

黄河含沙量变化过程预报方法研究

李楠, 张振华*, 宋扬, 吕淑英, 边晓南
(德州市水利局, 山东 德州 253014)

摘要: 含沙量预报能够为黄河流域生态保护和高质量发展提供技术支持与决策信息。本研究对现有的含沙量预报方法进行总结分析后发现, 系统响应函数模型的预报精度较高且易于运行, 水沙动力学模型的水沙运动机理性较强。通过结合水文和水力学方法, 在不同水沙运动机理条件下构建了基于不平衡输沙原理、马斯京根演算、多来多排理论的3种系统响应函数模型。在黄河潼关站的应用结果表明, 系统响应函数模型的物理运动机制越高, 预报精度也越高, 不平衡输沙原理系统响应函数模型可以较好地描绘汇流区的水沙输移特征, 预报效果最优。

关键词: 含沙量预报方法; 响应函数模型; 不平衡输沙原理

中图分类号: TV142

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022674

李楠, 张振华, 宋扬, 等. 黄河含沙量变化过程预报方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 89-92.

LI Nan, ZHANG Zhenhua, SONG Yang, et al. Study on Prediction Method of Sediment Content Process in Yellow River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 89-92.

0 引言

黄河含沙量对防洪减淤、协调水沙关系、水环境保护存在重要影响^[1-2], 落实“维护黄河健康生命”的重要举措之一就是调节黄河水沙关系, 提高水沙调控能力^[3-4]。河流含沙量变化取决于河道断面、水沙条件、水力因子, 是一个复杂的动态过程^[5]。目前, 含沙量预报方法主要分为水力学和水文学方法。水沙动力学模型的结构清晰, 可以反映河流泥沙输移的运动机制, 在实际操作时需要河道的冲淤状态和水力因子, 但河流泥沙的监测站点较少, 特别是监测频率、颗粒级配不能满足研究需求^[6-7]。因此, 基于水力学方法的预报难度大且精度不高。输沙单位过程线预报方法是利用纳什瞬时单位过程线法来推求河流悬移质瞬时输沙单位过程线, 该模型物理概念清楚, 但降水量与产沙量的关系不统一, 导致输沙单位过程线难以耦合^[8-9]; 神经网络预报模型^[10-11]难以掌握适度训练的尺度, 容易发生过度训练^[12]; 统计相关法过分依赖输入数据, 要求输入资料的代表性强、相关性高。系统响应函数模型^[13]是以统计规律为基础建立的响应系统水文学方法, 以宏观角度研究水沙演变过程,

预报精度依赖输入因子的代表性, 操作简单且便于实际预报。水沙机理描绘越清楚的系统响应函数模型的预报精度越高^[14]。

黄河干流潼关站位于黄渭汇流区, 因洪峰传播时间不同, 导致水流汇合复杂, 比单河段的预报工作难度更高。本文将基于不同水沙机理建立的系统响应函数模型应用在潼关站, 并对不同方法下的含沙量变化过程预报结果进行对比分析, 以提出简单、实用、有效的含沙量过程预报方法。

1 数据来源

1.1 研究区概况

潼关水文站位于渭河、北洛河与黄河的交汇处^[15], 控制流域面积 68.22 km²。潼关站上游水文站包括黄河龙门站、渭河华县站、北洛河状头站和汾河河津站, 上游干支流的来水、来沙在潼关站汇掺, 潼关站 1987—2020 年平均输沙量为 4.66×10⁸ t、含沙量为 18.1 kg/m³, 河道来水涨落剧烈, 颗粒粒径相对较粗, 当发生高流量洪水时会发生漫滩。

1.2 数据分析

泥沙颗粒级配在泥沙输移过程中会影响含沙水流的运动特性, 实测洪水的含沙量与中值粒径 (d_{50}) 之间的关系见图 1。在含沙量为 80 kg/m³ 时, 实测数据点出现转折, 当细颗粒泥沙量达到一定值时, 含沙水流的性质将发生改变。

按照 80 kg/m³ 含沙量将潼关站的洪水分为高含沙水流和低含沙水流, 实测含沙量 (S) 与对应时刻粒径 < 0.005 mm 的沙量百分比 ($P_{0.005}$) 之间的关系

收稿日期: 2022-12-01 修回日期: 2022-12-15

基金项目: “十一五” 国家科技支撑项目《黄河健康修复关键技术研究》(2006BAB06B05-2)

作者简介: 李楠 (1982-), 女, 辽宁抚顺人。高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源、泥沙运动力学等方面的研究。

E-mail: 13459512@qq.com

通信作者: 张振华 (1982-), 男, 山东滨州人。高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源、农作物灌溉、水利工程等方面的研究。

E-mail: zhangzhenhua2710@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

见图 2。沙量到达峰值前的实测 S 与对应时刻 $P_{10.005}$ 的关系见图 3。含沙水流的初始 $P_{10.005}$ 较低时, 后期含沙量不会提高; 高含沙水流的 S - $P_{10.005}$ 关系呈曲线带状分布, 说明含沙水流初始 $P_{10.005}$ 较高时, 后期含沙量较高。 $P_{10.005}$ 代表含沙水流中细颗粒量, $P_{10.005}$ 高会导致含沙水流粘性大, 水流挟沙力高, 能够挟带更多的泥沙, 从而成为高含沙水流; $P_{10.005}$ 低会导致含沙水流粘性不大, 水流挟沙力较低, 水流挟带泥沙易达到饱和, 含沙量稍有提高, 泥沙就会发生沉积, 因此含沙量不会大幅度提高, 维持在低含沙水流状态。

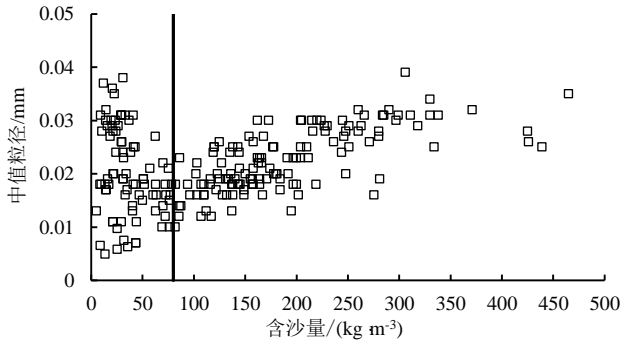


图 1 实测洪水的含沙量与 d_{50} 之间的关系

Fig.1 Hydrograph of observed sediment concentration and d_{50}

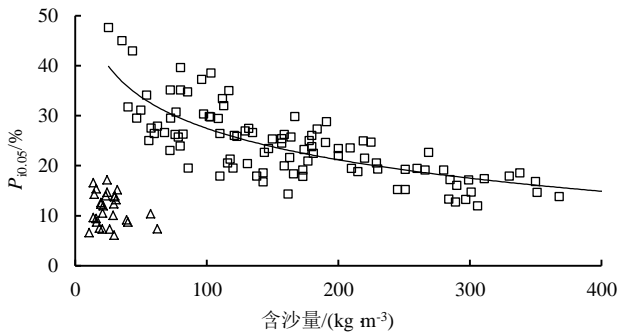


图 2 实测洪水 S 与 $P_{10.005}$ 之间的关系

Fig.2 Hydrograph of observed sediment concentration and $P_{10.005}$

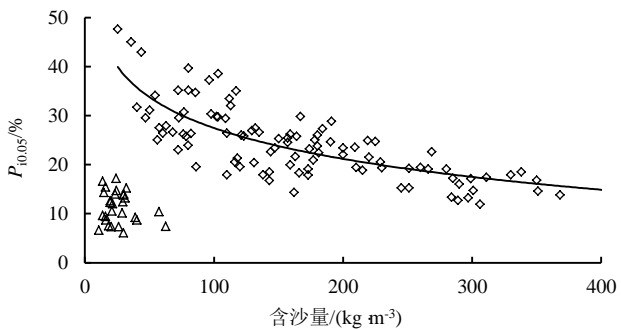


图 3 沙量到达峰值前 S 与 $P_{10.005}$ 之间的关系

Fig.3 Hydrograph of observed S and $P_{10.005}$ before the sand volume peaks

1.3 数据来源

高含沙量水流和低含沙量水流具有不同的水沙输移规律。龙羊峡和刘家峡水库的水沙输移经过调控从失稳状态重新达到动态冲淤平衡, 近年来黄河输沙量有所下降^[16], 河道输沙规律发生了改变。为了预报

模型的适用性和准确性, 模型率定数据选定潼关站及其对应的上游 3 个站 1987—2017 年的水沙实测数据 (含沙量 $> 80 \text{ kg/m}^3$) 共 29 场洪水, 其中率定期洪水 23 场; 检验期洪水 6 场 (干支流和干流、支流来水各 2 场)。

2 预报模型

2.1 合成含沙量概念

潼关站位于黄河小北干流和渭河的汇流区, 流量的汇合、干支流泥沙的混掺复杂。因此, 本研究提出“合成含沙量”概念, 运用“先合后演”方法, 将黄河干支流来水量作为溶剂, 将来沙量作为溶质在潼关站汇流混合, 见图 4。

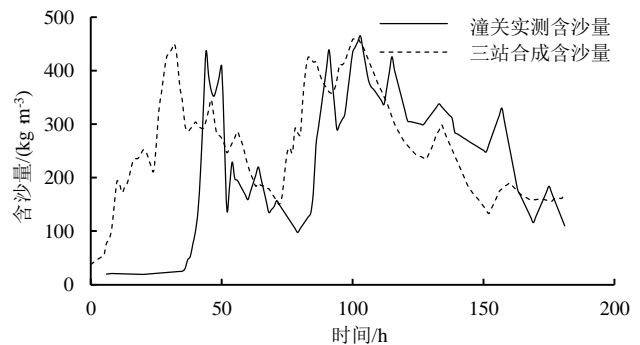


图 4 潼关站实测含沙量过程与合成含沙量过程对比

Fig.4 Hydrograph of observed and counted sediment concentration for Tongguan station

2.2 预报模型建立

2.2.1 基于多来多排理论建立系统响应函数模型

在天然河道中, 由于河流中水沙来源、颗粒级配、输送距离不同, 水沙特征是动态变化的。在黄河河道输沙中表现出“多来多排”的特征^[17], 根据河道“多来多排”理论推导含沙量计算式为:

$$S_{\text{下}t} = kQ_{\text{下}t}^\alpha S_{\text{合}t-\tau}^\beta \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{下}t}$ 为潼关站 t 时刻的流量; $S_{\text{合}t-\tau}$ 为 $t-\tau$ 时刻的合成含沙量; α 、 β 、 k 为方程参数。

2.2.2 基于不平衡输沙机理建立的系统响应函数模型

河道水沙输移大多处于不平衡输沙过程, 在不平衡输沙条件下, 水沙输移向水沙平衡状态演进, 其水流含沙量在理想状态下最终会达到水流挟沙力^[18], 影响河流挟沙力的因素众多, 如流量、颗粒级配、边界条件、水文测验, 含沙水流的发展状态取决于来水来沙及河道条件。

一维恒定均匀流不平衡输沙方程的简化表达式为:

$$S_{\text{下}} = S_{\text{挟}} + (S_{\text{上}} - S_{\text{挟}}) e^{-\frac{\omega \omega BL}{Q}} \quad (2)$$

含沙量预报试验系统模型为:

$$S_{\text{下}t} = BS_{\text{上}t-\tau} + \varepsilon, \quad (3)$$

式中： B 为 $S_{\text{上}}$ 的响应函数； m 为记忆长度； τ 为预见期； ε 为误差项。

2.2.3 基于不平衡输沙机理建立系统响应函数模型

基于马斯京根演算方程的流量演算方法能够对河段洪水演进过程进行描述且预报效果良好^[19]。首先利用马斯京根演算方程预报断面流量，再根据所预报的流量推算出马斯京根输沙率演算方程，预报河道断面含沙量。将马斯京根流量演算方程转换为马斯京根输沙率演算方程如下：

$$Q_{s\text{下}t} = C_0 Q_{s\text{上}t} + C_1 Q_{s\text{上}(t-1)} + C_2 Q_{s\text{下}(t-1)}, \quad (4)$$

式中： $Q_{s\text{下}}$ 为潼关站的输沙率； $Q_{s\text{上}}$ 为合成输沙率。

3 预报模型评价

3.1 含沙量过程预报

含沙量过程预报模型的检验结果如图5所示。基于不平衡输沙系统响应函数模型预报的含沙量过程与实测含沙量过程最为贴近，变化过程基本一致，马斯京根和多来多排系统响应预报模型的预报拟合效果次之。

3.2 不同水沙机理模型指标评价

不同水沙机理条件下的系统响应模型检验期含沙量过程预报结果的决定性系数和沙峰绝对误差计算结果见表1。

不同水沙机理条件下的系统响应模型率定期和

检验期预报结果的决定性系数和沙峰相对误差等级合格率见表2。

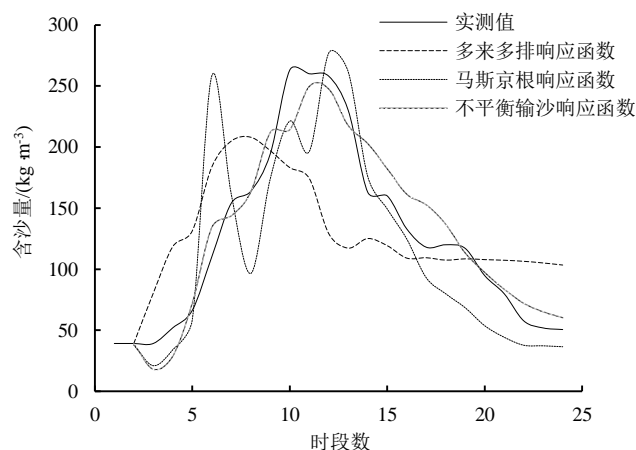


图5 潼关站含沙量过程预报3种方案预报效果对比

Fig.5 Hydrograph of observed and three forecasted sediment concentration for Tongguan station

表1 含沙量预报模型确定性系数和沙峰相对误差对比

Table 1 Verification results of deterministic coefficient and sediment peak

洪水编号	确定性系数 (dy)			沙峰相对误差/%		
	多来多排	不平衡输沙	马斯京根	多来多排	不平衡输沙	马斯京根
20100821	0.3	0.7	0.8	27.8	4.7	59.9
19930804	0.4	0.6	0.5	9.9	11.4	26.0
20051004	0.7	0.7	0.6	36.8	15.4	11.3
20170728	0.7	0.7	0.8	63.5	42.3	40.9
19880806	-0.1	0.6	0.7	30.8	13.9	64.7
19960810	0.5	0.9	0.7	42.8	2.0	7.2
平均值	0.4	0.7	0.7	35.3	15.0	35.0

表2 含沙量过程预报模型率定期、检验期结果

Table 2 Comparison of compute results for calibration and verification period

指标	多来多排理论		不平衡输沙机理		马斯京根演算	
	率定期	检验期	率定期	检验期	率定期	检验期
确定性系数大于0.6的百分比/%	20	33	36	100	56	83
确定性系数大于0的百分比/%	48	83	80	100	96	100
沙峰相对误差小于20%的百分比/%	-	17	-	83	-	33

从表1和表2可以看出，3种方案在检验期的 dy 大于0的百分比分别为83%、100%、100%，检验期6场洪水的 dy 平均值为0.7；基于不平衡输沙机理的系统响应函数模型在潼关站含沙量过程预报中能够吻合该断面流量的汇合、沙量的混掺，预报精度较高。

4 结论

本研究在不同水沙运动机理条件下构建了基于不平衡输沙原理、马斯京根演算、多来多排理论的3种系统响应函数模型。在黄河潼关站的应用结果表明，系统响应函数模型的物理运动机制越高，预报精度也越高，不平衡输沙原理系统响应函数模型可以较好地描绘汇流区的水沙输移特征，预报效果最优。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 王浩, 赵勇. 新时期治黄方略初探[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1 291-1 298.
- [2] 付景保. 黄河流域生态环境多主体协同治理研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 130-137.
- [3] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, 2019(20): 1-3.
- [4] 李国英. 在2022年全国水利工作会议上的讲话[J]. 中国水利, 2022(2): 1-10.
- [5] 李楠. 含沙量过程不确定性预报系统模型研究—以潼关站为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [6] 祝求, 余明辉, 马喜祥, 等. 考虑溯源冲刷中河岸展宽的一维水沙数学模型研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(4): 15-20.
- [7] 崔洁. 波流共同作用下的二维泥沙数学模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [8] 樊尔兰. 悬移质瞬时输沙单位线的探讨[J]. 泥沙研究, 1988(2): 56-61.

- [9] 李怀恩, 樊尔兰, 沈晋, 等. 逆高斯分布瞬时输沙单位线模型[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 48-55.
- [10] 全胜蓝. 基于人工神经网络的黄河中游水沙推估及驱动因素分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [11] 陈雄波, 王俊昀, 龚钰婷, 等. 基于神经网络和遗传算法的泥沙模型研发及应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(12): 18-22.
- [12] 秦毅, 石宝, 李楠, 等. 含沙量预报方法探讨[J]. 泥沙研究, 2010(1): 67-71.
- [13] 石宝, 秦毅, 凌燕, 等. 响应函数模型在含沙量预报中的应用[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 103-105.
- [14] 李楠, 张振华, 张雨, 等. 基于不确定性分析的黄河含沙量过程预报模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9): 141-148.
- [15] 水利部黄河水利委员会. 黄河泥沙公报[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2021.
- [16] 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 等. 黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 328-332.
- [17] 韩其为, 关见朝. 挟沙能力多值性及黄河下游多来多排特性分析—“黄河调水调沙的根据、效益与巨大潜力”之五[J]. 人民黄河, 2009, 31(3): 1-4, 15, 120.
- [18] 张静. 黄河下游花园口至夹河滩段含沙量过程预报方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [19] 梁忠民, 王旭伟, 宁亚伟, 等. 基于动力系统反演理论的马斯京根流量演算误差校正[J]. 水力发电, 2017, 43(12): 9-12.

Study on Prediction Method of Sediment Content Process in Yellow River

LI Nan, ZHANG Zhenhua*, SONG Yang, LYU Shuying, BIAN Xiaonan

(Dezhou Water Conservancy Bureau, Dezhou 253014, China)

Abstract: 【Background】 The ecological protection and high-quality development of the Yellow River are inseparable from the study of sediment concentration prediction. Due to the influence of many factors, its complexity makes the sediment concentration process difficult to predict. 【Objective】 The study of sediment concentration prediction methods can provide technical support and decision-making information for ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin. 【Method】 By analyzing the existing sediment concentration forecasting methods, it is found that the system response function model has high forecasting accuracy and is easy to operate, and the water and sediment movement mechanism of the water and sediment dynamic model is clearly visible. 【Result】 By combining hydrology and hydraulics methods, three system response function models based on unbalanced sediment transport principle, Muskingum calculus and many-to-many row theory were constructed under different water and sediment movement mechanism conditions. 【Conclusion】 The application of the system response function model in Tongguan Station of the Yellow River shows that the more the physical motion mechanism of the system response function model is reflected, the higher the prediction accuracy is. The system response function model based on the principle of unbalanced sediment transport can better describe the characteristics of water and sediment transport in the confluence area, and the prediction effect is better than the other two models, which can be applied to the actual prediction work of Tongguan Station.

Key Words: Sediment concentration prediction method; response function model; principle of unbalanced sand transport

责任编辑: 韩洋