

中小河流洪水预报研究进展

李红霞^{1,2}, 王瑞敏², 黄琦², 向俊燕², 覃光华^{1,2}

(1.四川大学水力学与山区河流开发保护点实验室, 四川 成都 610065;

2.四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:中小河流洪水预报是当前国际水文科学中亟待研究的重大科学问题之一。由于中小河流存在分布广、降水及下垫面空间异致性强、产汇流时间短、突发性强、水文资料欠缺等特点,因此预报精度较低,预见期短,预报难度大。目前国内外学者对中小河流洪水预报开展了一定的研究,主要集中在中小河流洪水形成机理、洪水预报模型、缺资料中小河流水文模型参数确定方法、洪水预报耦合降水预报等方面。对中小河流洪水预报相关研究进展和存在的问题进行了总结,并指出未来在多源信息高效融合、精细化洪水模拟、高精度降水预报等方面还应进行更深入的研究。

关键词: 中小河流;洪水;预报

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2020)03-0016-08

中小河流(一般指流域面积在 200~3 000km²)洪水灾害是当前我国严重的自然灾害之一。我国中小河流众多,分布广泛,并且大多防洪设施少、标准低,监测站点少,遭遇一般暴雨洪水即可能造成较大洪涝灾害。据统计,中小河流洪水损失占比非常大,一般年份中小河流洪涝灾害损失约占我国洪涝灾害的 70%,近年来造成的伤亡人数约占 80%。特别是近些年来极端天气事件增多,中小河流常发生极端暴雨,形成较大洪水,造成比较严重的洪涝灾害^[1]。

与大江大河相比,中小河流具有分布广、降水及下垫面空间异致性强、产汇流时间短、突发性强、水文资料欠缺等特点^[2-3],因此目前中小河流洪水预报难度大,预报精度和预见期是亟需解决的关键问题^[4-5]。中小河流洪水预报工作严重滞后于现实社会需求,对中小河流洪水灾害的有效防控和管理产生很大的影响。

中小河流洪水预报研究既是当前国际研究前沿,也是国家安全和科技发展的重大需求。尽管国内外已逐步开展了部分相关研究,但在基础研究方面,相对大江大河,针对中小河流洪水特点的研究成果仍较少,目

前还存在很多方面需要进一步研究。本文对目前中小河流洪水预报的研究进展、存在的问题和难点进行总结,并对未来的可能研究方向进行展望。

1 研究进展

国际上以美国、欧盟、日本为代表的国家自 20 世纪 70 年代开始中小河流洪水预报预警方面的研究^[6-9]。欧盟第六框架计划于 2006 年 9 月启动了《山洪预报的水文气象数据资源与技术 HYDRATE》项目^[7],美国国家河流预报中心与马里兰大学研制了基于分布式水文模型的小流域洪水预报系统^[8],日本国土交通厅建立了全国性的中小河流洪水预警发布网站^[9]。21 世纪初期我国开始重点开展中小河流洪水防治。国家先后启动《全国重点地区中小河流近期治理建设规划》、《国务院关于切实加强中小河流治理和山洪地质灾害防治的若干意见》、《全国重点中小河流治理实施方案》等。2011 年全国中小河流水文监测系统建设开始实施,至 2018 年全国各地中小河流水文监测系统累计投资多达 200 亿元以上。

收稿日期:2019-10-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YEC1510700);国家自然科学基金面上项目(51979177, 51879172)

作者简介:李红霞(1981-),女,山东烟台人,博士,副教授,主要从事水文预报等方面研究。E-mail:hx_li406@126.com

通讯作者:覃光华(1975-),女,重庆人,博士,教授,主要从事水文预报等方面研究。E-mail:ghqin2000@163.com

目前国内外对中小河流洪水预报主要集中在中小河流洪水形成机理、洪水预报模型、缺资料中小河流水文模型参数确定方法、洪水预报耦合降水预报等方面。

1.1 中小河流洪水形成机理

中小河流洪水形成主要影响因素包括降水、土壤含水量、下垫面等。目前中小河流洪水形成机理的研究主要集中在降水特性、土壤含水量以及下垫面对洪水的影响。

由于中小河流洪水形成中暴雨的重要性。目前暴雨洪水响应关系是中小河流研究的重点之一,主要集中在研究降水特性对洪水影响的研究^[10-11]。Bell 等分析了降雨空间异质性和降雨数据空间尺度对洪水的影响,结果表明在对流降雨过程中,当模拟洪水过程线的增大时径流敏感性最强^[12]。Ruiz-Villanueva 等探讨了德国西南部的极端暴雨对洪水过程的影响,结果表明流域下游的暴雨对极端洪水过程的影响更为显著^[13]。胡彩虹等分析了中小流域汛期降水时空分布集中程度与洪水关系,研究结果表明降水的时空分布不均性对洪水的形成有十分明显的影响^[14]。钱群以四川省都江堰市龙溪河流域为对象,探讨了流域内不同尺度上水文响应机理和水文响应特征,初步揭示了西部湿润山区小流域的水文响应特性与机理^[15]。

不同的初始条件会影响洪水的形成,尤其是初始土壤含水量对中小河流洪水影响较大。Michaud 等通过中小尺度半干旱流域不同类型的水文模型的模拟对比表明,输入模型的降雨和土壤初始含水量的精度直接影响模拟结果^[16]。Castillo 等采用分布式水文模型模拟了半干旱环境小流域径流过程,结果表明土壤含水量是半干旱环境下径流的主要控制因素^[17]。Marchi 等通过对不同初始土壤含水量条件下洪水的分析,发现在极端降雨条件下,洪水的水文响应可能存在差异,前期土壤含水量对地表洪水有着显著影响^[18]。Grillakis 等通过对四场极端暴雨洪水的分析,讨论了初始土壤含水量对山区洪水强度的影响,并对其洪峰流量进行了敏感性分析^[19]。

下垫面对流域洪水形成也有很大的影响。影响流域洪水的下垫面要素主要有地形、地貌、土壤特性、植被、水利工程及水保措施等。国内外学者对下垫面变化对中小河流洪水影响已开展较多研究^[20-22]。袁江等研究表明城市化后研究区域下垫面条件及地形地貌均发生巨大改变,导致流域内洪水特性发生了明显变化^[20]。

Scheider 等研究表明中小河流上小型水利水电工程的修建,对河道连续性造成了较大影响,改变了洪水产汇流过程^[21]。莫淑红等开展了岔巴沟流域下垫面变化对洪水过程影响的研究,结果表明流域下垫面变化对不同量级暴雨洪水过程的削峰和坦化影响不同^[22]。

1.2 中小河流洪水预报模型

随着山坡水文学等理论的发展,20世纪50年代起,水文模型开始快速发展,国内外相继提出了 Sacramento、Tank、新安江、HBV、HEC-HMS、SHE、TOPMODEL、GBHM、VIC、二元水循环、流溪河模型等一系列集总式和分布式水文模型^[23-25],以及多种模型参数优化方法^[26-27],洪水预报也随之发展。但国内外洪水预报业务主要集中在大江大河,预报效果目前相对较好,针对中小河流洪水预报的模型和方法相对较少^[28-29]。此外,在我国目前的水文情报预报规范中^[30-31],尚未制定出明确的中小流域洪水预报精度评价标准。

目前在中小河流洪水预报模型和方法上,大多借鉴大流域的预报模型和方法,部分学者提出或改进了适合中小流域洪水预报的模型^[32-35]。张东峰选用了大伙房模型、新安江模型、TOPMODEL 模型,对栾川小流域进行洪水预报,结果表明从整体上看大伙房模型和新安江模型模拟效果较好;对于雨量站点分布不均的情况 TOPMODEL 模型模拟更好^[36]。李致家等以正交网格降雨径流模型研究为基础,在新安江模型基础上提出了用于洪水预报的精细化基于网格蓄满与超渗空间组合的降雨径流模型,结果表明模型在湿润流域和半湿润流域均能取得良好的模拟预报精度^[34]。陈洋波等针对中小河流缺乏河道断面资料而无法实际应用分布式水文模型的问题,采用卫星遥感影像估算河道断面尺寸,提出了适用于中小河流洪水预报的流溪河改进模型,结果表明模型可应用于中小河流实时洪水预报中^[33]。王璐等选取了 14 个典型山区小流域,分析研究 5 种常用的水文模型在山丘区小流域的适用性,研究表明 HEC-HMS 分布式水文模型模拟效果最优,适用于短历时强降雨条件下的山洪模拟^[37]。李昂等对比分析了 HEC-HMS 模型和双超模型的模拟效果,结果表明双超模型对大、中型洪水的模拟精度整体较 HEC-HMS 模型高,而 HEC-HMS 模型对小型洪水的模拟精度则较双超模型高^[38]。杨甜甜等在大伙房流域模型基础上耦合水动力学模型,建立水文水动力耦合洪水预报模型,在一定程度上弥补了集总式水文模型不能考虑河道内复杂水流运动的不足^[39]。Bellos 等提

出一种基于物理的二维水动力模型耦合水文模型的方法,在希腊雅典的小流域进行模拟,模拟速度快且取得了良好的模拟结果^[40]。王建金等以海南省定安河小流域为例,采用基于多时段综合算法和修匀算法的深层前向BP神经网络,提高了洪水预报精度^[41]。

目前常用于中小河流洪水预报的模型见表1,包括水文模型、水文水动力学耦合模型、数据驱动模型等。

1.3 缺资料中小河流水文模型参数确定方法

水文模型参数一般利用长系列数据进行率定(优化)来确定。由于中小河流大部分属于山区,站网布设较少,观测频率偏低,很多地区甚至无监测站点,导致中小河流大部分水文资料缺乏,对洪水预报模型参数有效率定有很大影响。资料缺乏流域水文模型参数确定常用的方法为区域化方法(**regionalization**)^[48-52],其主要思想是通过有资料流域的模型参数推求无资料流域的模型参数,包括将有资料流域(根据距离相近或流域属性相似选取)率定好的参数移用到缺资料流域(又称距离相近法和属性相似法),或者利用有资料流域率定好的模型参数建立与流域物理属性(如土壤、地形、植被和气候等)之间的回归关系推求无资料流域的模型参数等(又称回归法)^[52-53]。目前常用的缺资料流域水文模型参数确定方法见表2。

Merz 和 Blöschl 利用奥地利 308 个中小流域研究了多种参数区域化方法的效果,结果表明基于距离相近的方法比基于流域属性的方法(全局回归法和局部回归法)效果更好^[54]。Young 利用 PDM 模型对英国 260 个中小流域进行研究,结果表明回归法优于距离相近法和属性相似法^[55]。Oudin 等利用 GR4J 和 TOPMO 模型对法国 913 个中小流域的研究结果表明距离相近法最优,属性相似法次之,回归法最差^[56]。Li 等对澳大利

表2 目前常用的缺资料流域水文模型参数确定方法
Table2 The currently applied determination methods of hydrological model parameters for ungauged catchments

方法	概念	参考文献
距离相近法	将距离相近的有资料流域率定好的参数移用到缺资料流域	Merz and Blöschl ^[54] , Li 等 ^[57]
属性相似法	将属性相似的有资料流域率定好的参数移用到缺资料流域	Oudin 等 ^[56] , Kay 等 ^[58]
回归法	利用有资料流域率定好的模型参数建立与流域物理属性之间的回归关系推求无资料流域的模型参数	Young ^[55] , Parajka 等 ^[59]

亚 210 个中小流域研究结果表明,距离相近法优于属性相似法^[57];Kay 等利用 PDM 和 TATE 两个水文模型对英国 119 个中小流域进行研究,结果发现对于 PDM 模型,属性相似法略优于回归法,而对于 TATE 模型,回归法表现最优,说明区域化方法的结果可能与所用水文模型有一定关系,区域化方法的适用性还有待于进一步研究^[58]。

1.4 洪水预报耦合降水预报

中小河流洪水由于汇流速度快,洪水陡涨陡落,仅依靠降雨径流和河道洪水预报,预报预见期往往较短,难以满足防洪减灾的要求。在洪水预报中耦合定量降水预报成为延长洪水预报预见期的主要技术手段^[60-61]。研究表明在洪水预报中引入定量降水预报,采用气象水文耦合预报的方式,可以有效延长洪水预报预见期。数值天气预报是定量降水预报的主要手段,目前国际上比较先进的数值天气预报模式包括

表1 目前常用的中小河流洪水预报模型

Table1 The currently applied flood forecasting models for small - medium rivers

分类	模型	参考文献
水文模型	集总式/分布式水文模型	新安江模型及改进
	集总式水文模型	大伙房模型及改进
	半分布式水文模型	TOPMODEL 模型
	分布式水文模型	HEC-HMS 模型 TOPKAPI 模型 流溪河模型及改进
水文水动力耦合模型	一维水动力耦合水文模型	一维水动力模型耦合大伙房模型
	二维水动力耦合水文模型	二维水动力模型耦合单位线模型
数据驱动模型	人工神经网络模型	BP 神经网络及改进

Zhao 等^[42],李致家等^[34]

苏万敏^[43],张东峰^[36]

Beven and Kirkby^[44],苏万敏^[43]

Bennett^[45],王璐等^[37]

刘志雨等^[46]

陈洋波等^[33]

杨甜甜等^[39]

Bellos 等^[40]

王建金等^[41],赵兰兰等^[47]

美国宾西法尼亚州立大学和美国大气研究中心联合研发的 MM5 模式、美国国家环境预报中心研发的 NCEP 和 WRF 模式,欧洲中期天气预报中心研发的 ECMWF 模式、加拿大气象中心研发的 CMC 模式以及我国气象局自主研发的 GRAPES 等,主要的数值天气预报模式见表 3。不同模式往往又包含多个子产品,预报时空分辨率和预报时效也不完全一样^[62],如 ECMWF 模式预报时效长达 15d,在 0~10d 预报选用分辨率高的 TL639L62 模式(水平分辨率约 30km),10~15d 预报改用较低分辨率的 TL319L62 模式(水平分辨率约 65km)^[63]。

表3 目前常用的区域数值降水预报模式

Table3 The currently applied regional numerical weather forecasting models

研发机构	模式	参考文献
美国宾西法尼亚州立大学 和美国大气研究中心	MM5	Anderson 等 ^[64] ,Amengual 等 ^[65]
美国国家环境预报中心	WRF	Jankov 等 ^[77] ,张海荣 ^[78]
欧洲中期天气预报中心	ECMWF	Molteni 等 ^[79] ,林锐等 ^[74]
加拿大气象中心	CMC	Jasper 等 ^[67] ,包红军等 ^[80]
中国气象局数值预报中心	GRAPES	包红军等 ^[60] ,王莉莉等 ^[81]

早期应用较多的是单一数值降水预报。Anderson 等利用中尺度模式 MM5 预报的降水信息作为 HEC-HMS 的输入信息,预见期延长了约 48h^[64]。Amengual 等将 HEC-HM 耦合 MM5,通过基于扰动的 MM5 集合预报结果,分析流域对降雨模式时空不确定性的响应灵敏度^[65]。Lu 等将 MC2 与新安江模型单项耦合,建立淮河上游实时洪水预报^[66]。余豪利用改进后的 GFS 降水数值预报信息耦合洪水预报模型,有效的延长洪水预报预见期 5-12 个时段^[67]。由于单一的确性降雨预报具有模式误差、大气自身混沌以及初值误差等特点,因此预测结果通常具有很大的不确定性^[68]。Miller 等利用耦合数值天气预报模式和水文模型的 CARS 预报系统,对 1995 年美国加利福尼亚州北部俄罗斯河流域的洪水进行模拟,结果表明模拟精度较高误差基本在 10%以内,但存在很大的不确定性^[69]。Yu 等采用 MM5 耦合 HMS 模拟了三场暴雨洪水,结果表明 MM5 对雨型预报效果基本较为准确,但以 MM5 降水作为输入的洪水预报结果偏小^[70]。Jasper 等将五个大气模型与水文模型分别进行耦合,分析气象水文耦合模式在山

区流域的效果,研究指出预报存在很大的不确定性^[71]。

因此在单一数值降水预报的研究基础上,发展了多模式集合降雨预报,用以处理预报结果的不确定性问题,将单一确定性预报转变为概率预报^[72]。WMO 设立了全球多模式集合预报(TIGGE)资料中心,包括欧洲中期天气预报中心(ECMWF),美国国家大气研究中心(NCEP)和中国气象局(CMA)等^[73]。Wu 等提出一种基于多模式集合降水预报的气候-水文耦合模型,在淮河王家坝子流域的模拟结果表明,多模式集合降水预报的耦合系统在延长预见期的同时降低了洪水预报的不确定性^[74]。彭涛等利用集合降水预报产品作为新安江模型的输入,对湖北省漳河流域汛期典型洪水过程进行预报,结果表明考虑预见期内的降雨比未考虑预见期降雨对洪水预报结果更有优势^[75]。林锐等将欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 24hr 累积降水预报信息进行等权重加权集合平均,驱动 DHSVM 模型进行洪水预报,结果表明耦合集合数值天气预报后能够延长洪水预报预见期,预见期在 8d 以内的预报结果较为可靠^[76]。

2 存在的问题及研究展望

2.1 精细化洪水模拟提高预报精度

目前中小河流洪水预报大多采用已有的流域洪水预报模型,模型在中小河流上的适用性和精度等很多地方还需要进一步研究。未来应进一步研发适用于中小河流的洪水预报模型,在中小河流暴雨洪水演变特征和形成机制、精细化中小河流洪水模拟、缺资料流域水文模型参数确定方法、中小河流洪水预报实时校正技术等方面应开展更深入研究,提高中小河流洪水预报精度。

此外,随着社会经济的快速发展,人类对水资源的需求不断增加,人类活动对很多中小河流也产生了一定的影响,如库塘闸坝等小型水利水电工程的修建以及城市化等。流域上已有的洪水预报模型或预报方案可能不再适用,给中小河流洪水预报带来新的挑战。因此未来中小河流洪水预报需要考虑人类活动对中小河流洪水的复杂影响和作用。

2.2 多源信息提高数据完备性和准确性

中小河流洪水预报准确性依赖于各种观测数据的完备性和准确性。由于大部分中小河流资料相对缺乏(包括降水资料、洪水资料、水位资料等),影响了洪水预报的开展。

降水资料是水文模型重要的输入,降水的精度直接影响洪水预报的精度。因此提高降水数据准确性和时空分辨率是提高中小河流洪水预报精度的关键技术之一。雷达和卫星测雨技术的发展为降水监测提供了新手段,可弥补常规地面降水观测的不足。目前主要的卫星测雨产品包括美国的 TRMM、GPM 全球卫星降水观测系统、中国的风云系列卫星等。但不同来源的降水观测数据均有自身的误差特征,未来应充分利用天、空、地全方位多层次监测资料,识别不同来源降水信息的有效性和不确定性,进行多源信息高效融合,提高降水数据精度。

中小河流洪水和水位等资料的缺乏,对洪水预报模型参数有效率定有很大影响。未来应进一步合理布设水文站点,加强水文资料的收集和积累,增强数据的完备性;同时进一步研究资料缺乏条件下模型参数确定方法,包括更加有效合理的参数移用方法、利用流域物理特征推求参数地理规律、研究具有物理机制的水文模型以减少水文模拟对参数率定的依赖程度等,从而进一步解决缺资料流域水文模型参数问题。

2.3 高精度降水预报延长预见期

中小流域洪水预报往往预见期偏短,因此最关键的问题之一是延长预见期。降水预报是延长洪水预报预见期的关键因素和手段之一。中小河流由于流域较小,对降水预报的准确性和分辨率要求更高,包括降水预报的位置、量级、时段和尺度等。目前数值降水预报还存在分辨率和精度偏低等问题。未来应进一步研究中小河流致洪暴雨天气动力学机制及其驱动因素,构建高分辨率高精度降水预报模式,以及发展更好的数值模式参数化、初始值确定等方法,进一步研究提高局地中小尺度降水预报能力,延长中小河流洪水预报预见期。另一方面,为了降低降水预报的不确定性,还需要进一步发展集合降水预报技术,统筹考虑各模式预报产品,利用多模式集合预报来提高降水预报的可靠性和精度。

3 结语

中小河流洪水灾害是我国当前严重的自然灾害之一。中小河流洪水预报不仅是国际前沿研究的关键科学问题,也是国家中长期科技发展规划的优先领域和重点方向。深入开展中小河流洪水预报技术和方法研究,对降低洪水带来的风险和灾害具有重要的作用和

意义。目前国内外学者在中小河流洪水形成机理、中小河流洪水预报模型、缺资料中小河流水文模型参数确定方法、洪水预报耦合降水预报等方面已经开展了一定的研究。未来应继续在多源信息高效融合、精细化洪水模拟、高精度降雨预报等方面的深入研究和发 展,将有可能进一步提高中小河流洪水预报水平,提升中小河流洪水灾害应急处置时效和风险应对能力。

参考文献:

- [1] 刘志雨,李致家,杨大文,等. 中小河流洪水预警指标确定与预报技术研究[M]. 北京:科学出版社, 2016. (LIU Zhiyu, LI Zhijia, YANG Dawen, et al. Research on Indicator Determination and Forecasting Technology for Flood Warning for Small - Mediu n River [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 陈丹凤,陈伟昌,赖峥嵘,等. 中小河流洪水预报难点及对策[J]. 农业灾害研究, 2018,8(3):50-51. (CHEN Danfeng, CHEN Weichang, LAI Zhengrong, et al. Difficulties and counter-measures in flood forecasting of small and medium-sized rivers [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2018,8(3):50-51. (in Chinese))
- [3] 李胜胜. 小流域洪水预报方法研究及应用 [J]. 资源环境, 2017,24: 35-36.(LI Xiaosheng. Research and application of flood forecasting method in small watershed [J]. Resource Environment, 2017,24:35-36. (in Chinese))
- [4] 王欢. 浅谈中小河流洪水预报的难点与对策[J]. 水资源开发与管理, 2015,(1):82-84.(WANG Huan. On difficulties and countermeasures of medium and small river flood forecast [J]. Water Resources Development & Management, 2015,(1):82-84. (in Chinese))
- [5] Todini E. Flood forecasting and decision making in the new Millennium. Where are we? [J]. Water Resources Management, 2017,31:3111-3129.
- [6] 李胜常,曹志先. 欧盟洪水研究与启示[J]. 水利水电快报, 2016,27(3):22-24. (LI Shengchang, CAO Zhixian. EU flood research and enlightenment [J]. Water Conservancy and Hydropower Express, 2016,27(3):22-24. (in Chinese))
- [7] Borga M, Anagnostou E, Bloschl G, et al. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project [J]. Environmental Science & Policy, 2011,14:834-844.
- [8] Grunfest E, Handmer J. Coping with Flash Flood [M]. Springer Netherlands, 1999.
- [9] 何秉顺,常清睿,凌永玉. 日本中小河流山洪预报研究 [J]. 山洪灾害防治, 2016,26(6):51-56. (HE Bingshun, CHANG Qingrui, LING Yongyu. Mountain flood forecasting in small and medium-sized rivers in Japan [J]. Mountain Flood Prevention, 2016,26(6):51-56. (in Chinese))
- [10] Collier C, Fox N. Assessing the flooding susceptibility of river catchments to extreme rainfall in the United Kingdom [J]. International Journal of River Basin Management, 2003,1(3):1-11.
- [11] Ogden F, Julien P. Runoff sensitivity to temporal and spatial

- rainfall variability at runoff plane and small basin scales [J]. *Water Resources Research*, 1993,29(8):2589-2597.
- [12] Bell V, Moore R. The sensitivity of catchment runoff models to rainfall data at different spatial scales [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2000,4(4):653-667.
- [13] Ruiz-Villanueva V, Borga M, Zoccatelli D, et al. Extreme flood response to short-duration convective rainfall in South-West Germany [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2012,16(5):1543-2012.
- [14] 胡彩虹,王纪军,詹发竹,等. 中小流域汛期降水时空分布集中程度与洪水关系研究[J]. *水文*, 2009,29(4):14-21. (HU Caihong, WANG Jijun, ZHAN Fazhu, et al. study on the relationship between spatial and temporal distribution of precipitation and flood in flood season in medium and small watershed [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009,29(4):14-21. (in Chinese))
- [15] 钱群. 中国西部湿润山区小流域水文响应过程-以四川龙溪河流域为例 [D]. 浙江: 浙江大学, 2014. (QIAN Qun. *Hydrological Response Process of Small Watersheds in Wet Mountainous Areas of Western China - A Case Study of Longxihe Watershed in Sichuan* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [16] Michaud J, Sorooshian S. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid watershed [J]. *Water Resources Research*, 1994,30(3):593-605.
- [17] Castillo V M, A Gómez-Plaza, Martínez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach [J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2003,284(1-4):114-130.
- [18] Marchi L, Borga M, Preciso E, et al. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management [J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2010, 394(1-2):118-133.
- [19] Grillakis M G, Koutroulis A G, Komma J, et al. Initial soil moisture effects on flash flood generation - a comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2016.
- [20] 袁江. 城市化对山区中小河流洪水特性影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. (YUAN Jiang. *Study on the Influence of Urbanization on Flood Characteristics of Small and Medium Rivers in Mountain Area* [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [21] Scheeider S, Jakeman A, Letcher R, et al. Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray-Darling basin, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2002,262:84-98.
- [22] 莫淑红,巩瑶,李洁,等. 人类活动对岔巴沟流域洪水过程影响研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019,27(3):492-508. (MO Shuhong, GONG Yao, LI Jie, et al. Impact of human activities on flood process in Chabagou basin of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019,27(3):492-508. (in Chinese))
- [23] Beven K J. Rainfall-runoff modeling: the primer [J]. *Rainfall Runoff Modelling the Primer*, 2012,15(1):84-96.
- [24] 徐宗学. 水文模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2017. (XU Zongxue. *Hydrological Models* [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [25] Li H, Zhang Y, Zhou X. Predicting surface runoff from catchment to large region [J]. *Advances in Meteorology*, 2015,1-7.
- [26] Duan Q, Sorooshian S, Vijai G. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models [J]. *Water Resources Research*, 1992,28(4):1015-1031.
- [27] Li H, Zhang Y. Regionalising rainfall-runoff modelling for predicting daily runoff: Comparing gridded spatial proximity and gridded integrated similarity approaches against their lumped counterparts [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550:279-293.
- [28] Wagener T. Evaluation of catchment models [J]. *Hydrological Processes*, 2003,17: 3375-3378.
- [29] 马凯凯,李士进,王继民,等. 数据驱动的中小河流智能洪水预报方法对比研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2016,46(9):774-779. (MA Kaikai, LI Shijin, WANG Jimin, et al. Comparative study of data-driven intelligent flood forecasting methods for small-medium rivers [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2016,46(9):774-779. (in Chinese))
- [30] GB/T 22482-2008, 水文情报预报规范 [S]. (GB/T 22482-2008, *Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting* [S]. (in Chinese))
- [31] 水利部水文局, 长江水利委员会水文局. 水文情报预报技术手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (Water Resources Bureau of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Water Resources Commission Hydrology Bureau. *Hydrological Information Forecasting Technical Manual* [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2010. (in Chinese))
- [32] 迟明. 山东省中小河流洪水预报系统设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2015. (CHI Ming. *Design and Realization of Flood Forecast System of Small and Medium Rivers in Shandong Province* [D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese))
- [33] 陈洋波,覃建明,王幻宇,等. 基于流溪河模型的中小河流洪水预报方法 [J]. *水利水电技术*, 2017,48(7):12-19. (CHEN Yangbo, QIN Jianming, WANG Huanyu, et al. Liuxihe model-based method for flood forecast of medium and small-sized river [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017,48(7):12-19. (in Chinese))
- [34] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用 [J]. *河海大学学报*, 2017,45(6):471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Grid-based refined rainfall runoff hydrological model and its application in flood forecasting [J]. *Journal of Hohai University*, 2017,45(6):471-480. (in Chinese))
- [35] 梁犁丽,马岚,胡宇丰,等. 中小河流洪水预警预报方法与应用 [J]. *水电站机电技术*, 2017,40(7):88-91. (LIANG Lili, MA Lan, HU Yufeng, et al. Early warning and forecasting method and

- application of flood in medium and small rivers [J]. *Hydropower Station Electromechanical Technology*, 2017,40(7):88-91. (in Chinese))
- [36] 张东锋. 洪水预报多模型在栾川小流域的适用性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017. (ZHANG Dongfeng. Study on the Applicability of Flood Forecasting Multi-model in Luanchuan Small Watershed [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [37] 王璐,叶磊,吴剑,等. 山丘区小流域水文模型适用性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018,(2):78-84. (WANG Lu, YE Lei, WU Jian, et al. Research on multi-hydrological models applicability of flash flood simulation in hilly areas [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018,(2):78-84. (in Chinese))
- [38] 李昂. 基于HEC-HMS和双超模型的小流域洪水预报研究与应用[D]. 太原:太原理工大学, 2018. (LI Ang. Research and Application of Small Basin Flood Forecast Based on HEC-HMS and Double Super Model [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [39] 杨甜甜,梁国华,何斌,等. 基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017,15(1):72-78. (YANG Tiantian, LIANG Guohua, HE Bin, et al. Study and application of a flood forecasting model based on coupled hydrological-hydrodynamic approach [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017,15(1):72-78. (in Chinese))
- [40] Bellos V, Tsakiris G. A hybrid method for flood simulation in small catchments combining hydrodynamic and hydrological techniques [J]. *Journal of Hydrology*, 2016,540:331-339.
- [41] 王建金,石朋,瞿思敏,等. 改进BP神经网络算法在中小流域洪水预报中的应用研究 [J]. *西安理工大学学报*, 2016,32(4):475-480. (WANG Jianjin, SHI Peng, QU Simin, et al. Application of improved BP neural network algorithm in flood forecasting in the middle and small watershed [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016,32(4):475-480. (in Chinese))
- [42] Zhao R J. The Xinanjiang model applied in China [J]. *Journal of Hydrology*, 1992,135(1-4):371-381.
- [43] 苏万敏. 小流域洪水预报方法研究及应用 [D]. 大连:大连理工大学, 2016. (SU Wanmin. Study on Flood Forecasting Methods at Small Watershed and Application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [44] Beven, K J, Kirkby, M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979,24(1):43-69.
- [45] Bennett T H. Development and Application of a Continuous Soil Moisture Accounting Algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) [D]. CA: University of California, Davis, 1998.
- [46] 刘志雨,侯爱中,王秀庆. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术 [J]. *水文*, 2015,35(1):1-6. (LIU Zhiyu, HOU Aizhong, WANG Xiuqing. Flood forecasting for small- and medium-sized rivers based on distributed hydrological modelling [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015,35(1):1-6. (in Chinese))
- [47] 赵兰兰,朱冰,唐俊龙. 不同洪水预报模型在拒马河流域的应用对比分析[J]. *水文*, 2017,37(4):24-28. (ZHAO Lanlan, ZHU Bing, TANG Junlong. Comparative analysis of different flood forecasting models used for Jumahe river basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017,37(4):24-28. (in Chinese))
- [48] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究 [D]. 南京: 河海大学,2006. (WANG Guoqing. Impacts of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Middle Reaches of the Yellow River Basin [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [49] 井立阳,张行南,王俊,等. GIS在三峡流域水文模拟中的应用[J]. *水利学报*, 2004,4:15-19. (JING Liyang, ZHANG Xingnan, WANG Jun, et al. Application of GIS in simulation of river basin hydrology in Three Gorges Project reservoir [J]. *Journal of hydraulic Engineering*, 2004,4:15-19. (in Chinese))
- [50] 李红霞. 无径流资料流域的水文预报研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009. (LI Hongxia. Runoff Prediction in Ungauged Catchments [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [51] 毛能君,夏军,张利平,等. 参数区域化在乏资料地区水文预报中应用研究综述 [J]. *中国农村水利水电*, 2016,(12):88-92. (MAO Nengjun, XIA Jun, ZHANG Liping, et al. An overview of hydrological model parameter regionalization for ungauged catchments [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016,(12):88-92. (in Chinese))
- [52] Sivapalan M. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology [J]. *Hydrological Processes*, 2003,17:3163-3170.
- [53] Zhang Y Q, Vaze J, Chiew F, et al. Predicting hydrological signatures in ungauged catchments using spatial interpolation, index model, and rainfall-runoff modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,517: 936-948.
- [54] Merz R, Blöschl G. Regionalization of catchment model parameters [J]. *Journal of Hydrology*, 2004,287:95-123.
- [55] Oudin L, Andréassian V C, Perrin C, et al. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments [J]. *Water Resources Research*, 2008,44: W03413.
- [56] Young A R. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model [J]. *Journal of Hydrology*, 2006,320:155-172.
- [57] Li H X, Zhang Y Q, Chiew F, et al. Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index [J]. *Journal of Hydrology*, 2009,370(1-4):155-162.
- [58] Kay A L, Jones D A, Crooks S M, et al. A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models [J]. *Hydrology Processes*, 2006,20:3953-3973.
- [59] Parajka J, Merz R, Blöschl G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005,9:157-171.
- [60] 包红军,王莉莉,沈学顺,等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J].

- 气象, 2016,42 (9):1045-1057. (BAO Hongjun, WANG Lili, SHEN Xueshun, et al. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology [J]. Meteorological Monthly, 2016,42(9):1045-1057. (in Chinese))
- [61] 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 Xiaohui, WANG Hao, LIAO Weihong, et al. Progress in research on meteorological hydrological forecasting under changing environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(1):9-18. (in Chinese))
- [62] Cloke H L, Pappenberger F. Ensemble flood forecasting: a review [J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3-4):613-626.
- [63] 麻巨慧,朱跃建,王盘兴,等. NCEP,ECMWF 及 CMC 全球集合预报业务系统发展综述[J].大气科学学报, 2011,34(3):370-380. (MA Juhui, ZHU Yuejian, WANG Panxing, et al. A review on the developments of NCEP, ECMWF and CMC global ensemble forecast system [J]. Transactions of Atmospheric Science, 2011, 34 (3):370-380. (in Chinese))
- [64] Anderson M L, Chon Z, Kavvas M L, et al. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002,7(4):312-318.
- [65] Amengual A, Romero R, Gómez M, et al. A Hydrometeorological modeling study of a flash-flood event over Catalonia, Spain [J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(3):282-303.
- [66] Lu G H, Wu Z Y, Wen L, et al. Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River basin in China using a coupled hydro-meteorological modeling system [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008,51(7):1049-1063.
- [67] 余豪. 基于气象水文耦合模型的洪水预报与洪水优化调度方法及应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (YU Hao. Study on Flood Forecasting and Flood Optimal Dispatching Method Based on Hydro-Meteorological Model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [68] Cloke H L, Pappenberger F. Ensemble flood forecasting: a review [J]. Journal of Hydrology, 2009,375(3-4):613-626.
- [69] Miller N L, Kim J. Numerical prediction of precipitation and river flow over the Russian river Watershed during the January 1995 California storms [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010,77(1996):101-106.
- [70] Yu Z, Lakhtakia M N, Yarnal B, et al. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system [J]. Journal of Hydrology, 1999,218(1-2):72-91.
- [71] Jasper K, Gurtz J, Lang H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2002,267(1):40-52.
- [72] Thomas E, Randel L. Possible hydrologic forecasting improvements resulting from advancements in precipitation estimation and forecasting for a real-time flood forecast system in the Ohio River Valley, USA [J]. Journal of Hydrology, 2019,579:124-138.
- [73] 刘硕,王国利,张琳. TIGGE 降雨信息在柴河流域洪水预报中可利用性评估 [J]. 水文, 2018,38(5):17-22+84. (LIU Shuo, WANG Guoli, ZHANG Lin. Availability assessment of TIGGE precipitation data in flood forecasting for Chaihe River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2018,38(5):17-22+84. (in Chinese))
- [74] Wu J, Lu G, Wu Z. Flood forecasts based on multi-model ensemble precipitation forecasting using a coupled atmospheric-hydrological modeling system [J]. Natural Hazards, 2014,74 (2): 325-340.
- [75] 彭涛. 定量降水预报及其集合预报产品在中小流域洪水预报中的应用 [A]. 第 33 届中国气象学会年会 S9 水文气象灾害预报预警 [C]. 中国气象学会, 2016:9. (PENG Tao. Application of quantitative precipitation forecast and its ensemble forecast products in flood forecasting of medium-and small-size watersheds [A]. The 33rd Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S9 Hydro-meteorological Disaster Forecasting and Warning [C]. Chinese Meteorological Society, 2016:9. (in Chinese))
- [76] 林锐,泮苏莉,刘莉,等. 耦合降水预报和多目标参数优化的洪水预报方法[J]. 水力发电学报, 2017,36(10):27-34. (LIN Rui, PAN Suli, LIU Li, et al. Flood forecasting methods with precipitation prediction and multi-objective parameter optimization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017,36(10):27-34. (in Chinese))
- [77] Jankov I, Gallus W A, Segal M, et al. The impact of different wrf model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall [J]. Weather and Forecasting, 2005,20 (6):1048-1060.
- [78] 张海荣. 耦合天气预报的流域短期水文预报方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. (ZHANG Hairong. Watershed Short-Term Hydrological Forecast Coupling with Weather Forecasting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [79] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996,122(529):33-79.
- [80] 包红军,赵琳娜. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究[J]. 水利学报, 2012,43(2):216-224. (BAO Hongjun, ZHAO Linna. Flood forecast of Huaihe River based on TIGGE ensemble predictions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(2):216-224.(in Chinese))
- [81] 王莉莉,包红军. 基于 GRAPES 的气象-水文模式在淮河流域的一次试验[J]. 气象与环境科学, 2015,38(3):47-51. (WANG Lili, BAO Hongjun. Application of GRAPES meteorological-hydrological coupled model in Huaihe River [J]. Meteorological Environmental Sciences, 2015,38(3):47-51. (in Chinese))

- hong, et al. A comparative study of online monitoring technology on river sediment content [J]. *Yellow River*, 2014,36(10):16-19. (in Chinese)
- [13] 刘玉洁. 悬移质泥沙自动监测仪设计[J]. *电子测试*, 2017,24(7):29-30. (LIU Yujie. Design of suspended sediment automatic monitor [J]. *Electronic Test*, 2017,24(7):29-30. (in Chinese))
- [14] 王海申. 在线实时含沙量观测系统构建及其应用 [J]. *中国水运*, 2018,18(1):91-95. (WANG Haishen. Construction and application of online real-time sediment content observation system [J]. *China Water Transport*, 2018,18(1):91-95. (in Chinese))
- [15] 杨惠丽, 罗惠先, 于爽. 利用 ADCP 回波强度估算河流悬移质含沙量的应用研究[J]. *水利水电技术*, 2017,48(1):106-110. (YANG Huili, LUO Huixian, YU Shuang. Study on application of echo amplitude of ADCP to estimation on sediment concentration of river suspended load [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017,48(1):106-110. (in Chinese))

Scheme Design for Pumped On-line Measurement System of Silt Content

XING Jiewei¹, SHUI Jiangtao¹, LI Yanbo²

(1. Luoyang Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Luoyang 471000, China;
2. Luoyang Tractor Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: The existing methods of sediment content test adopt the methods of artificial sampling and laboratory analysis. The long working period makes it cannot be measured in real time. At present, all of the sand measuring instruments are set up in rivers. The collected signal is interfered by water temperature, velocity, water depth, pressure and other factors, as a result, the measurement system operation is unstable. Among them, isotope densitometer are proposed by the specification of sediment test. But it has radioactivity and potential impacts on the environment and the human body. This paper adopted the principle of sediment specific gravity displacement method, installed the instrument module to the shore to reduce the disturbance instrument factor, and took the water sample to the differential pressure on-line densitometer to measure the sediment content in real time. Through the scientific and reasonable installation of the densitometer, the working environment of the densitometer is close to the static state of the laboratory, the accuracy of the test is guaranteed, and a new solution is provided for the sediment content test of the suspended mass.

Key words: pumping type; sediment content; online measurement; system design

(上接第 23 页)

Advances on Flood Forecasting of Small-Medium Rivers

LI Hongxia^{1,2}, WANG Ruimin², HUANG Qi², XIANG Junyan², QIN Guanghua^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The flood forecasting of small-medium rivers is one of the most important scientific issues in the international hydrological sciences. The small-medium rivers feature wide distribution, strong spatial heterogeneity of precipitation and underlying surface, short time of runoff generation and routing and ungauged hydrological data, which lead to the low forecasting precision, short forecasting lead time and high forecasting difficulty. This paper presented the progress and issues in flood forecasting of small-medium rivers including the flood mechanism, flood forecasting models, parameters estimation for ungauged catchments, and precipitation forecasting. Efficient fusion of multi-source precipitation, precise flood simulation and high-precision precipitation forecasting are suggested for further study.

Key words: small-medium rivers; flood; forecasting