

HUANGHE ZHONGXIAYOU GANLIU ZHUYAO SHUIWENZHAN
HONGSHUI ZUIDA HANSHALIANG YUBAO FANGFA YANJIU

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

徐建华 金双彦 任铁军 秦毅 李雪梅 等 编著



黄河水利出版社

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

徐建华 金双彦 任铁军 秦毅 李雪梅等编著

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以黄河泥沙具有“多来多排”的特性为基础,按照洪水不同来源,分析不同组合的自变量因子,建立了基于统计途径的黄河中下游干流9个水文站的洪水最大含沙量预报模型,并进行了部分试预报;采用不平衡输沙模型和系统响应函数法对夹河滩洪水含沙量过程预报进行了探索性研究。

本书特色在于理论与生产紧密结合,既注重泥沙输移规律,更强调作业预报中信息的可获得性,使模型易于应用。可供从事水文水资源、泥沙研究等专业的科研工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

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/徐建华等编著. —郑州:黄河水利出版社,2009. 11

ISBN 978 - 7 - 80734 - 606 - 7

I. 黄… II. 徐… III. 黄河流域 - 水文站 -
洪水 - 泥沙 - 水文预报 - 研究 IV. P338

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 148431 号

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:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13.25

字数:306 千字

印数:1—1 000

版次:2009 年 11 月第 1 版

印次:2009 年 11 月第 1 次印刷

定价:39.00 元

前言

天然河流中的泥沙预报,是一个在学术上及应用上都具有重要意义的研究课题。黄河是世界上输沙量最大、含沙量最高的河流。黄河健康的四大标志——堤防不决口,河道不断流,河床不抬高,水质不超标,其中前三个标志都与黄河泥沙有关,所以,解决好黄河泥沙问题,是维持黄河健康生命的核心问题之一。

黄河的泥沙预报是一项难度很大、研究问题极为复杂的挑战性课题,目前国内外尚无可借鉴的成熟经验和方法。但是随着黄河治理开发的深入,为满足黄河下游防洪、调水调沙、小北干流放淤等治黄措施的需求,亟须开展黄河中下游干支流主要水文站含沙量预报。有的领导和专家指出:现在的水文预报,只预报洪水,不预报泥沙,对黄河来说,不预报泥沙,预报内容就减少了一半,甚至可以说,没有含沙量预报,黄河水文预报是不完整的。由此看出,在黄河上开展含沙量预报,的确是黄河治理的需要。本书是在“黄河中下游干流主要水文站洪水最大含沙量预报方法”研究成果的基础上改写而成的。

本书共分8章:第1章分析、综述了当前国内外关于黄河泥沙预报研究的动态,并简述了本书的研究思路及主要目的、内容;第2章选择龙门站1956~2003年洪峰流量在起报标准 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的洪水共85场作为研究对象,在物理概念指导下,经多模型分析比较,优选出龙门站在吴堡来水为主、混合来水和吴龙区间来水为主时的10个模型;第3章选择潼关站1960~2003年符合起报标准的洪水共88场,建立并优选出在龙门来水为主、共同来水和龙潼区间来水为主时的5个模型;第4章选择花园口站1957~2000年共96场洪水,建立并优选出当洪峰流量大于等于 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和小于 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时不同小花洪峰比的10个模型;第5章选择1960~2000年夹河滩86场、高村94场、孙口74场、艾山74场、淤口88场和利津84场洪水,建立并优选出这6个水文站各3个预报模型;第6章选择龙门站1990~2003年洪峰流量在 $500\sim5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的中小洪水共108场,以吴堡沙峰、输入站合成沙峰或上述变量与预报站洪峰流量的组合为自变量,建立了小北干流放淤洪水最大含沙量预报模型;第7章以泥沙动力学和水文学理论为依据,选择黄河下游无支流加入的花园口至夹河滩河段为研究对象,建立了可用于洪水含沙量过程预报的不平衡输沙模型(简化水力学模型)和系统响应函数模型;第8章详细介绍了预报模型的生产应用情况,即对符合起报标准以及满足小北干流放淤要求的16场洪水的试预报。

各章编写人员:第1章由徐建华、金双彦、秦毅、刘晓伟、李雪梅和马骏编写,第2章和第6章由任铁军编写,第3章~第5章由段文超和吴幸华编写,第7章由秦毅编写,第8章由金双彦编写。全书由徐建华、金双彦、秦毅、李雪梅和刘晓伟统稿完成。

由于书稿资料量大,编撰时间较短,我们的写作水平有限,书中欠妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2009年8月于郑州

目 录

前 言

第1章 概 述	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究内容与方法	(2)
1.3 精度评价指标的确定	(4)
1.4 主要研究成果(推荐预报模型)	(6)
1.5 生产应用情况简介	(10)
1.6 创新点	(10)
1.7 存在问题及努力方向	(10)
第2章 龙门站次洪最大含沙量预报方法研究	(13)
2.1 吴龙区间概况	(13)
2.2 资料选用	(14)
2.3 精度控制	(14)
2.4 龙门站洪水泥沙输移特性	(15)
2.5 预报模型研制	(16)
2.6 模型的推荐	(27)
2.7 预报模型拟合检验	(29)
第3章 潼关站次洪最大含沙量预报方法研究	(32)
3.1 龙潼区间概况	(32)
3.2 资料选用	(32)
3.3 精度控制	(33)
3.4 预报模型研制	(33)
3.5 模型的推荐	(42)
3.6 预报模型拟合检验	(42)
第4章 花园口站次洪最大含沙量预报方法研究	(46)
4.1 小花区间概况	(46)
4.2 资料选用	(46)
4.3 精度控制	(46)
4.4 预报模型研制	(46)
4.5 模型的推荐	(69)
4.6 预报模型拟合检验	(73)
第5章 夹河滩及以下各站次洪最大含沙量预报方法研究	(78)
5.1 河段概况	(78)
5.2 资料选用	(78)

5.3	精度控制	(78)
5.4	预报模型研制	(79)
5.5	模型的推荐	(90)
5.6	预报模型拟合检验	(90)
第6章	龙门站小洪水最大含沙量预报方法研究	(110)
6.1	资料选用	(110)
6.2	精度控制	(110)
6.3	预报模型研制	(110)
6.4	模型的推荐	(120)
6.5	预报模型拟合检验	(123)
第7章	黄河下游夹河滩站含沙量过程预报研究	(128)
7.1	概 述	(128)
7.2	简化水力学模型	(131)
7.3	系统响应函数法	(140)
7.4	沙库模型	(145)
7.5	总 结	(147)
第8章	生产应用情况	(150)
8.1	2003年7月31日龙门沙峰试预报	(150)
8.2	2004年7月26日龙门沙峰试预报	(153)
8.3	2004年8月11日龙门沙峰试预报	(158)
8.4	2004年8月12日龙门沙峰试预报	(160)
8.5	2004年8月13日龙门沙峰试预报	(162)
8.6	2004年8月黄河下游洪水沙峰试预报过程	(164)
8.7	2005年7月2日龙门沙峰试预报过程	(173)
8.8	2005年8月12日龙门沙峰试预报过程	(176)
8.9	2006年7月31日龙门沙峰试预报过程	(178)
8.10	2006年8月26日龙门沙峰试预报过程	(182)
8.11	2006年8月31日龙门沙峰试预报过程	(185)
8.12	2006年9月22日龙门沙峰试预报过程	(187)
8.13	生产应用情况总结	(190)
参考文献与资料		(192)
附录一	批 复	(194)
附录二	任务书审查意见	(195)
附录三	初步验收意见	(196)
附录四	验收意见	(197)
附录五	试预报	(198)

第 1 章 概 述

1.1 研究背景

1.1.1 问题的提出及研究的意义

黄河,华夏儿女的母亲河

黄河,沧桑岁月的见证河

黄河,生命与活力的象征河

.....

可而今天的黄河,真是不堪负重,20 世纪 90 年代的频繁断流,下游河道的淤积萎缩,过洪能力的急剧减小,小洪水,高水位,大漫滩.....

难怪当代一位年轻的治河专家急呼“‘维持黄河健康生命’为黄河治理的终极目标”^[1]! 维持黄河健康生命,是黄河健康的需要,是广大人民生命财产安全保障的需要,是经济社会可持续发展的需要,更是时代的需要。因此,维持黄河健康生命是黄河治理的终极目标。

重要性:黄河是世界上输沙量最大、含沙量最高的河流。黄河健康的四大标志——堤防不决口,河道不断流,河床不抬高,水质不超标,其中前三个标志都与黄河泥沙有关,所以,解决好黄河泥沙问题,是维持黄河健康生命的核心问题之一。

需求:随着黄河治理开发的深入,为满足黄河下游防洪、调水调沙、小北干流放淤等治黄措施的需求,亟须开展黄河含沙量预报。

现状:现在的水文预报,只预报洪水,不预报泥沙。对黄河来说,不预报泥沙,预报内容就减少了一半,甚至可以说,没有含沙量预报,黄河水文预报是不完整的。

难度:黄河的泥沙预报,是一项难度很大、研究问题极为复杂的挑战性课题,目前国内外尚无可借鉴的成熟经验和方法。

意义:开展黄河含沙量预报,并根据洪水含沙量和级配情况,可为小北干流等适当地区“淤粗排细”的放淤试验服务;开展黄河含沙量预报,并根据洪水泥沙来源判断泥沙粗细,可为小浪底水库实现“拦粗泄细”的调度应用服务;开展黄河含沙量预报,并根据洪水大小及其组成情况,可为有计划地开展“淤滩刷槽”的洪水调度应用服务;开展黄河含沙量预报,并根据洪水泥沙总量情况,在资源性缺水的黄河流域,可为“洪水资源化”的调度应用服务。由此看出,在黄河上开展含沙量预报的确是黄河治理的需要。这项研究不仅具有重要的实践意义和应用前景,也具有科学的科学意义。

2003 年 5 月,黄委水文局研究院开始着手研究预报模型,水文局信息中心配合,并于当年开展了黄河干流龙门站第一次试预报。2004 年 5 月 16 日,水文局上报了“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”任务书。2005 年 2 月 6 日,黄委组织专家对水文局编报的任务书进行了审查。2005 年 8 月 10 日,黄委以黄规计〔2005〕105 号文批准了项目任务书。

1.1.2 国内外研究概况简介

国内外在流域产沙预报方面作了大量的工作,也有许多研究成果^[1],但大都是事后“仿真”模拟,精度也很有限,如黄河水沙变化研究中,相关的结果都不作逐年检验,为了避免剧烈的波动,而是用10年平均结果来反映^[2,3],因此在大江大河上开展含沙量预报,难度更大,也未见付诸实施。

据《黄河水文志》记载,早在1960年,主要为三门峡水库服务,发布年、汛期、月和次洪水输沙量预报,预报方法采用简单的水沙相关法^[4],之后也有一些主要是次洪沙量和输沙率预报的模型^[5,6]。但由于问题的复杂性,含沙量预报一直未能开展起来。

20世纪70年代后期,黄委水文局和黄委水科院在“黄河下游变动河床洪水水位预报方法研究”中曾尝试过平均含沙量、最大含沙量及沙峰峰现时间预报,但由于方法中所涉及的预报因子太多以及限于当时作业预报手段,该法在生产中未得到推广应用。

1.2 研究内容与方法

黄河因沙多水黄而得名,黄河因沙多水黄而闻名,黄河因沙多水“大”而难治,黄河因沙多水“少”而枯竭。黄河人、关心黄河的人,在黄河泥沙问题上进行过大量的、卓有成效的研究,对黄河泥沙的侵蚀、输移、沉积,河床演变等方面有许多研究成果。如黄河下游泥沙有多来、多排、多淤,少来、少排、少淤的特性^[5,7],这就是水文学方法建立含沙量预报的依据。

1.2.1 研究内容

黄河泥沙预报的内容很多,如最大含沙量预报、最大含沙量出现时间预报、输沙率(含沙量)过程预报以及泥沙粒径组成预报等。本次主要涉及洪水最大含沙量预报,其他预报暂不涉及。预报研究的水文站有黄河中游干流的龙门、潼关两站,黄河下游干流花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、冻口和利津等站洪水最大含沙量预报。并利用水力学方法,探索夹河滩站含沙量过程预报。

为了满足小北干流放淤对含沙量预报的要求,项目组选择接近近期河道条件的1990~2003年系列,统计龙门站洪峰流量在500~5000 m³/s的洪水,同时摘录吴堡以及吴龙区间三川河后大成、无定河白家川、清涧河延川、昕水河大宁、延水甘谷驿等站的洪峰流量、最大含沙量等,初步建立了龙门最大含沙量预报模型。

1.2.2 研究方法

在现场查勘增强感性认识的基础上,进行科学研究,分析影响含沙量的主要因素,组织科研(高校)、生产与管理部门协同攻关,使科研成果尽快转化为生产力。

查阅和研究前人有关研究成果,考虑移用和改造的可能性,建立便于操作的预报经验模型,使之适应预报作业中有限信息的实际情况来进行最大含沙量预报。

黄河中下游泥沙素有“多来多排”之说,说明下站的含沙量主要受上游干支流来水来沙的影响;另外,当上游站来沙系数小时,河道发生冲刷,下站含沙量会增大。因此,可采用上

游站含沙量、来沙系数等参数建立预报模型,同时由于流量反映了动力因子的强弱,也可用流量或区间加入量为参数,用水文学方法建立经验相关关系。

本次研究除对最大含沙量预报方法探讨之外,还对含沙量过程预报做了有意义的尝试。通过对比总结以往的研究成果,在借鉴前人工作的基础上,分别从泥沙动力学和水文学角度出发,研究含沙量过程预报的方法。由于本研究还处在探索方法的基础研究阶段,为使问题集中在含沙量过程预报方面,所以选择无支流加入河段为研究对象,这里研究河段是花园口至夹河滩河段,并排除漫滩洪水情形。本项研究的技术路线如下:

(1)收集花园口、夹河滩的相关水沙资料。包括两站流量、含沙量、级配资料等。

(2)对所收集的资料进行分析。包括洪水流量、含沙量的大小,洪水、悬移质泥沙的传播时间,泥沙颗粒的级配情况等。

(3)在上述水沙资料的基础上,采用水文学方法和水动力学理论,分别建立含沙量预报的水力学模型、系统响应函数模型,沙库模型,并从可操作性和预报效果两方面对模型进行验证。

(4)从模型结构、预报效果和预报资料的要求三个方面来比较模型的优劣。

1.2.2.1 龙门站最大含沙量预报

黄河泥沙65%来自龙门以上。因此,进行龙门站沙峰预报方法研究,可为潼关站沙峰预报争取预见期。

在统计的92场龙门站发生 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的洪水中,有30%完全是吴堡以上来水,其余为吴堡及其吴龙区间支流混合来水,一些为吴堡以下支流来水,有近10%为干支流水文站以下未控区暴雨造成。因此,龙门沙峰预报方法研究中,分别以吴堡来水为主、干支流混合来水、未控区暴雨洪水和揭河底等分别研究预报方法。

1.2.2.2 潼关站沙峰预报方法研究

潼关是三门峡水库的入库站,潼关以上有4个干支流水文站,分别是龙门、华县、河津和淤头。从历史实测资料看,潼关的泥沙主要来自龙门以上,北洛河淤头、泾河张家山以上来水也会带来大量的泥沙,但淤头和张家山属省区水文站,预报模型不宜上延到华县以上的张家山,但必须考虑北洛河淤头站。

在潼关的沙峰预报方法研究中,要区别以龙门来水为主、华县来水为主、有无漫滩等情况分别研究。

1.2.2.3 花园口最大含沙量预报

花园口站是黄河下游防汛的重要指标站,未来下游是否淤积或冲刷,人们都比较关注花园口的含沙量指标。预报花园口的含沙量拟以小浪底水库出库站以及黑石关和武陟站为输入,建立含沙量相关关系。

1.2.2.4 夹河滩及其以下各站最大含沙量预报

夹河滩站至利津站束缚在黄河大堤内,基本上无泥沙加入,主要是利用上下游站经验相关,以上游站含沙量、来沙系数为自变量,也可考虑流量动力因子。

1.2.2.5 夹河滩洪水含沙量过程预报

分别建立恒定流不平衡输沙模型、以多来多排特性为基础的系统响应函数模型、沙库模型进行含沙量过程预报。

1.3 精度评价指标的确定

在模型的研究过程中,模型优劣的对比评价是必不可少的,这就应该有相应的评价标准。然而由于含沙量预报还不成熟,因此还不能像水资源和洪水预报那样,有一套相应科学合理的精度评价方法,鉴于含沙量预报精度评价指标前人未曾研究,这里借用洪水预报精度评价思路来建立评价含沙量预报模型好坏的指标。

1.3.1 洪峰预报方案精度评价简介

根据《水文情报预报规范》^[8],洪峰预报许可误差规定如下:降雨径流预报以实测洪峰流量的 20% 作为许可误差;河道流量(水位)预报以预见期内实测值变幅的 20% 作为许可误差。

预报项目的精度评定规定如下:一次预报的误差小于许可误差时,为合格预报。合格预报次数与预报总次数之比的百分数为合格率,表示多次预报总体的精度水平。

合格率按下列公式计算:

$$QR = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中:QR 为合格率(取 1 位小数);n 为合格预报次数;m 为预报总次数。

预报项目的精度按合格率的大小分为三个等级。精度等级按表 1-1 规定确定。

表 1-1 预报项目精度等级

精度等级	甲	乙	丙
合格率(%)	$QR \geq 85.0$	$85.0 > QR \geq 70.0$	$70.0 > QR \geq 60.0$

1.3.2 最大含沙量预报模型精度评价指标的建立

本次采用两种指标来判别预报值好坏与否/通过与否。

1.3.2.1 参考洪峰预报许可误差的思路(指标一)

洪峰预报许可误差规定如下:降雨径流预报以实测洪峰流量的 20% 作为许可误差。

参照洪峰预报许可误差的思路,各站沙峰预报模型精度评价指标的确定方法是:实际出现含沙量在临界含沙量(见表 1-2)以上时,允许误差暂按相对误差小于等于 20% 为通过,反之为不通过。当实际出现含沙量在临界含沙量以下时,允许误差按绝对误差来评定,绝对误差小于等于规定的误差即认为通过,反之为不通过(见表 1-3)。其中,绝对误差和相对误差的定义分别是:水文要素的预报值减去实测值为预报误差,其绝对值为绝对误差。预报误差除以实测值为相对误差,以百分数表示。

(1)各站误差评定临界含沙量的确定。误差评定临界含沙量是指:在研究的 9 个站中,各站按满足洪峰起报标准的洪水摘录对应最大含沙量,所有最大含沙量的算术平均即为临界含沙量。

(2)各站最大含沙量预报模型精度评定允许误差。参照洪峰预报许可误差的思路,各站沙峰预报模型优劣的评价方法是:实际出现含沙量在临界含沙量以上时,若预报相对误差

小于等于许可相对误差,则认为本次预报通过,记 $Q_i = n(\text{模型预报通过次数})/m(\text{模型预报总次数})$ 为模型预报通过率。分别统计各预报模型在相应误差档次下的相应预报通过率,通过率最高者相对最优,并依此推荐预报模型。当实际出现含沙量在临界含沙量以下时,模型的预报绝对误差小于等于规定的许可误差即认为模型预报通过,按前述方法统计通过率并推荐预报模型。

表 1-2 各站最大含沙量误差评定临界含沙量值

站名	统计时段 (年)	沙峰次数 (次)	临界含沙量 (kg/m^3)
龙门	1956 ~ 2000	85	300
潼关	1960 ~ 2000	97	200
花园口	1954 ~ 2000	96	100
夹河滩	1954 ~ 2000	89	100
高村	1954 ~ 2000	97	80
孙口	1954 ~ 2000	77	80
艾山	1954 ~ 2000	77	80
涑口	1954 ~ 2000	91	70
利津	1954 ~ 2000	87	70
龙门(小流量)	1990 ~ 2003	108	172

表 1-3 各站预报最大含沙量误差评定控制指标

站名	临界含沙量 (kg/m^3)	允许误差控制指标	
		小于临界值(kg/m^3)	大于等于临界值
龙门	300	60	20%
潼关	200	40	20%
花园口	100	20	20%
夹河滩	100	20	20%
高村	80	16	20%
孙口	80	16	20%
艾山	80	16	20%
涑口	70	14	20%
利津	70	14	20%
龙门(小流量)	172	34	20%

1.3.2.2 参考流量过程预报许可误差的思路(指标二)

流量过程预报许可误差规定如下:“预见期内最大变幅的许可误差采用变幅均方差(σ_Δ),变幅为零的许可误差采用 $0.3\sigma_\Delta$,其余变幅的许可误差按上述两值用直线内插法求出^[8]。”

由于可以认为某预报站实测场次最大含沙量系列为一个随机变量系列,其分布曲线看成是过程线,则参照流量过程预报许可误差的思路,在建模资料所在时期内,以最大含沙量系列的均方差 σ_{ρ_m} 为基础,取该预报站历史上曾经出现的最大沙峰的许可误差为 σ_{ρ_m} ,最小沙峰的许可误差为 $0.3\sigma_{\rho_m}$,其余值的许可误差按上述两值用直线内插法求出,见表 1-4。

表中均方差按下列公式计算:

$$\sigma_{\rho_m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{mi} - \bar{\rho}_m)^2}{n - 1}} \tag{1-2}$$

式中: ρ_{mi} 为次洪最大含沙量; $\bar{\rho}_m$ 为次洪最大含沙量的均值; n 为样本个数。

表 1-4 各站预报最大含沙量许可误差计算公式

站名	最大沙峰 (kg/m ³)	最小沙峰 (kg/m ³)	均方差 σ_{ρ_m} (kg/m ³)	许可误差计算公式
龙门	777	43	143.6	$y = 0.137x + 37.19$
潼关	911	26.6	167.9	$y = 0.133x + 45.48$
花园口	809	5.47	122.2	$y = 0.106x + 31.28$
夹河滩	456	17.5	79.4	$y = 0.127x + 13.96$
高村	405	13.1	62.9	$y = 0.112x + 7.84$
孙口	267	19.3	47.3	$y = 0.134x - 3.26$
艾山	246	20.5	46.3	$y = 0.144x - 5.28$
涑口	221	19.1	41.5	$y = 0.144x - 8.96$
利津	222	21.3	39.7	$y = 0.138x - 9.63$
龙门(小流量)	1 040	10.7	153.9	$y = 0.105x + 41.97$

注:因变量 y 代表 $\sigma_{\rho_{mi}}$,自变量 x 代表 ρ_{mi} 。

直线内插公式为

$$\sigma_{\rho_{mi}} = \frac{0.7(\rho_{mi} - \rho_{mmin})}{\rho_{mmax} - \rho_{mmin}} \sigma_{\rho_m} + 0.3\sigma_{\rho_m} \tag{1-3}$$

式中: ρ_{mmax} 为最大的沙峰; ρ_{mmin} 为最小的沙峰。

实际预报中,若 $|\rho_{m计} - \rho_{m测}| \leq \sigma_{\rho_{mi}}$ 时,即认为预报通过,反之认为不通过。

1.4 主要研究成果(推荐预报模型)

1.4.1 最大含沙量预报

在物理概念指导下,经多模型分析比较,优选出各站最大含沙量预报模型见表 1-5 和表 1-6。

1.4.2 小北干流放淤龙门站最大含沙量预报

小北干流放淤龙门站最大含沙量预报模型见表 1-7。

表 1-5 龙门、潼关、花园口洪水最大含沙量预报模型汇总

站名	分类	k 值	模型	表达式	计算公式	α	β	相关系数	指标一 通过率	指标二 通过率
龙门	—	$k \geq 0.9$	2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.8154x + 17.11$	—	—	0.914	28/35 = 80.0%	26/35 = 74.3%
			1	$y = f(\rho_{\text{具}})$	$y = 1.0189x - 63.583$	—	—	0.918	25/35 = 71.4%	28/35 = 80%
			3	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.6499x + 12.13$	0.1581	0.8096	0.927	27/35 = 77.1%	27/35 = 77.1%
			4	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.2075x + 13.264$	0.2134	0.9056	0.919	25/35 = 71.4%	24/35 = 68.6%
潼关	—	$0.6 \leq k < 0.9$	2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.9616x - 25.57$	—	—	0.964	24/27 = 88.9%	24/27 = 88.9%
			4	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.1256x - 10.221$	0.1061	1.1649	0.965	23/27 = 85.2%	25/27 = 92.6%
		$k < 0.6$	2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.5943x + 99.57$	—	—	0.725	16/23 = 69.6%	18/23 = 78.3%
			4	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.0211x + 38.854$	0.4372	0.8260	0.825	15/23 = 65.2%	15/23 = 65.2%
花园口	—	—	—	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 5.775E - 6x^2 + 0.01659x + 54.301$	0.3005	0.9454	0.949	45/60 = 75.0%	52/60 = 86.7%
				$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.849x + 3.4209$	—	—	0.890	9/14 = 64.3%	10/14 = 71.4%
				$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.4868x - 28.488$	0.2009	0.8172	0.889	9/14 = 64.3%	10/14 = 71.4%
				$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.8759x + 6.6624$	—	—	0.995	14/14 = 100%	14/14 = 100%
花园口	洪水流量大于 等于 4 000 m ³ /s	$k \geq 0.9$	2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 167.04x - 15.927$	-0.4976	0.8702	0.985	13/14 = 92.9%	14/14 = 100%
			6	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.9381x - 28.063$	—	—	0.979	9/16 = 56.3%	
			2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.008357x + 26.028$	0.7883	0.9548	0.977	10/16 = 62.5%	
			6	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.3744x + 28.202$	—	—	0.728	10/11 = 90.9%	
		$0.8 \leq k < 0.9$	6	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 2.4543x + 3.4994$	0.1179	0.4818	0.752	10/11 = 90.9%	
			2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.861x + 1.5571$	—	—	0.984	14/17 = 82.4%	
			6	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 0.048x - 8.4179$	0.4178	0.8552	0.929	14/17 = 82.4%	
			2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.6622x + 21.795$	—	—	0.988	6/6 = 100%	
		$k < 0.7$	6	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$	$y = 7.6044x + 2.7299$	-0.0582	0.6526	0.994	6/6 = 100%	
			2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 0.6099x + 4.1914$	—	—	0.907	8/12 = 66.7%	10/12 = 83.3%
	洪水流量 3 000 ~ 4 000 m ³ /s	$k \geq 0.9$	2	$y = f(\rho_{\text{合}})$	$y = 2.009E + 13x - 2.7511$	-3.412	0.3060	0.921	7/8 = 87.5%	8/8 = 100%
		$k < 0.9$	5	$y = f(Q_{\text{max}}^{\alpha} \rho_{\text{合}}^{\beta})$						

注: ① x 为表达式列括号中对应自变量的组合。② 花园口洪峰流量大于 4 000 m³/s 采用的是 1974 年以后系列。

表 1-6 夹河滩及以下各站含沙量预报模型汇总

水文站	表达式	计算公式	相关系数	α	β	指标一通过率	指标二通过率
夹河滩	$y = f(\rho_{\text{花}})$	$y = 0.5747x + 24.452$	0.910			73/89 = 82.0%	81/89 = 92.1%
	$y = f(Q_{\text{夹}}^{\alpha} \rho_{\text{花}}^{\beta})$	$y = 0.9811x + 0.9890$	0.921	0.0947	0.7926	75/89 = 84.3%	83/89 = 93.35%
	$y = f(Q_{\text{夹}}^{\alpha} \rho_{\text{花}}^{\beta})$	$y = 0.7348x + 11.757(\rho_{\text{花}} \geq 100)$	0.922	0.1241	0.7898	75/89 = 84.3%	86/89 = 96.6%
		$y = 0.4161x + 0.2085(50 \leq \rho_{\text{花}} < 100)$		0.0972	0.9713		
		$y = 8.4738x - 0.8196(\rho_{\text{花}} < 50)$		-0.1238	0.7441		
高村	$y = f(\rho_{\text{夹}})$	$y = 0.9165x + 8.2478$	0.975			90/97 = 92.8%	91/97 = 93.8%
	$y = f(Q_{\text{高}}^{\alpha} \rho_{\text{夹}}^{\beta})$	$y = 0.9113x - 6.0772$	0.975	0.0870	0.8594	88/97 = 90.7%	91/97 = 93.8%
	$y = f(Q_{\text{夹}}^{\alpha} \rho_{\text{花}}^{\beta})$	$y = 0.2928x + 1.2945(\rho_{\text{夹}} \geq 100)$	0.981	0.1177	1.0116	92/97 = 94.8%	94/97 = 96.9%
		$y = 1.9496x - 0.6209(50 \leq \rho_{\text{夹}} < 100)$		-0.0590	0.9493		
		$y = 0.145x - 2.6217(\rho_{\text{夹}} < 50)$		0.2761	0.9330		
孙口	$y = f(\rho_{\text{高}})$	$y = 0.6772x + 19.098$	0.951			70/77 = 90.9%	71/77 = 92.2%
	$y = f(Q_{\text{高}}^{\alpha} \rho_{\text{高}}^{\beta})$	$y = 10.067x + 0.3725$	0.967	-0.1874	0.8174	72/77 = 93.5%	73/77 = 94.8%
	$y = f(Q_{\text{高}}^{\alpha} \rho_{\text{高}}^{\beta})$	$y = 28.528x + 0.0346(\rho_{\text{高}} \geq 100)$	0.972	-0.2269	0.6912	71/77 = 92.2%	73/77 = 94.8%
		$y = 5.4083x + 1.9118(50 \leq \rho_{\text{高}} < 100)$		-0.1279	0.8396		
		$y = 43.9x + 0.3668(\rho_{\text{高}} < 50)$		-0.3815	0.8819		
艾山	$y = f(\rho_{\text{孙}})$	$y = 0.9662x + 1.7879$	0.989			76/77 = 98.7%	76/77 = 98.7%
	$y = f(Q_{\text{艾}}^{\alpha} \rho_{\text{孙}}^{\beta})$	$y = 1.0073x + 0.6372$	0.989	0.0038	0.9871	76/77 = 98.7%	76/77 = 98.7%
	$y = f(Q_{\text{艾}}^{\alpha} \rho_{\text{孙}}^{\beta})$	$y = 2.0114x - 3.4802(\rho_{\text{孙}} \geq 100)$	0.989	-0.0386	0.9272	76/77 = 98.7%	76/77 = 98.7%
		$y = 2.256x - 2.4641(50 \leq \rho_{\text{孙}} < 100)$		0.0274	0.9966		
		$y = 1.7391x - 1.2372(\rho_{\text{孙}} < 50)$		-0.0406	0.9515		
冻口	$y = f(\rho_{\text{艾}})$	$y = 0.9007x + 4.6437$	0.987			91/91 = 100%	91/91 = 100%
	$y = f(Q_{\text{冻}}^{\alpha} \rho_{\text{艾}}^{\beta})$	$y = 0.8121x + 1.5249$	0.988	0.0381	0.9615	91/91 = 100%	91/91 = 100%
	$y = f(Q_{\text{冻}}^{\alpha} \rho_{\text{艾}}^{\beta})$	$y = 0.2806x + 3.3723(\rho_{\text{艾}} \geq 100)$	0.990	0.1893	0.9180	91/91 = 100%	91/91 = 100%
		$y = 3.077x - 3.2577(50 \leq \rho_{\text{艾}} < 100)$		0.0184	0.8991		
		$y = 0.914x - 1.5948(\rho_{\text{艾}} < 50)$		0.0265	0.9761		
利津	$y = f(\rho_{\text{冻}})$	$y = 0.9345x + 6.1172$	0.982			83/87 = 95.4%	86/87 = 98.9%
	$y = f(Q_{\text{利}}^{\alpha} \rho_{\text{冻}}^{\beta})$	$y = 1.4014x + 0.0024$	0.983	0.0042	0.9203	83/87 = 95.4%	86/87 = 98.9%
	$y = f(Q_{\text{利}}^{\alpha} \rho_{\text{冻}}^{\beta})$	$y = 0.8945x + 12.372(\rho_{\text{冻}} \geq 100)$	0.990	0.0701	0.9208	83/87 = 95.4%	86/87 = 98.9%
		$y = 0.8602x + 11.339(50 \leq \rho_{\text{冻}} < 100)$		-0.0209	0.8935		
		$y = 1.0984x + 0.2089(\rho_{\text{冻}} < 50)$		0.0200	0.9658		

注: x 为表达式列括号中对应自变量的组合。

表 1-7 龙门洪峰流量 500 ~ 5 000 m³/s 之间预报模型汇总

k 值	模型	计算公式	α	β	相关系数	通过率	
						指标一	指标二
$k \geq 0.9$	4	$\rho_{\text{龙}} = 3.4595x + 1.2636$	-0.0647	0.7806	0.954	34/40 = 84%	37/40 = 92.5%
	2	$\rho_{\text{龙}} = 0.559\rho_{\text{合}} + 15.17$	—	—	0.957	35/40 = 87.5%	37/40 = 92.5%
$0.6 \leq k < 0.9$	4	$\rho_{\text{龙}} = 1.3917x - 13.525$	0.2717	0.5178	0.938	10/13 = 76.9%	12/13 = 92.3%
	2	$\rho_{\text{龙}} = 0.5509\rho_{\text{合}} + 40.071$	—	—	0.905	8/13 = 61.5%	11/13 = 84.6%
$k < 0.6(1)$	4	$\rho_{\text{龙}} = 0.1882x + 0.5921$	0.6274	0.3628	0.638	24/55 = 43.6%	28/55 = 50.9%
$k < 0.6(2)$	$Q_{m\text{龙}} \geq 2500$	$\rho_{\text{龙}} = 0.0002265x + 58.99$	1.2988	0.5396	0.561	9/19 = 47.4%	10/19 = 52.6%
	$Q_{m\text{龙}} < 2500$	$\rho_{\text{龙}} = 1.7771x + 4.9419$	0.4526	0.2110	0.383	12/36 = 33.3%	17/36 = 47.2%
						21/55 = 38.2%	27/55 = 49.1%
$k < 0.6(3)$	左岸来水	$\rho_{\text{龙}} = 0.6771x + 30.444$	0.2885	0.5614	0.561	13/30 = 43.3%	14/30 = 46.7%
	左岸无水	$\rho_{\text{龙}} = 0.3246x - 40.134$	0.6274	0.3628	0.712	9/25 = 36.0%	12/25 = 48%
						22/55 = 40.0%	26/55 = 47.2%

注: $x = Q_{m\text{龙}}^\alpha \rho_{\text{合}}^\beta$ 。

1.4.3 夹河滩含沙量过程预报

(1) 恒定流不平衡输沙模型:

$$\rho_{\text{下}} = \rho_{*L} + (\rho_{\text{上}} - \rho_{*L}) e^{-\frac{\alpha \rho B}{Q}} \quad (1-4)$$

式中: ρ_{*L} 是河道挟沙力, 令其等于上下断面挟沙力均值; Q 是河道平均流量; B 是平均水面宽。马斯京根河道流量演算方法中的参数 χ 、 K 分别为 0.4、9.34。

(2) 以多来多排特性为基础的系统响应函数模型:

$$\rho_{\text{下}t} = k Q_{\text{下}t}^\alpha \rho_{\text{上}t-1}^\beta \quad (1-5)$$

式中: $Q_{\text{下}t}^\alpha$ 是下断面 t 时刻流量, 通过响应函数模型求出, 即

$$\begin{pmatrix} Q_{2t} \\ Q_{2t+1} \\ Q_{2t+2} \\ \vdots \\ Q_{2t+n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{2t-1} & Q_{1t-1} & & & \\ Q_{2t} & Q_{1t} & Q_{1t-1} & & \\ Q_{2t+1} & Q_{1t+1} & Q_{1t} & \ddots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & Q_{1t-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{2t+n} & Q_{1t+n} & Q_{1t+n-1} & \cdots & Q_{1t+n-m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{01} \\ b_{02} \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

式中各参数分别为: $m = 2$, $b = [0.5190, 0.4122, 0.0985, 0.0329]^\top$, $k = 2.6794$, $\alpha = -0.05$, $\beta = 0.8284$ 。

(3) 沙库模型:

$$\begin{aligned} \frac{dW_s}{dt} &= Q_{s\text{上}} - Q_{s\text{下}} \\ W_s &= k_2 [Q_{s\text{上}} + k_1 (Q_{s\text{上}} - Q_{s*L})] \end{aligned}$$

联解方程组可得

$$\rho_{\text{下}2} = \frac{Q_{\text{上}1}\rho_{\text{上}1} + Q_{\text{上}2}\rho_{\text{上}2} - Q_{\text{下}1}\rho_{\text{下}1}}{Q_{\text{下}2}} + 2k_2 \frac{Q_{\text{上}1}\rho_{\text{上}1} - Q_{\text{上}2}\rho_{\text{上}2}}{Q_{\text{下}2}} +$$

$$k_1 k_2 \frac{2Q_{上1}\rho_{上1} - 2Q_{上2}\rho_{上2} + Q_{上2}\rho_{*上2} + Q_{下2}\rho_{*下2} - Q_{上1}\rho_{*上1} - Q_{下1}\rho_{*下1}}{Q_{下2}} \quad (1-6)$$

式中:1、2 分别表示 t 、 $t+1$ 时刻, $k_1=0.07$ 、 $k_2=0.3$;其他参数同方法 1。研究表明,沙库模型存在问题较大,尚需进一步研究。

1.5 生产应用情况简介

本项目 2003~2006 年 4 年间对中下游研究站点共进行了 16 次试预报工作,见表 1-8。其中各站符合起报标准的洪水共 6 次,小北干流放淤共 10 次。符合起报标准的 6 次洪水沙峰试预报无论是计算值还是发布值按指标一都通过,说明研究成果从目前来看还是可用的,但指标二有一次不通过;小北干流放淤的 10 次试预报,从指标一来看按计算值通过率为 60%,按发布值通过率为 50%,指标二通过率为 80%,说明龙门小流量含沙量预报中随机影响因素还很难把握,有待深入研究。

1.6 创新点

本项目研究特色在于理论与生产紧密结合,既注重泥沙输移规律,更强调作业预报中信息的可获得性,使模型易于应用。其创新点体现在以下几方面:

(1)引入干流上下游洪峰比 k 。由于沉速与粒径成正比,来自不同地区的洪水泥沙粒径不同落淤程度不同,为了表征这一特性,在预报中引入干流上下游洪峰比的概念,区分出洪水的不同来源,考虑不同因子的组合,分别建立沙峰预报模型。

(2)引入合成含沙量概念。在有支流加入时,借用洪水预报中合成流量的思路,引入合成含沙量的概念及计算方法,反映来水来沙空间分布的不均匀性和干支流水沙的耦合性,并建立实用预报模型。

(3)引入预报站洪峰流量作为动力因子。上游来的泥沙在水中是沉降还是漂浮,受水流挟沙能力的影响,由于含沙量与流量的高次方成正比,预报中不仅要考虑上游来沙的影响,同时引入了预报站洪峰流量作为输沙动力因子,使预报精度进一步提高。

(4)在含沙量过程预报方面,在恒定流不平衡输沙模型中首次利用了双值挟沙力公式,首次尝试了以“多来多排”特性为基础的系统响应函数模型,首次提出了沙库模型的概念。

(5)首次建立了沙峰预报精度评价指标。含沙量预报精度的评价指标前人未曾研究,本文参考洪峰预报和洪水过程预报精度评价思路建立了洪水最大含沙量、含沙量过程预报精度评价的指标。

1.7 存在问题及努力方向

泥沙预报的内容非常丰富,如降水径流泥沙预报、干支流泥沙耦合预报、沙峰预见期预报、含沙量过程预报以及泥沙粒径组成预报等,见图 1-1。本次仅作了部分站洪水最大含沙量预报模型的研究和小北干流放淤龙门站小洪水沙峰预报。夹河滩含沙量过程预报只是作了探索,并未进行实际应用。龙门及下游站洪水最大含沙量模型虽进行了实际应用,但仍嫌应用太少,希望黄委有关部门继续支持进一步开展相关研究。

表 1-8 16 次最大含沙量试预报结果分析

(单位:计算值、实测值、绝对误差、允许误差均为 kg/m³,相对误差为%)

分类	次数	水文站	洪峰日期 (年-月-日)	实测值	计算结果						发布情况					
					指标一			指标二			指标一			指标二		
					计算值	绝对 误差	相对 误差	通过 与否	绝对 误差	允许 误差	通过 与否	绝对 误差	相对 误差	通过 与否	绝对 误差	允许 误差
洪水 最大 含沙 量试 预报	1	龙门	2003-07-31	127	146	19		✓	19	54.6	✓	13		✓	19	54.6
	2	夹河滩	2004-08-24	270	250		-7.4	✓	20	48.2	✓		11.1	✓	20	48.2
	3	高村	2004-08-25	227	235		3.5	✓	8	33.3	✓		5.7	✓	8	33.3
	4	孙口	2004-08-25	167	180		7.8	✓	13	19.1	✓		7.8	✓	13	19.1
	5	艾山	2004-08-26	178	152		-14.6	✓	26	20.3			-15.7	✓	26	20.3
	6	浜口	2004-08-26	138	137		-0.7	✓	1	10.9	✓		1.4	✓	1	10.9
通过次数								6			5			6		5
通过率								100%			83.3%			100%		83.3%
小北 干流 放淤 龙门 最大 含沙 量试 预报	1	龙门	2004-07-26	390	317		-18.7	✓	73	82.8	✓		23.1		73	82.8
	2	龙门	2004-08-11	572	480		-16.1	✓	92	101.8	✓		-30.1		92	101.8
	3	龙门	2004-08-12	160	57	103			103	58.7		110			103	58.7
	4	龙门	2004-08-13	150	141	9		✓	9	57.7	✓	0		✓	9	57.7
	5	龙门	2005-07-02	166	225	59			59	59.3	✓	54			59	59.3
	6	龙门	2005-08-12	78	79.1	1.1		✓	1.1	50.1	✓	8		✓	1.1	50.1
	7	龙门	2006-07-31	82	140	58			58	50.6		18		✓	58	50.6
	8	龙门	2006-08-26	104	140	36			36	52.9	✓	4		✓	36	52.9
	9	龙门	2006-08-31	148	150	2		✓	2	57.5	✓	48			2	57.5
	10	龙门	2006-09-22	210	245		16.7	✓	35	63.9	✓		14.3	✓	35	63.9
通过次数								6			8			5		8
通过率								60%			80%			50%		80%