

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221049

引黄渠道水沙输移及冲淤规律研究

周宇伟¹,肖娟¹,吴文勇²

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:以尊村灌区一干改造渠段为例,研究渠道泥沙输移特性及冲淤变化规律。通过沿程悬移质、床沙质取样和实测流速,分析渠道淤积成因。结果表明,淤积最严重情况发生在渠首,停水期泥沙淤积是造成渠道淤积的重要因素,给出了各输水工况下应满足的挟沙流速,为今后渠道减淤,灌区高效运行提供了依据。

关键词:渠道输沙;挟沙力;泥沙淤积;引黄灌区

中图分类号:TV139.16 文献标志码:A 文章编号:1000-7709(2023)03-0165-03

表1 采样断面位置

Tab.1 Location of sampling section

序号	断面	桩号	序号	断面	桩号
1	C1	0+000	6	C6	4+303
2	C2	0+689	7	C7	4+879
3	C3	1+339	8	C8	5+525
4	C4	1+995	9	C9	6+199
5	C5	3+346	10	C10	7+010

1 概况

尊村引黄工程是山西省一个大型多级提水灌溉工程,以黄河为水源,设计规模为9级31站。尊村灌区属于半干旱大陆性季风气候,多年平均降雨量为54 mm,汛期为6~9月,汛期降水量占全年降水量的60%以上。自1978年尊村引黄灌区投入运行,经过40多年的输水输沙,渠道淤积严重,大大降低了渠道输水输沙能力。一级干渠总长15.8 km,现状为砼预制板梯形防渗断面,输水能力较设计时下降约50%^[1]。为分析引黄渠道泥沙输移特性及冲淤变化规律,通过野外采样、室内检测的方法分析渠道淤积原因,以为工程实践提供指导。

2 野外采样及室内检测

2.1 采样断面布设

试验研究渠段为一级站出口混凝土改造渠段,全长7.9 km,设计输水流量为46.5 m³/s,干渠设计纵坡比为1:3 000。考虑采样的准确性、代表性等因素,在一干渠改造渠段布置10个采样断面,各监测断面之间间距不等,断面桩号见表1。

2.2 渠道泥沙采样方法

根据取水口泵站提水流量,分别在夏灌及冬灌时期不同提水流量下采集水样。每次采样待渠

道水流稳定记录提水流量,再进行监测断面的取样监测工作,主要测量每个监测断面的起点距并纪录水深,根据《河流流量测验规范》^[2],各监测断面布设三条测沙垂线,同时每个断面布设三条垂线,取样点为每条垂线距水面0.2H、0.6H、0.8H(H为水深)处,采用三点法取样;同时采用旋桨式流速仪测量流速,断面测速垂线与测沙垂线重合,垂线上测点也一一对应。在灌水期结束后,在渠道底部取床沙样并测量淤积深度。

2.3 指标测定

现场采样监测内容包括采集干渠各断面悬移质,测定各采样断面的垂线水深和流速,测量各采样断面的水面线长度。室内检测分析指标包括悬移质含沙量、颗粒级配。采用烘干法检测含沙量;采用旋桨流速仪测定流速;采用激光粒度仪检测分析泥沙颗粒级配。

含沙量S的计算公式为:

$$S = (m_1 - m_2) / V \quad (1)$$

式中,m₁、m₂分别为烘干前、后烧杯重,g;V为水样体积,mL。

收稿日期:2022-05-18,修回日期:2022-06-20

基金项目:山西省水利科学技术研究与推广项目(2021SX007)

作者简介:周宇伟(1997-),男,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术,E-mail:912676927@qq.com

通讯作者:肖娟(1968-),女,博士、教授、硕导,研究方向为节水灌溉理论与技术,E-mail:zhangxd626@163.com

3 泥沙特性分析

3.1 悬移质监测结果

试验共进行 5 次监测采样,从夏季灌水 8 月到秋冬季灌水 11、12 月,采样时间、相应的泵站机组提水流量等情况见表 2。

表 2 取样时间与输水工况

Tab. 2 Sampling time and water conveyance condition

取样日期	机组流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均水温 / $^{\circ}\text{C}$	取样日期	机组流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均水温 / $^{\circ}\text{C}$
08-02	29.04	29	11-19	6.553	8
08-09	19.28	30	12-02	5.802	4
08-17	6.74	28			

不同灌水期含沙量沿程变化见图 1,可以看出夏灌期渠道含沙量高于冬灌期,一方面夏季来水含沙量大,另一方面夏灌期引水流量大,取水口抽拉床沙导致含沙量增大。渠首附近含沙量明显减小,说明泥沙大多在渠首附近淤积。除个别渠段外,各灌水期内渠道含沙量变化不大,基本可以实现冲淤平衡。

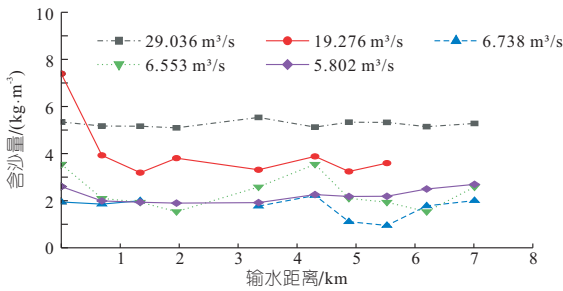


图 1 含沙量沿程变化图

Fig. 1 Variation of sediment concentration along the route

3.2 床沙质检测结果

图 2 为渠道床沙粒径经频率分布图,床沙粒径在渠道沿程和断面垂向分布差别不大,中值粒径约 0.25 mm,说明在每次灌水期渠道内 0.062 mm 以下泥沙均可随水流输移,而停水期沉降的泥沙中细颗粒泥沙更容易起动,在下一轮输水时随水流运移。

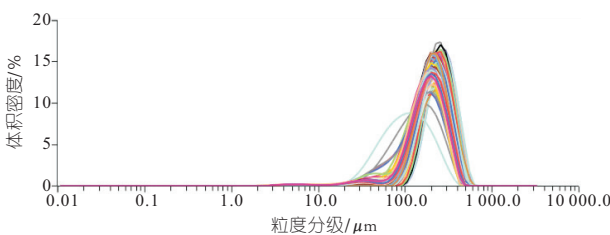


图 2 渠道沿程床沙粒径变化

Fig. 2 Variation of sand particle size along channel

3.3 多年来水对比

根据《河流泥沙颗粒分析规程》^[3],河流泥沙分类应符合表 3 规定。

表 3 河流泥沙分类

Tab. 3 Classification of river sediments mm

粘粒	粉粒	砂粒	砾石	卵石	漂石
<0.004	0.004~0.062	0.062~2.0	2.0~16.0	16.0~250.0	>250.0

2017 年渠道悬移质采样时间为 6 月 28 日~8 月 12 日,采样时段内黄河来水来沙条件并无大变化。夏灌时期引黄渠道输水流量在 6~12.5 m^3/s ,采样记录显示在 6 次取样中,6 月 28 日、8 月 2 日、8 月 12 日泵站提水未经过沉沙池直接流入渠道,其余 3 次通过沉沙池,渠道悬沙采样监测结果显示,通过沉沙池的悬移质泥沙中粉粒泥沙的含量高于未通过沉沙池的渠道悬沙含量;而流量相近的 6 月 28 日与 7 月 7 日,以及 8 m^3/s 输水流量下的 7 月 30 日与 8 月 12 日,经过沉沙池渠道沙粒泥沙含量的占比明显减少,说明沉沙池减少了渠道粗颗粒泥沙的输入。

2021 年 10 次渠道悬沙采集均为黄河水直接进入引黄渠道,从泥沙各组分占比情况来看,4 月主要以粉粒泥沙为主,6 月开始,渠道悬沙中主要为粗颗粒泥沙,因此 2021 年夏季遭遇较大洪水,来水主要以沙粒泥沙为主,冬灌时来水沙粒泥沙占比降低,与 4 月来水条件相近。

从 2017、2019、2021 年渠道采样结果(表 4)来看,夏季来水沙粒泥沙在悬移质中占比逐渐增加,从来水含沙量来看,渠道内悬移质含沙量也逐年增加。

表 4 2017、2019、2021 年取样结果

Tab. 4 Sampling results in 2017, 2019, 2021

年份	取样时间	流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	含沙量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%
2017	06-28	6.00	0.68	9.56	56.10	34.33
	07-07	7.00	1.27	14.43	78.41	7.16
	07-10	12.00	1.60	15.29	74.32	10.39
	07-30	8.00	2.02	12.60	69.90	17.50
	08-02	12.50	5.40	12.01	72.18	15.81
	08-12	8.00	1.61	10.06	62.28	27.66
2019	05-01	7.60	1.70	0.80	52.53	46.55
	05-13	19.90	2.13	0.87	58.18	40.85
	06-03	8.80	1.70	0.98	49.38	49.42
	06-24	6.55	1.33	1.26	51.62	47.09
	07-01	6.60	1.55	1.49	53.14	45.25
	07-14	13.00	4.73	2.02	68.72	29.20
2021	04-21	6.93	2.42	3.17	50.48	44.60
	04-23	9.00	2.49	3.06	43.62	49.72
	06-02	3.29	1.52	1.24	13.87	83.91
	06-03	7.05	2.29	1.51	16.88	81.16
	06-07	12.61	4.21	1.83	42.86	54.27
	08-03	29.04	5.25	0.29	5.84	92.47
	08-09	19.28	4.04	0.72	10.09	88.89
	08-17	6.74	1.74	1.21	11.30	86.67
	11-19	6.55	2.34	5.21	45.52	45.11
	12-02	5.80	2.22	3.66	48.02	44.23

3.4 渠道不淤流速

悬移质中属于床沙部分的挟沙能力^[4]为:

$$S = K \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right)^m \quad (2)$$

式中, K 、 m 分别为水流挟沙能力系数和指数, 可通过实测资料率定, 其中 K 量纲为 kg/m^3 ; U 为断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; R 为水力半径, m , 在宽浅河道中可用平均水深 h 代替; ω 为床沙质沉降速度, m/s 。

不同水沙条件下有不同参数取值, 需根据实测资料确定。结合多年实测数据, 最终优化公式 K 取 0.22, m 取 0.66, 相比 2017 年优化的挟沙力公式, 相关性达到 0.813, 提高了 0.284。

假定渠道水流以均匀流流动, 明渠均匀流中, 水力坡降为渠底纵坡 i , 水深为正常水深 h , 相应的过水断面为 A , 水力半径为 R , 明渠均匀流的流量公式为:

$$Q = AC \sqrt{Ri} \quad (3)$$

式中, C 为谢才系数。

C 可由曼宁公式计算:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (4)$$

渠道断面面积 A 为:

$$A = (b + mh)h \quad (5)$$

湿周 χ 为:

$$\chi = b + 2\sqrt{1 + m^2}h \quad (6)$$

水力半径 R 为:

$$R = A/\chi \quad (7)$$

将式(4)~(7)代入式(3), 得到水深 h 求解公式为:

$$h = \left[\frac{nQ}{\sqrt{i}} (b + 2\sqrt{1 + m^2}h)^{2/3} \right]^{3/5} / (b + mn) \quad (8)$$

将求解的水力半径 R 代入挟沙力公式(式(1))反解出挟沙流速 U , 计算结果见表 5。表 5 计算结果为渠道设计条件下的计算值。

以渠道设计水利要素计算的输沙流速与表 6

表 5 渠道不同输水流量下挟沙流速

Tab. 5 The flow velocity of sediment carrying under different water delivery flows in the channel

含沙量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	不同输水流量(m^3/s)下的挟沙流速												
	46.5	41.5	36.5	31.5	26.5	21.5	19	16.5	13	11.5	9	6.5	3.5
11.5	2.74	2.71	2.66	2.61	2.56	2.49	2.45	2.40	2.33	2.29	2.22	2.12	1.95
10	2.56	2.52	2.48	2.43	2.38	2.32	2.28	2.24	2.17	2.14	2.07	1.98	1.81
9	2.43	2.39	2.35	2.31	2.26	2.20	2.16	2.12	2.06	2.03	1.96	1.88	1.72
8	2.28	2.25	2.22	2.18	2.13	2.07	2.04	2.00	1.94	1.91	1.85	1.77	1.62
7	2.14	2.11	2.07	2.03	1.99	1.94	1.91	1.87	1.81	1.78	1.73	1.65	1.51
6	1.98	1.95	1.92	1.88	1.84	1.79	1.76	1.73	1.68	1.65	1.60	1.53	1.40
5	1.80	1.78	1.75	1.72	1.68	1.63	1.61	1.58	1.53	1.51	1.46	1.39	1.28
4	1.61	1.59	1.56	1.53	1.50	1.46	1.44	1.41	1.37	1.35	1.30	1.25	1.14
3	1.39	1.37	1.35	1.33	1.30	1.26	1.24	1.22	1.18	1.16	1.13	1.08	0.99
2	1.13	1.12	1.10	1.08	1.06	1.03	1.01	0.99	0.96	0.95	0.92	0.88	0.80
1	0.80	0.79	0.78	0.76	0.74	0.72	0.71	0.70	0.68	0.67	0.65	0.62	0.57

表 6 各取样工况下挟沙流速计算值与实测值

Tab. 6 Calculated value and measured value of sand-carrying flow velocity under each sampling condition

流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水力 半径/ m	实测含沙量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	计算流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	实测流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
29.04	1.21	5.25	1.62	1.65
19.28	0.98	4.04	1.20	1.37
6.74	0.74	1.74	0.79	0.83
6.55	0.50	2.34	0.91	1.01
5.80	0.52	2.22	0.77	0.93

中运行后渠道输沙计算流速比较相差不大, 因此表 5 可作为今后渠道调控不淤输水流速的参考值, 说明按原渠道比降输水可基本满足不淤效果, 因此由于泥沙淤积导致渠道比降减小进而导致渠道挟沙能力不足仅是导致渠道淤积的一方面, 另一方面主要是由于每次灌水期结束, 渠道内水流停止流动导致的大量泥沙淤积, 改变渠道比降降低挟沙能力。

4 结论

a. 相比 2017 年研究给出的来水量需在 8

m^3/s 以上的减淤建议, 本文打破了输水量局限, 重新优化了适合尊村灌区的挟沙力公式, 给出了各种工况下的渠道挟沙流速。

b. 沉沙池及时清淤进行泥沙集中处理是当前渠道减淤的有效措施; 同时结合表 4 提高冬灌期输水速率尤其是停水前流速对渠道进行冲刷, 可减缓清淤压力。

参考文献:

[1] 赵永安, 相保成, 王久龙. 引黄灌区泥沙调控对策研究——以尊村灌区为例[J]. 水利建设与管理, 2015(10):37-40.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流流量测验规范:GB50179-2015[S]. 北京:中国计划出版社,2016.

[3] 中华人民共和国水利部. 河流泥沙颗粒分析规程:SL42-2010[S]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[4] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.

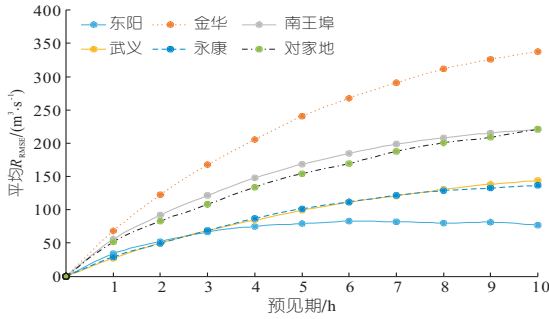


图 3 各站点不同预见期结果评价

Fig. 3 Evaluation of results in different forecast periods of each station

4 结论

- a. 结合 MIKE 11 NAM 和 MIKE 11 HD 建立了金华江流域洪水预报模型,在流量和水位方面表现较好;利用基于集合卡尔曼滤波的实时校正模型校正预报结果,可提高实时洪水预报精度,为金华江流域洪水预报及调度提供参考。
- b. 流域洪水预报模型主要概化了大中型水库,对小水库的影响考虑不足,可补充完善以提高预报精度。

Application of Real-time Correction Technology Based on Ensemble Kalman Filter in Basin Flood Forecasting

SHU Quan-ying¹, WANG Qing-qing², GUO Lei¹, LIU Cheng-xiu³, ZHANG Xing³, LIN Ping³

- (1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China;
- 2. Zhejiang Dayu Information Technology Limited Company, Hangzhou 310002, China;
- 3. Wuchuan Water & Environment Co., Ltd., Shanghai 201102, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of real-time flood forecasting in Jinhua River basin, the basin flood forecasting model coupled with Mike 11 Nam and Mike 11 HD and the real-time correction model based on Ensemble Kalman filter were established, and the real-time correction of flood forecasting in Jinhua River basin was realized. The simulation effect of the basin flood forecasting model on the main stations in the basin is good, and the simulation accuracy of flood discharge and flood level is high. When the real-time correction model is within 10h of the forecast period, the correction effect decreases with the increase of the forecast period, and the prediction error can be effectively reduced in the early stage of the forecast period. On the whole, the established basin flood forecasting model and the real-time correction model based on Ensemble Kalman filter can meet the application requirements of flood forecasting in Jinhua River basin.

Key words: hydrology and hydrodynamics; basin flood forecasting; ensemble Kalman filter; real time correction technology

(上接第 167 页)

Study on Law of Water and Sediment Transport and Erosion and Sedimentation in the Yellow River Diversion Channel

ZHOU Yu-wei¹, XIAO Juan¹, WU Wen-yong²

- (1. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
- 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Taking a reconstruction canal section in Zuncun Irrigation District as the research object, this paper studied the sediment transport characteristics and scouring and silting change law of the canal. The causes of channel siltation were analyzed by sampling suspended matter, bed sand and measured velocity. The results show that the most serious siltation occurs at the head of the canal, and the siltation during the water shut-down period is an important factor causing the siltation of the canal. The flow rate of sediment carrying under each water conveyance condition is given, which provides the basis for the reduction of siltation and the efficient operation of the irrigation area in the future.

Key words: channel sediment transport; sand carrying capacity; sediment deposition; Yellow River Irrigation Area

参考文献:

- [1] 浙江省水利厅. 浙江省河流手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [2] 罗志洁, 杜世鹏, 张晓文. 浙江省金华江流域大型水库洪水调度方案研究[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(2): 31-35, 41.
- [3] 林波, 刘琪璟, 尚鹤, 等. MIKE 11/NAM 模型在挠力河流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 99-108.
- [4] DHI. MIKE11 a modelling system for rivers and channels reference manual [M]. 2014:293-305,41.
- [5] 顾炉华, 赖锡军. 基于集合卡尔曼滤波的实时校正方法[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 73-77.
- [6] 舒全英, 郭磊, 孙甜, 等. 基于数据驱动的确窑水库洪水预报[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 115-118.
- [7] ZHANG KE, WANG QINGQING, CHAO LI-JUN, et al. Ground observation-based analysis of soil moisture spatiotemporal variability across a humid to semi-humid transitional zone in China[J]. Journal of hydrology, 2019, 574: 903-914.
- [8] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范: GB/T22482-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] 元晓华, 王浩. 金华站预报方案建模及洪水预报系统研制[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(16): 254-255, 274.