

引黄灌渠泥沙迁移特性与渠道挟沙力模型试验研究

赵志华¹, 吴文勇^{2*}, 王佳盛³, 赵永安⁴

(1. 石河子大学, 新疆 石河子 832000; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3. 中山市水利水电勘测设计咨询有限公司, 广东 中山 528403; 4. 运城市尊村引黄灌溉管理局, 山西 运城 044099)

摘要:【目的】探索灌渠泥沙迁移特性及泥沙级配的沿程变化规律,找出减少渠道泥沙淤积的方法,保障灌区正常运行。【方法】通过对尊村灌区典型干渠高含沙水流实时监测采样,分析了悬移质泥沙沿程含沙量变化及级配特征,并根据实测数据带入4个典型挟沙力公式,筛选出适合尊村灌区的挟沙力公式,进一步改进得到尊村灌区渠道挟沙力计算公式。同时,通过一干渠改造段实测数据,推求出一干渠冲淤平衡比降计算公式。【结果】不同粒径泥沙的输移特性不同,总干渠悬移质含沙量随来水含沙量的增加而增加,渠道淤积主要与粉粒和砂粒量有关,其中砂粒对来水含沙量的变化表现得最为敏感,而黏粒更多的被水流带走,渠道由非平衡输沙经冲刷、淤积达到冲淤平衡输沙的过程比较缓慢。同时沉沙池能有效地减小引水中砂粒量。二干渠末清淤修缮段依旧存在泥沙淤积问题,一干渠剩余未改造部分,在条件允许的情况下,建议增大比降。【结论】含沙量在 2 kg/m^3 内时,一级站来水量在 $8\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,渠道基本实现冲淤平衡。

关键词:灌渠; 悬移质; 颗粒级配; 减淤措施; 挟沙力

中图分类号:S274.3

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20190199

赵志华, 吴文勇, 王佳盛, 等. 引黄灌渠泥沙迁移特性与渠道挟沙力模型试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 63-71.

0 引言

全国引黄灌区灌溉面积达733万 hm^2 ,占全国灌溉面积的13.8%,引黄灌溉事业经历了初办、大办、停灌、复灌、到稳固发展5个阶段^[1]。20世纪50、60年代兴起对灌区泥沙的研究,钱宁^[2]针对渠道坡度、流速、含沙量等问题,讨论了减少渠首泥沙的措施,再依据动量定理简要阐明了防止泥沙入渠的基本原理。20世纪80年代之后,随着引黄灌区泥沙问题越来越突出,沙玉清等^[3]从水流平均挟沙力的角度阐述了使渠道冲淤平衡的设计方法。张庭英等^[4]从不冲不淤流速出发,推求灌区渠道不冲不淤稳定边坡的表达式。胡健等^[5]依据小开河灌区运行10 a的资料,分析灌区不同渠段的水流挟沙力与流量的关系,验证了小开河灌区渠道的输沙能力是合理的,并指出小开河灌区采用的长距离输沙设计思路在建设引黄灌区中的创新意义。毛继新等^[6]采用簸箕李灌区的实测资料建立了引黄渠道长距离输送数学模型,并指出,渠道衬砌和复式断面有利于减少渠道的淤积,同时指出避免小流量长时间引水、减少沿程分水和提水灌溉是实现泥沙远距离输送的有效措施。前人^[7-11]针对簸箕李灌区、位山灌区等引黄灌区渠道泥沙淤积问题,从渠道泥沙分布、泥沙粒径特性和渠道挟沙力入手,通过大量实测资料分析并得出了解决泥沙问题的方法,引入远距离输沙系数与泥沙分散系数2个概念来判别灌区泥沙的输移距离及分散程度。迄今,很多研究成果已用于灌区泥沙防治^[12-14],尽管在河流泥沙水动力学和引黄渠道水沙输移的理论方面已经形成了较为完备的体系,但针对特定灌区而言,已有理论和成果的应用依旧存在差异。现行政策提出灌区引水要水沙并用,引水时不得将泥沙清理到黄河,而只能由渠道输送到下游或田间,因此提高了对渠道输沙能力的要求。基于此迫切需要对灌渠流速、含沙量和悬移质粒径分布之间的关系以及泥沙沿程迁移的特性进行研究,找出其中规律。诸多国内学者^[15-17]

收稿日期:2019-04-30

基金项目:现代灌区高效用水技术及应用(2017YFC040320603)

作者简介:赵志华(1993-),男,硕士研究生,主要从事水文及水资源与节水灌溉方面的研究。E-mail: zhaozhihua135@163.com

通信作者:吴文勇(1977-),男,教授级高级工程师,博士,主要从事节水灌溉与水土环境保护方面的研究。E-mail: wenyongwu@126.com

对引黄灌区泥沙的淤积原因及防治方法进行了研究。先前的成果多是针对含沙量沿程变化规律的研究,针对灌渠沿程泥沙粒径特性分布研究的较少。本研究以尊村引黄灌区为对象,经实地原型监测采样,分析入渠泥沙的迁移特性和粒径分布,并筛选出了尊村灌区渠道挟沙力计算公式,根据实测资料对公式做了相应调整,为灌区优化管理模式减轻泥沙淤积、建立相应过滤模式和对推广高效节水灌溉提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

尊村灌区位于运城市西北黄河小北干流中段的尊村咀上,1976年兴建多级提水灌溉工程,工程规模为九级31站,已经建成九级22站,灌区总干渠全长113.554 km,分干渠5条总长136.753 km,支渠134条,总长776.589 km,输水泥沙在灌区有33%淤积在沉沙池,35%淤积在了干渠^[18]。灌区主要受益范围为涑水河流域的永济、临猗、盐湖、夏县、闻喜5县(市/区)的44个乡镇,596个行政村,农业人口74.11万人,灌区总扬程165.44 m,总装机6.14万kW,设计提水流量46.5 m³/s,灌溉面积166 hm²,渠道纵坡1/4 000。

1.2 监测点布置

鉴于尊村渠系网络的复杂性,选择一级站到二级站的一干渠和二级站到三级站的二干渠作为分析路线进行原型取样,一二干渠来水量大且干渠长度较长,具有较好的代表性,并且灌溉水利用率较高,适合测定工作的开展,所以选定在一干渠和二干渠上设置14个监测点作为分析路线。其中一干渠设置8个监测点,监测点布置如图1所示,测点主要布设在一干渠渠首、沉沙池出口和典型断面变化处,二干渠上设置6个测点,主要设置在渠首、渠尾和拱桥等典型断面,各测点之间距离不等,测点位置如表1所示。

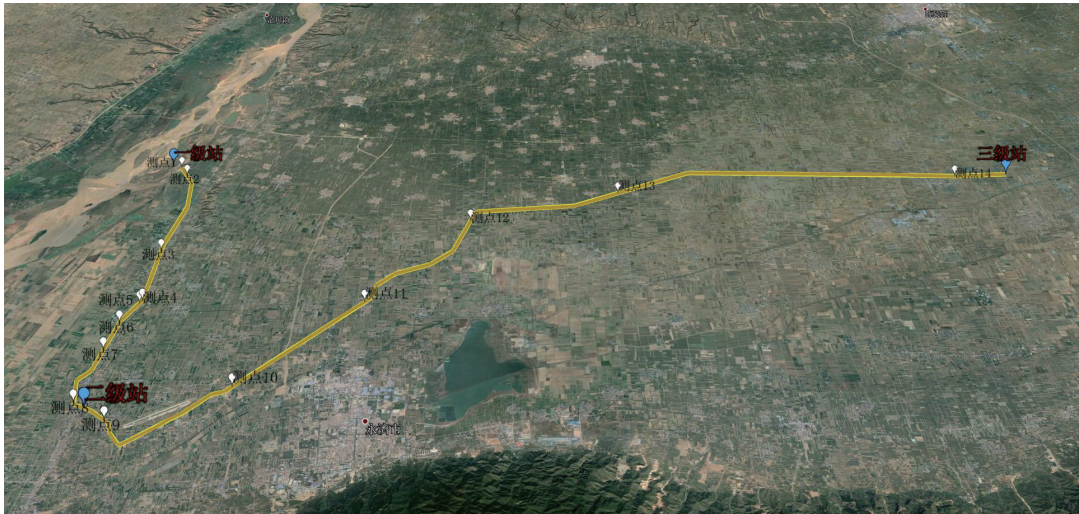


图1 取样点平面布置图

表1 监测断面位置

断面 序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
桩号	K0+	K0+	K4+	K7+	K7+	K11+	K12+	K14+	K16+	K22+	K29+	K36+	K42+	K61+
	000	100	600	200	800	100	900	900	800	700	800	800	700	500

1.3 灌渠泥沙采样方法

2018年夏灌期(6月28日—8月12日)对灌渠进行原型观测试验。尊村灌区由黄河干流尊村咀上一级提水泵站引水进入总干渠,待渠系流量稳定后,记录各机组引水流量,开始在各监测点进行取样测量工作,横断面的测量主要包括水深测量和起点距测量。泥沙采样方法采用国家标准《河流悬移质泥沙测验规范》^[19],由于渠系较长,下游测量时间比上游晚,时间间隔计算式^[20]为:

$$T=L/\bar{u}, \tag{1}$$

式中: T 为监测点之间测量时间间隔(s); $\bar{u}$ 为平均流速(m/s); L 为相邻监测点距离(m)。

采用Starflow6 526超声多普勒仪进行测量,干渠测量断面设置3条测速垂线,设置测沙垂线与测速垂线重合。每个横断面的测量布设3条测深垂线,同时用卷尺测出各测深垂线的起点距,由于一二干渠渠道水面

宽度变化不大,且水深小于5 m,流速仪可直接测得水深。采用积深法采集洪水样(每测点重复取样3次,取样瓶容积为1 500 mL),根据实际水深布置测沙垂线上的测点数。采用烘干法得到渠道断面含沙量,所得浑水样装于取样瓶带回实验室,将水样倒于2 000 mL量筒定容至整刻度线以得到浑水样体积,静置沉淀24 h,采用蠕动泵抽取上清液,为保证泥沙量的准确,每次抽取剩余500 mL水样,将剩余水样倒于称质量后的烧杯中,置于烘箱105 ℃恒温烘干处理,烧杯冷却后采用1/1 000高精度电子天平称量,得到泥沙质量。将上一步制备的沙样编号装袋以备泥沙粒径分析。

1.4 泥沙测试方法

泥沙分析采用《河流泥沙颗粒分析规程》^[21],样品分析于中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室中进行,采用马尔文3 000激光粒度分析仪对泥沙粒径进行分析。分析过程如下:测定泥沙pH值、判断酸碱性,以明确分散剂的种类(经测定沙样为碱性),过2 mm筛去样品中草根等杂质。称取泥沙约0.2 g左右,称好后放入50 mL三角瓶中,加几滴去离子水浸润土样,加3~5 mL双氧水去除有机质,直至反应停止。向冷却后的三角瓶中加入1 mL分散剂(0.5 N六偏磷酸钠)、35 mL左右去离子水,在电沙浴锅上加热,水沸腾后加热1 h,冷却后用粒度仪测量。采用激光粒度仪的湿法测量程序测量前处理后的泥沙样品,得到泥沙样品颗粒级配^[22]。

2 结果与分析

2.1 灌渠泥沙基本特性

在夏灌期采样6次,6月28日、8月2日、8月12日时3次采样,一级站来水未经沉沙池直接引入一干渠,其余3次均经沉沙池沉沙。采样日期与对应的泵站机组上报流量大小以及对应编号见表2。由表2可知,测量的6组含沙量数据中,含沙量最大为5.87 kg/m³,最小为0.29 kg/m³。1996年3月和9月对尊村灌区一干渠进行2次测量采样资料中,同本次试验相近来水工况下的含沙量最大为82.59 kg/m³,最小为8.79 kg/m³,因此,与以往测量数据相比含沙量大幅减少^[23],此外,7月10日与8月2日一级站机组引水流量相差0.5 m³/s,8月2日的干渠平均含沙量比7月10日增加约0.9倍,同时,7月7日比6月28日引水流量增加1 m³/s,平均含沙量增加约0.7倍,7月30日与8月12日引水流量较7月7日增加1 m³/s,平均含沙量分别比7月7日增加约1.5倍和0.6倍,7月10日较7月30日与8月12日引水流量分别增加4 m³/s和4 m³/s,平均含沙量分别增加约0.02倍和0.5倍,随着引水流量的增加,渠道平均含沙量逐渐增大,说明渠道平均含沙量与渠道引水流量正相关。

表2 采样日期与来水工况

来水工况	6月28日	7月7日	7月10日	7月30日	8月2日	8月12日
机组引水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	6	7	12	8	12.5	8
测点1含沙量/(kg·m ⁻³)	0.66	1.40	2.59	3.93	4.86	1.33
测点2含沙量/(kg·m ⁻³)	0.87	1.13	1.58	1.86	5.61	1.56
测点13含沙量/(kg·m ⁻³)	0.46	0.83	5.87	3.65	4.67	1.77
测点14含沙量/(kg·m ⁻³)	0.29	0.43	2.38	2.05	2.93	0.96
最小含沙量/(kg·m ⁻³)	0.29	0.43	1.86	1.86	2.93	0.96
最大含沙量/(kg·m ⁻³)	0.90	1.41	5.87	3.93	5.61	2.64
渠道平均含沙量/(kg·m ⁻³)	0.606	1.050	2.636	2.583	4.927	1.730

注 由于测点数目较多,单个测点含沙量未全部列出。

实测含沙量沿程变化过程见图2。从图2可以看出,干渠泥沙整体上表现为有冲有淤的状态,其中6月28日、8月2日和8月12日3次测流时引水未经过沉沙池,测点2总体含沙量增加,与测点1相比分别增长32%、15%和17%,7月7日、10日和30日3次测流来水通过沉沙池,与测点1相比测点2含沙量分别减小19%、39%和53%,可见,渠首沉沙池会有效减小来沙入渠。8号测点与9号测点之间为一干渠尾和二干渠首的交汇处,6次测流中,除8月2日来水含沙量较大,在二级站下游9号测点含沙量未增加外,其他5次含沙量均有不同幅度的增加,说明水流中含沙量较低时,二级站出口水流紊乱,渠首易发生冲刷破坏。此外,计算6组测流数据均显示14号测点的含沙量明显小于13号测点,6月28日、7月7日和7月10日测流分别减少37%、48.2%和59.4%,7月30日、8月2日和8月12日测流分别减小43.8%、37.2%和45.8%。二干渠设计流量为31.5 m³/s,13号测点到14号测点位于二干渠末端,流量相比渠道最初引水量大幅减小且远远小于设计流量,流速也大

幅减小。因此,二干渠末段输水过程中普遍存在淤积现象,13号测点到14号测点之间包含一段清淤修缮的新渠,其修缮前淤积严重,影响灌区正常运作,由此可见,清淤修缮后并没有解决该段易产生淤积的现象。

对比沉沙池出口的2号监测点,结合表2一级站来水情况可以看出,6月28日和7月7日一级站平均引水流量为 $6.7 \text{ m}^3/\text{s}$,此时总干渠产生淤积,并且单位体积水中含沙量变化幅度较大。而在7月30日和8月12日一级站平均引水流量为 $8 \text{ m}^3/\text{s}$,2次来水中含沙量相差不大,干渠渠道分别表现为冲刷和淤积状态,二干渠末端(测点14)含沙量与一干渠来水含沙量(测点2)相比分别是增加 $0.19 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $-0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。7月10日和8月2日在大流量分别为 $12 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,渠道表现为冲刷状态。由此可以得出,来水含沙量在 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 内时,一级站来水量需要在 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,渠道才能达到冲淤平衡。

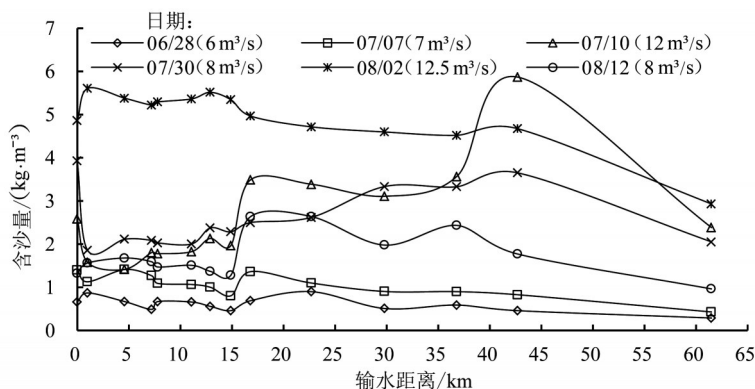


图2 含沙量沿程变化

2.2 灌渠泥沙粒径分布特征

对选定的尊村一二干渠采样路线沿程不同粒径泥沙变化进行分析,悬移质中3类泥沙在渠道中的沿程变化如图3所示。

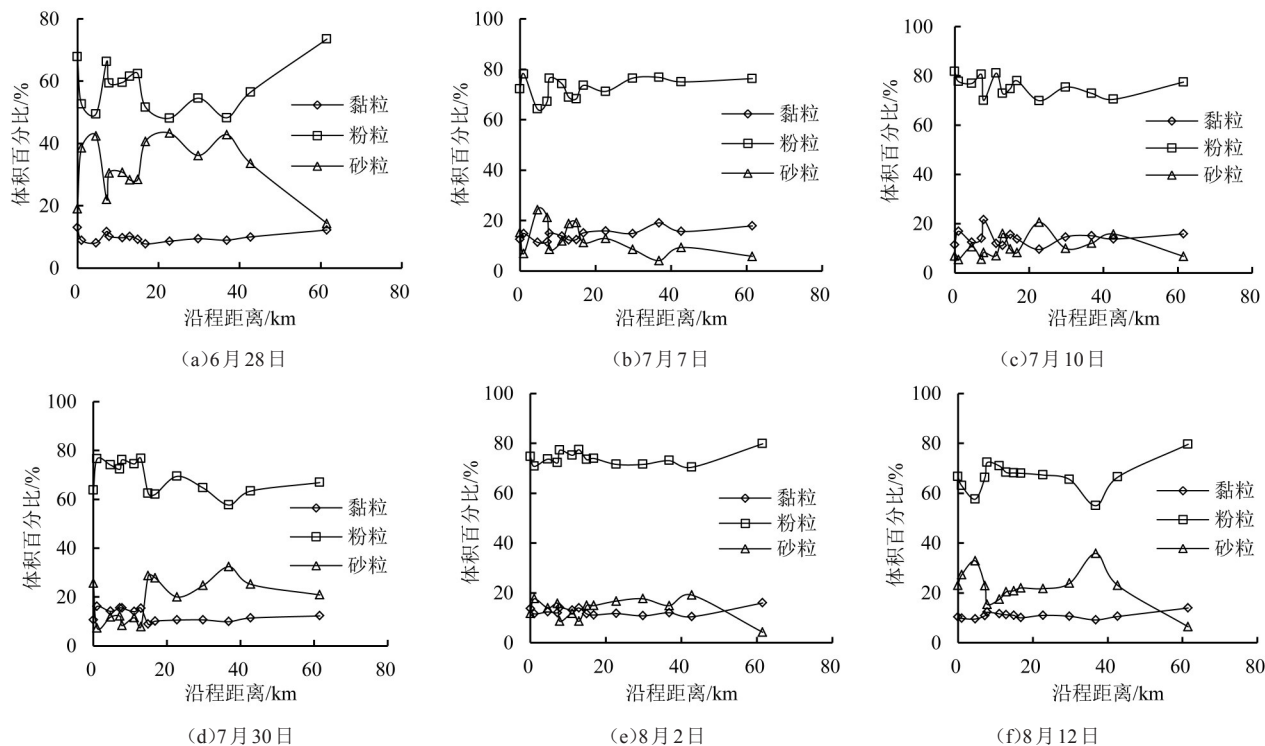


图3 泥沙沿程变化

从图3可以看出,6月28日、7月7日、8月2日和8月12日测流时干渠总体呈淤积状态,7月10日、30日测流时干渠表现为冲刷状态。渠道中黏粒量变化较为平缓且总体上所占比例有所增长,而粉粒和砂粒之间则呈现出此消彼长的状态。表明当干渠处于淤积状态时,粉粒和砂粒表现尤为敏感,产生淤积的泥沙也主要来源于粉粒和砂粒,而粒径微小的黏粒则更多的被水流带走。在7月10日、30日取样过程中,渠道总体产生冲刷,3种类型泥沙所占比例变化明显,说明在大流量下,水流更为紊乱,各粒径的泥沙均会与底泥发生交

换,呈现动态的增加。由1号测点(一干渠渠首)和2号测点(沉沙池出口)的泥沙粒径变化可以看出,引水通过沉沙池后,砂粒所占比例明显减小(图3(b)、图3(c)、图3(d)),引水未通过沉沙池时,砂粒量增加(图3(a)、图3(e)、图3(f))。说明,沉沙池能有效降低引水中砂粒的比例,同时,一级站出水池水流紊乱,未经过沉沙池时,显示2号测点的砂粒比例增加,而粉粒和黏粒的比例减少,说明砂粒对水流的冲刷表现得最为敏感。就13号和14号测点之间,普遍存在粉粒和黏粒所占比例增加,砂粒所占比例大幅减小的现象,与图2中13号和14号测点含沙量沿程变化比较,进一步说明13号和14号测点之间的清淤修缮段依然存在淤积现象。因此,在渠道冲、淤的过程中,砂粒表现最为敏感。

2.3 灌渠泥沙输移特性

在一定边界条件下,一定的水流能挟带的悬移质泥沙量的临界值被定义为水流挟沙力。水流挟沙力是河床演变分析和河道整治工程设计的重要基础,是解决水库、河渠等大量泥沙冲淤问题的关键,在进行河床的冲淤计算时,水流的挟沙能力是最关键的问题^[24],挟沙力大小计算选取4个典型黄河周边水流及引黄渠道的计算公式,如表3所示。

表3 典型挟沙力计算公式

名称	武汉大学挟沙力公式	黄河水流委员会挟沙力公式	内蒙古河套灌区挟沙力公式	水利水电科学研究院河渠所挟沙力公式
公式	$S = 1.07 \frac{U^{2.25}}{R^{0.74} \omega^{0.77}}$	$S = 77 \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right) \left(\frac{H}{B} \right)^{1/2}$	$S = 50 \left(\frac{U^2}{gR\omega} \right)^{2/3} \left(\frac{H}{B} \right)^{1/2}$	$S = 2.34 \frac{U^4}{\omega R^2}$

注 S 为挟沙力(kg/m^3); U 为流速(m/s); g 为重力加速度(m/s^2); R 为水力半径(m); H 为平均水深(m); B 为水面宽(m); ω 为泥沙沉速,除黄河水流委员会挟沙力公式中单位为(m/s),其他公式中单位为(cm/s)。

泥沙沉速是反应泥沙特性之一,泥沙沉速计算过程中粒径按照《河流泥沙颗粒分析规程》^[21]将悬移质泥沙样品粒径分为16个粒径区间,最小粒径为 $0.1 \mu\text{m}$,最大为 $1\,500 \mu\text{m}$ 。

断面平均粒径计算式为:

$$D_i = \sqrt{D_u D_L}, \quad (2)$$

$$D = \sum P_i D_i, \quad (3)$$

式中: D_i 为第 i 组平均粒径; D_u 、 D_L 为某组上下、限; P_i 为断面平均粒径; D 为断面平均粒径。经计算结果表明,断面的平均粒径不同时间不同位置均有所变化,说明悬移质在随水流的运动过程中,不停地与底泥发生不规则的交换。平均粒径小于 0.062 mm 时,沉速计算公式选择斯托克斯公式:

$$\omega = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{\nu}, \quad (4)$$

式中: ω 为泥沙沉速(m/s); γ_s 为泥沙容重(kN/m^3); γ 为水容重(kN/m^3); ν 为水的运动黏度(cm^2/s); d 为泥沙平均粒径(cm)。

平均粒径为 $0.062 \sim 2 \text{ mm}$ 时,沉速计算公式选择沙玉清过渡区公式:

$$(\log S_a + 3.665)^2 + (\log \varphi - 5.777)^2 = 39, \quad (5)$$

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{1/3} \nu^{1/3}}, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{g^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{1/3} d}{\nu^{2/3}} = \frac{\omega d}{S_a \nu}, \quad (7)$$

式中: S_a 为沉速判数; φ 为粒径判数; ω 为泥沙沉速(m/s); γ_s 为泥沙容重(kN/m^3); γ 为水容重(kN/m^3); ν 为水的运动粘度(cm^2/s); d 为泥沙平均粒径(cm)。

将计算得到平均沉速带入挟沙力计算公式,计算各断面的挟沙力大小,并将计算值与实测值进行比较,采用SPSS做皮尔逊相关性分析,分析结果见表4。由表4可知,实测含沙量与武汉大学挟沙力公式和内蒙古河套灌区挟沙力公式的计算结果在0.05水平上显著相关,而与其他2个公式的计算结果没有明显的相关性。结合4个公式建立的地域基础,可以看出挟沙力的变化随地域差异有很大的差异。尊村引黄灌区、渭河等支流和河套灌区位于黄土高原以及黄土高原边缘地带,地域靠近和地理环境的状况类似,公式计算相关性较强,而位于黄河下游平原的人民胜利渠,在挟沙力的统计规律上与尊村引黄渠道的相关性较差。

表4 不同公式计算值与实测值相关性分析结果

名称	武汉大学挟沙力公式	黄河水流委员会挟沙力公式	内蒙古河套灌区挟沙力公式	水利水电科学研究院河渠所挟沙力公式
实测值	0.239*	0.160	0.274*	0.086
显著性	0.037	0.164	0.016	0.456
N	78	78	78	78

注 *表示在0.05水平(双向)上显著相关。

综上所述,武汉大学挟沙力公式和内蒙古河套灌区挟沙力公式与实测值之间的相关性较强,尊村引黄灌区干渠的挟沙力计算可以参考这2个公式的计算结果。将每一测点计算得到的平均沉速、水力半径和流速等带入公式计算挟沙力大小,并将同一测点的实测值和计算值作为自变量和因变量绘于同一坐标轴下,拟合得到关系曲线,2个公式的计算结果分别与实测值比较,对比结果见图4和图5所示。

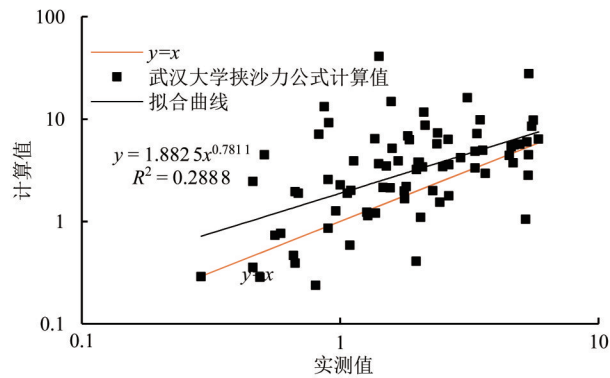


图4 武汉大学挟沙力公式计算值与实测值的关系

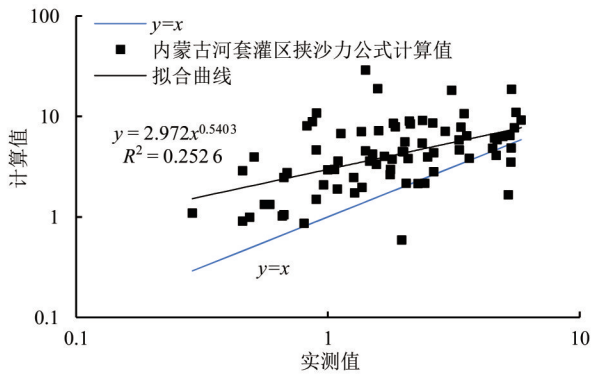


图5 内蒙古河套灌区挟沙力公式计算值与实测值的关系

对图4和图5可知,武汉大学挟沙力公式的结果更靠近实测结果。因此,尊村引黄灌区一、二干渠的挟沙力选定武汉大学挟沙力公式来计算。计算挟沙力多大于实测含沙量,为了使公式的计算结果与实测值的偏差进一步缩小,需对公式进行调整。

令:

$$S = y = 1.07 \frac{U^{2.25}}{R^{0.74} \omega^{0.77}} \quad (8)$$

联立:

$$y = 1.882x^{0.781} \quad (9)$$

得:

$$x = 0.569 \frac{U^{2.9}}{R^{0.9} \omega} \quad (10)$$

最终确定尊村引黄灌区干渠挟沙力计算式为:

$$S = 0.57 \frac{U^{2.9}}{R^{0.9} \omega} \quad (11)$$

式中: S 为挟沙力(kg/m^3); U 为流速(m/s); R 为水力半径(m); ω 为泥沙沉速(cm/s)。

2.4 灌渠减淤措施

尊村引黄灌区干渠现存在2种断面形式的渠道,一种是清淤改造后的U形横断面新渠,另一种是梯形横断面且淤积严重老渠。老渠经长期淤积,不论是横断面、纵坡、糙率等都不利于泥沙的长距离输送,导致淤积越来越严重。近期,尊村引黄灌区一干渠将全部按新渠的形式进行改造,就一干新渠的过水输沙能力为例,计算分析相应减淤措施。一干新渠在原有T形渠的基础上进行了改造,减小底宽和边坡系数,增加渠高,其水力要素见表5。

表5 新渠设计水力要素

底宽/m	弧脚半径/m	渠高/m	边坡系数	渠口宽/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/m	流速/m	纵坡	糙率
3.0	3.0	4.4	1.25	16.1	46.5	2.97	1.8	1/3 000	0.015

渠道横断面直接影响渠道过流能力,进而影响渠道输沙能力。渠道横断面的一个重要因素是边坡系数。尊村引黄灌区一干新渠底宽为3 m,远小于15 m,属于小底宽断面,边坡系数设置在1.0~1.5时,渠道挟沙力接近最大值^[10]。新渠横断面边坡系数为1.25,利于输沙。渠道的纵坡较缓是造成渠道流速较低、泥沙淤积的主要因素。林超然^[25]推求渠道冲淤平衡比降计算式为:

$$J=0.239\frac{n^2\omega^{0.73}\rho^{1.1}}{Q^{0.1}}。 \quad (12)$$

式中: J 为水面比降; n 为渠道糙率; ω 为泥沙平均沉速(cm/s); ρ 为挟沙能力(kg/m³); Q 为断面流量(m/s)。

然而公式建立的参考数据来自特定区域,并不符合尊村灌区渠道的水沙迁移规律,根据其推导方法,推导尊村渠道冲淤平衡纵坡。根据一千新渠段实测数据进行线性回归拟合渠道断面形态关系 $B=aQ^b$ 。拟合曲线见图6。拟合得到关系式为:

$$B=6.832Q^{0.167}。 \quad (13)$$

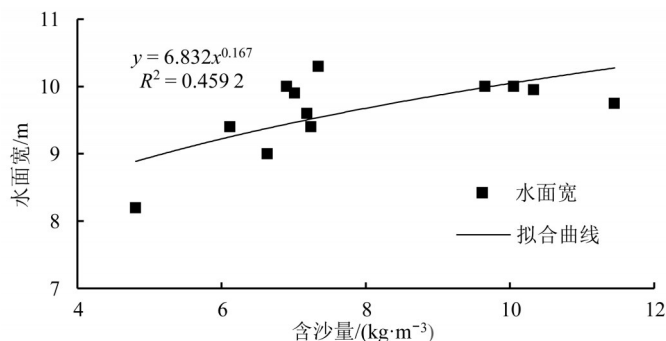


图6 新渠河宽与流量关系

联立水动力方程($U=\frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}J^{\frac{1}{2}}$)与挟沙力方程(11),求得冲淤平衡坡降公式为:

$$J=\frac{n^2s^{0.69}\omega^{0.69}}{0.68R^{0.71}}。 \quad (14)$$

新建渠道断面仅底部两侧存在小段圆弧,可以简化为梯形渠道,则:

$$R=\frac{A}{\chi}=\frac{A}{2h\sqrt{1+m^2}+B-2mh}。 \quad (15)$$

取边坡系数 $m=1$,则:

$$R=\frac{A}{B}=\frac{Q}{UB}。 \quad (16)$$

将式(13)带入式(16),得:

$$R=\frac{Q}{6.832Q^{0.167}U}=\frac{Q^{0.833}}{6.832U}。 \quad (17)$$

将式(17)带入水动力方程:

$$U=\frac{J^{0.3}Q^{0.33}}{2.16n^{0.6}}。 \quad (18)$$

将式(17)、式(18)带入式(13),得:

$$J=6.156\frac{n^2S^{0.88}\omega^{0.88}}{Q^{0.452}}, \quad (19)$$

式中: A 为过水断面面积(m²); n 为渠道糙率; R 为水力半径(m); ρ 为挟沙能力(kg/m³); J 为水面比降; ω 为泥沙平均沉速(cm/s); B 为渠道水面宽(m); h 为断面设计水深(m); b 为断面设计底宽(m); m 为边坡系数。

式(19)即为一千渠冲淤平衡比降计算公式。

根据该公式计算得到,当在实际流量46 m³/s时, $J=0.0004$ 。而干渠纵坡设计为1/3000,设计值略小于计算值,因此,一千渠剩余未改造部分,在条件允许的情况下,建议增大比降。泥沙沉速取0.44 cm/s,进一步计算渠道不同流量下流速、水深及挟沙力,计算结果见表6。

按照《灌溉与排水工程设计规范》(GB50288—99)^[26]的规定,续灌渠道的最小流量应不低于设计

表6 渠道不同流量下流速、水深及挟沙力

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)	水深/m	挟沙力/(kg·m ⁻³)
6.0	1.0	1.02	1.86
8.1	1.1	1.20	2.14
10.8	1.2	1.40	2.43
14.2	1.3	1.61	2.73
18.6	1.4	1.85	3.04
23.6	1.5	2.10	3.37
29.8	1.6	2.37	3.70
37.3	1.7	2.66	4.04
46.5	1.8	2.97	4.39

流量 40%, 而最小水深不应低于设计水深 70%。设计流量的 40% 为 $18.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计水深的 70% 为 2.08 m。渠道在流量为 $18.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时对应的水深为 1.85 m, 相比规范规定的数值小。由表 6 可知, 在 $8.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量下, 渠道的挟沙力为 $2.14 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。这印证上文中的结论, 渠道来水含沙量在 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下时, 一级站来水量需要在 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上, 才能减少淤积, 实现冲淤平衡。

3 讨论

渠首沉沙能有效地减少来沙入渠, 从而减少渠道淤积。魏杨等^[14]研究发现尊村一干渠首的沉沙池和部分改造段对泥沙的防治起到了良好的效果, 且渠道平均含沙量较历史多年平均含沙量低, 渠道含沙量变化无明显规律, 对个断面泥沙级配研究发现, 细沙含沙量变化不明显, 粗沙含沙量沿程递减。文中研究发现, 2018 年夏灌期含沙量较 20 世纪 90 年代大幅减小, 同时渠首沉沙池沉沙效果良好, 能有效减小来水含沙量, 特别是砂粒量, 悬移质泥沙中绝大部分为粉粒, 各类泥沙所占的比例与来水量的大小及含沙量没有明显的关系。本研究结果与上述研究结果一致。在本试验研究中, 监测渠道距离选取较长, 断面数目多, 还发现在渠道的冲、淤过程中, 砂粒表现最为敏感, 产生淤积的泥沙主要来源于砂粒及粉粒, 而粒径微小的黏粒更多的被水流带走, 含沙量在 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 内时, 一级站来水量要在 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右, 渠道基本实现冲淤平衡, 同时, 未改造段渠道在条件允许的情况下, 建议增大比降。

灌区泥沙输移特征与各个时期不同的水文泥沙径流条件有很大关系, 本文仅以尊村夏灌期泥沙的原型观测为依据分析总结出了灌渠泥沙输移规律, 具有一定的局限性, 研究中对支渠和斗渠沿程泥沙变化方面可以进一步研究, 今后将继续开展不同灌期和不同水文径流条件下有针对性、系统的观测实验, 并对试用于灌区挟沙力公式进一步调整, 对不同冲淤状态下断面不同深度泥沙粒径级配变化等内容进行大量研究, 为引黄灌区渠系泥沙淤积问题的处理提供有益依据。

4 结论

1) 渠首沉沙池沉沙效果良好, 能有效减小来水含沙量, 特别是砂粒量。二干渠渠首受冲刷比较严重, 二干渠末清淤修缮段依旧存在泥沙淤积问题, 应考虑采取相应的工程措施, 减少二干渠渠首的冲刷及末端的淤积问题。

2) 尊村引黄 2018 年夏灌期渠道中含沙量较 20 世纪 90 年代大幅减小, 总干渠悬移质含沙量随来水含沙量的增加而增加, 其中砂粒对来水含沙量的变化表现的更为敏感, 且渠道由非平衡输沙经冲刷、淤积达到冲淤平衡输沙的过程比较缓慢。含沙量在 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 内时, 一级站来水量要在 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右, 渠道基本实现冲淤平衡。

3) 悬移质泥沙中绝大部分为粉粒, 各类泥沙所占的比例与来水量的大小及含沙量没有明显的关系。渠道悬移质含沙量与粉粒和黏粒的多少有关。在渠道的冲、淤过程中, 砂粒表现最为敏感, 产生淤积的泥沙主要来源于砂粒及粉粒, 而粒径微小的黏粒更多的被水流带走。为了减少渠道淤积, 一干渠剩余未改造部分, 在条件允许的情况下, 建议增大比降。

参考文献:

- [1] 张广建, 杨明, 张虹龙, 等. 黄河下游引黄灌区发展历程与面临的新问题[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(1):4-5, 9.
- [2] 钱宁. 灌溉渠首的防沙措施[J]. 黄河建设, 1957(10):25-31.
- [3] 沙玉清. 冲淤平衡稳定渠道设计法[J]. 水利学报, 1959(4):23-42, 83.
- [4] 张庭英. 灌溉渠道不冲不淤坡度的计算方法[J]. 武汉水利电力学院学报, 1964(2):38-41, 98.
- [5] 胡健, 王景元, 戴清, 等. 小开河灌区渠道的输水输沙特性[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3):41-45.
- [6] 毛继新, 曹文洪. 引黄灌区泥沙远距离输送研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3):23-26.
- [7] 王延贵, 史红玲. 引黄灌区不同灌溉方式的引水分沙特性及对渠道冲淤的影响[J]. 泥沙研究, 2011(3):37-43.
- [8] 王延贵, 匡尚富, 李希霞. 引黄灌区不同类型渠道冲淤特性分析[J]. 人民黄河, 2002, 24(1):28-29, 32.
- [9] 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.
- [10] 王延贵, 李希霞, 王冰伟. 典型引黄灌区泥沙运动及泥沙淤积成因[J]. 水利学报, 1997(7):14-19, 37.
- [11] 王延贵, 李希霞. 典型引黄灌区水沙分布及其特点[J]. 泥沙研究, 1997(2):42-46.
- [12] 高红艳, 魏占民. 澄口扬水灌区输水干渠来沙特性解析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7):99-105.
- [13] 王婧, 韩启彪, 那巍. 山西柳林灌区引黄水的泥沙特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2):140-143.
- [14] 魏杨, 欧阳前超, 周霞, 等. 尊村引黄灌区渠道泥沙含量与粒径级配研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(31):205-206, 240.

- [15] 张瑞瑾. 论重力理论兼论悬移质运动过程[J]. 水利学报, 1963(3):11-23.
- [16] 李超, 于健, 李伟帅, 等. 磴口扬水灌区总干渠悬移质泥沙特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8):87-91.
- [17] 秦荣昱. 不均匀沙的起动规律[J]. 泥沙研究, 1980(1):83-91.
- [18] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J]. 科学通报, 1979(17):804-808.
- [19] 河流悬移质泥沙测验规范. GB 50159—1992[S].
- [20] 王兆印. 悬移质运动规律的分析[J]. 水利学报, 1986(7):11-20.
- [21] 河流泥沙颗粒分析规程. SL 42—2010[S].
- [22] 游波, 王保田, 赵辰洋. 激光粒度仪在土工颗粒分析中的应用研究[J]. 人民长江, 2012, 43(24):50-54.
- [23] 蒋如琴, 曹文洪. 引黄灌区泥沙研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [24] 王士强, 陈骥, 惠遇甲. 明槽水流的非均匀沙挟沙力研究[J]. 水利学报, 1998(1):2-10, 18.
- [25] 林超然, 潘庄引黄灌区设计中泥沙处理的几个问题[J]. 人民黄河, 1981(6):41-44.
- [26] 灌溉与排水工程设计规范. GB 50288—1999[S].

Experimental Study on Sediment Transport Characteristics and Channel Sediment Carrying Capacity Model of Yellow River Irrigation Canal

ZHAO Zhihua¹, WU Wengyong^{2*}, WANG Jiasheng³, ZHAO Yongan⁴

(1. Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. The China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Zhongshan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Consulting Co. LTD, Zhongshan 528403, China; 4. Yuncheng Zun Village Yellow River Irrigation Administration, Yuncheng 044099, China)

Abstract: **【Objective】**The characteristics of sediment transport and the variation of sediment gradation along the way can be explored, the way to reduce the sediment deposition of the channel can be found, and the normal operation of the irrigation area can be guaranteed. **【Method】**Based on the real-time monitoring and sampling of high sediment concentration flow in typical main canal of Zun Village irrigation district, the variation and gradation characteristics of suspended sediment along the process were analyzed, and four typical sediment carrying capacity formulas are brought into with regards to the measured data, and the formula of sediment carrying capacity suitable for Zun Village irrigation area was selected, which further formulated the calculation formula of channel sediment carrying capacity in Zun Village irrigation area. At the same time, based on the measured data of the reconstruction section of a main canal, the formula for calculating the balance gradient of scouring and silting in a main canal was derived. **【Result】**The sediment transport characteristics of different particle sizes were different. The sediment concentration of suspended matter in the main canal increases with the increase of incoming water sediment content, and the channel siltation was mainly related to the content of silt and sand particles, in which sand particles were the most sensitive to the change of sediment concentration in incoming water, and more clay particles were taken away by water flow. The channel was scoured by non-equilibrium sediment transport, therefore, the process of silting to scouring and silting equilibrium sediment transport was relatively slow. Meanwhile, the sedimentation tank could effectively reduce the sand content in the diversion water. There was still the problem of sediment deposition in the end clearance and repair section of the second main canal, that was, the remaining unmodified part of main canal. If the conditions permit, it was suggested to increase the gradient. **【Conclusion】**When the sediment concentration is within 2 kg/m^3 , the incoming water quantity of the first grade station is about $8 \text{ m}^3/\text{s}$, and the channel basically realizes the balance of scouring and silting.

Key words: canals; suspended load; particle grading; countermeasures against siltation; sediment-carrying capacity

责任编辑: 陆红飞