

水利部公益性行业科研专项经费项目（200901016）资助出版

黄河吴龙区间 洪水泥沙预报技术研究

霍世青 郑红星 傅旭东 梁忠民 许珂艳
刘龙庆 范国庆 狄艳艳 颜亦琪 王秀兰

编著



黄河水利出版社

水利部公益性行业科研专项经费项目(200901016)资助出版

黄河吴龙区间洪水泥沙 预报技术研究

霍世青 郑红星 傅旭东 梁忠民 许珂艳 编著
刘龙庆 范国庆 狄艳艳 颜亦琪 王秀兰

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书通过分析黄河中游吴龙区间典型支流清涧河流域产水产沙特性,研究径流、泥沙形成机制,找出致洪致沙关键因子;利用传统水文模型和分布式水文模型,研发清涧河流域降雨径流预报模型;采用有物理基础的分布式水文模型,研发清涧河流域产沙输沙预报模型,并对模型的不确定性进行了分析。书中还给出了利用统计模型和不平衡输沙模型对龙门、潼关等主要控制站含沙量过程预报技术的研究成果。

本书可供从事防汛、水文水资源预报工作的工程技术人员以及有关大专院校师生和科研工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河吴龙区间洪水泥沙预报技术研究/霍世青等编著. —
郑州:黄河水利出版社,2013. 2

水利部公益性行业科研专项经费项目(200901016)资助
出版

ISBN 978-7-5509-0417-0

I. ①黄… II. ①霍… III. ①黄河-洪水-水文预报-研究
②黄河-河流泥沙-水文预报-研究 IV. ①P331.1
②TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 012362 号

组稿编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:22.75

字数:530 千字

印数:1—1 000

版次:2014 年 8 月第 1 版

印次:2014 年 8 月第 1 次印刷

定价:65.00 元

“黄河吴龙区间主要站洪水含沙量过程 预报技术研究”项目承担单位及人员

项目承担单位:黄河水利委员会水文局

项目协作单位:中国科学院地理科学与资源研究所

清华大学 河海大学

项目负责人:霍世青

主要完成人员:

黄河水利委员会水文局

霍世青	陶新	刘龙庆	许珂艳	颜亦琪	狄艳艳
范国庆	史玉品	马骏	王秀兰	郭卫宁	何劲草
杨健	许卓首	虞航	张献志	李根峰	邱淑会
徐小华	高国甫	魏祥贵	张勇	焦敏辉	周建伟
陈志洁	郑树明	卜全喜	张亚伟	罗勳	侯博
谢莉	杜军	刘九玉	宋烁	任俨	王帅
袁华	杨国伟				

中国科学院地理科学与资源研究所

刘昌明 郑红星 朱芮芮 胡姗姗 刘静 韩静艳

清华大学

傅旭东	魏加华	介玉新	李铁键	王皓	高洁
王远见	史海匀	刘荣华	张昂	郭大卫	张利国
郭碧云	张丽	王大宇	冯晴枫	刘德天	安晨歌
杨飞	高然				

河海大学

梁忠民	刘俊	程莉	王军	毛倩倩	刘华振
曹炎煦	黄清烜	孙美云			

前言

黄河从内蒙古自治区托克托县的河口镇附近流经山西、陕西两省境内的黄土高原地区。黄土高原地区属温带大陆性季风气候,由于黄土高原特殊的自然地理条件,水土流失非常严重,汛期遇强降雨常发生高含沙洪水,使得黄河成为世界上输沙量最大、含沙量最高的多沙河流。高含沙洪水极其复杂的产水产沙规律,以及在运移过程中造成的剧烈河道冲淤,给洪水预报、防洪调度,乃至水资源开发利用带来了众多困难。

2002年以来,黄河水利委员会开展了黄河调水调沙、小北干流放淤试验等重大治黄实践。这些治黄实践,以及正在开展的构建全河水沙调控体系工作,对洪水预报提出了新的更高的要求。具体表现在,不仅要预报洪峰和洪量,同时还要预报沙峰和沙量。目前,虽然国内外研制的水沙模型较多,但受模型计算精度和输入资料的限制,难以满足生产实际的要求。

黄河中游吴堡—龙门区间是黄河洪水泥沙的主要来源区之一。该区复杂的水文气象特点,特殊的河道条件,多变的产汇流、产汇沙规律,以及大面积的未控制区和较落后的泥沙信息采集手段,使得洪水预报和泥沙预报存在着不少难点和空白。

2003年以来,根据治黄工作需要,黄河水利委员会水文局相继开展了黄河中下游主要水文站洪水含沙量预报研究工作,取得了一些初步成果。2003~2006年,徐建华等在“黄河中下游干流主要水文站洪水最大含沙量预报方法研究”中,利用水文学经验相关法,建立了龙门、潼关、花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、涑口和利津等站最大含沙量预报模型。2004~2009年,黄河水利委员会水文局在“黄河下游智能洪水预报模型研究”项目中,与北京师范大学环境学院进行合作,采用人工智能神经网络模型进行了花园口—利津河段含沙量过程预报研究,建立了下游各站含沙量过程预报模型。2007~2009年,为了满足黄河小北干流放淤的需要,黄河水利委员会水文局采用经验统计方法,分别建立了龙门、潼关站中小洪水最大含沙量及出现时间、次洪沙量预报方案。

目前,小浪底水库已基本进入拦沙运用后期,及时准确的洪水泥沙预报对优化水库防洪调度,减少水库淤积至关重要。虽然黄河水利委员会水文局在泥沙预报方面取得了一些初步成果,但作为小浪底水库防洪调度运用主要依据的龙门、潼关站洪水泥沙预报方案还不完善,预见期和精度还不能完全满足水库防洪调度的需要。

为了进一步认识黄河中游产水产沙规律,建立适用的洪水泥沙预报模型,提高洪水泥沙预报的精度和时效性,为小浪底水库和下游防洪调度提供科学依据,同时为构建全河水沙调控体系提供基础理论研究,2009年4月,黄河水利委员会国际合作与科技局组织申报了水利部公益性行业科研专项“黄河吴龙区间主要站洪水含沙量过程预报技术研究”。经过多次专家咨询与审查,项目于2009年11月获水利部批复。2010年1月6日,水利部在郑州召开项目启动会,该项目正式开始实施。黄河水利委员会水文局作为项目的承担单位,与中国科学院地理科学与资源研究所、清华大学、河海大学等合作单位一起,经过3

年的联合攻关,于2012年底顺利完成该项目的研究工作。本书是在该项目研究成果的基础上整理而成的。

本书通过分析黄河中游吴堡—龙门区间典型支流清涧河流域产水产沙特性,研究径流、泥沙形成机制,找出致洪致沙的关键因子;利用传统水文模型及分布式水文模型,在水循环综合模拟系统(HIMS)的支持下,研发清涧河流域降雨径流预报模型;采用数字流域技术,进行清涧河流域的产沙输沙模型应用研究;利用水文学及基于系统理论的智能方法和含沙量过程预报系统,进行主要控制站吴堡、龙门、潼关含沙量过程预报技术研究。

本书共分6章:第1章介绍项目研究背景,简述前期相关研究成果,简要介绍本次研究的主要成果,总结其主要技术创新点,指出存在问题和今后的努力方向;第2章介绍清涧河流域、吴堡—龙门区间和龙门—潼关区间地形、地貌等自然地理特征和气候、水文、泥沙等特性;第3章选取清涧河流域作为典型流域,分析吴堡—龙门区间产水产沙特性和降雨强度、时空分布、持续历时和土壤水分,地形地貌,土壤特性和土地利用,地表植被覆盖,以及水利水保工程等因子对产水产沙的影响,研究径流、洪水、泥沙形成机制,找出致洪致沙的关键因子;第4章在致洪致沙关键因子研究的基础上,结合历史洪水资料及地理信息,应用GIS/RS技术,在国家重点基础研究发展规划项目(G19990436)研发的大型水循环综合模拟系统(HIMS)的基础上,利用HIMS的模型定制功能构建业务化运行的降雨—径流模拟系统;第5章利用清华大学研发的黄河数字流域模型,借助数字流域信息化表现手段与模拟方法的优势,根据清涧河流域地形地貌与水沙运动特点,综合处理流域的空间、地理、气象、水文和历史水情等信息,开展清涧河流域的产沙输沙模型应用研究;第6章研究吴堡—龙门区间泥沙输移规律,探讨龙门—潼关、华县—潼关河段洪水含沙量演进规律,寻求龙门、潼关站含沙量过程与入流站水沙过程相关因子的关系,建立龙门、潼关站含沙量过程预报模型,研究龙门、潼关站泥沙预报技术。

此外,附录中还收录了清涧河流域降雨径流模拟系统、以GIS为平台的清涧河流域水沙模拟系统和黄河中游龙门、潼关含沙量过程预报系统3个应用软件的使用说明,以供读者参考。

书中引用了众多相关参考文献,在此谨向这些文献的作者表示衷心的感谢。

鉴于黄土高原地区降雨径流关系的复杂性和泥沙预报技术的难度,书中有些研究内容仍有待在今后的研究中进一步补充、完善。同时,由于时间较短,加之作者学识水平和文笔能力有限,难免有谬误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年12月于郑州

目 录

前 言

第 1 章 概 述	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 前期研究成果	(1)
1.3 本次主要研究内容及成果	(2)
1.4 主要技术创新点	(6)
1.5 存在问题及努力方向	(7)
第 2 章 研究区域概况	(8)
2.1 清涧河流域	(8)
2.2 吴龙、龙潼区间	(11)
第 3 章 致洪致沙关键因子研究	(16)
3.1 概 述	(16)
3.2 降雨对产水产沙的影响	(17)
3.3 地形对水沙的影响	(41)
3.4 土壤对水沙的影响	(63)
3.5 水利水保措施对水沙的影响	(75)
3.6 主要研究成果与建议	(87)
第 4 章 清涧河流域降雨径流模型研究	(88)
4.1 概 述	(88)
4.2 降雨径流模型原理与结构	(89)
4.3 目标函数与参数优化技术	(97)
4.4 降雨径流过程集总式模拟	(102)
4.5 降雨径流过程分布式模拟	(108)
4.6 小时尺度场次洪水过程模拟	(125)
4.7 降雨径流模拟系统开发	(138)
4.8 结 论	(144)
第 5 章 典型支流(清涧河流域)产沙输沙模型应用研究	(146)
5.1 概 述	(146)
5.2 流域产流产沙预报数字流域模型	(148)
5.3 清涧河流域产流产沙预报验证	(154)
5.4 模型输入与参数不确定性	(178)
5.5 吴龙区间未控区产流产沙预报	(185)
5.6 结论与建议	(198)

第 6 章 龙门、潼关含沙量过程预报技术研究	(200)
6.1 概 述	(200)
6.2 龙门站及潼关站含沙量过程预报模型与方法	(205)
6.3 实时校正模型	(238)
6.4 多模型综合技术	(251)
6.5 含沙量预报系统开发	(261)
6.6 结论与建议	(272)
附录 1 清涧河流域降雨径流模拟系统使用手册	(275)
附录 2 以 GIS 为平台的清涧河流域水沙模拟系统使用手册	(290)
附录 3 黄河中游龙门、潼关含沙量过程预报系统用户手册	(314)
参考文献	(348)

第 1 章 概 述

1.1 研究背景

黄河之所以成为世界上公认最为复杂难治的河流,正是因为其“水少沙多、水沙不平衡”的特性。20 世纪 80 年代后期,黄河连续多年未发生较大洪水,并由此带来了黄河下游、宁蒙河段、渭河等河段的河槽萎缩、排洪能力降低、悬河加剧等一系列严重问题。

针对黄河问题的症结所在,黄河水利委员会(简称黄委)提出了增水、减沙、调水调沙的治理思路,并由此三种途径构建了科学的水沙调控体系。其中,利用干支流水库调水调沙,充分利用水库群的科学调控,变天然不利的水沙关系为有利于泄洪输沙的协调水沙过程。另外,利用小北干流滩区和小浪底以下滩区实施大规模放淤也是减缓高含沙洪水在水库和下游河道淤积的有效措施。

无论是调水调沙还是滩区放淤,都对黄河水文预报提出了更新、更高的要求:不仅要准确预报洪峰流量及出现时间,也要预报最大含沙量及出现时间,还要预报洪水过程、含沙量过程的持续时间。

黄河中游吴堡至龙门区间(简称“吴龙区间”)是黄河洪水泥沙主要来源区之一。该区因特殊的暴雨洪水特点、黄土高原下垫面特征和河道形态,产汇流规律极为复杂,加之雨量站网密度小、大面积区域没有水文站控制,使得水文预报还存在着不少难点和盲点。诸多因素对产汇流规律的影响加大了该区水文预报的不确定性。目前吴龙区间洪水预报只有流量预报项目,手段较为单一,主要以河道洪水演进方法为主,尚未开展降雨径流预报,依赖于洪水预报的泥沙预报更是空白。

因此,迫切需要开展黄河吴龙区间主要站水沙过程预报技术的研究,进一步认识黄河流域水产产沙规律,扩展预报区域和预报内容,提高预报精度和时效性,为开展满足全河水沙调控要求的黄河水沙预报奠定基础,为黄河防洪、实施洪水泥沙管理的重点转向塑造协调的水沙关系等治黄重大举措提供重要技术支撑。

2009 年 11 月,水利部批复了“黄河吴龙区间主要站洪水含沙量过程预报技术研究”公益性行业科研专项,由黄河水利委员会水文局负责实施,中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室、清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室、河海大学水文水资源学院等科研机构和大专院校作为协作单位联合开展了该专项的研究工作。

1.2 前期研究成果

国内外专家、学者在泥沙预报方面做了大量工作,已有大量研究成果,但大都局限于

理论研究或事后“仿真”模拟,精度也很有限,无法应用于生产实践。2003年以来,根据治黄工作需要,在前人研究成果的基础上,黄委水文局开展了黄河中下游主要水文站洪水含沙量预报研究工作,取得了一些初步成果。

2003~2006年,黄委水文局在“黄河中下游干流主要水文站洪水最大含沙量预报方法研究”项目中,利用水文学经验相关法,建立了龙门、潼关、花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、涑口和利津等站最大含沙量预报模型,在近几年汛期进行了试预报。

2004~2009年,黄委水文局在“黄河下游智能洪水预报模型研究”项目中,与北京师范大学环境学院进行合作,采用人工智能神经网络模型进行了花园口—利津河段含沙量过程预报研究,建立了下游各站含沙量过程预报模型。

2007~2009年,为了满足小北干流放淤的需要,黄委水文局采用经验统计方法,分别建立了龙门、潼关站中小洪水最大含沙量及出现时间、次洪沙量预报方案,在近年汛期中进行了试预报。

1.3 本次主要研究内容及成果

以清涧河为典型流域,通过分析黄河吴龙区间典型支流产水产沙特性,研究径流、泥沙形成机制,找出致洪致沙的关键因子;利用传统水文模型及分布式水文模型,在水循环综合模拟系统(HIMS)的支持下,研发清涧河流域降雨径流预报模型;采用数字流域技术,进行清涧河流域的产沙输沙模型应用研究;同时,利用水文学及基于系统理论的智能方法进行主要控制站龙门、潼关含沙量过程预报技术研究,开发相应的含沙量过程预报系统。

1.3.1 致洪致沙关键因子研究

1.3.1.1 研究内容

在整理分析清涧河流域自然地理、水文气象、土壤植被、水利水电工程等资料的基础上,分析流域的下垫面特性和产水产沙特点,研究降雨、地形、土壤、水利水电工程等对产水产沙的影响。

1.3.1.2 研究成果

(1)清涧河流域属黄土高原丘陵沟壑区,为典型的超渗产流区,年径流量、输沙量用降雨量表述的程度仅为39%、25%,且存在明显的年代变化,1990~1999年径流量、输沙量用降雨量表述的程度最高,分别达到90%、84%。经初步分析,一方面是受年降雨量时空分布不同的影响,另一方面是受水利水电工程等下垫面条件变化的影响。

(2)降雨量是次洪产水产沙的主要驱动力因子,对产水产沙的作用分别为72%、67%左右,且随年代变化。用降雨量与降雨强度(简称雨强)的乘积 PI 作指标, PI 与产水产沙的相关系数分别为0.88、0.86,比仅用降雨量作变量分别提高了16%、19%。60 min雨强对产水的影响最为明显,其与次洪洪峰的相关系数为0.79。但不论洪水大小,次洪洪峰一般在600~1000 kg/m³左右。

(3)初始土壤含水量的大小是影响径流形成过程的一个重要因素,随着初始土壤含水量的加大,次洪径流深和洪峰流量相应增加。对于本研究流域,当初始土壤含水量达到

25 ~ 30 mm 时,次洪过程趋于平稳,即再加大初始土壤含水量,对次洪降雨径流过程的影响也不大。

(4)自然状态下集水区体积是地形因子中影响产水、产沙的主要因素,但是就水沙变化而言,由于集水区体积短时间内难以发生大的变化,因此造成来水来沙变化的因素中集水区体积就不再是主要因素。目前大量修建公路、铁路,进行矿产开发,水利工程建设,开展淤地坝建设及其他各类水土保持措施等,人类活动影响巨大。在这种非自然情况下,最容易发生变化的就是坡度坡长和沟壑密度等地形因子,因此影响流域产水、产沙变化的主要地形因子是坡度坡长变化、沟壑密度和地形起伏度。

(5)清涧河流域 70% 以上为黄土覆盖,且大部分为黄绵土,土壤侵蚀方式主要是面蚀、沟蚀等水力侵蚀和滑坡、崩塌等重力侵蚀,这是引起流域土壤侵蚀的最主要内在因素。土壤下渗方程无法直接获得,而往往是通过降雨、蒸发、径流等实测资料反推得到,这种量化的下渗规律其实已经包含了土壤、地形、植被,乃至人类活动影响等众多因子的综合作用。

(6)水利水保措施能有效地削洪滞沙,减轻土壤侵蚀。分析认为在降雨量保持基本不变的情况下,水保工程能降低年际间径流量的波动范围,对大雨洪水的拦蓄作用大于对暴雨洪水的拦蓄作用,能降低洪峰流量,减小洪水径流系数。但是水利水保工程都有一定的防御标准,若遇大暴雨有可能出现溃坝、决口现象,反而会加大径流量。

(7)坡面林草措施可改善土壤结构,增大土壤下渗能力和蓄水容量,同时也可在一定程度上增大对降雨的截留能力。对产流的影响表现在减少地表径流量,同时增大地下径流成分。

1.3.2 典型支流降雨径流模型研究

1.3.2.1 研究内容与方法

在深入认识清涧河流域的产汇流规律的基础上,充分利用 GIS、RS 以及水文模拟技术研究的最新成果,建立流域降雨径流预报模型,开发相应的预报系统,为黄河防洪以及洪水资源化等治黄重大实践提供技术支撑。主要研究内容包括以下几个方面:①集总式降雨径流模型;②分布式降雨径流模型;③水文模型参数分析;④水文模拟系统集成。

研究方法:根据清涧河流域水文气象及地理信息资料,建立降雨径流模型库及模型参数优化方法库,从而研发清涧河流域水文模拟系统,构建清涧河流域降雨径流模拟方案。在此基础上,针对不同的研究目标或应用目的,选用不同的模拟方案,分别进行清涧河流域日降雨径流过程模拟(或预测)、次洪模拟(或预报)研究。

1.3.2.2 研究成果

1. 清涧河流域降水径流集总模型的建立与应用

分别采用 3 种不同的产流模式,模拟研究了清涧河流域 2000 ~ 2007 年的日水文过程。在产流计算中,采用既考虑超渗产流机制又考虑蓄满产流机制的混合模式,其模拟效果最好。模型参数在时间上和空间上均呈现出一定的差异。模型条件率定(Conditional Calibration)的结果表明,汛期土壤最大含水量较其他季节小,而壤中流出流系数、蒸发系数以及地下径流系数则较其他季节大,说明了清涧河水文系统的非稳态性,要求变化参数

以提高模拟精度;在空间上,上游与下游的水文参数在 10 月至次年 1 月相似,其他季节区别较明显,反映了不同下垫面特征对径流过程的影响。

2. 分布式降水径流模型的构建与应用

根据流域 DEM 和遥感信息,借助 GIS 平台,基于清涧河数字流域分析,获取了分布式流域水文模型参数和重要输入信息,例如水系、水流方向、地形、坡度、地形指数、土地利用、植被覆盖及植被指数(*NDVI*)和叶面积指数(*LAI*)等。基于两种不同的流域离散方式:网格和子流域,对流域进行空间离散,在此基础上实现了清涧河流域分布式水文模拟。两种计算模式都较好地再现了清涧河流域的降雨径流过程,以及水循环要素的时空演变过程。分布式水文模型的模拟结果受地面气象观测站点密度的影响较大,这在一定程度上降低了分布式水文模型的效率。增加降水观测站点(或采用雷达测雨技术),有助于提高分布式水文模型的模拟效果。

3. 场次暴雨—洪水过程模拟

应用定制的水文模型,对 1980 ~ 2007 年洪峰流量超过 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 的 59 场洪水进行了数值模拟,并分析了模型对输入和参数的敏感性。研究表明,68% 的洪水过程模型效率系数均在 0.5 以上,其中 19% 超过了 0.8,有 3 场洪水模型效率系数超过 0.9;78% 的洪水过程模型确定性系数(R^2)超过 0.5,平均为 0.66。敏感性分析结果表明,洪峰流量对降水观测误差的响应十分敏感,降水输入量的微小变化,可以引起洪峰流量较大幅度的变化,这一响应特征在小洪水过程上表现得更为突出。基于 59 场历史洪水的模拟,获取了流域水文模型参数库,并深入分析了模型参数的概率分布,提出了洪水过程的集合预报方案。

1.3.3 典型支流的产沙输沙模型应用研究

1.3.3.1 研究内容与方法

根据泥沙运动力学以及建模理论,采用数字化技术、存储与计算技术、软件开发和网络技术等,以现有“黄河数字流域模型”为基础,研发完善并集成各子模型,建立了黄河中游降雨产流产沙预报模型系统。利用实测资料,对模型进行率定与验证,并对集成后的模型系统作必要的检验和试运行。选取清涧河流域作为模型检验和应用的流域。为了使模型系统应用于现状下垫面条件,采用的验证资料为研究区域 2000 年以后的典型场次洪水资料,包括洪水过程、输沙过程。

考虑到吴龙区间各支流入黄把口站离黄河干流都有一定距离,形成吴龙区间 $11\,333 \text{ km}^2$ 的未控区间。作为清涧河流域产沙输沙模拟技术专题研究的拓展,亦将模型应用到吴龙区间未控区。其中,干流河道水沙演进的侧向边界入流条件为数字流域模型的计算结果,结合河道地形和下边界条件,完成未控区产沙输沙过程的计算。

1.3.3.2 研究成果

(1) 数字流域模型定位于大范围、高分辨率的水沙过程模拟预报。在通过 DEM 数据和遥感影像获取地形与下垫面参数的基础上,将数字流域模型在清涧河流域进行了应用。计算结果较好地重现了典型场次洪水的降雨—径流—产沙—输沙过程,各测站的计算与实测径流和输沙过程均具有较好的一致性。但是,降雨数据的时空精度和一些其他没有

考虑水沙产输过程的影响因素(例如淤地坝、小水库等调蓄作用),对计算结果具有重要影响。

(2)与卫星降雨、雷达测雨以及其他手段的天气预报融合是流域水沙预报的发展方向。在应用地面雨量站实测降雨数据的同时,分析对比了国际上公开的3 h分辨率TMPA卫星降雨数据的可用性,作为雨量站信息的有效补充,参与清涧河流域子长站2002年7月洪水的计算,重新计算对原结果修正并不显著。卫星降雨数据尽管具有数据连贯整齐、时间分辨率较高的优点,但空间分辨率较低(经纬度 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,数据栅格控制面积约 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$)的特点,使其无法有效辨识流域内短历时、局部、高强度降雨信息,限制了卫星数据在清涧河等中小尺度流域的应用。

(3)在降雨信息空间密度较小的条件下,水文模拟对降雨输入条件和模型参数的不确定性响应十分敏感,较小的降雨输入变化将导致径流模拟结果出现较大的变化。如果暴雨中心数据没能被捕捉输入到水文模型中,输入的降雨量小于实际雨量,将造成模拟径流量显著偏小,使分布式水文模型的实际应用和参数识别受到了一定程度的限制。同时,参数对模型模拟结果的影响并非呈现单调或单个峰值的形式,运用数字流域模型进行水沙模拟,在参数调试时需要关注参数影响的全局分布规律。

(4)采用集成了坡面侵蚀、沟坡区重力侵蚀和沟道不平衡输沙三个子模型的黄河数字流域模型模拟典型流域的暴雨引起的产流输沙过程,重现了水沙过程的尺度现象。黄土高原丘陵沟壑区产沙过程的尺度现象是由不同子过程叠加引起的。重力侵蚀能够在特定的流域尺度下显著提高水流含沙量,是引起黄土沟壑区产输沙过程中尺度现象的最主要因素。

1.3.4 龙门、潼关站含沙量过程预报技术研究

1.3.4.1 研究内容与方法

泥沙预报主要包括产沙输沙预报、最大含沙量预报、含沙量过程预报等。目前对于含沙量过程预报的研究相对较少,生产实际中可供借鉴的模型与方法很少。为进一步认识黄河中游多支流区域泥沙变化规律,为小浪底水库的防洪调度和小北干流放淤工作以及构建黄河水沙调控体系提供必要的技术支撑,本次通过研究吴龙区间泥沙输移特性,探讨龙门—潼关、华县—潼关河段洪水含沙量演进规律;通过量化龙门、潼关站含沙量过程与入流站水沙过程、区间降雨等主要影响因子的统计关系,建立龙门、潼关站含沙量过程的预报模型,实现吴堡—潼关区间(简称吴潼区间)主要站洪水含沙量的过程预报。

首先进行泥沙过程预报所需资料的收集和预处理,然后分别采用线性动态系统模型和BP神经网络模型,以及不平衡输沙模型进行模拟预报,并针对各模型采用不同的实时校正技术进行校正,最后基于贝叶斯平均理论将各模型预报结果进行多模型综合预报。

1.3.4.2 主要成果

(1)影响河道含沙量的因子众多,如降雨、流量、挟沙力、泥沙粒径、河床形态等,各因子之间及各因子与含沙量之间的关系复杂,本书联合采用物理成因分析与统计分析相结合的途径,确定含沙量过程预报的关键因子。

(2)黄河中游面积较大,水沙异源,根据各支流空间拓扑关系及水沙组成特性,面向

预报建模目的需要,将研究区域划分成若干分区,对各分区进行预报因子抽象与合成,以提高预报的可行性。在此基础上建立了龙门站和潼关站含沙量过程预报模型,包括线性动态系统模型、BP 神经网络预报模型和不平衡输沙模型。

(3)研究含沙量过程实时校正预报技术。采用最小二乘自适应算法递推估计线性动态系统预报模型的参数,应用误差自回归模型与含沙量过程预报模型相结合,对模型预报结果进行实时校正,以提高模型预报的精度。

(4)不同含沙量预报模型都是从不同侧重方面对客观泥沙物理过程的概化和描述,对于同样的输入,不同的模型则给出不同的预报结果。本书采用贝叶斯模型平均(BMA)方法,将不同预报模型结果进行综合,发挥不同模型优势并提高预报精度。

(5)开发了面向实用性的含沙量过程预报应用系统软件,所需资料少,运行方便,简单易用。

1.4 主要技术创新点

(1)基于 GIS 与数字流域技术构建了融合遥感信息的分布式水文过程模拟的业务化运行系统。在 GIS/RS 的支持下,分别对清涧河流域的水文循环过程进行集总式和分布式模拟,揭示了流域产汇流过程和参数的时空差异以及水文系统的非稳定性特征,提出了应用条件率定以及多模型集合模拟提高模拟预报效率,减少模拟预报不确定性的新方法。

(2)在小时尺度的场次洪水降雨径流模拟方面,通过模型比选,提出了较适合研究区洪水过程的场次洪水模拟方法,论证了模型关于输入(降水)和参数的敏感性特征,提出了洪水过程预报的多参数集合预报方案。

(3)以 DEM 数据为依托,流域分级理论为依据,利用现有的先进信息技术手段,开发了一个完整的黄河数字流域模型(TUD - Basin)。模型依托结构化数字河网和动态并行计算技术,实现了基于动力学机制的大尺度($>10^3 \text{ km}^2$ 级)流域水沙过程模拟。模型在清涧河流域多场次降雨—径流—产沙—输沙过程中得到了验证与应用。

(4)研究分析了降雨输入及模型参数的不确定性对数字流域模型水沙模拟结果的影响;采用高分辨率区分不同地貌部位和产输沙子过程的模拟方法成功重现了流域水沙过程的尺度现象。为以后深入研究模型机制,提高水沙模拟预报尺度奠定了基础。

(5)面向预报需求的研究区域概化和预报因子筛选。黄河中游面积较大,水沙异源,根据各支流空间拓扑关系及水沙组成特性,面向预报建模目的需要,将研究区域划分成若干分区,对各分区进行预报因子抽象与合成,以提高预报的可行性。影响河道含沙量的因子众多,例如降雨、流量、挟沙力、泥沙粒径、河床形态等,各因子之间及各因子与含沙量之间的关系复杂,根据因子与含沙量之间物理成因关系,结合统计分析技术,识别主要预报因子也是本书的一个创新点。

(6)含沙量过程实时校正技术。现有的水文预报模型在建模时都是对客观水文现象的主要规律进行了概化,考虑主要因素,忽略次要因素,这就使得模型存在一定的误差。为了利用当前信息对预报模型参数及预报结果进行修正,引入了最小二乘自适应递推算法和误差自回归模型实时校正技术,建立含沙量过程实时校正模型,预报精度得到提高。

(7) 基于 BMA 理论的多模型综合预报技术。不同含沙量预报模型都是从不同侧重方面对客观泥沙物理过程的概化和描述,对于同样的输入,不同的模型给出不同的预报结果。为了综合考虑各模型的预报结果,发挥不同模型优势并提高预报精度,采用基于贝叶斯模型平均(BMA)理论的多模型综合预报技术,将不同预报模型结果进行综合,以提高预报精度及预报的稳定性。而且,通过 BMA 方法,不仅能提供常规意义下的确定性预报值,同时可以给出含沙量的概率预报,预报信息丰富。

1.5 存在问题及努力方向

(1) 流域产水产沙是地形、土壤、植被、降雨、土地利用等多因素综合作用的复杂物理过程,单独做某种因子的分析显然得不到最真实的结果。书中对地形、土壤植被、水利水电工程对致洪致沙的影响只是定性的分析,要将其进行定量化描述,需借助更先进的技术手段加上野外试验等,作更深入的分析研究。

(2) 在清涧河流域水沙模拟预报过程中,降雨数据时空精度和淤地坝等局部下垫面条件变化,对计算结果会产生重要影响。为了实现满足实践要求的水沙过程预报,流域-河道集成模拟预报系统需要时空精度较高的降雨和下垫面数据。同时,流域下垫面条件在人类活动影响下近年来发生了显著变化,淤地坝、小水库等对场次暴雨洪水过程具有明显调蓄作用,需要提高流域降雨预报和下垫面刻画精度。在现有地面雨量站网的条件下,通过与卫星或雷达测雨数据的融合,有可能能够提高水沙预报的精度。

(3) 服务于黄河防洪及水沙调控的水沙过程预报需要较快的运算速度。为此,数字流域模型采用了并行计算多核运行、数据库存取海量数据等先进技术。尽管如此,清涧河流域(8 万条河段、20 万个坡面)采用 6 min 时间分辨率,20 个 CPU 核心计算需 20 min。可见,进一步提高运算速度(例如结合微软 HPC 集群专用计算系统)也是未来水沙预报研究的一个重要方向。

(4) 各支流水文站到干流站的泥沙传播时间问题。泥沙颗粒在流体作用下经历启动、翻滚、跳跃、悬浮、输移和沉降等过程,与洪水传播有本质区别,所以从物理成因角度确定泥沙传播时间有很大难度,且根据历史洪水资料显示,洪峰与沙峰的峰现时差无明显的规律,所以借用洪水传播时间来推求相应泥沙传播时间的做法也存在不足。本书利用各支流站与干流站的沙峰峰现时差来确定泥沙传播时间,并没有考虑在泥沙传播过程中其他未控支流泥沙对于其沙峰峰现时间的影响,该处理方法是经验性的,未来需要加强具有物理基础的针对性研究。

第2章 研究区域概况

本书涉及的研究区域有黄河中游吴龙区间典型支流清涧河流域、吴龙区间和龙潼区间。

清涧河流域位于吴龙区间右岸中部,属黄河一级支流,处于无定河与延河之间,气候、土壤、植被、地形等自然条件具有由南向北的过渡性特征;治理措施主要为坝库控制与大面积水土保持相结合,具有地区的相似性,在陕北多沙粗沙支流治理中具有一定的代表性,因此选取清涧河流域作为吴龙区间的典型支流。

针对龙门和潼关两站含沙量预报研究,则涉及吴龙区间和龙潼区间。吴龙区间以黄河干流吴堡站及吴龙区间支流把口站为入流边界,以龙门站为出流边界;龙潼区间以黄河干流龙门、渭河华县、北洛河淤头、汾河河津为入流边界,以潼关站为出流边界。研究区域位置见图 2-1。

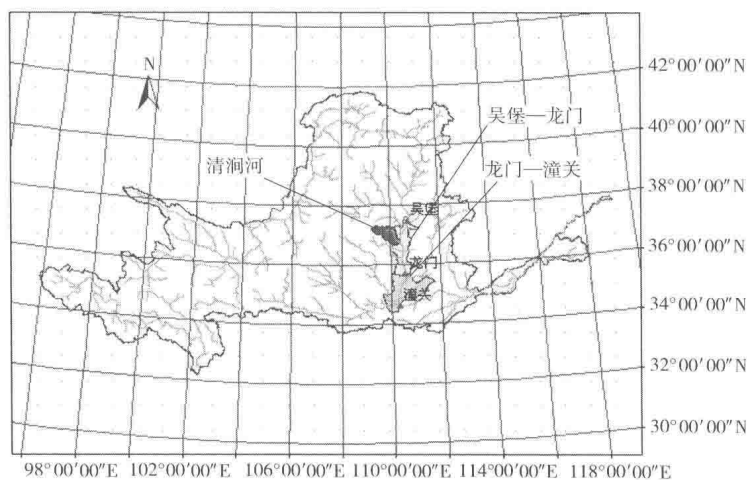


图 2-1 研究区域位置

2.1 清涧河流域

清涧河流域位于东经 $109^{\circ}12' \sim 111^{\circ}24'$, 北纬 $36^{\circ}39' \sim 37^{\circ}19'$, 东西长约 190 km, 南北宽约 56.9 km。清涧河发源于陕西子长县李家岔乡, 流经子长、清涧和延川三县, 于延川县苏亚河汇入黄河, 清涧县以上称秀延河, 清涧县以下称清涧河, 全长 169.9 km, 流域面积 4 078 km², 清涧河流域示意图见图 2-2。

清涧河流域上中游比较宽阔, 下游比较狭窄, “干流深切、支沟密布”, 河流比降变化大, 河道平均比降为 4.82‰。集水面积大于 100 km² 的支流共 8 条, 主要集中在上中游, 其中较大的有李家川、永坪川、文安驿川和拓家川等。下游除拓家川外均为不足 10 km² 的支沟、毛沟。

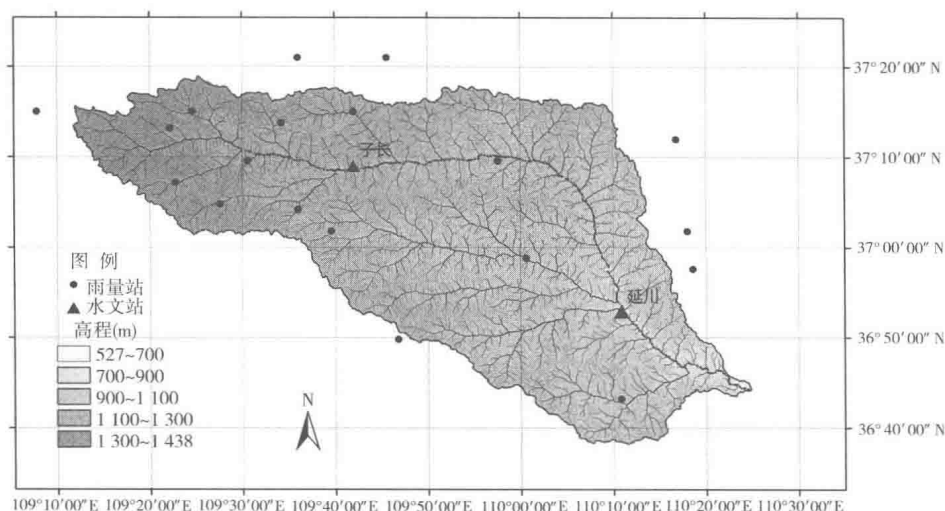


图 2-2 清涧河流域示意图

2.1.1 自然地理

清涧河流域地质基础属鄂尔多斯地质、陕北构造盆地的一部分。震旦纪开始,沉积形成了封面基底的覆盖层,主要是古生代与中生代的沉积岩。250 万年以来,在这种地貌基础上覆盖了深厚的风成黄土,并在长期的降雨、水流作用下,逐渐形成了由塬、梁、峁、沟组成的黄土高塬丘陵沟壑地貌。

清涧河流域地势上西北高而东南低,由西北向东南倾斜。该流域山地居多,起伏不平,山大沟深,植被稀少,沟壑密度 1.3 km/km^2 ,切割深度最深达 130 m,属水土流失极为严重区。

流域内土壤类型主要有黄绵土和黑垆土。由于长期耕种和水土流失,黑垆土仅残留于梁峁鞍部,主要以黄土性土为主(占流域的 92%),黄土土层节理发育,通气良好,渗水性,宜林、宜农、宜牧。但土质疏松,结构不稳定,若遇降雨容易造成水土流失。

流域内原生天然植被以森林草原为主,由于长期的自然侵蚀,加之人类活动影响,天然林草遭到严重破坏,到处是一片荒山秃岭,天然次生林较少,主要植被为人工乔木林和灌木林,荒山荒坡的天然草较为稀疏,林草面积 34.65 hm^2 ,占流域面积的 10%。

2.1.2 水文气象

清涧河流域处于大陆性暖温带季风半干旱气候区,具有明显的大陆性季风气候的特点。冬季多风、漫长、寒冷、雨雪少,夏季高温、短暂、暴雨多,春季多风、升温慢,秋季早晚温差大、降温快。多年平均降雨量为 451 mm,降雨时空分布不均,年际间变率大,年内月降雨量呈明显的单峰型分布,降雨多集中在 7~9 月,占全年降雨量的 65%,降雨量的地域分布规律由西北部向东南部递减。该流域多风,多年平均风速为 1.53 m/s ,最大风速为 20 m/s (1975 年 2 月 19 日),冬春多为西北风,夏季多为东南风,多年平均出现 8 级以上大风 5.8 次。河流冻结期在 11 月中旬至次年 3 月中旬,降雪在 11 月上旬至次年 4 月