着全球变暖,季节性冻土中土壤水分运移机制及其由冰到水的相态转化过程将发生改变。因此,揭示变化环境下“高寒草甸+季节性冻土”的动态产流机制、定量刻画季节性冻土的冻融与融冻过程的水热交换机理是当前黄河源区水文模型构建的关键难题,对改进源

区径流预报具有重要指导意义。

除了产流,汇流是水文模型的另一个重要模块,汇流计算主要包括坡面汇流与河道汇流2个部分。目前,黄河洪水预报系统采用的坡面汇流方法主要有三水源滞后演算法、纳什瞬时单位线法、等流时线法及变参数非线性汇流算法等;河道汇流方法主要有马斯京根法和漫滩洪水蓄率中线法等^[21-24]。在实际作业预报中,可根据不同区域的水文特性与河道特点,选取与之匹配的算法组合进行汇流计算。黄河源区下垫面条件复杂,河流以弯曲型为主,弯道数量多,河道比降和流速差异较大,源区上、中、下游的汇流特点各不相同。因此,研制适用于黄河源区下垫面特性的专用汇流模型是源区水文模型构建的一个重要环节。此外,近年来随着中国社会经济的快速发展,黄河源区的高速公路网建设已初具规模,高速公路对自然流域汇流过程的影响值得关注。2018—2021年,本文团队通过多次野外勘察发现:黄河源区新建的高速公路靠近上坡的单侧出现了大量串珠状湖沼,特别是在缺少涵洞的路段,高速公路对坡面汇流的阻断更为显著,在一定程度上已经改变了自然流域汇流的时空分布特性。因此,高速公路对流域汇流过程的阻隔效应及其对径流预报的影响,将是黄河源区水文模型构建中需要考虑的新问题。

综上所述,构建适用于变化环境下高寒区复杂下垫面产汇流机制的专用水文模型对提高黄河源区水文预报精度至关重要,其中季节性冻土的水热交换机理与产流形成机制是亟待解决的关键科学问题。尤其是黄河源区的主要产流区门玛区间典型“高寒草甸+季节性冻土”的特殊产流机制有待深入研究,准确刻画高寒草甸覆盖下季节性冻土不同土壤状态(冻融-完全融化-冻融-完全冻结)的水热交换过程与水分运移规律,对改进春季冻融期和秋季融冻期的径流预报具有重要指导意义。未来黄河源区水文模型发展需要开展大量野外观测试验,揭示高寒区不同下垫面的产汇流特性,同时还需充分利用新一代卫星遥感反演、水热流同步耦合、焓理论等新技术和新方法,以进一步提高模型在缺资料源区流域的水文模拟与预报能力。

2.4 黄河源区气象水文耦合预报系统集成

在气象水文预报系统集成方面,近年来国内外学者将天气预报模式与水文模型相耦合,开展了大量集成研究^[42-43],但研究成果直接应用于实际水文作业预报的相对较少。针对黄河源区的气象水文预报系统集成,黄河水利委员会水文局通过中国-荷兰政府间合作项目(2004—2008年)初步建立了“基于卫星的黄河流域水监测和河流预报系统”。该系统采用2套风云2C静止卫星的热红外反演与地面站点的融合降水,驱动基于格网的分布式水文模型进行黄河源区径流预报,但预报精度离实际需求仍存在一定差距。目前,水利部已在黄河流域建立了比较完备的三级水情传输系统、卫星接收系统等,并实现了卫星数据、模式预报数据与水文预报系统的实时传输,为集成系统的后续改进提供了重要平台。

另一方面,尺度问题一直是困扰当前黄河源区气象水文预报系统集成的技术瓶颈。时间尺度方面,预报系统需要同时完成短中期小时次洪和中长期日(旬、月)径流等多个尺度的滚动预报,应用于不同时间尺度水文预报的模型参数各不相同;空间尺度方面,基于不同尺度的水文计算单元,预报系统既要实现全流域的大尺度预报,又要实现嵌套流域与重点子流域(如门玛区间的黑河、白河等)的中小尺度预报。此外,由于天地多源异构数据的时空不一致性,系统集成中还需采用动力降尺度、统计降尺度等方法进行时空尺度转换,以有效降低尺度误差。因此,预报系统集成必须同时具备时空尺度自适应和模型参数自适应的多尺度气象水文耦合预报能力。

最后,在实际水文作业预报中还需综合考虑可能影响预报结果的各类信息和各种因素。例如,在短中期洪水预报中需要分析高原大气的环流特征、主要降水的落区以及洪水冲刷改变河道观测断面等气象水文信息;在中长期径流预测中还需兼顾全球变暖背景下冰川积雪和湖泊面积变化、下垫面植被覆盖变化以及冻土退化等引起的流域水文特性改变等影响因素。另外,由于羊曲水电站修建的需求,源区出口站唐乃亥水文站已经开始实施向下游方向的搬迁工程,唐乃亥站整体搬迁将涉及新老站点水文观测数据的校准与衔接等问

题,流域产汇流面积也会随之发生改变。以上这些均是源区实际水文作业预报中需要综合考虑的客观因素。

3 高原降水发生的气象成因与形成机制

3.1 降水特点及水汽来源

科学认知源区降水发生的气象成因与形成机制,可为进一步提升黄河源区气象水文预报水平提供坚实的理论基础。黄河源区每年汛期的洪峰主要出现在7月上旬(伏汛)和9月中下旬(秋汛),8月是低平期,显示出独特的“双峰”现象(部分年份也存在伏汛单峰或秋汛单峰情形),洪水历时长、退水比较缓慢。高原大气环流和高海拔地形共同影响了黄河源区降水的时空分布特征,从而形成了这种洪水特性。

黄河源区降水的时空分布极为不均。时间上,源区年内降水主要集中在5—9月的汛期,占年降水量的84.9%,其余非汛期7个月的降水量仅占15.1%,雨季、旱季分明;空间上,降水量由西北向东南逐步递增,西北部的黄河源头年降水量 <300 mm,属于干旱/半干旱区,而东南部的门玛区间年降水量 >600 mm,属于半湿润区,其中久治站多年平均降水量达739 mm^[44]。黄河源区的主要水汽来源是印度洋,经孟加拉湾直接北上或从孟加拉湾绕过中南半岛北部北上,偏南季风携带充沛水汽经过门玛区间,致使该区域雨水丰沛,成为黄河源区的主要产流区^[45]。

黄河源区主要包括强降水(日降水量 ≥ 25 mm)与连阴雨(连续阴雨日 ≥ 5 d,日照时数 ≤ 2 h)2种典型降水类型,区域性强降水与连阴雨主要集中在水汽充沛的门玛区间。强降水大多出现在7—8月,虽然持续时间短,但突发性强、破坏性大,容易形成局地洪水;连阴雨平均每年出现1.8次(门玛区间2~3次),虽然强度小,但持续时间长,形成的洪水一般具有历时较长、退水缓慢的特点^[46]。

3.2 强降水的天气系统

在强降水的天气系统影响机制方面,国内外已开展大量研究^[47-48],部分学者还针对中国不同地区建立了江淮梅雨锋暴雨、华南暴雨和东北华北暴雨等不同强降水类型的天气学概念模型^[49-50]。然而,目前针对黄河源区的强降水形成机理研究相对较少,已有研究也仅针对个例、局部地区或者单一天气系统进行分析。例如,谌芸等^[51]对2003年7月29—30日青藏高原东北部的区域性强降水过程进行诊断,研究发现,西风槽和高原低涡是造成此次强降水过程的主要影响天气系统;李江萍等^[45]对玛曲地区夏季强降水进行环流分型,结果表明,暴雨发生的环流型以高原低槽型为主,大雨发生的环流型以切变型为主;郁淑华等^[52]研究发现,切变线是导致高原强降水的重要天气系统,持续24 h的高原竖切变线可导致高原暴雨,而高原横切变线则需要持续48 h才能产生暴雨;温丽叶等^[44]对黄河源区25场区域性强降水过程进行高度场分析,发现源区强降水的环流型主要有高原槽东移型、高原低涡-切变线型及副高西北侧西南气流型等3种类型,以典型的高原槽东移型为例,其天气系统多表现为高原低槽东移,东西向切变线位于河源区,同时南面的印缅低槽活跃,槽前暖湿空气与北方低压槽携带的冷空气交汇,造成强降水发生。

综上所述,影响黄河源区强降水的天气系统是多样的(主要包括高原槽、高原低涡、切变线及南亚高压等),而且这些天气系统之间的相互作用过程是复杂的。然而,目前研究主要集中在强降水的环流分型和单一天气系统分析,源区强降水的多影响天气系统相互作用机理研究亟待进一步加强,其科学认知将有助于深入理解高海拔区复杂气候背景下强降水的形成机制与时空演变规律。未来需深入开展持续强影响天气系统的物理特性条件分析、高低空天气系统交叉配置等理论与方法研究,构建强降水天气学概念模型,这对于改进区域数值天气预报模式和提高预报降水精度具有重要指导价值。

3.3 连阴雨的天气系统

在连阴雨的天气系统影响机制方面,已有研究主要集中在四川、云南和贵州的华西秋雨^[53-54],针对黄

河源区的连阴雨研究相对较少。其中,具有代表性的工作包括:狄潇泓等^[55]对2007年西北地区一次罕见的秋季连阴雨事件进行天气系统分析,结果表明,西风带低槽活动和副热带高压位置的异常变化,使得北方冷空气和南方暖湿气流持续交汇于西北地区,是导致本次连阴雨过程的主要原因;王建兵等^[56]对甘南高原(紧邻黄河源区东南部)的秋季连阴雨进行环流分析,研究发现,甘南连阴雨的环流形势主要分为副高边缘型和纬向环流型,其中以副高边缘型为主,占总次数的71.4%;张荣刚等^[57]对黄河源区2017年秋季一场典型连阴雨过程进行分析,指出南亚高压和副高异常偏强是本次连阴雨中最显著的大气环流异常特征,200 hPa的西风急流和500 hPa的低压槽稳定维持是本次连阴雨的主要形成机制;温丽叶等^[44]对黄河源区1959—2017年期间典型连阴雨的天气系统进行分析,研究发现,源区6—8月连阴雨主要受新疆低压槽、高原槽、印缅低压和高原切变线等天气系统共同影响,而9月连阴雨主要受副高影响。

总体而言,黄河源区连阴雨持续时间长、空间差异大,连阴雨过程可持续5~24 d不等,对总径流量贡献最大的月份分别是7月、9月和6月,科学认知连阴雨的天气系统影响机制将有助于深入理解源区洪水特性、提升源区次季节径流预报精度。当前研究已经涉及到黄河源区连阴雨的环流分型及其不同高度场解析,但其背后的气象成因与形成机制比较复杂,连阴雨的多影响天气系统相互作用机理及其对中长期径流预测的影响研究有待深入开展。未来需进一步厘清黄河源区连阴雨发生的前期环流信号,解析引发区域性连阴雨的多影响天气系统及其配置模式,为连阴雨预报提供准确的着眼点。

4 结 语

由于高海拔恶劣的水文地理条件,黄河源区降水的地面观测匮乏,严重制约了源区水文预报精度。加之缺少可靠的寒区专用水文模型,现有模型无法准确刻画源区流域独特的下垫面特征和产汇流特性,当前黄河源区水文作业预报系统的预报精度与预见期不能完全满足黄河上游防洪调度需求。

目前,黄河源区水文预报面临的关键科学问题包括:高海拔缺资料地区的降水观测与降水预报、高寒区季节性冻土的水热交换机理与产流形成机制、具备时空尺度自适应和模型参数自适应的多尺度气象水文耦合预报系统集成、高原复杂气候背景下降降水的气象成因与形成机制等,这些问题也是中国北方高寒区流域水文预报研究的共性难题。未来发展应大力加强遥感科学、大气科学、计算机科学与水文科学的深度交叉融合,着力打通气象部门与水文部门之间的前沿技术壁垒,研究重点应聚焦在新一代多源降水信息融合与同化、高寒区特殊产汇流模型构建、无缝隙气象水文集合预报、强降水与连阴雨的多影响天气系统解析等关键技术,以提高黄河源区洪水/径流预报精度并延长预见期,从而促进预报业务化的源头创新,为黄河流域水安全与水资源高效利用提供基础支撑。

致谢:衷心感谢黄河水利委员会水文局信息中心王春青、陶新以及水文预报员们在数据整理和野外勘察等方面提供的帮助,感谢中国气象局地球系统数值预报中心张红亮对本文预报降水部分的修改,感谢中国科学院青藏高原研究所王磊对本文寒区水文模型部分的修改。

参考文献:

- [1] 贾仰文,高辉,牛存稳,等.气候变化对黄河源区径流过程的影响[J].水利学报,2008,39(1):52-58.(JIA Y W, GAO H, NIU C W, et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 52-58. (in Chinese))
- [2] 王春青,陈冬伶.黄河水量调度径流预报方法研究[J].人民黄河,2019,41(9):20-25.(WANG C Q, CHEN D L. Study on runoff forecasting method for water regulation of the Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 20-25. (in Chinese))
- [3] 陶新,许珂艳,王高升.三水源新安江模型在黄河三小区间的应用[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):32-35.

- (TAO X, XU K Y, WANG G S. Application of three-source Xin'anjiang model in San-Xiao reach of Yellow River[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(1): 32-35. (in Chinese))
- [4] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443. (ZHANG J Y. Review and reflection on China's hydrological forecasting techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 435-443. (in Chinese))
- [5] YONG B, LIU D, GOURLEY J, et al. Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: implications for its successor global precipitation measurement mission[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96: 283-296.
- [6] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The global precipitation measurement mission[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(2): 701-722.
- [7] LU H Y, HUANG Z Y, DING L D, et al. Calibrating FY4A QPE using CMPA over Yunnan-Kweichow Plateau in summer 2019 [J]. European Journal of Remote Sensing, 2021, 54(1): 476-486.
- [8] YIN G H, BAIK J, PARK J. Comprehensive analysis of GEO-KOMPSAT-2A and FengYun satellite-based precipitation estimates across Northeast Asia[J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 782-800.
- [9] 魏栋, 刘丽伟, 田文寿, 等. 基于卫星资料的西北地区高原涡强降水分析[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 829-839. (WEI D, LIU L W, TIAN W S, et al. Analysis of the heavy precipitation caused by plateau vortex in Northwest China based on satellite data[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(4): 829-839. (in Chinese))
- [10] SHEN Y, ZHAO P, PAN Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [11] RAUSER F, ALQADI M, AROWOLO S, et al. Earth system science frontiers: an early career perspective[J]. Bulletin of the American Meteorology Society, 2017, 98(6): 1119-1127.
- [12] TOTH Z, KALNAY E, TRACTON S M, et al. A synoptic evaluation of the NCEP ensemble[J]. Weather and Forecasting, 1997, 12(1): 140-153.
- [13] HERSBACH H, MUREAU R, OPSTEEGH J D, et al. A short-range to early-medium-range ensemble prediction system for the European area[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(10): 3501-3519.
- [14] BOUGEALT P, TOTH Z, BISHOP C, et al. The THORPEX interactive grand global ensemble[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(8): 1059-1072.
- [15] VITART F, ARDILOUZE C, BONET A, et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(1): 163-173.
- [16] ROBERTSON A W, KUMAR A, PEÑA M, et al. Improving and promoting subseasonal to seasonal prediction[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(3): 49-53.
- [17] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15. (LI Z C, CHEN D H. The development and application of the operational ensemble prediction system at national meteorological center [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 13(1): 1-15. (in Chinese))
- [18] 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 1-10. (SHEN X S, SU Y, HU J L, et al. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(1): 1-10. (in Chinese))
- [19] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 25-37. (HUANG L P, CHEN D H, DENG L T, et al. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(1): 25-37. (in Chinese))
- [20] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 533-539. (XIN X G, WU T W, ZHANG J, et al. Introduction of BCC models and its participation in CMIP6[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 533-539. (in Chinese))
- [21] 吕光圻, 冯相明. 黄河三花间实时洪水联机预报系统[J]. 人民黄河, 1990, 12(4): 17-20. (LYU G Q, FENG X M. Real-time on-line flood forecasting system in Sanhua of the Yellow River [J]. Yellow River, 1990, 12(4): 17-20. (in Chinese))

- [22] 史玉品, 范国庆, 狄艳艳, 等. 黄河龙门水文站实用水文预报方案改进及应用[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 40-44, 60. (SHI Y P, FAN G Q, DI Y Y, et al. Improvement and application of practical hydrologic forecasting schemes at Longmen station of the Yellow River[J]. Yellow River, 2021, 43(1): 40-44, 60. (in Chinese))
- [23] 霍世青, 王春青, 许卓首. 近 10 a 黄河水文气象情报预报工作进展[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 36-39, 130. (HUO S Q, WANG C Q, XU Z S. Progress on hydro-meteorological information and forecasting of the Yellow River in recent ten years[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 36-39, 130. (in Chinese))
- [24] 陶新. 黄河小花区间洪水预报模型研究及软件系统开发[D]. 南京: 河海大学, 2007. (TAO X. The flood forecasting model research and software system development on Xiaohua reach of the Yellow River[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [25] 杨针娘, 刘新仁, 曾群柱, 等. 中国寒区水文[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 109-124. (YAGN Z N, LIU X R, ZENG Q Z, et al. Cold region hydrology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 109-124. (in Chinese))
- [26] 郑秀清, 樊贵盛, 邢述彦, 等. 水分在季节性非饱和和冻融土壤中运动[M]. 北京: 地质出版社, 2002. (ZHENG X Q, FAN G S, XING S Y, et al. Water movement in seasonal unsaturated frozen soil[M]. Beijing: Geology Press, 2002. (in Chinese))
- [27] 肖迪芳, 阎琛荣, 王春雷, 等. 寒区冻土水文学概论[C]//第三届全国冰工程会议论文集. 大连: [s. n.], 1997: 345-368. (XIAO D F, YAN C R, WANG C L, et al. Outline of frozen soil hydrology in cold regions [C]//Professional Papers on 3th Conference on Ice Engineering in China. Dalian: [s. n.], 1997: 345-368. (in Chinese))
- [28] 关志成, 段元胜. 寒区流域水文模拟研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(S2): 266-272. (GUAN Z C, DUAN Y S. Modeling the hydrological process of drainages in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(S2): 266-272. (in Chinese))
- [29] 俞鑫颖, 刘新仁. 分布式冰雪融水雨水混合水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 23-27. (YU X Y, LIU X R. Distributed hydrological model for watersheds supplemented with melted snow and glacier water and rainfall[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(5): 23-27. (in Chinese))
- [30] FONTAINE T A, CRUICKSHANK T S, ARNOLD J G, et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT)[J]. Journal of Hydrology, 2002, 262(1/2/3/4): 209-223.
- [31] POMEROY J W, GRAY D M, BROWN T, et al. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(19): 2650-2667.
- [32] 周剑, 张伟, POMEROY J W, 等. 基于模块化建模方法的寒区水文过程模拟: 在中国西北寒区的应用[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 389-400. (ZHOU J, ZHANG W, POMEROY J W, et al. Simulating the cold regions hydrological processes in Northwest China with modelar moduling method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 389-400. (in Chinese))
- [33] 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 概念性水文模型在出山径流预报中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 18-26. (KANG E S, CHENG G D, LAN Y C, et al. Application of a conceptual hydrological model in the runoff forecast of a mountainous watershed [J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(1): 18-26. (in Chinese))
- [34] 陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(I): 模型原理[J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 806-818. (CHEN R S, LYU S H, KANG E S, et al. A distributed water-heat coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (I): model structure and equations[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(8): 806-818. (in Chinese))
- [35] 周祖昊, 刘扬李, 李玉庆, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: I: “积雪-土壤-砂砾石层”连续体水热耦合模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 20-32. (ZHOU Z H, LIU Y L, LI Y Q, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: I: hydrothermal coupling simulation of “snow-soil-sand gravel layer” continuum[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 20-32. (in Chinese))
- [36] 刘扬李, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: II: 考虑冰川和冻土的尼洋河流域水循环过程模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 201-210. (LIU Y L, ZHOU Z H, LIU J J, et al. Distributed hydrological model

- of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: II: simulation of water cycle processes in the Niyang River basin considering glaciers and frozen soils [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 201-210. (in Chinese))
- [37] JANSSON P E, MOON D S. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(1): 37-46.
- [38] WANG L, ZHOU J, QI J, et al. Development of a land surface model with coupled snow and frozen soil physics[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 5085-5103.
- [39] SONG L, WANG L, LI X P, et al. Improving permafrost physics in a distributed cryosphere-hydrology model and its evaluations at the Upper Yellow River basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(18): e2020JD032916.
- [40] 郝振纯, 张越关, 杨传国, 等. 黄河源区水文模拟中地形和融雪影响[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 311-318. (HAO Z C, ZHANG Y G, YANG C G, et al. Effects of topography and snowmelt on hydrologic simulation in the Yellow River's source region[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 311-318. (in Chinese))
- [41] 车骞, 王根绪, 孔福广, 等. 气候波动和土地覆盖变化下的黄河源区水资源预测[J]. *水文*, 2007, 27(2): 11-15. (CHE Q, WANG G X, KONG F G, et al. Runoff estimation under climate and land cover change in Yellow River source region [J]. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(2): 11-15. (in Chinese))
- [42] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 变化环境下气象水文预报研究进展[J]. *水利学报*, 2018, 49(1): 9-18. (LEI X H, WANG H, LIAO W H, et al. Advances in hydro-meteorological forecast under changing environment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1): 9-18. (in Chinese))
- [43] TAO Y, DUAN Q Y, YE A, et al. An evaluation of post-processed TIGGE multimodel ensemble precipitation forecast in the Huai River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 2890-2905.
- [44] 温丽叶, 靳莉君, 刘静, 等. 黄河源区降水特点及气象成因分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(1): 21-25, 57. (WEN L Y, JIN L J, LIU J, et al. Precipitation characteristics and its meteorological causes in the source region of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2022, 44(1): 21-25, 57. (in Chinese))
- [45] 李江萍, 杜亮亮, 张宇, 等. 玛曲地区夏季强降水的环流分型及水汽轨迹分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(6): 1582-1590. (LI J P, DU L L, ZHANG Y, et al. Analysis on circulation pattern and water vapor source of heavy precipitation in Maqu region[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6): 1582-1590. (in Chinese))
- [46] 曹瑜, 游庆龙, 马茜蓉. 青藏高原中东部夏季极端降水年代际变化特征[J]. *气象科学*, 2019, 39(4): 437-445. (CAO Y, YOU Q L, MA Q R. Interdecadal characteristics of the summer extreme precipitation in the Central and Eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, 39(4): 437-445. (in Chinese))
- [47] QIAN Y F, ZHANG Q, YAO Y H, et al. Seasonal variation and heat preference of the South Asia high[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(5): 821-836.
- [48] FRANCIS J A, VAVRUS S J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(6): L06801.
- [49] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. *气象学报*, 1994, 52(3): 274-284. (DING Y H. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 274-284. (in Chinese))
- [50] JIANG J Y, NI Y Q. Diagnostic study on the structural characteristics of a typical Mei-yu front system and its maintenance mechanism[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(5): 802-813.
- [51] 湛芸, 李泽椿. 青藏高原东北部区域性大到暴雨的诊断分析及数值模拟[J]. *气象学报*, 2005, 63(3): 289-300. (CHEN Y, LI Z C. Diagnostic analysis and numerical simulation on a regional heavy-hard rain in Northeast Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(3): 289-300. (in Chinese))
- [52] 郁淑华, 高文良, 彭骏. 近 13 年青藏高原切变线活动及其对中国降水影响的若干统计[J]. *高原气象*, 2013, 32(6): 1527-1537. (YU S H, GAO W L, PENG J. Statistical analysis of shearline activity in QXP and its influence on rainfall in China in recent 13 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(6): 1527-1537. (in Chinese))
- [53] 徐桂玉, 林春育. 华西秋雨特征及成因探讨[J]. *气象科学*, 1994, 14(2): 149-154. (XU G Y, LIN C Y. Survey on the causes and features of autumn rain in Western China [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 1994, 14(2): 149-154. (in

Chinese))

- [54] 白虎志, 董文杰. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 884-889. (BAI H Z, DONG W J. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 884-889. (in Chinese))
- [55] 狄潇泓, 王小勇, 张培燕. 西北地区一次罕见的秋季连阴雨特征分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(4): 358-361, 409. (DI X H, WANG X Y, ZHANG P Y. Analysis of an infrequent continuous rain weather process in autumn in Northwest China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(4): 358-361, 409. (in Chinese))
- [56] 王建兵, 安华银, 汪治桂, 等. 甘南高原秋季连阴雨的气候特征及主要环流形势[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 70-77. (WANG J B, AN H Y, WANG Z G, et al. The climatic characteristics of continuous autumn rain in Gannan Plateau during 1981—2010 and the main circulation [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 70-77. (in Chinese))
- [57] 张荣刚, 靳莉君, 芦璐, 等. 2017年秋季黄河源区连阴雨成因分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 7-11. (ZHANG R G, JIN L J, LU L, et al. Cause analysis of autumn continuous rain in the source region of the Yellow River in 2017[J]. Yellow River, 2018, 40(5): 7-11. (in Chinese))

Key scientific issues of hydrological forecast in the headwater area of Yellow River*

YONG Bin^{1,2}, ZHANG Jianyun^{1,3}, WANG Guoqing^{1,3}

- (1. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: The hydrological forecast for the headwater area of Yellow River is of vital importance to the flood water resources utilization through optimal operation of cascade reservoirs over the Upper Yellow River such as Longyangxia and Liujiaxia, even to the prevention of flood and drought disasters for the entire Yellow River basin. However, the hydrological forecast in the source region is one of difficult problems in the current operational forecast of flood and discharge of Yellow River, due to the critical deficiency of ground-based rainfall observations and the lack of special hydrological model for high and cold mountain areas. This paper first reviewed the domestic and international related studies and then demonstrated the current status and technical level of hydrological forecast in the headwater area of Yellow River from three aspects including precipitation observation and precipitation forecast over ungauged areas with high altitudes, construction of hydrological model in cold regions and integration of meteorological and hydrological coupling forecast system, and meteorological genesis and formation mechanism of plateau precipitation occurrence. Subsequently, several key scientific issues existed in current hydrological operation forecast are systematically analyzed. Finally, it is suggested that the future studies of hydrological forecast in the headwater area of Yellow River focus on several important directions, such as the new-generation multi-source precipitation information fusion and assimilation, the development of specific hydrologic model for high and cold regions, the seamless ensemble forecast technique based on the meteorological and hydrological coupling, the analysis of multiple weather systems triggering heavy precipitation and continuous overcast rain.

Key words: hydrological forecast; precipitation; hydrological model; weather system; meteorology and hydrology coupling; headwater area of Yellow River

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3201100) and the National Natural Science Foundation of China (No. U2243229).