



引黄灌区首部枢纽泥沙输移特性与流速试验研究



宁少雄

宁少雄¹, 孙耀民², 吴文勇³, 肖娟^{1*}, 赵永安², 赵志华⁴

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 运城市尊村引黄灌溉服务中心, 山西 运城 044099; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 4. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为了探究引黄灌溉枢纽挟沙水流沿程含沙量变化规律和悬移质泥沙的垂向分布规律, 推求首部枢纽有害泥沙悬浮的临界不淤流速, 阐明减少有害泥沙引入的措施与方法, 以提高输配水利用效率. 以山西尊村灌区为主要研究对象, 通过对一级站首部枢纽2019年5—7月取黄河水样及工况、断面流速、水深、水面宽度数据监测, 分析了泥沙含量、沉起流速, 采用马尔文 Mastersizer 3000 仪器处理分析了粒径级配, 修正了适用于尊村灌区首部枢纽的挟沙力、扬动流速公式. 结果表明: 干渠黄河水泥沙含量与来水工况呈正相关; 尊村灌区所引黄河泥沙粒径以 0.006~0.200 mm 为主; 尊村灌区淤积与黄河口流速及粒径大小密切相关. 建议增长泵前黄河口输水距离, 流速控制在 0.30 m/s 左右, 同时对引水口清淤; 干渠以大于 2.06 m/s 流速定时冲刷. 实际运行中单机组工况应控制在 7.50 m³/s 左右以减少有害泥沙引入, 干渠流速控制在 0.42 m/s 左右, 输配水效率最高.

关键词: 首部枢纽; 输移特性; 挟沙力; 临界流速; 扬动流速; 悬移质; 颗粒级配

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)04-0359-07

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0306

宁少雄, 孙耀民, 吴文勇, 等. 引黄灌区首部枢纽泥沙输移特性与流速试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4): 359-365.

NING Shaoxiong, SUN Yaomin, WU Wenyong, et al. Experimental study on sediment transport characteristics and velocity of first hub in Yellow River Diversion Irrigation District[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2022, 40(4): 359-365. (in Chinese)

Experimental study on sediment transport characteristics and velocity of first hub in Yellow River Diversion Irrigation District

NING Shaoxiong¹, SUN Yaomin², WU Wenyong³, XIAO Juan^{1*}, ZHAO Yongan², ZHAO Zhihua⁴

(1. School of Hydro Science & Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. Yuncheng Zun Village Yellow River Irrigation Service Center, Yuncheng, Shanxi 044099, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In order to explore the variation law of sediment content and vertical distribution law of suspended sediment along the sand-carrying flow of the Yellow River Diversion Irrigation Project, deduce the critical non silting velocity of harmful sediment suspension in the first project was calculated. The measures and methods to reduce the introduction of harmful sediment were elucidated, so as to improve the utilization efficiency of water transportation and distribution. Taking Zuncun Irrigation District in Shanxi Province as the main research object, the sediment content and settling velocity were analyzed

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-17; 网络出版时间: 2022-04-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220406.1207.016.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC040320603)

第一作者简介: 宁少雄(1995—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生(shaoxiongning@163.com), 主要从事节水灌溉与泥沙研究.

通信作者简介: 肖娟(1968—), 女, 山西临汾人, 教授(zhangxd626@163.com), 主要从事节水灌溉理论与技术研究.

by monitoring the water samples of the Yellow River which taken from May to July 2019, the data of working conditions, section velocity, water depth and water surface width. The particle size gradation was analyzed by using the Malvern Mastersizer 3000 instrument. The formulas of sand-carrying capacity and uplifting velocity applied to the first junction of Zuncun Irrigation District were modified. The results show that there is a positive correlation between sediment content and inflow conditions. The sediment particle size of the Yellow River sediment in Zuncun Irrigation District is mainly 0.006–0.200 mm. The siltation in Zuncun Irrigation District is closely related to the velocity and particle size of the Yellow River estuary. It is suggested to increase the water delivery distance of the Yellow River estuary before the pump, control the flow rate at about 0.30 m/s, and clear the silt at the inlet. The main channel is scoured regularly at a flow velocity that larger than 2.06 m/s. In actual operation, the working condition of single unit should be controlled at about 7.50 m³/s to reduce the introduction of harmful sediment. The flow velocity in the main channel should be controlled at about 0.42 m/s to achieve the highest water delivery and distribution efficiency.

Key words: first hub; transport characteristics; sediment carrying capacity; critical velocity; sediment suspension velocity; suspended sediment; particle grain

黄河以泥沙多闻名,引水必引沙.引黄灌区沉沙池、后池、干渠泥沙含量大,淤积重,导致灌溉水利用效率低,然而灌区泥沙具有双面性.王延贵等^[1]在引黄灌区一系列实测数据的基础上,探讨了泥沙启动规律和淤积机理,总结了典型引黄灌区水、沙分布的规律与特点,分析并验证了适用于典型灌区的挟沙力公式.韩其为^[2]阐述并验证了泥沙启动的统计学规律.程秀文等^[3]对黄河水沿垂线分布的含沙量特点进行了分析,提出了在首部枢纽整治泥沙的重要性.胡春宏^[4]针对泥沙灾害提出了资源化利用、联合优化配置与水沙调控治理方略.尚静^[5]针对黄河淤积问题,提出通过水源和沉沙池两方面减沙,并通过优化输水断面等提高挟沙力.卢红伟等^[6]提出减少泥沙的途径主要是减少黄河水泥沙含量或减少引水,对于引水后的泥沙主要通过沉沙池沉降粗沙来实现沉降拦截.文献[7–8]探讨了不同粒径泥沙的扬动机理,得到了一些成果与结论,但针对渠道和首部枢纽的研究相对较少.

文中为提高灌区输配水利用效率,重点是减少泥沙含量和粗沙的引入,因此急需对首部枢纽展开试验研究,提出减少粗沙引入的措施与阈值,为尊村引黄灌区泵站高效提水与减沙提供一定依据.

1 研究区域概况

尊村一级站位于黄河小北干流中段右岸尊村咀上,共有 10 台机组,为实现侧向进水,设计提水流量定为 46.5 m³/s,灌溉面积为 11.06 万 hm²,同时,它还承担着工业用水与城市用水.由于需水量大和泥沙含

量大导致灌区淤积问题突出,其中 1/3 淤积在沉沙池内,1/3 淤积在渠道,严重影响了干渠的输配水能力.

2 材料与方法

2.1 监测点及断面布置

试验研究区域位于尊村引黄灌区一级站,整个枢纽监测布置从泵前黄河口至沉沙池出口,长 1 640 m,各监测断面距离不等,如图 1 所示.根据试验需求,在引黄口、前池、进水口、后池、沉沙池进口、沉沙池出口布设监测断面,选取不等距典型断面.共选取 7 个监测断面,分别为泵前断面 I、断面 II、断面 III、断面 IV,泵后断面 V、断面 VI、断面 VII,如表 1 所示.当沉沙池关闭时,监测断面 V 和断面 VI,当沉沙池开启时,监测断面 VII 和断面 VI.

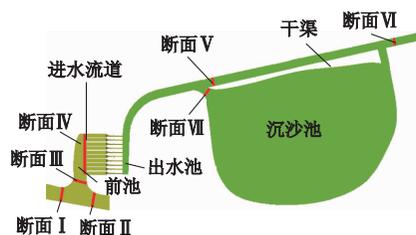


图 1 断面布置图

Fig.1 Layout section

表 1 断面桩号

Tab.1 Section pile number

序号(黄河口)	桩号	序号(干渠)	断面桩号
I	K0-130	V	K0+280
II	K0-130	VI	K0+1 500
III	K0-060	VII	K0+280
IV	K0+000		

2.2 监测及采样方案

2019年5—7月对所布置断面进行监测及取黄河水样.各机组运行稳定后,记录其工况,准备1.5 L采样瓶,采用积深法按照图2采集黄河水样,不同断面采集黄河水样时间间隔计算式为

$$T = L / \bar{u}, \quad (1)$$

式中: T 为各断面之间时间间隔, s; L 为相邻断面距离, m; \bar{u} 为平均流速, m/s.

根据《河流流量测验规范(GB 50179—2015)》^[9],如图2所示,布置3条测深、测速、测沙垂线,且三者互相重合,使用Starflow 6526超声多普勒仪测量水深、平均流速和水面宽度.

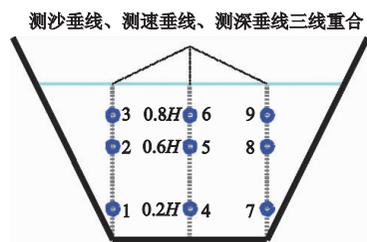


图2 断面取样布设图

Fig.2 Section sampling layout diagram

2.3 泥沙水处理与分析方法

泥沙水样经定容、静置,并采用虹吸法吸取上清液1 000~1 200 mL,将剩余泥沙水样倒置于烧杯中,经烘箱烘干,对烘干后的泥沙称重并记录,依据《河流泥沙颗粒分析规程(SL 42—2010)》^[10]对其进行粒径级配分析.首先进行前处理,判断泥沙样品酸碱性.经判断,泥沙样品为弱碱性.将泥沙样品中的杂草等杂质通过筛分清理掉,取筛分后的泥沙样品约0.4 g左右,放入到试剂管中,并加入4 mL左右的过氧化氢溶液,通过产生大量气泡去除其中有机质;随后将试剂管置于电沙浴锅内,通过加热去除剩余过氧化氢溶液,待试剂管冷却后加入40 mL去离子水和0.5 mol/L六偏磷酸钠,继续加热沸腾1 h,沸腾期间,为防止去离子水蒸干,根据实际情况需要补充去离子水;待其冷却后,采用马尔文Mastersizer 3000湿法测量分析粒径级配.

2.4 测定指标与推算

依据《河流悬移质泥沙测验规范》^[11],测沙垂线上各测点泥沙含量、测沙垂线上平均泥沙含量、整个断面平均泥沙含量计算式为

$$C_s = \frac{W_s}{V}, \quad (2)$$

$$C_{sm} = \frac{1}{3v_m} (C_{s0.2}v_{0.2} + C_{s0.6}v_{0.6} + C_{s0.8}v_{0.8}), \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{1}{1\,000} \{ C_{sm1} + C_{sm3} + [(C_{sm1} + C_{sm2})q_2 + (C_{sm2} + C_{sm3})q^3] \}, \quad (4)$$

$$C_{sa} = \frac{Q_s}{Q} \times 1\,000, \quad (5)$$

上述式中: C_s 为黄河水样泥沙含量, g/L; W_s 为黄河水样中干沙的重量, g; V 为所取黄河水样样品的体积, L; C_{sm} 为测沙垂线上平均泥沙含量, kg/m³; $C_{s0.2}, C_{s0.6}, C_{s0.8}$ 为不同深度测点泥沙含量, kg/m³; $v_{0.2}, v_{0.6}, v_{0.8}$ 为不同深度测点流速, m/s; v_m 为垂线上平均流速, m/s; Q_s 为整个断面上的泥沙输送率, t/s; q_i 为第 i 根垂线与第 $i-1$ 根垂线之间面积通过的流量, m³/s; C_{smi} 为第 i 根垂线的平均泥沙含量, kg/m³; C_{sa} 为断面上平均泥沙含量, kg/m³; Q 为整个断面上通过的流量, m³/s.

3 研究结果与分析

3.1 泵站首部枢纽泥沙变化特征

在2019年5—7月共进行了6次监测及采集黄河水样,有1次沉沙池开启(05-01),如表2所示.首部枢纽所引泥沙含量与来水工况呈正相关关系,通过监测与试验分析发现,来水工况介于6.55~8.80 m³/s时,一级站平均泥沙含量低于2.00 kg/m³.如图3所示,对于泵前4个断面,黄河水从泵前断面I、断面II流至断面III的过程中挟带了大量泥沙,总体呈现明显上升趋势,这是由于黄河本身含沙量高、流速大所致.黄河水从断面III到断面IV的过程中泥沙含量普遍上升,仅有一次(05-13)泥沙含量没有增加.这是由于机组引水导致流速大小不一,使断面III流至断面IV时,底部泥沙产生冲刷或悬移质泥沙形成沉降造成.黄河水从泵前断面IV提至泵后断面V(VII)的过程中,泥沙含量变化有高有低,且这一数值与泵后断面水深成反比,其中断面VII水深145 cm(05-01)、断面V水深181 cm(05-13)、断面V水深122 cm(07-14)呈现这一规律,这是由于5月单机组工况较小,流速小导致淤积从而使泥沙含量呈现下降趋势,7月中旬(07-14)单机组工况大进而产生冲刷,断面VI泥沙含量高达4.29 kg/m³,但由于断面IV泥沙含量值远大于断面IV,故造成泥沙含量下降的趋势.由于冲刷导致流速过快,水深下降,其中断面V水深1.16 m(06-03)、断面V水深1.11 m(06-24)、断面V水深1.21 m(07-01)符合这一现象与规律.黄河水从断面V(VII)到断面VI过程中泥沙含量呈现降低趋势,沉沙池开启时(05-01)这一趋势尤为显

著,泥沙含量从 2.75 kg/m^3 减少至 0.64 kg/m^3 ,减少了约 77%,说明沉沙池沉降泥沙十分有效.

表 2 来水工况与泥沙含量
Tab.2 Inflow scheme and sediment content

参数	日期					
	05-01	05-13	06-03	06-24	07-01	07-14
$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	7.60	19.90	8.80	6.55	6.60	13.00
$C_{\text{III}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.58	2.62	0.88	0.53	0.45	3.03
$C_{\text{IV}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3.23	2.53	1.18	1.00	0.81	7.54
$C_{\text{V(VII)}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2.75	2.02	1.73	1.08	2.00	5.16
$C_{\text{VI}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.64	2.23	1.66	1.58	1.10	4.29
$C_{\text{sed}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2.05	2.35	1.36	1.05	1.08	5.00

注:仅列出 4 个典型断面

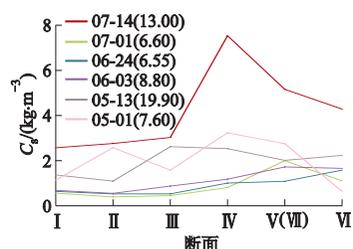
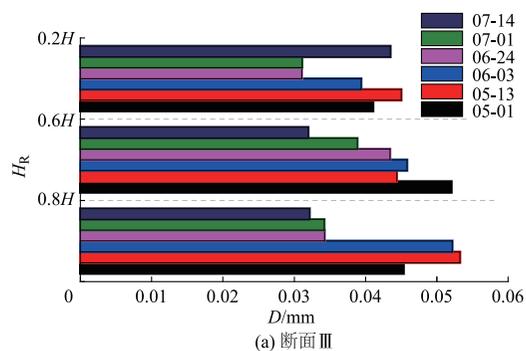
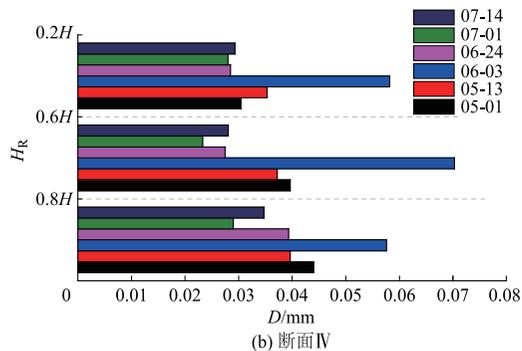


图 3 断面泥沙含量变化

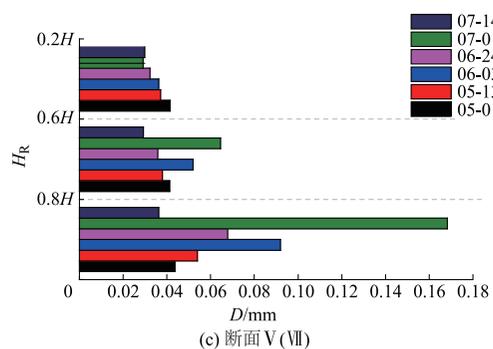
Fig.3 Variation of cross section sediment content



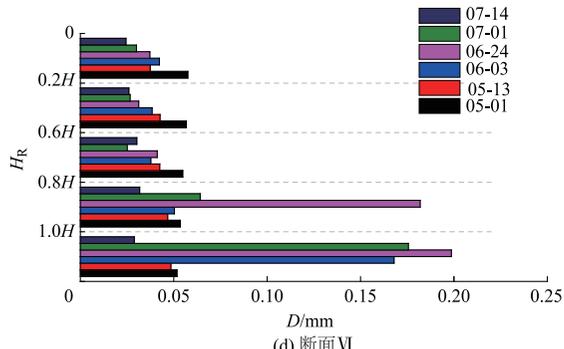
(a) 断面 III



(b) 断面 IV



(c) 断面 V(VII)



(d) 断面 VI

图 4 不同断面不同深度中值粒径级配

Fig.4 Median particle size grading for different sections and different depths

图 5 为各断面泥沙粒径级配曲线,图中 α_1 为小于某粒径百分数.由于试验位于黄河口附近,从断面 III、断面 IV、断面 V(VII)、断面 VI 所取泥沙粒径级配分析数据可以看出,其粒径最大值为 3.500 mm ,最小值为 $0.100 \times 10^{-3} \text{ mm}$.所引黄河水中泥沙粒径主要

3.2 断面泥沙粒径分布规律

选取断面 III、断面 IV、断面 V(VII)、断面 VI,对经马尔文 Mastersizer 3000 分析的样品数据选取 3 或 5 个深度的中值粒径值 D 进行绘图分析,如图 4 所示,图中 H_R 为相对水深.其中断面 VI 选取 5 个深度,表示为 $0, 0.2H, 0.6H, 0.8H, 1.0H$.断面 III、断面 IV、断面 V(VII) 选取 3 个深度,表示为 $0.2H, 0.6H, 0.8H$.对于不规则断面 III,从底层到表层中值粒径有大有小,这是由于断面 III 过水断面面积变化较大导致流速时大时小所致,该断面中值粒径介于 $0.030 \sim 0.054 \text{ mm}$.对于断面 IV,由于断面水体紊乱,流速分布不均,故从底层到表层中值粒径有大有小,该断面中值粒径介于 $0.02 \sim 0.07 \text{ mm}$.对于规则断面 V(VII),从底层到表层中值粒径呈现减小的趋势,该断面中值粒径介于 $0.03 \sim 0.17 \text{ mm}$.对于断面 VI,从底层至表面中值粒径总体变小,该断面中值粒径介于 $0.025 \sim 0.170 \text{ mm}$.沉沙池开启时,从底层至表层中值粒径分布较为均匀.可见首部枢纽的泥沙中值粒径大小介于 $0.02 \sim 0.20 \text{ mm}$.

为 $0.006 \sim 0.200 \text{ mm}$,极大颗粒与极小颗粒占比小,粗沙(大于 0.050 mm)所占比例为 40.8% .由此可知,黄河水中泥沙粒径集中分布于 $0.050 \sim 0.200 \text{ mm}$,表明尊村灌区引水过程的泥沙粒径介于 $0.006 \sim 0.200 \text{ mm}$.

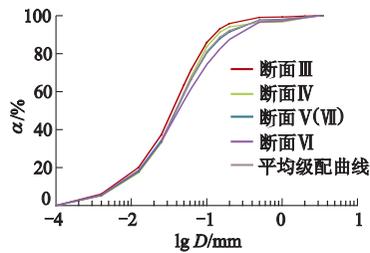


图5 泥沙粒径级配曲线

Fig.5 Sediment particle size distribution curves

3.3 泥沙输移特性分析

黄河水挟沙力指挟沙量与水流的挟沙能力相等,使其处于不冲不淤积状态,即引水过程中所能携带悬移质泥沙量处于临界值。结合2019年试验中实测数据与室内分析,推算其挟沙能力。选取黄河水利委员会精密测验所用公式,经处理后的挟沙力计算式为

$$S = 1.07 \frac{v^{2.25}}{R^{0.74} \omega^{0.77}}, \quad (6)$$

式中: S 为挟沙力, kg/m^3 ; v 为水流速度, m/s ; R 为水力半径, m ; ω 为泥沙静水沉降速度, m/s 。

泥沙静水沉降速度计算按《河流泥沙颗粒分析规程(SL 42—2010)》,将粒径划分为17个组,最大粒径为4.000 mm,最小为0.001 mm。

在计算泥沙沉降速度时,粒径 $D \leq 0.062$ mm时,采用斯托克斯公式计算,即

$$\omega = \frac{g}{1800} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \frac{D^2}{\nu}. \quad (7)$$

当 $0.062 < D \leq 2.000$ mm时,计算式为

$$(\lg S_a + 3.665)^2 + (\lg \varphi - 5.777)^2 = 39, \quad (8)$$

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{1/3} \nu^{1/3}}. \quad (9)$$

当 $D > 2.000$ mm时,计算式为

$$\omega = 4.58 \sqrt{10D}. \quad (10)$$

粒径组沉降的几何平均值计算式为

$$\bar{\omega}_i = \sqrt{\omega_i \omega_{i+1}}, \quad (11)$$

上述式中: ρ_s 为沙密度, g/cm^3 ; ρ_w 为水密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, cm/s^2 ; ν 为黄河水的运动黏滞系数, cm^2/s ; S_a 为沉降速度判数; φ 为泥沙粒径判数; $\bar{\omega}_i$ 为粒径组平均沉降速度, cm/s ; ω_i 为粒径组上限粒径沉降速度, cm/s ; ω_{i+1} 为粒径组下限粒径沉降速度, cm/s 。

将上述计算所得沉降速度代入式(6),得到各断面挟沙力,与试验值比较,经相关性分析及与前人研究对比并分析,结果见表3。表3结果比前人研究相关性更高。这是因为首部枢纽更靠近黄河口,与

式(6)的实测资料更为接近。

表3 挟沙力实测与计算值相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between measured and calculated values of sediment carrying capacity

名称	皮尔逊系数	斯皮尔曼系数	皮尔逊系数(干渠)
相关性	0.393 *	0.553 **	0.239 *
显著性	0.018 00	0.000 46	0.037 00

注: *表示在0.05水平上(双向)差异具有统计学意义; **表示在0.01水平上(双向)差异具有统计学意义

如图6所示,将各断面的实测值作为自变量,计算值作为因变量绘制拟合于同一坐标轴,实测值略小于计算值。

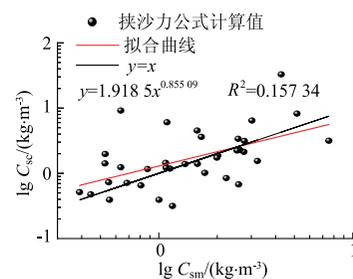


图6 挟沙力计算值与实测值拟合关系

Fig.6 Fitting relationship between calculated and measured values of sediment carrying capacity

为了使计算值更加接近于首部枢纽实测值,建立式(6)和拟合公式关系如下:

令

$$S = y = 1.07 \times \frac{v^{2.25}}{R^{0.74} \omega^{0.77}}, \quad (12)$$

联立

$$y = 1.918 5x^{0.855 09}, \quad (13)$$

得

$$x = 0.505 \times \frac{v^{2.63}}{R^{0.87} \omega^{0.90}}, \quad (14)$$

即尊村灌区首部枢纽挟沙力公式为

$$S = 0.505 \times \frac{v^{2.63}}{R^{0.87} \omega^{0.90}}. \quad (15)$$

3.4 扬动、起动流速分析

根据各断面测量深度 H , 平均温度 T 取 20°C , 深度取 $H = 1.0, 1.5, 2.0$ m; 根据《河流泥沙颗粒分析规程(SL 42—2010)》计算沉速, 扬动及起动流速(见表4)采用天然砂公式计算, 即

$$v_c = \left[0.43D^{0.75} + 1.1 \frac{(0.7 - \varepsilon)^4}{D} \right]^{0.5} H^{0.2}, \quad (16)$$

$$v_t = 0.812D^{0.40} \omega^{0.2} H^{0.2}, \quad (17)$$

式中: v_c 为泥沙的起动流速, m/s ; ε 为孔隙率, 取

0.4; v_f 为泥沙的扬动流速, m/s.

表4 泥沙沉速、起动速度

Tab.4 Sedimentation rate and starting rate of sediment

D/mm	$\omega/(10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
		H=1.0 m	H=1.5 m	H=2.0 m
0.004	0.014	1.49	1.62	1.72
0.015	0.202	0.78	0.85	0.90
0.025	0.561	0.62	0.67	0.71
0.050	2.250	0.47	0.51	0.54
0.062	3.450	0.44	0.48	0.51
0.350	5.710	0.47	0.51	0.54
0.500	10.460	0.52	0.57	0.60
1.500	52.190	0.77	0.83	0.88
2.000	75.360	0.85	0.92	0.98
3.500	271.000	1.05	1.14	1.21

从表4可以发现,粗颗粒泥沙沉速快,细颗粒泥沙沉速慢,泥沙粒径越大,沉速越快.正是利用这一泥沙特性,在首部利用沉沙池可以有效沉降并拦截大量粗颗粒泥沙,这也是造成淤积的重要原因.当 $D > 0.062 \text{ mm}$ 时,起动流速随粒径增大而增大;当 $D \leq 0.062 \text{ mm}$ 时,起动流速随粒径增大而减小.

将马尔文 Mastersizer 3000 分析所得粒径与实测 H 代入式(17)得到理论扬动流速值,并和实测数据对照分析(见表5),两者差异具有统计学意义,表明此公式适用于尊村灌区.

表5 流速计算与实测值相关性分析

Tab.5 Correlation analysis between velocity calculation and measured value

名称	皮尔逊系数	斯皮尔曼系数
相关性	0.632 **	0.767 **
显著性	0.001 600	0.000 031

注: ** 表示在 0.01 水平上(双向)差异具有统计学意义

将流速实测值 v_m 作为自变量,计算值 v_c 作为因变量绘制拟合于同一坐标轴,如图7所示,当流速大于 0.3 m/s 时,计算值 v_c 小于实测值 v_m ; 当流速小于 0.3 m/s 时,计算值大于实测值.

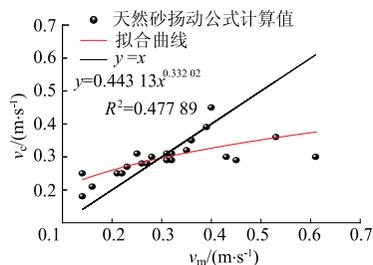


图7 流速计算值与实测值拟合关系

Fig.7 Fitting relationship between calculated velocity and measured velocity

为了使计算值更接近于首部枢纽实测值,建立

式(17)和拟合公式:

令

$$v_f = y = 0.812D^{0.4} \omega^{0.2} H^{0.2}, \quad (18)$$

联立

$$y = 0.443 13x^{0.332 02}, \quad (19)$$

得

$$x = 6.197D^{1.2} \omega^{0.6} H^{0.6}, \quad (20)$$

即尊村灌区首部枢纽泥沙扬动流速公式为

$$v_f = 6.197D^{1.2} \omega^{0.6} H^{0.6}. \quad (21)$$

4 讨论

在引黄灌区,需要减少有害泥沙(大于 0.05 mm)引入,基于上述研究,针对首部枢纽实测数据,在此对 1~2 m 水深展开讨论,由式(21)计算可知,流速大于 0.28~0.42 m/s 时,粒径为 0.05 mm 的泥沙开始扬动,故对于泵前黄河口断面Ⅲ流速应控制在 0.28 m/s 左右才能大量减少有害泥沙输移至泵前.对于引水口断面Ⅳ,通过图4(Ⅳ)、图5及式(21)预测到其淤积严重,目前水深最大为 2.00 m,淤积严重的引水口仅有 0.25 m,这也是造成有害泥沙引入的原因之一.据此,引水口流速应介于 0.12~0.42 m/s,工况为 3.0~10.5 m³/s 最宜;距引水口平均水深处,该断面最佳流速为 0.3 m/s,工况为 7.5 m³/s,由此可减少有害泥沙的引入,对于此引水口断面,后期应及时清淤.

泵后干渠泥沙粒径大小介于 0.006~0.200 mm,将 0.200 mm 带入式(21)可知干渠不同水深处扬动流速介于 1.36~2.06 m/s,同时 0.050 mm 粒径泥沙不同水深处扬动流速介于 0.28~0.42 m/s,为了确保干渠冲淤平衡,应定时冲刷.表4中粒径为 3.500 mm 的泥沙起动流速介于 1.05~1.21 m/s,依据国家规范《灌溉与排水工程设计规范(GB 50288—2018)》^[12],渠道平均流速不应小于 0.30 m/s,要想实现上述冲淤平衡目标,建议流速以 0.42 m/s 左右最佳,需要冲刷时,流速应大于 2.06 m/s.

5 结论

1) 干渠黄河水泥沙含量与工况成正相关,保证输水效率前提下,为减少有害泥沙的引入,建议单台机组流量控制在 7.50 m³/s,引水口断面应及时清淤.

2) 进入干渠的有害泥沙占比为 2/5,悬移质泥沙粒径分布于 0.006~0.200 mm,沉沙池对有害泥沙

沉积拦截效果十分有效。

3) 建议增长泵前输水距离,前池流速以 0.30 m/s 左右最宜.对于干渠,灌溉、生活、工业用水时,流速以 0.42 m/s 左右最宜,为实现冲淤平衡,应定期以大于 2.06 m/s 的流速进行冲刷。

文中仅以一个灌期内数据处理分析,具有一定局限性.今后继续加大此项研究工作,以获取更多数据,同时结合 CFD 数值模拟深化此研究,为未来泥沙问题和灌区现代化发展提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 王延贵,胡春宏.引黄灌区水沙综合利用及渠首治理[J].泥沙研究,2000(2):39-43.
WANG Yangui, HU Chunhong. Water and sediment comprehensive utilization and sediment control in irrigation system of the Lower Yellow River[J]. Journal of sediment research, 2000(2):39-43. (in Chinese)
- [2] 韩其为.泥沙起动规律及起动流速[J].泥沙研究,1982(2):11-26.
HAN Qiwei. Characteristics of incipient sediment motion and incipient velocity [J]. Journal of sediment research, 1982(2):11-26. (in Chinese)
- [3] 程秀文,尚红霞,陈发中,等.黄河下游引黄灌溉中的泥沙处理利用[J].泥沙研究,2000(2):10-14.
CHENG Xiuwen, SHANG Hongxia, CHEN Fazhong, et al. Sediment treatment and utilization in the Lower Yellow River Irrigation [J]. Journal of sediment research, 2000(2):10-14. (in Chinese)
- [4] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
HU Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2016, 35(10):1-11. (in Chinese)
- [5] 尚静.黄河小北干流引黄灌区渠道淤积解决方案浅析[J].山西水利,2013,29(5):46,48.
SHANG Jing. Analysis on the solution of channel siltation in the Lower Yellow River of the small north main stream of the Yellow River [J]. Shanxi water resources, 2013, 29(5):46,48. (in Chinese)
- [6] 卢红伟,王延贵,史红玲.引黄灌区水沙资源配置技术的研究[J].水利学报,2012,43(12):1405-1412.
LU Hongwei, WANG Yangui, SHI Hongling. Study on main techniques of water and sediment resources allocation in irrigation system of the Lower Yellow River [J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 43(12):1405-1412. (in Chinese)
- [7] 窦国仁.紊流力学(下册)[M].北京:高等教育出版社,1987.
- [8] CELIK I, RODI W. Suspended sediment-transport capacity for open channel flow [J]. International journal of sediment research, 1997, 114(2):191-204.
- [9] 水利部.河流流量测验规范:GB 50179—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [10] 水利部.河流泥沙颗粒分析规程:SL 42—2010[S].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [11] 水利部.河流悬移质泥沙测验规范:GB 50159—2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [12] 水利部.灌溉与排水工程设计规范:GB 50288—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.

(责任编辑 谈国鹏)

(上接第 331 页)

- [9] 曾鹏,章煜君,李申杰,等.核主泵试验台三维设计[J].工程建设与设计,2016(12):121-123.
ZENG Peng, ZHANG Yujun, LI Shenjie, et al. The 3D design of test bed for nuclear power reactor coolant pump [J]. Manufacture engineering design, 2016(12):121-123. (in Chinese)
- [10] 刘强.核电用泵试验台建造经验浅谈[J].通用机械,2015(11):65-67.
LIU Qiang. Discussion on the construction experience of nuclear power pump test bed [J]. General machinery, 2015(11):65-67. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.回转动力泵水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级:GB/T 3216—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

(责任编辑 盛杰)