

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.02.012

# 浑水灌区过渡段引水明渠恢复饱和系数 沿程变化规律的分析研究

付强<sup>1,2</sup>, 张耀哲<sup>1,2</sup>, 王文娥<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 针对浑水灌区渠首沉沙池前过渡段引水明渠存在的泥沙淤积问题, 开展了泵站过渡段引水明渠水流泥沙运动特征的分析研究, 给出了该区段非均匀沙各分组粒径级泥沙恢复饱和系数的量化确定方法, 分析讨论了多种工况组合时, 该区段非均匀沙各粒径级恢复饱和系数的变化特征, 为过渡段泥沙输移的精准量化分析提供了依据, 为过渡段渠道基于不淤设计的相关水力几何约束条件分析比选提供了方法和途径。

**关键词:** 浑水灌区; 过渡段引水渠; 恢复饱和系数

中图分类号: S274.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0081-07

## Analysis on Variation Law of Recovery Saturation Coefficient of Diversion Open-Channel in Transition Section of Muddy Water Irrigation Area

FU Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yaozhe<sup>1,2</sup>, WANG Wen'e<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering Ministry of Education,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Water Conservancy and Construction Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Focusing on the problem of sediment deposition in the transitional open channel in the front of desilting basin in muddy water irrigation area, the analysis and research on the characteristics of sediment movement in the transitional open channel of pumping station are carried out, and the quantitative determination method of the saturation recovery coefficient of non-uniform sediment in each particle size class in this section is proposed. The variation characteristics of the recovery saturation coefficient of the section under various working conditions are also analyzed and discussed. This work can provide a basis for the accurate quantitative analysis of sediment transport in the transition section which is also very helpful for analysis and comparison of relevant hydraulic geometric constraints based on non-silting design in the transition section.

**Keywords:** muddy water irrigation area; transition section diversion canal; recovery saturation coefficient

河道水源含沙浑水体经由抽水泵站进入渠系后, 先通过过渡段引水明渠进入渠首沉沙池, 沉排处理部分有害粗颗粒泥沙后再将浑水向下一级渠系单元输送。泵站出水口至渠首沉沙池进口之间的过渡段, 明渠流速沿程递减呈现非均匀流特点, 直到沉沙

池进口附近趋于稳定。一般情况下受泵站出流水动力条件的影响, 引渠过渡段水流挟沙力大于浑水体含沙量, 挟沙水流处于次饱和和非平衡态, 但是在现实中, 渠首沉沙池之前的引渠过渡段泥沙淤积现象时有发生, 历史上陕西东雷抽黄灌区渠首沉沙池之前

收稿日期: 2022-10-21

修稿日期: 2022-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(52079113); 陕西水利科技计划项目(2021slkj-8)

作者简介: 付强(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学。E-mail: 1687673026@qq.com

通讯作者: 张耀哲(1963—), 男, 研究员, 主要从事工程泥沙方面的研究工作。E-mail: 531454930@qq.com

的引水干渠局部渠段一度曾被淤满,隔河相望的山西尊村灌区引渠过渡段内也有明显可见的泥沙淤积体。精准量化分析该区段水流泥沙运动特征,给出既定来水来沙条件等运行工况时该区段挟沙水流维持在次饱和和非平衡态所需要的相关水力几何约束条件,对保证浑水灌区供水安全有重要意义,也是浑水渠灌区需要迫切解决的工程泥沙问题之一。泵站引渠过渡段的非均匀沙不平衡输沙与常规的明渠均匀流条件下非均匀沙不平衡输沙,在进行量化分析计算时,主要区别在于引渠过渡段泥沙数学模型中的恢复饱和系数受到流速沿程变化的影响,本文探讨量化确定该区段恢复饱和系数的方法,并分析讨论多种工况条件下恢复饱和系数在这一区段的变化特征。

## 1 恢复饱和系数及其相关理论

以抽黄引水灌溉为代表的浑水渠灌区,进入渠系的浑水以不冲不淤的平衡态安全输移到农田末端,是灌区输配水系统水沙调节的最高目标,由于灌溉渠系水力几何条件沿程变化,沿程各类输配水节制措施的节点效应以及来自河流浑水体中泥沙颗粒级配的非均匀特性,导致灌溉渠系中运行的水流挟沙力与来流含沙量彼此不平衡,构成了浑水灌区主要的工程泥沙问题<sup>[1-4]</sup>。由沙玉清先生倡导,发端于灌溉渠系泥沙问题的明渠水沙运动基本规律,是泥沙运动力学最基础的研究内容,韩其为院士等在此传统理论上拓展建立的明渠非均匀沙不平衡输沙理论,为浑水灌区泵站过渡段引水明渠水流泥沙运动特征的量化分析提供了依据<sup>[5-6]</sup>。

恢复饱和系数是泥沙数学模型计算中的敏感参数,对计算精度构成最主要的影响,该参数的取值方法从泥沙数学模型诞生伊始的纯经验方法取值,到目前普遍采用的理论分析计算值,期间经历了大约几十年的发展变迁。非均匀沙泥沙数学模型细化了浑水体中的泥沙粒径级,为渠系泥沙更精准调控提供了依据,但同时也增加了建模难度,比如需要进一步考虑各分组粒径级的恢复饱和系数。目前研究恢复饱和系数  $\alpha$  的代表性理论成果可以分为三种:第一种  $\alpha$  是在直接建立一维泥沙连续方程时将  $\alpha$  解释为泥沙沉降概率,其值小于 1<sup>[7]</sup>;第二种  $\alpha$  是在较简化的边界条件下,直接求解立面二维扩散方程后导出<sup>[8]</sup>,由于边界条件不尽合理  $\alpha$  恒大于 1 结果无法符合实际,也有研究成果试图沿横向积分以降低其数值<sup>[9]</sup>,但这只考虑流速分布的影响,并未反应扩散及“恢复”的作用。其次有假定不平衡输沙和平衡

输沙的河底含沙量梯度相同,积分二维扩散方程后得出  $\alpha$  为底部含沙量(或挟沙能力)与垂线平均含沙量(或平均挟沙能力)的比值,其值也大于 1<sup>[10-11]</sup>;第三种是根据泥沙运动统计理论建立不平衡输沙的边界条件方程,得出不平衡输沙恢复饱和系数  $\alpha$  的理论表达式<sup>[12-13]</sup>,韩其为根据泥沙运动统计理论,提出非均匀沙统计理论的分组恢复饱和系数表达式为:

$$\alpha_l = (1 - \varepsilon_{0,l})(1 - \varepsilon_{4,l})\mu_{4,l} \frac{q}{\omega_l} = (1 - \varepsilon_{0,l})(1 - \varepsilon_{4,l}) \frac{L_{0,l}}{L_{4,l}} \quad (1)$$

由式(1)可知,恢复饱和系数由悬移质的止动概率  $(1 - \varepsilon_{0,l})$ 、止悬概率  $(1 - \varepsilon_{4,l})$ 、落距  $L_{0,l}$  和单步距离  $L_{4,l}$  决定。式中  $\alpha_l$  为第  $l$  组泥沙的恢复饱和系数,  $\mu_{4,l}$  为悬移质单步距离  $L_{4,l}$  的倒数,  $q$  为单宽流量,  $\omega_l$  为泥沙沉速,  $\varepsilon_{0,l}$  为不止动概率,  $\varepsilon_{4,l}$  为悬浮概率,  $L_{0,l}$  为悬移质落距,其中各量计算公式为:

$$\varepsilon_{0,l} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{V_{b,k,l}}{2u^*}}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{4,l} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\omega_l}{u^*}}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3)$$

$$L_{0,l} = \frac{q}{\omega_l} \quad (4)$$

式中:  $V_{b,k,l}$  为  $L$  粒径组泥沙的止动流速, m/s;  $u^*$  为摩阻流速, m/s;  $L_{4,l}$  为悬移质单步距离, 是颗粒上升和下降的纵向距离之和。

$$L_{4,l} = q(h_l) \left( \frac{1}{U_{y,u,l}} + \frac{1}{U_{y,d,l}} \right) \quad (5)$$

式中:  $U_{y,u,l}$  为悬移质颗粒上升的平均速度, m/s;  $U_{y,d,l}$  为悬移质颗粒下降的平均速度, m/s。且:

$$U_{y,u,l} = \frac{u^*}{\sqrt{2\pi\varepsilon_{4,l}}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_l}{u^*}\right)^2} - \omega_l \quad (6)$$

$$U_{y,d,l} = \frac{u^*}{\sqrt{2\pi(1 - \varepsilon_{4,l})}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_l}{u^*}\right)^2} + \omega_l \quad (7)$$

$q(h_l)$  为自河底至悬移质平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量:

$$\eta_l = \frac{h_l}{H} = 2 \left( \frac{\kappa u^*}{6c\omega_l} + \frac{1}{1 - e^{\kappa u^*}} \right) \quad (8)$$

$$q(h_l) = \int_0^{h_l} V(y) dy \quad (9)$$

式中:  $\eta_l$  为相对悬浮高, m;  $H$  为水深, m;  $c$  为非饱和调整系数, 近似反映不平衡输沙时含沙量分布的变化, 次饱和冲刷时, 含沙量梯度增  $c > 1$ ; 超饱和淤积时, 含沙量梯度减小  $c < 1$ ; 饱和时  $c = 1$ 。

而对于悬移质平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$ , 韩其为通过引入卡曼-普兰特对数流速分布公式, 并且根据平原河流垂线平均流速和水面流速的关系为:  $\bar{V} = 0.85V_m$ , 代入(10)中, 得到  $\frac{u^*}{\kappa\bar{V}} = 0.176$ :

$$V(y) = V(\eta) = V_m + \frac{u^*}{\kappa} \ln \eta = \bar{V} + \frac{u^*}{\kappa} (1 + \ln \eta) \quad (10)$$

式中:  $V_m$  为水面流速, m/s;  $\bar{V}$  为垂线平均流速, m/s;  $u^*$  为摩阻流速, m/s;  $\kappa$  为卡门常数, 可取为 0.4;  $\eta$  为相对水深  $y/H$ 。

最终得到悬移质平均悬浮高  $h_l$  的相对单宽流量为相对悬浮高  $\eta_l$  的函数:

$$\frac{q(h_l)}{q} = (\eta_l + 0.176\eta_l \ln \eta_l) = f(\eta_l) \quad (11)$$

但是对于同一流线上的各个质点速度不相等, 且沿程各断面上流速分布不相同的灌溉引水过渡段明渠中的非均匀流而言, 采用上式计算悬移质平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$  存在不合理之处。

## 2 泵站过渡段引水明渠水流泥沙运动特征分析计算模型

### 2.1 分析计算基本流程

过渡段引水明渠位于浑水渠灌区泥沙处理的第一道防线(取水头部引水防沙措施)和第二道防线(渠首沉沙池)之间, 具体区位如图 1 概化所示。欲量化分析描述该区段水流泥沙特征, 需要首先确定过渡段进口的水流条件, 然后对该过渡段水流要素沿程变化情况进行量化分析, 基于恢复饱和系数现有相关理论, 量化分析并确定过渡段恢复饱和系数的沿程变化特征, 在此基础上应用明渠非均匀沙非平衡输沙相关理论构建计算模型, 可得到过渡段水流和泥沙运动特征的量化描述, 进而为过渡段泥沙不淤设计提供约束条件。图 2 为过渡段引水明渠水流泥沙运动特征分析计算流程示意图。

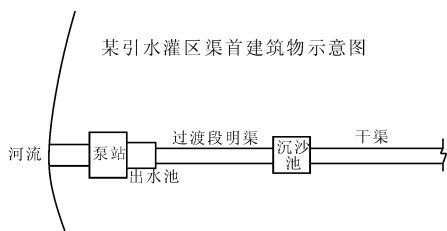


图 1 浑水灌区泵站过渡段引水明渠区位示意图

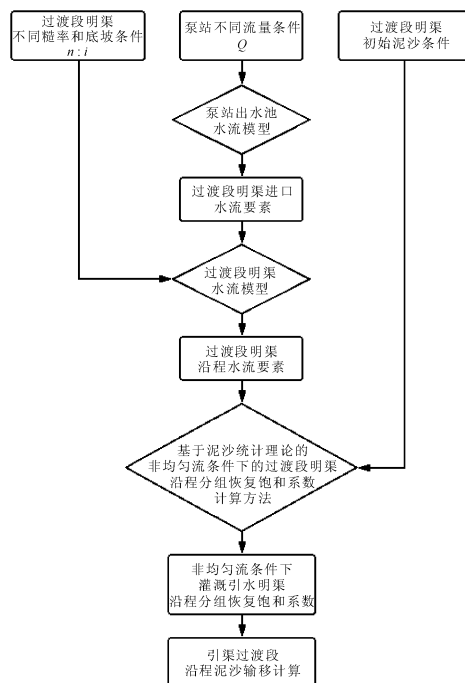


图 2 过渡段引水明渠水流泥沙运动特征分析计算流程图

### 2.2 过渡段进口水流条件分析确定方法

过渡段首部与泵站出水池相接, 为确定过渡段进口水流条件, 本应通过建立泵站出水渠道和出水池的三维水流模型, 但是本文的重点是研究沉沙池前过渡段渠道沿程水流泥沙运动特性变化规律, 为了减少不必要的工作量, 本文假设泵站出水渠道效果最佳, 进入出水池的水流流速认为等同于出水渠道出口断面平均流速, 即  $\bar{V} = Q/A$ , 并以该流速为出水池进口流速条件使用 Fluent-3D 建立泵站出水池的三维水流模型, 得到泵站不同流量工况下过渡段渠道进口处的水流条件(主要是水深和流速垂线分布)。

### 2.3 过渡段水流要素沿程变化特征的量化分析方法

根据明渠非均匀沙非平衡泥沙数学模型的相关理论, 采用水沙非耦合方法分析不同粒径组泥沙的运动特征, 需要先量化分析得到过渡段沿程水流要素变化的分析结果, 通过前述进口段的模拟分析结果, 可以得到不同工况时过渡段进口断面中轴线处的水流条件, 再以该条件为初始水流条件使用 Fluent-2D 建立过渡段渠道的立面二维水流模型进行求解计算。其中, 模型设置 1 个速度入口边界条件、1 个自由出流边界条件和无滑移固体边壁边界条件, 空气接触面使用对称面处理。其中入口处速度值使用 3.1 的模拟结果, 选取合适的流速垂线分布

公式,再通过 Fluent 软件的自定义函数(UDF)进行编译输入。最后通过模型计算可以得出不同工况下的过渡段明渠内水流运动特征。

#### 2.4 过渡段恢复饱和系数沿程变化特征的量化分析方法

根据韩其为的泥沙运动统计理论,非均匀沙统计理论的分组恢复饱和系数表达式(1)可知,恢复饱和系数由悬移质的止动概率( $1 - \varepsilon_{0,l}$ )、止悬概率( $1 - \varepsilon_{4,l}$ )、落距  $L_{0,l}$  和单步距离  $L_{4,l}$  决定,各变量计算公式为式(2)~式(8),其中摩阻流速  $u^* = \frac{n\bar{v}\sqrt{g}}{R^{1/6}}$ , m/s, 止动流速  $V_{b,k,l} = 0.916 \sqrt{53.9d_l}$ , m/s, 可通过过渡段水流要素沿程变化特征的量化分析的模拟结果直接进行计算。泥沙沉速可根据泥沙粒径的范围分别使用斯托克斯沉速公式和沙玉清的过渡区沉速公式进行计算,当粒径不大于 0.062 mm 时,采用斯托克斯沉速公式:

$$\omega = \frac{g}{1800} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{D^2}{\nu} \quad (12)$$

式中: $\omega$  为沉降速度, cm/s;  $D$  为颗粒粒径, mm;  $\rho_s$  为泥沙密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_w$  为清水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, cm/s<sup>2</sup>;  $\nu$  为水的运动黏滞系数, cm<sup>2</sup>/s。

当粒径在 0.062 mm ~ 2.000 mm 范围时,用沙玉清的过渡区沉速公式求解:

$$(\lg S_a + 3.665)^2 + (\lg \varphi - 5.777)^2 = 39.00 \quad (13a)$$

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{1/3} \nu^{1/3}} \quad (13b)$$

$$\varphi = \frac{g^{1/3} \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{1/3} D}{10\nu^{2/3}} \quad (13c)$$

式中: $\omega$  为沉降速度, cm/s;  $D$  为颗粒粒径, mm;  $\rho_s$  为泥沙密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_w$  为清水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, cm/s<sup>2</sup>;  $\nu$  为水的运动黏滞系数, cm<sup>2</sup>/s;  $S_a$  和  $\varphi$  为泥沙判数。

对于悬移质平均悬浮高  $h_l$  单宽流量  $q(h_l)$ , 为自河底至平均悬浮高的垂线流速分布的积分式(9),而对于过渡段渠道内的流速垂线分布  $V(y)$ , 直接采用对数流速分布公式或者抛物线流速分布都无法准确反映非均匀流条件下过渡段明渠内的流速分布沿程变化情况<sup>[14]</sup>。因此本文将根据 2.2 节量化分析过渡段明渠水流运动特征沿程变化的结果,提取沿程的垂线流速数据,并使用 Origin 软件离散化

求解  $V(y)$  分布曲线的积分,从而得到悬移质平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$ ,进而计算出过渡段明渠内沿程分组粒径的恢复饱和系数。

### 3 引渠段恢复饱和系数沿程变化规律的分析研究

#### 3.1 主要分析计算结果

根据某抽黄引水灌区实际资料,建立泵站出水池三维水流模型,得到了泵站不同运行工况(4组引水流量泵站流量分别为  $Q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 24 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_3 = 36 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_4 = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 下出水池出口处的水流条件,再概化一条长 100 m 的梯形断面过渡段引渠,引渠顺直连接泵站出水池和沉沙池进口,其中渠道深度 6 m,底宽 6 m,边坡系数 1.5,同时考虑了三组渠道比降(1/4000, 1/5000, 1/6000) 和三组渠道糙率(0.014, 0.015, 0.016) 进行控制变量。

采用 Fluent-2D 软件建立引水过渡段引渠中轴线立面二维水流模型。模型设置一个速度入口边界条件、一个自由出流边界条件、无滑移固体壁边界条件,空气接触面使用对称面处理。其中入口处速度值使用泵站出水池三维水流模型的模拟结果,选取合适的流速垂线分布公式,再通过 Fluent 软件的自定义函数(UDF)进行编译输入。其中过渡段渠道入口处流速分布公式根据前人已有成果<sup>[15]</sup>并结合泵站出水池水流模拟结果,采用对数律和尾流律的线性组合公式:

$$\frac{V(y)}{u^*} = 5.02 \lg \left( \frac{u^* y}{\nu} \right) + 1.64 \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{H} \right) - 8.4 \quad (14)$$

速度入口速度值选用设置的自定义函数,湍流强度设置为 2.63%,水力半径为 1.286 m;壁面设置粗糙高度  $K_s$  分别为 0.00113, 0.00210, 0.00365(分别对应糙率  $n = 0.014, 0.015, 0.016$ ) 粗糙度常数  $C_s = 0.5$ 。其中糙率和粗糙高度的换算使用爱因斯坦水流流速分布公式计算:

$$\frac{R^{1/6}}{ng^{1/2}} = \frac{V}{u^*} = 5.75 \lg \frac{12.27R\chi}{K_s} \quad (15)$$

式中: $R$  为水力半径;  $n$  为渠道糙率;  $V$  为断面平均流速;  $\chi$  为流态校正系数,一般情况下可取为 1.0。模型使用稳态求解,VOF 方法处理自由水面,迭代次数设置为 2500。进行了如表 1 所示共 8 种不同组合工况的分析计算,得到了不同工况组合引渠过渡段水深和摩阻流速沿程变化分析计算结果(略)。

表 1 引渠过渡段恢复饱和系数分析计算工况组合

工况编号	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	底坡	糙率
1	12	1/4000	0.015
2	24	1/4000	0.015
3	36	1/4000	0.015
4	48	1/4000	0.015
5	24	1/5000	0.015
6	24	1/6000	0.015
7	24	1/4000	0.014
8	24	1/4000	0.016

通过后处理软件(CFD-post)得到过渡段渠道内沿程水深变化和沿程垂线流速数据,再根据提取出的沿程流速垂线分布数据,使用 Origin 软件离散化求解流速分布  $V(y)$  曲线的积分,从而得到悬移质平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$ ,然后再根据其余相关量计算式(2)一式(8)分别计算悬移质的止动概率、止悬概率、落距和单步距离。进而计算出 8 组工况各泥沙分组粒径对应的沿程分组粒径恢复饱和系数,图 3 和图 4 所示为其中两组工况各泥沙分组粒径恢复饱和系数沿程变化情况。

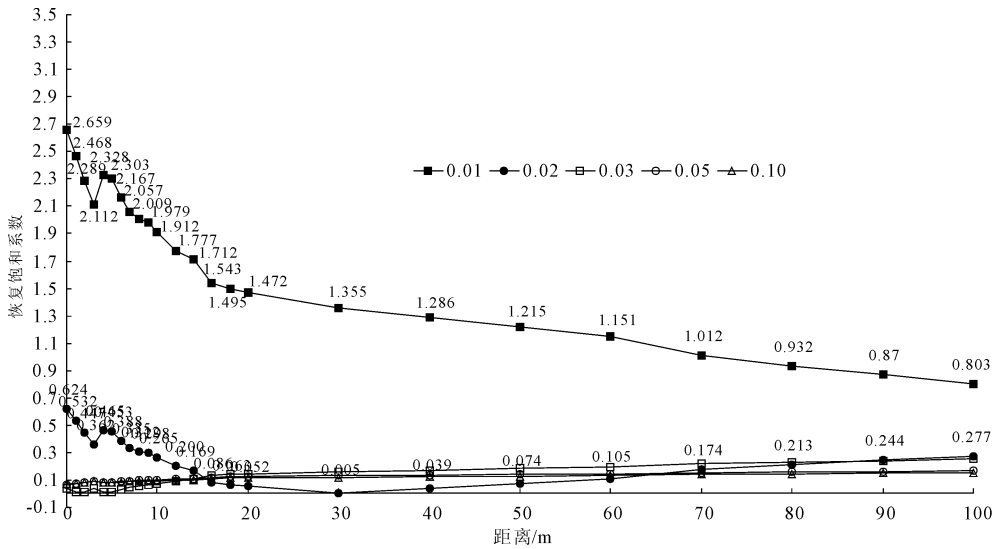


图 3 工况 1 引渠过渡段分组粒径恢复饱和系数沿程变化图

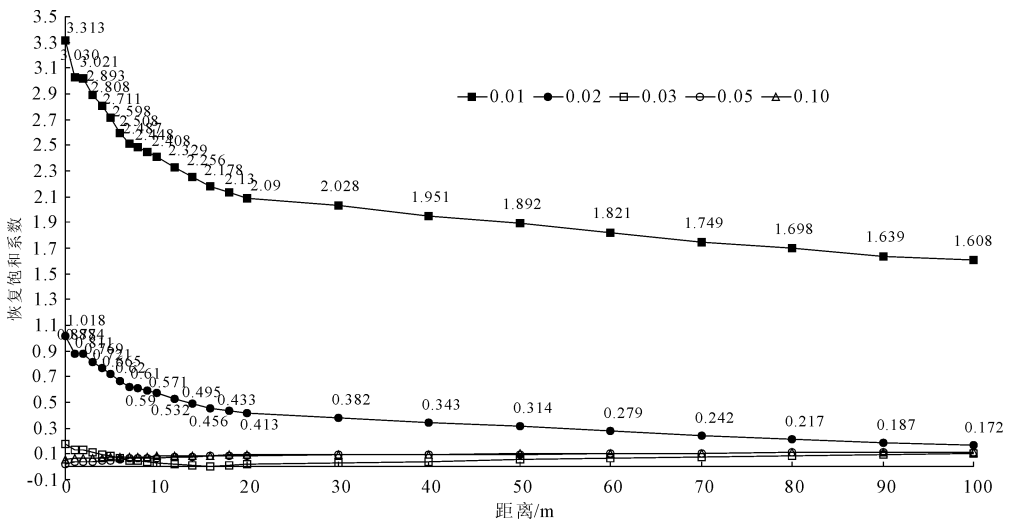


图 4 工况 8 引渠过渡段分组粒径恢复饱和系数沿程变化图

### 3.2 分析与讨论

通过不同组合工况引渠过渡段各分组粒径恢复饱和系数的分析,初步得到以下几点认识:

(1) 过渡段引水渠道各水力几何条件维持不变

的情况下,随着泵站引水流量增大,过渡段明渠内同一断面上各粒径组恢复饱和系数均增大。这是由于当流量  $Q$  增大时,摩阻流速  $u^*$ 、单宽流量  $q$  均增大,而不止动概率  $\varepsilon_{0,l}$  和悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  为满足正态分布

的曲线积分,  $(\frac{V_{b,k,l}}{2u^*} - 2.7)$  和  $(\frac{\omega_l}{u^*})$  分别是它们的积分下限, 当泥沙粒径一定时, 两者仅与摩阻流速  $u^*$  相关, 而不同流量工况时, 沿程摩阻流速  $u^*$  的计算值范围在  $0.038 \text{ m/s} \sim 0.081 \text{ m/s}$  之间变化, 不同泥沙粒径的止动流速  $V_{b,k,l}$  在  $0.021 \text{ m/s} \sim 0.067 \text{ m/s}$  之间变化, 泥沙沉速  $\omega_l$  在  $0.001 \text{ m/s} \sim 0.008 \text{ m/s}$  之间变化, 此时不同流量工况下、相同粒径沿程不止动概率  $\varepsilon_{0,l}$  和悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  变化很小, 故悬移质单步距离  $L_{4,l}$  变化也很小, 恢复饱和系数取值主要由悬移质落距  $L_{0,l}$  决定 ( $\alpha_l$  与  $L_{0,l}$  成正比), 而  $L_{0,l}$  和单宽流量  $q$  成正比, 故流量  $Q$  增大时, 单宽流量  $q$  增大, 则过渡段明渠内同一断面上各粒径组恢复饱和系数均增大。

(2) 相同流量和相同渠道糙率的工况时, 底坡减缓, 过渡段明渠内同一断面上小粒径泥沙恢复饱和系数减小, 大粒径泥沙恢复饱和系数增大。这是由于流量  $Q$  不变时, 底坡减小时, 同一断面平均流速减小, 水深增大, 单宽流量  $q$  减小, 则同一断面上相同粒径颗粒悬移质落距  $L_{0,l}$  减小; 而摩阻流速  $u^*$  基本不变, 对于悬移质单步距离  $L_{4,l} = q(h_l) (\frac{1}{U_{y,u,l}} + \frac{1}{U_{y,d,l}})$ , 其中  $U_{y,u,l}$  和  $U_{y,d,l}$  的取值在悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  和摩阻流速  $u^*$  变化很小时基本保持不变, 而  $q(h_l)$  随底坡减小也是减小的, 即  $L_{4,l}$  也减小; 且不止动概率  $\varepsilon_{0,l}$  和悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  变化很小; 此时同一断面各粒径泥沙恢复饱和系数主要由  $\frac{L_{0,l}}{L_{4,l}}$  的比值决定, 又因为悬移质落距  $L_{0,l} = \frac{q}{\omega_l}$ , 由于小粒径泥沙 ( $D = 0.01 \text{ mm}$ ) 沉速 ( $\omega_l = 8.95 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) 与大粒径泥沙 ( $D = 0.1 \text{ mm}$ ) 的沉速 ( $\omega_l = 7.56 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ) 相差 2 个量级, 由单宽流量  $q$  减小所造成  $L_{0,l}$  的减小程度, 小粒径泥沙远大于大粒径泥沙, 故小粒径泥沙  $\frac{L_{0,l}}{L_{4,l}}$  比值减小, 即恢复饱和系数减小; 而大粒径泥沙比值  $\frac{L_{0,l}}{L_{4,l}}$  增大, 即恢复饱和系数增大。此时同一断面各粒径组恢复饱和系数变化主要取决于悬移质单步距离  $L_{4,l}$  ( $\alpha_l$  与  $L_{4,l}$  成反比)。

(3) 相同流量和底坡工况时, 糙率增大时, 过渡段明渠内同一断面上小粒径泥沙恢复饱和系数增大, 大粒径泥沙恢复饱和系数减小。这是由于流量  $Q$  不变时, 糙率增大时, 同一断面平均流速减小, 水深

增大, 梯形渠道单宽流量  $q$  减小, 则同一断面上相同粒径颗粒悬移质落距  $L_{0,l}$  减小; 而摩阻流速  $u^*$  增大, 即  $U_{y,u,l}$  和  $U_{y,d,l}$  增大,  $(\frac{1}{U_{y,u,l}} + \frac{1}{U_{y,d,l}})$  减小, 而  $q(h_l)$  随糙率增大是减小的, 故  $L_{4,l}$  也减小; 且不止动概率  $\varepsilon_{0,l}$  和悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  变化很小; 此时同一断面各粒径泥沙恢复饱和系数主要由  $\frac{L_{0,l}}{L_{4,l}}$  的比值决定, 但是由于  $U_{y,u,l}$  和  $U_{y,d,l}$  值的范围在  $0.04 \sim 0.06$  之间变化, 且小粒径泥沙减小程度相比大粒径泥沙更多, 故小粒径组  $\frac{L_{0,l}}{L_{4,l}}$  的比值增大, 大粒径组比值减小, 则糙率增大时, 过渡段明渠内同一断面上小粒径组恢复饱和系数增大, 大粒径组恢复饱和系数减小。

(4) 同一组合工况, 过渡段明渠内沿程分组恢复饱和系数呈现“小粒径泥沙减小、大粒径泥沙增大”的趋势。这是由于流量  $Q$  不变时, 梯形渠道单宽流量  $q$  基本不变, 而摩阻流速  $u^*$  沿程减小, 而不止动概率  $\varepsilon_{0,l}$  和悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  沿程变化很小, 沿程各粒径泥沙恢复饱和系数变化主要取决于悬移质单步距离  $L_{4,l}$ , 而  $L_{4,l} = q(h_l) (\frac{1}{U_{y,u,l}} + \frac{1}{U_{y,d,l}})$ , 其中  $U_{y,u,l}$  和  $U_{y,d,l}$  的取值在悬浮概率  $\varepsilon_{4,l}$  沿程变化很小时, 主要由摩阻流速  $u^*$  决定 (与  $U_{y,u,l}$ 、 $U_{y,d,l}$  成正比), 即  $(\frac{1}{U_{y,u,l}} + \frac{1}{U_{y,d,l}})$  沿程增大; 对于  $q(h_l) = \int_0^{h_l} V(y) dy$  的取值主要由沿程流速分布  $V(y)$  决定, 由于过渡段明渠内的水流是流速逐渐衰减、水深逐渐增大、流速分布沿程变化 (沿程最大流速点高度增加) 的非均匀流, 故悬移质平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$  是沿程减小的, 但是由于小粒径泥沙平均悬浮高  $h_l$  几乎等于水深, 即  $h_l \approx H$ , 沿程流速分布  $V(y)$  最大流速点高度的增加对  $q(H) = \int_0^H V(y) dy$  的计算值影响很小, 而相对于小粒径泥沙而言, 大粒径泥沙平均悬浮高  $h_l$  远低于水深, 沿程流速分布  $V(y)$  最大流速点高度的增加对  $q(h_l)$  的计算值影响相对较大, 即小粒径泥沙平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$  沿程减小程度对悬移质单步距离  $L_{4,l}$  的影响, 相比于大粒径泥沙  $q(h_l)$  沿程减小程度对  $L_{4,l}$  的影响要小, 因此大粒径泥沙单步距离  $L_{4,l}$  又主要由平均悬浮高  $h_l$  的单宽流量  $q(h_l)$  决定, 故过渡段明渠内沿程小粒径泥沙单步距离  $L_{4,l}$  随  $(\frac{1}{U_{y,u,l}} + \frac{1}{U_{y,d,l}})$  沿程增大而

增大,即小粒径泥沙恢复饱和系数沿程减小;而大粒径泥沙单步距离 $L_{4,l}$ 随 $q(h_l)$ 沿程减小而减小,即大粒径泥沙恢复饱和系数沿程增大。

(5) 根据5、6、7、8四个工况的恢复饱和系数计算结果,采用一维非饱和泥沙沉降计算方法进行泥沙沉降计算,结果显示:四个工况下,总沉降率分别为0.85%、0.87%、0.95%、0.73%;最大粒径泥沙颗粒( $D = 1 \text{ mm}$ ) 在100 m处沉降率分别为3.10%、3.16%、3.44%和2.7%;这与(2)、(3)分析的四个工况下大粒径泥沙恢复饱和系数的变化规律也相符。

## 4 结 语

渠首沉沙池是浑水灌区泥沙处理的主要措施之一,确保从泵站出水口到沉沙池之间的过渡段引水明渠不发生累加性的泥沙淤积,是浑水灌区相关设计与日常运行管理中需要遵循的基本原则。

本文介绍了一种综合考虑泵站机组运行工况以及过渡段引水明渠坡降、断面形态渠道糙率等水力几何参数的影响,进行非均匀沙各粒径级泥沙颗粒输移特征量化分析的方法和途径,特别针对泵站过渡段引水明渠这一特定工况环境下,非均匀沙泥沙数学模型分析中的各粒径组恢复饱和系数的变化规律开展了分析研究,提出了量化分析一种特殊非均匀流中非均匀泥沙运动特征的计算方法。文中所介绍的方法和途径以及相关结论,既可以应用在渠首泵站过渡段引水明渠,也可以作为非渠首泵站以外的各级泵站尾水渠不淤设计时参考。

浑水灌区水流泥沙精准调控是一个非常复杂的工程问题,既需要可靠的理论分析为依托,也需要大量来自工程实践中原型观测数据的反馈来进一步完善相关的调控措施,这一方面的工作任重而道远。

## 参考文献:

- [1] 曹文洪,方春明,戴清. 引黄灌区水沙配置理论与关键技术研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 张芳芳,张耀哲,栗晓玲. 灌渠闭闸期间前段流场特征及泥沙淤积速率分析[J]. 农业工程学报,2016,32(2):111-118.
- [3] 江恩慧. 黄河泥沙研究重大科技进展及趋势[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):1-9.
- [4] 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.
- [5] 韩其为. 泥沙运动统计理论前沿研究成果[J]. 水利学报,2018,49(9):1040-1054.
- [6] 张耀哲. 灌区泥沙问题研究的回顾与展望[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(6):10-17.
- [7] 窦国仁. 潮汐水流中的悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报,1963(4):13-24.
- [8] 张啟舜. 明渠水流泥沙扩散过程的研究及其应用[J]. 泥沙研究,1980(1):37-52.
- [9] 周建军,林秉南. 二维悬移质泥沙数学模型 第一部分——模型理论与验证(英文)[J]. 应用基础与工程科学学报,1995(1):78-98.
- [10] 李林林,夏军强,邓珊珊,等. 长江中游荆江段非均匀悬沙恢复饱和系数[J]. 水科学进展,2021,32(5):727-737.
- [11] 李侃禹. 水库非均匀沙恢复饱和系数特性[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(9):778-781,816.
- [12] 韩其为,何明民. 恢复饱和系数初步研究[J]. 泥沙研究,1997(3):34-42.
- [13] 韩其为,陈绪坚. 恢复饱和系数的理论计算方法[J]. 泥沙研究,2008(6):8-16.
- [14] 贺方舟,朱勇辉,郭小虎,等. 水库下游悬移质泥沙沿程恢复研究进展[J]. 长江科学院院报,2017,34(12):1-6.
- [15] 尹进高,吕宏兴,栾维功,等. 梯形渠道断面流速分布规律试验研究[J]. 人民长江,2008(12):67-69.