

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230315

引黄灌区干渠水沙运移与防淤研究

王则勋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: 为处理山西尊村引黄灌区干渠淤积严重的问题, 对一干渠做实地水沙试验, 运用垂线悬浮指标、规划求解方法探究渠道中悬移质泥沙分布规律、渠道流量与泥沙淤积关系以及渠道水流挟沙能力, 使其能够在一定范围内表达出水流的挟沙状况。并提出了渠道粒径所对应的临界悬浮流量, 根据工况与粒径大小调整流量益于防淤; 优化了水流挟沙力公式。结果表明, 引水流量在 $4.46 \sim 24.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 渠道泥沙含量在 $0.9 \sim 4.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 之间, 泥沙含量与流速大小呈正相关; 渠道流量调整至 $39.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上可使渠道内大粒径泥沙有效悬浮; 优化后的挟沙力公式针对干渠泥沙计算值与实测值相关性达 0.828, 说明此公式能够较高程度地反映当前含沙量, 为后期渠道冲淤平衡设计与分析提供支撑。

关键词: 渠道水流; 挟沙能力; 泥沙淤积; 颗粒悬浮

中图分类号: TV139.16

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0173-05

1 引言

山西尊村引黄灌溉工程是一座大型多级提水灌溉工程, 总扬程 165.44 m, 设计提水流量 $46.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 承担着向运城市农业和工业供水的主要任务。近年来, 引黄渠道泥沙淤积非常严重, 给灌区带来一系列问题, 输水效率降低, 不足设计流量的 20%, 远不能满足灌溉的需求。而渠道清淤费用较高, 并易造成渠道两侧农田沙化等^[1], 严重影响了灌区效益的发挥和可持续发展。针对灌区淤积问题, 田庆齐等^[2]基于黄河下游引黄灌区水沙运移特点, 提出了四种水沙调控模式; 卢红伟等^[3]提出减少引入黄河水的含沙量来减少淤积; 宁少雄等^[4]对首部枢纽泥沙特性进行了分析, 提出了灌区首部不淤流速; 赵志华等^[5]研究了干渠泥沙输移规律, 以联立方程的方式提出新的挟沙力公式, 但此方式对数据间的联系较弱, 精度有待提高。鉴此, 本文通过不同工况研究泥沙分布状况, 以规划求解的方式对挟沙力公式进行优化, 提高其可靠性, 并对不同粒径下颗粒的悬浮能力进行计算, 提出渠道泥沙临界悬浮流量, 旨在为渠道防淤积提供理论支撑。

2 试验布置

2.1 试验工况

试验地点为引黄灌区一干渠的 8 个断面, 断面间隔 1 km, 断面编号以 $C_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 表示, 每个断面设置 3 条垂线, 每条垂线设置 3 个取样点记录流速及含沙量, 渠道截面见图 1。

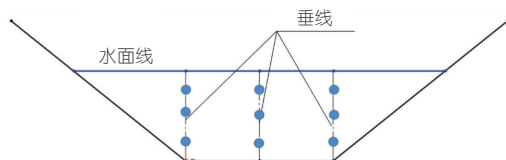


图 1 渠道截面布置图

Fig. 1 Channel section layout

试验共进行了 5 次监测采样, 从 6 月夏季灌水期到 11 月秋冬季灌水期, 采样日期 6 月 4 日、6 月 11 日、6 月 17 日、8 月 5 日、11 月 24 日相应的泵站机组提水流量分别为 6.18 、 4.46 、 6.07 、 24.52 、 $5.17 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2 断面泥沙含量计算

根据《河流悬移质泥沙测验规范》(GB/T 50159-2015)^[6], 对试验数据进行处理求得各断面含沙量。垂线平均流速、面平均流速及断面含沙

收稿日期: 2023-03-05, 修回日期: 2023-04-04

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1900804, 2021YFD1900702)

作者简介: 王则勋(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术, E-mail: wang3435@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

量计算公式分别为：

$$V_m = (V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})/3 \quad (1)$$

$$\bar{V}_i = (V_{m(i-1)} + V_{mi})/2 \quad (2)$$

$$S = \{C_{sm1}Q_1 + (C_{sm1} + C_{sm2})Q_2/2 + (C_{sm2} + C_{sm3})Q_3/2 + C_{sm3}Q_4\}/Q \quad (3)$$

式中, V_m 为垂线平均流速, m/s; $V_{0.2}$ 、 $V_{0.6}$ 、 $V_{0.8}$ 分别为 $0.2H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 相对水深处的测点流速(H 为水深), m/s; \bar{V}_i 为第 i 部分断面的平均流速, m/s; V_{mi} 为第 i 条垂线的平均流速, m/s, ($i=1, 2, \dots, n-1$); S 为断面平均含沙量, kg/m^3 ; Q 为过水断面流量, m^3/s ; C_{smi} 为第 i 条垂线的平均含沙量, kg/m^3 ; Q_i 为第 i 部分的流量, m^3/s 。

3 渠道含沙量分布探究

3.1 渠道沿程含沙量分析

在实验室对采样泥沙进行处理计算, 得到各监测断面含沙量。表 1 为 5 次采样各断面的含沙量数据。此次试验取样位置在桁架上, 监测位置没有桥墩对水流产生扰动影响。前 4 次取样在夏灌期间, 第 5 次在冬灌期间。6 月 4~17 日流量较小, 8 月 5 日流量达到 $24.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 。第 1 次取水泥沙含量较少, 最大为 $2.29 \text{ kg}/\text{m}^3$, 这与进水口泥沙长时间沉降有关; 最大含沙量达 $5.17 \text{ kg}/\text{m}^3$, 接近 $6 \text{ kg}/\text{m}^3$, 与流量的急速增长有关, 渠道过水流量增大, 流速相应增大, 对泥沙扰动剧烈; 6 月 4 日、6 月 17 日两次引水流量相差不大, 但 6 月 17 日悬移质泥沙平均含量普遍比 6 月 4 日偏高约 1.5 倍, 这说明悬移质泥沙含量受上游来水的影响。

表 1 各监测断面实测含沙量

Tab. 1 Measured sediment concentration at each monitoring section

监测断面	实测含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				
	6月4日	6月11日	6月17日	8月5日	11月24日
C_1	0.90	1.35	1.59	4.56	1.20
C_2	0.78	1.28	1.38	3.67	1.04
C_3	0.50	1.21	1.02	4.30	0.83
C_4	0.59	1.81	1.75	1.64	1.17
C_5	0.88	0.95	1.52	4.23	1.20
C_6	0.85	1.27	1.16	3.46	1.04
C_7	1.00	1.20	1.55	5.17	0.63
C_8	0.54	0.67	1.13	3.05	0.51
渠道平均含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.76	1.22	1.63	3.99	0.95

综合分析, 渠道泥沙含量与引水流量大小呈正相关, 流量越大, 泥沙含量越高, 同时也受黄河上游来水影响, 来水情况越复杂, 含沙量越高。

图 2 为断面沿程含沙量变化。由图 2 可知, 泥沙沿程含量整体变化幅度较小, 呈微弱的下降趋势。部分断面泥沙含量出现突变, 特别在大流量时上下浮动更为明显。从水流特性分析大流量下雷诺数增大, 水流脉动更加剧烈, 泥沙颗粒在水中的运动更加不规则, 沉降困难。总的来说目前渠道泥沙含量虽上下波动幅度明显, 但位于一定范围内, 故认为其趋于平衡状态, 这为挟沙力的研究提供了条件。

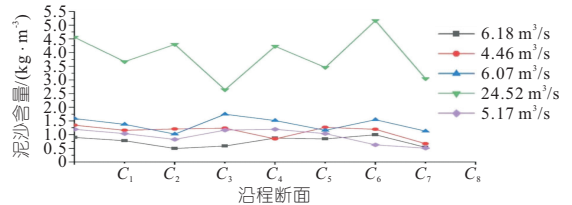


图 2 断面沿程含沙量变化

Fig. 2 Variation of sediment concentration along the section

3.2 渠道垂向含沙量分析

对渠道断面 $C_1 \sim C_4$, 在 $0.2H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 处做垂向含沙量分布曲线, 为减小误差选取相近流量工况 4.46 、 6.07 、 $6.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 做相应分析, 见图 3。由图 3 可知, 在同一流量下越接近渠底含沙量越高, 最大时达 $2.75 \text{ kg}/\text{m}^3$, 最小值约为 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$; $0.8H$ 与 $0.6H$ 相差 $0.2 \sim 0.4 \text{ kg}/\text{m}^3$, $0.6H$ 与 $0.2H$ 时相差 $0.70 \sim 0.85 \text{ kg}/\text{m}^3$; $6.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 与 $6.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量相近, 含沙量也趋近相同; 通过比较不同流量可看出, 流量越大, 悬移质含沙量越高, 垂线含沙量上下差距越大。

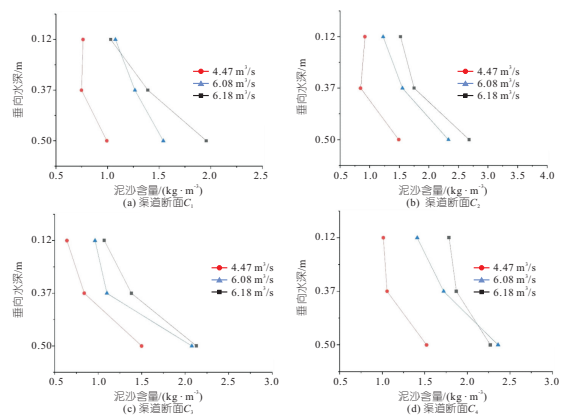


图 3 截面垂线水深含沙量变化图

Fig. 3 Variation of sediment concentration at vertical points of section

3.3 渠道垂向流速分析

水流在高雷诺数紊流状态下流速垂向分布不均, 以相对水深 $0.2H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 为测流点位探究截面垂向水流变化。在 $24.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大流量下 $0.2H$ 处流速达到 $2.2 \text{ m}/\text{s}$, $0.8H$ 处流速为 $1.64 \text{ m}/\text{s}$, 相差 $0.56 \text{ m}/\text{s}$; 流量为 $4.47 \text{ m}^3/\text{s}$ 时

流速相较于其他工况下偏小,0.2H 处流速在 0.8~0.6 m/s 之间,近渠底 0.8H 处流速在 0.35~0.50 m/s 之间,两点之间差约 0.3 m/s; 6.18 m³/s 与 6.08 m³/s 流量相差不大,过水断面面积相似,因此两者流速在垂线分布上差距不大,流速在 0.9~0.5 m/s 之间。分析流速变化可知,同一过水断面、同一输水流量下,水深越大,流速越小;大流量状态下不同水深之间的流速差值比小流量时大。

结合垂线泥沙含量分布进行分析,引水流量在 4~6 m³/s 区间时,近表层 0.2H 处流速区间为 0.5~1.0 m/s,泥沙含量位于 0.6~1.5 kg/m³ 之间;在近底层 0.8H 处时,流速在 0.35~0.50 m/s 之间,泥沙含量在 1.50~2.75 kg/m³ 之间;在 24.5 m³/s 流速下可达 1.7 m/s 左右,含沙量达 4 kg/m³ 左右。由于水流流态多变,含沙量与流速不断变化,由实测数据可知含沙量与流速基本呈正相关性,在大流量即大流速下含沙量亦增大;沿垂向水深流速逐渐减小,水流扰动减弱,这也是悬沙沉降的重要条件。

4 渠道临界流量

对渠道泥沙样品进行颗粒分析,并将结果以粒径级配曲线显示,如图 4 所示,泥沙中值粒径为 0.054 mm,悬移质粒径多集中于 0.02~0.30 mm,占比达 80%,此区间多为粉粒与沙粒,大于 0.3 mm 粒径约占 10%。通过泥沙悬浮指标公式(式(4))中悬浮指标 Z 是否大于 5 来判定颗粒是否悬浮,并推求出利于泥沙颗粒悬浮的临界流量。

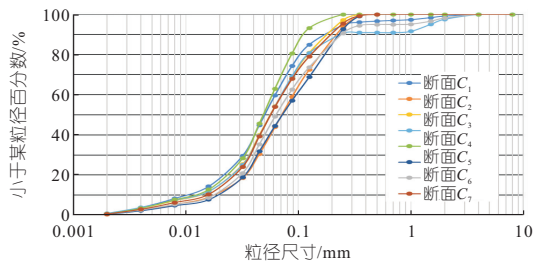


图 4 粒径级配图

Fig. 4 Grain size gradation diagram

渠道引水流量固定,明渠引流是恒定均匀流,恒定均匀流在固定渠道坡降下有较稳定的水深,悬浮指标及某粒径悬浮的临界流量计算公式为:

$$Z = \omega / (\kappa U_*) \tag{4}$$

$$V = C \sqrt{RJ} \tag{5}$$

$$Q = VA \tag{6}$$

式中, Z 为悬浮指标; κ 为 Karman 指数,取 0.4;

ω 为泥沙颗粒沉速, m/s; U_* 为摩阻流速, m/s; V 为断面流速, m/s; C 为谢才系数; R 为水力半径; J 为渠道坡降; Q 为引水流量, m³/s。

由粒径级配曲线图(图 4)可知,目前所取悬移质泥沙粒径范围主要在 0.02~0.20 mm 之间,大于 0.2 mm 粒径在悬浮颗粒中占比较少,说明较大颗粒大部分沉降在渠底而较难悬浮。使大颗粒悬浮需要更大的流速及流量,为使易于淤积的较大颗粒能够顺利随渠道水流悬浮而出,需控制流量至颗粒悬浮状态。如表 2 所示,0.8 mm 粒径以下所需临界流量较小,1.0 mm 粒径以上临界流量增长梯度加大,据粒径级配曲线可知水流中泥沙粒径最大可达 1.2 mm,且此粒径含量较少。分析渠道床沙粒径,最大粒径可达 2 mm,且沿渠道大粒径泥沙含量逐渐较小,可知其在输水中逐渐沉降。

表 2 渠道泥沙悬浮临界流量表

Tab. 2 Critical flow of suspended sediment in channel				
粒径 D/mm	摩阻流速 $U_*/(m \cdot s^{-1})$	沉速 $\omega/(m \cdot s^{-1})$	悬浮指标 Z	引水流量 Q/(m ³ · s ⁻¹)
0.054	0.001	0.003	4.92	0.000 1
0.1	0.004	0.008	4.96	0.001 0
0.2	0.012	0.024	4.97	0.030 0
0.3	0.021	0.041	4.83	0.200 0
0.4	0.030	0.058	4.94	0.650 0
0.5	0.038	0.075	4.96	1.540 0
0.6	0.047	0.093	4.97	3.020 0
0.7	0.055	0.110	4.98	5.310 0
0.8	0.063	0.130	4.98	8.540 0
0.9	0.071	0.141	4.99	13.100 0
1.0	0.079	0.160	4.98	19.200 0
1.1	0.090	0.170	4.90	27.200 0
1.2	0.100	0.190	4.99	39.600 0
1.3	0.101	0.200	4.90	46.500 0

根据分析可认为在渠道淤积过程中,大粒径首先沉降,故考虑粒径范围,可通过将引水流量调整至 13.1~39.6 m³/s,使 0.9~1.2 mm 附近的粒径悬浮,若遇特殊来水情况可根据粒径情况参照临界流量表来调整流量,预防渠道淤积。

5 水流挟沙公式改进

通过《河流泥沙颗粒分析规程》(SL 42-2010)^[7]中沉速计算方法,并采用含沙量断面计算公式计算得到不同工况下各断面泥沙含量,采用对黄河泥沙进行精密监测并处理得到的挟沙力公式(黄河委挟沙力公式)^[8]进行计算,得到相应断面含沙量值,将此计算值与断面含沙量实测值进行相关性分析,并依据实测数据对黄河委挟沙力公式进行优化。

$$S = 1.07V^{2.25} / (R^{0.74} \omega^{0.77}) \quad (7)$$

式中, S 为水流挟沙能力, kg/m^3 ; V 为断面平均流速, m/s ; R 为水力半径, m ; ω 为泥沙沉速, m/s 。

由实测值与计算值相关性分析(表 3)可知, 实测值与计算值在 Pearson 相关分析下 $P=0.000 < 0.01$, 在 Spearman 相关分析下 $P=0.000 < 0.01$, 在两种分析下均具有显著相关性, 可知黄河委挟沙力公式在一定程度上符合干渠挟沙特征, 可用于干渠挟沙力基本统计计算。

表 3 实测值与计算值相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of measured value and calculated value

类别	Pearson	Spearman
相关性	0.702**	0.342*
显著性	0.000	0.031

注: ** 在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

图 5 为实测值与计算值比较。由图 5 可看出, 泥沙含量实测值普遍高于计算值, 在高流速下

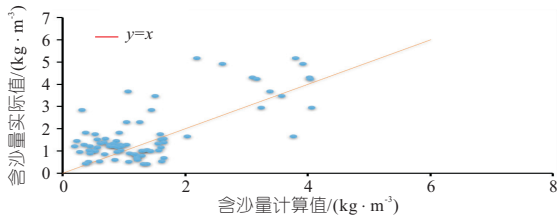


图 5 含沙量散点分布图(优化前)

Fig. 5 Scatter distribution of sediment concentration before optimize

这种差异更为明显, 原因为高流速泥沙颗粒组成与低流速存在差异, 大颗粒较多, 但公式采用的是静水下颗粒沉速, 大颗粒泥沙沉速较快, 这就造成含沙量计算值偏小于实测值。为减小这种差距, 将黄河委挟沙力公式进行拟合优化, 运用规划求解方法对实测值进行拟合, 通过改变公式相应指数不断形成新的线性关系, 在减少实测值与计算值方差的过程中寻求最优解。黄河委挟沙力公式各参数指数计算公式分别为:

$$S = C_4 V^{c_1} / (R^{c_2} \omega^{c_3}) \quad (8)$$

$$Z = \sum_{i=0}^{40} (Q_i - Q_j)^2 \quad (9)$$

式中, Z 为 Q_i 与 Q_j 平方差和, 令 Z 值最小时可求得方程最优解; Q_i 为实测值, m^3/s ; Q_j 为计算值, m^3/s ; c_1, c_2, c_3 均为修正参数。

表 4 为部分参数指数, 规划求解过程中参数在一定范围内调整, 超过一定范围 C_3 指数会消失, 此时沉速 ω 对挟沙力不产生影响, 而实际情况是沉速对悬移质泥沙的沉降起着至关重要的作用

表 4 挟沙力公式参数指数

Tab. 4 Parameter index of sediment carrying capacity formula

C_1	C_2	C_3	C_4	Z
2.25	0.74	0.77	1.07	49.70
2.61	0.73	0.69	1.21	34.52
2.21	0.78	0.29	1.37	22.47
2.09	0.78	0.25	1.34	21.60
2.15	0.76	0.13	1.24	20.00
1.93	0.35	0	1.14	18.00

用, 故综合各种情况, 拟得挟沙力公式:

$$S = 1.24V^{2.15} / (R^{0.76} \omega^{0.13}) \quad (10)$$

采用优化后的公式计算泥沙含量, 并与实测值进行相关性分析, 结果表明其 Pearson, Spearman 相关系数分别为 0.828**、0.493**, 显著性分别为 0.000、0.001 (** * 表示在 0.01 级别(双尾), 相关性显著)。由此可发现, 相关系数均有所上升, $P_2=0.828 > P_1=0.702$, 实测值相关性更强, 如图 6 所示, $y=x$ 两侧数据更均匀, 更能反映大流量下渠道含沙量情况。

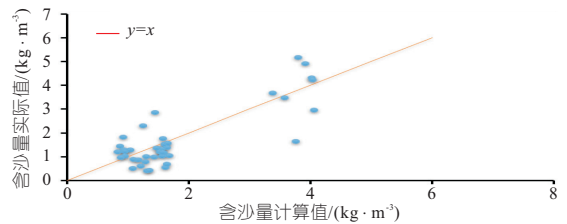


图 6 含沙量散点分布(优化后)

Fig. 6 Scatter distribution of sediment concentration after optimize

6 结论

a. 试验发现渠道泥沙沿程含量整体有微弱下降趋势, 增大流速会使渠道沙量同步上升。泥沙含量沿垂线上下差距明显, 大流量下水流扰动促使泥沙含量上下浮动; 流量 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右时平均含沙量在 $1.47 \text{ m}^3/\text{s}$, 上下水深含沙量相差约 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; 流量 $24.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时平均含沙量约 $3.99 \text{ kg}/\text{m}^3$; 最大泥沙含量在 $5.17 \text{ kg}/\text{m}^3$ 左右。

b. 基于最小二乘法的规划求解方法对黄河委挟沙力公式进行优化, 使其在干渠渠道上具有适用性, 相关系数达到 0.828, 高度相关, 能够较精确地反映引水流量特别是大流量下所携带的泥沙含量。

c. 由悬浮指标判定颗粒是否悬浮并列出了悬浮临界流量, 水流中大颗粒集中于 $0.3 \sim 1.2 \text{ mm}$ 之间, 并且河床沙粒径多在 0.3 mm 以上, 适当增大引水流量可防止大颗粒沉降; 流量提升至 19.2

