

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.03.005

# 基于泥沙悬浮高度假设的恢复饱和系数研究

杨永杰,张根广,许晓阳

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

**摘要:**针对大坝下游单向冲刷条件下次饱和挟沙水流的恢复饱和系数取值问题,基于泥沙悬浮高度假设,采用理论推导与对比验证的方法对恢复饱和系数公式进行了分析研究。分析了泥沙颗粒在挟沙水流中的动力机理和能量转换过程,推导了泥沙颗粒的单步悬浮高度和步长公式,改进了恢复饱和系数公式。采用经典的恢复饱和系数公式和黄河非均匀沙恢复饱和系数率定值,与改进的恢复饱和系数公式进行了对比分析。结果表明:改进的公式可以较好的预测恢复饱和系数,粒径0.025 mm~1.5 mm泥沙的恢复饱和系数在1.9 cm/s~100.0 cm/s的摩阻流速范围内取值在0.01~3.00之间,恢复饱和系数随摩阻流速的变化规律也随泥沙粒径的不同而不同。

**关键词:**恢复饱和系数;不平衡输沙;悬移质;非均匀沙;悬浮高度

中图分类号:TV142

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2023)03-0030-07

## Study on the Saturation Recovery Coefficient of Suspended Sediment Based on the Hypothesis of Suspension Height

YANG Yongjie, ZHANG Genguang, XU Xiaoyang

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the value of saturation recovery coefficient of subsaturated sediment-laden flow under the condition of unidirectional scour downstream of the dam, based on the hypothesis of suspension height of sediment particles, the formula of saturation recovery coefficient is analyzed and studied by means of theoretical derivation and comparative verification. The dynamic mechanism and energy conversion process of sediment particles in sediment-laden flow are analyzed, the formulas of single-step suspension height and step length of sediment particles are derived, and the formula of saturation recovery coefficient is improved. The classical formula of saturation recovery coefficient and the value of saturation recovery coefficient of non-uniform sand in the Yellow River are compared with the improved formula of saturation recovery coefficient. The results show that the improved formula can better predict the saturation recovery coefficient, and the saturation recovery coefficient of particle size 0.025 mm~1.5 mm sediment is between 0.01 and 3 within the friction velocity range of 1.9 cm/s~100 cm/s, and the variation law of saturation recovery coefficient of different particle size sediment is different with the friction velocity.

**Keywords:** saturation recovery coefficient; non-equilibrium sediment transport; suspended sediment; non-uniform sediment; suspension height

在不平衡输沙理论中,恢复饱和系数 $\alpha$ 反映着悬移质含沙量向饱和含沙量趋近的速率,其取值大小直接影响着河床的冲淤变化,因此,恢复饱和系数对于悬移质不平衡输沙数学模型的计算结果具有较

重要的影响。

自20世纪80年代起,国内学者从不同角度对恢复饱和系数开展了大量研究。在理论研究方面,学者大都采用挟沙水流连续性方程和河床变形方程,通

收稿日期:2023-01-10

修稿日期:2023-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51879227)

作者简介:杨永杰(1997—),男(苗族),硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: y\_yongjie@163.com

通讯作者:张根广(1964—),男,博士,研究员,主要从事水工水力学研究与教学工作。E-mail: zgg64@163.com

过数学推导得到悬移质恢复饱和系数的理论公式。周建军等<sup>[1]</sup>对水流连续方程沿水深方向进行积分,得到了主要考虑流速分布影响下的恢复饱和系数计算公式。刘金梅等<sup>[2-3]</sup>将床沙粗化过程与悬移质扩散过程相结合,得到不平衡输沙计算方程的数值解,并由此反推出恢复饱和系数,分析了不同冲淤情况下恢复饱和系数的计算公式和变化规律,研究主要考虑了床沙补给条件对悬移质含沙量恢复饱和过程的影响。韩其为等<sup>[4]</sup>根据泥沙交换统计理论对二维不平衡输沙的边界条件作了深入研究,建立了悬移质恢复饱和系数 $\alpha$ 的理论表达式,并建议冲刷时取1.0,淤积时取0.25;之后韩其为等<sup>[5]</sup>在此基础上结合河床变形方程提出了底部恢复饱和系数的概念;公式中通过引入不平衡调整系数 $c$ 来反映不同冲淤条件。王士强<sup>[6]</sup>假定不平衡输沙与平衡输沙时的底部含沙量与垂线平均含沙量之比相等,其比值即为恢复饱和系数,再引入不饱系数 $\beta$ 来反映冲淤情况。李林林等<sup>[7]</sup>通过引入紊流中泥沙颗粒的落淤水平距离对韩其为恢复饱和系数公式进行了改进,通过数学处理方法消去了公式中需要人为确定的不平衡调整系数。韦直林等<sup>[8]</sup>认为恢复饱和系数 $\alpha$ 应通过实测资料来率定,提出了分组泥沙恢复饱和系数与其沉速成反比的观点,并广泛应用于输沙数学模型计算中;王宏新等<sup>[9]</sup>基于统计方法和试验资料得到了恢复饱和系数与分组粒径泥沙的沉速成反比的半经验公式;此外,还有一些学者<sup>[10-13]</sup>基于特定水沙条件展开研究,得到冲刷或淤积条件下的恢复饱和系数的经验或半经验公式,并与其各自试验观测结果符合较好。然而不同学者得到的恢复饱和系数 $\alpha$ 数值差异较大,针对坝下游单向冲刷条件下恢复饱和系数的研究相对较少。

综上所述,在恢复饱和系数研究方面虽然取得了较多成果,但在恢复饱和系数的公式结构、取值大小、应用范围及颗粒悬浮机理等方面尚不统一。本文基于紊动水流支持泥沙产生一定悬浮高度的假设,分析探索次饱和和输沙过程的泥沙颗粒悬浮机理,推导泥沙颗粒在挟沙水流中的悬浮高度和步长公式,改进坝下游河道次饱和和不平衡输沙过程中的恢复饱和系数公式。

## 1 恢复饱和系数公式定义

根据韩其为等<sup>[4]</sup>的研究成果,恢复饱和系数理论表达式为:

$$\alpha = \frac{(1 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_4)}{L_4} \frac{q}{\omega} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为恢复饱和系数; $\varepsilon_0$ 为泥沙颗粒不止动概率, $(1 - \varepsilon_0)$ 为泥沙颗粒止动概率; $\varepsilon_4$ 为泥沙颗粒悬浮概率, $(1 - \varepsilon_4)$ 为泥沙颗粒止悬概率; $q$ 为水流单宽流量, $\text{cm}^2/\text{s}$ ; $\omega$ 为颗粒沉速, $\text{cm}/\text{s}$ ; $L_4$ 为颗粒单步悬浮步长, $\text{cm}$ ,即泥沙颗粒完成一次悬移运动后在水流方向的位移。其中, $\varepsilon_0$ 和 $\varepsilon_4$ 表征颗粒运动受水流随机作用的影响程度。

泥沙颗粒一次悬移运动可分解为泥沙颗粒自床面起悬至最高处及由最高处回落至床面的两部分,悬浮高度为 $h$ ,如图1所示。

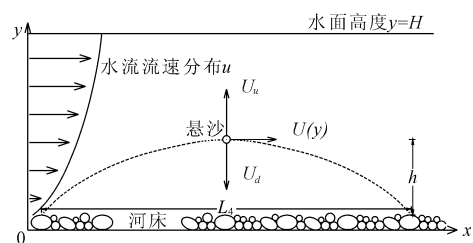


图1 泥沙颗粒悬移运动示意图

## 2 泥沙颗粒悬浮高度假设

### 2.1 沙粒悬浮能量守恒公式的建立

水流的紊动扩散作用使泥沙颗粒在各层之间相互交换,当水流对泥沙颗粒产生的悬浮作用力大于泥沙颗粒的水下重力时,泥沙颗粒将发生悬移。假设泥沙颗粒在悬浮运动过程中遵循能量守恒原理,即泥沙颗粒从紊动水流中获得湍动能使之悬浮,在悬浮过程中泥沙颗粒获得势能和动能并产生能耗。泥沙颗粒之间可能发生碰撞并引起能量损耗,悬浮颗粒自身紊动也会造成能量耗散等等,本文将以上能量损耗计入湍流能量传递系数中,以下将不单独考虑。由此可得:

$$\int_0^y \varepsilon_D \frac{\pi d^2}{4} \overline{v_y'}^2 \rho_h dy + \int_0^x C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{u_x^2}{2} \rho_h dx = m_s' gy + \frac{1}{2} m_s (U_{sy}^2 + U_{sx}^2) \quad (2)$$

式中:左边第一项为悬浮作用力沿垂直方向对泥沙颗粒做的功;左边第二项为拖曳力沿水流方向对泥沙颗粒做的功;右边第一项为泥沙颗粒在悬浮过程中获得的水下势能;第二项为泥沙颗粒在悬浮过程中获得的动能。其中, $\varepsilon_D$ 为湍流能量传递系数,反映了水流向泥沙颗粒传递湍动能的效率,作者分析认为 $\varepsilon_D$ 是一个关于泥沙粒径和流速的函数,

$\varepsilon_D = f(u_*, d)$ ;  $d$  为泥沙粒径, mm;  $v'_y$  为水流垂向脉动流速, cm/s;  $\rho_h$  为挟沙水流密度分布, g/cm<sup>3</sup>, 为水深  $h$  的函数;  $C_D$  为颗粒阻力系数, 根据窦国仁<sup>[17]</sup> 公式计算得到;  $u_x$  为作用在泥沙颗粒上的纵向流速, cm/s;  $m'_s$  为泥沙颗粒水下质量, g;  $g$  为重力加速度, cm/s<sup>2</sup>;  $m_s$  为泥沙颗粒质量, g;  $U_{vy}$  为泥沙颗粒垂向速度, cm/s;  $U_{sx}$  为泥沙颗粒纵向速度, cm/s。

当泥沙颗粒悬浮至最高处  $y = h$  时, 其垂向速度  $U_{vy}$  为零。此时泥沙颗粒具有的动能只与泥沙颗粒纵向速度  $U_{sx}$  相关,  $U_{sx}$  产生于纵向水流拖曳力做的功, 与垂向悬浮作用力无关, 所以式(2) 可以改为:

$$\int_0^h \varepsilon_D \frac{\pi d^2}{4} \overline{v'_y}^2 \rho_h dy = m'_s gh \quad (3)$$

式中:  $h$  为泥沙颗粒悬浮高度; 其余符号意义同上。

挟沙水流的含沙量沿垂线分布不均匀, 挟沙水流密度  $\rho_h$  与水深  $h$  的关系可表示为:

$$\rho_h = \frac{m_s + m_w}{V_m} = S + \frac{m_w}{V_m} = S + \frac{\rho V_w}{V_m} = S + \rho(1 - S_v) \quad (4)$$

式中:  $V_m$  为挟沙水体积, cm<sup>3</sup>;  $m_s$  为挟沙水体积  $V_m$  内泥沙的质量;  $m_w$  为挟沙水体积  $V_m$  内水的质量;  $S$  为含沙量, 为高度  $h$  的函数, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho$  为水的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $S_v$  为体积比含沙量。

$S$  和  $S_v$  的关系为:

$$S_v = \frac{V_s}{V_m} = \frac{m_s}{\rho_s V_m} = \frac{S}{\rho_s} \quad (5)$$

式中:  $V_s$  为挟沙水体积  $V_m$  内泥沙的体积, cm<sup>3</sup>;  $\rho_s$  为泥沙密度, g/cm<sup>3</sup>。

将式(5) 代入式(4) 得:

$$\rho_h = S \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) + \rho \quad (6)$$

$$h = \frac{\int_0^h f(d, u_*) \frac{\pi d^2}{4} \left[ 0.06 \left( u^2 \frac{du}{d\xi} \right)^{1/3} \right]^2 \left[ \kappa \left( u^2 \frac{du}{d\xi} \right)^{1/3} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) + \rho \right] dy}{m'_s g} \quad (13)$$

## 3 恢复饱和系数公式的建立

### 3.1 湍流能量传递系数

根据韩其为等<sup>[17]</sup> 研究, 泥沙颗粒的相对悬浮高度可表示为:

$$\frac{h}{H} = 2 \left( \frac{0.4u_*}{6\omega} - \frac{e^{-\frac{6\omega}{0.4u_*}}}{1 - e^{-\frac{6\omega}{0.4u_*}}} \right) \quad (14)$$

将式(14) 代入式(13), 可反求得湍流能量传递系数  $\varepsilon_D$ , 见表 1。考虑到坝下游河道冲刷过程中河床

将式(6) 代入式(3) 得到泥沙颗粒悬浮过程中的能量守恒方程:

$$\int_0^h f(d, u_*) \frac{\pi d^2}{4} \overline{v'_y}^2 \left[ S \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) + \rho \right] dy = m'_s gh \quad (7)$$

### 2.2 悬浮高度求解

根据挟沙水流湍流强度及浓度垂线分布<sup>[14-15]</sup> 研究成果:

$$\sigma_y = k_0 \left( u^2 \frac{du}{d\xi} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$S = K \left( u^2 \frac{du}{d\xi} \right)^{1/3} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_y$  为垂直方向湍流强度, cm/s;  $k_0$  为无量纲系数, 取 0.06;  $u$  为流速, 按粗糙床面流速分布计算;  $\xi$  为相对水深,  $\xi = y/H$ ,  $y$  为水流中某点流速对应的水深,  $H$  为水深, cm;  $S$  为含沙量, g/cm<sup>3</sup>;  $K$  为与泥沙颗粒粒径相关的系数, 据叶小云等<sup>[15]</sup> 的研究,  $K = 37.7d^2 - 5.35d^2 + 0.31$ 。

根据湍流强度定义:

$$\sigma_y = \sqrt{\overline{v'_y}^2} \quad (10)$$

将式(10) 代入式(8) 得:

$$\overline{v'_y}^2 = \sigma_y^2 = \left[ 0.06 \left( u^2 \frac{du}{d\xi} \right)^{1/3} \right]^2 \quad (11)$$

粗糙床面流速分布公式<sup>[16]</sup> 可表示为:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_i}{k_s} + B \quad (12)$$

式中:  $y_i$  为理论零点, 取  $y_i = 0.25d$ ;  $\kappa$  为卡门常数, 取 0.4;  $k_s$  为床面泥沙颗粒粒径;  $B$  为无量纲积分系数, 取 5.29。

将式(9)、式(11) 及式(12) 代入式(7) 得到泥沙颗粒在挟沙水流中的悬浮高度  $h$ :

发生粗化, 此时悬移质泥沙粒径相应较粗, 故本文计算设置的最大泥沙粒径为 1.5 mm。

图 2 为  $\varepsilon_D$  和  $d, u_*$  的变化关系。由图 2 可知,  $\varepsilon_D$  随  $u_*$  的增加而减小, 随  $d$  的增大而增大,  $\varepsilon_D$  与  $d$  之间的关系为线性关系, 因此,  $\varepsilon_D$  和  $u_*, d$  的关系可表示为:

$$\varepsilon_D = f(u_*) \cdot d \quad (15)$$

式中:  $d$  为泥沙颗粒粒径, mm。

表1 湍流能量传递系数  $\varepsilon_D$

$u_* / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$d/\text{cm}$											
	0.0025	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
1.92	0.02500	0.07100	0.17800	0.36300	0.53200	0.69900	—	—	—	—	—	—
6.07	0.00200	0.00700	0.02000	0.04900	0.07500	0.10000	0.12500	0.14900	0.1730	0.1980	0.2230	0.2490
12.12	0.00100	0.00200	0.00500	0.01400	0.02200	0.03000	0.03800	0.04600	0.0530	0.0610	0.0680	0.0750
27.12	0.00012	0.00037	0.00105	0.00285	0.00494	0.00710	0.00920	0.01130	0.0133	0.0152	0.0170	0.0187
50.00	0.00004	0.00011	0.00031	0.00085	0.00117	0.00150	0.00220	0.00361	0.0043	0.0049	0.0056	0.0061
100.00	0.00001	0.00003	0.00008	0.00021	0.00038	0.00055	0.00073	0.00091	0.0011	0.0012	0.0014	0.0015

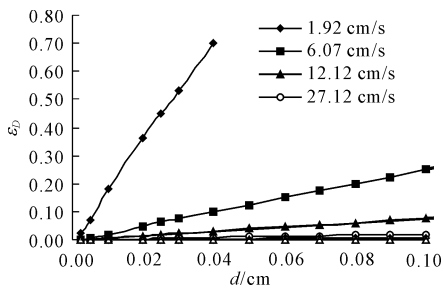


图2  $\varepsilon_D$  与  $d, u_*$  的变化关系

将  $\varepsilon_D$  和  $d$  代入式(15) 反算出  $f(u_*)$ , 见表2。

表2  $f(u_*)$  与  $u_*$  的对应关系

$u_* / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	1.92	6.07	12.12	27.12	50.00	100.00
$f(u_*)$	1.7660	0.2508	0.0738	0.0186	0.0060	0.0015

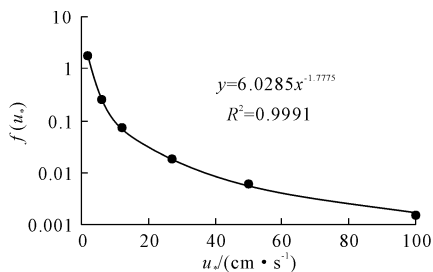


图3 系数  $f(u_*)$  与摩擦流速  $u_*$  的拟合曲线

图3为  $f(u_*)$  与  $u_*$  关系曲线,  $f(u_*)$  可表示为:

$$f(u_*) = 6.0285u_*^{-1.777} \quad (16)$$

将式(16) 代入式(15) 得到:

$$\varepsilon_D = 6.0285u_*^{-1.777}d \quad (17)$$

Baghold 曾提出悬移质运动效率系数  $e_s$  [18] 的概念,  $e_s$  为泥沙悬浮功与水流总能量之比。本文提出的  $\varepsilon_D$  与  $e_s$  在概念上类似。钱宁等 [18-19] 整理大量室内外实测资料得到  $e_s$  的取值在 0.000 04 ~ 0.200 00 之间。从表1 可以看出,  $\varepsilon_D$  的取值范围和  $e_s$  的取值范围基本一致。

### 3.2 单步悬移步长公式

泥沙颗粒在水流中悬浮和回落是水流摩阻流

速、泥沙颗粒悬浮概率及泥沙颗粒沉速的随机变量, 根据韩其为等的研究 [17], 悬浮速度和淤落速度的数学期望可分别表示为:

$$\bar{U}_{y,u} = \omega \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\varepsilon_{4,l}} \times \frac{u_*}{\omega} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_*}\right)^2} - 1 \right] \quad (18)$$

$$\bar{U}_{y,d} = \omega \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}(1 - \varepsilon_{4,l})} \times \frac{u_*}{\omega} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_*}\right)^2} + 1 \right] \quad (19)$$

式中:  $\bar{U}_{y,u}$  为泥沙颗粒平均悬浮速度, cm/s;  $\bar{U}_{y,d}$  为泥沙颗粒平均淤落速度, cm/s; 其余符号意义同上。

泥沙颗粒完成一个悬浮步长所需要的时间  $t$  为:

$$t = h \times \left( \frac{1}{\bar{U}_{y,u}} + \frac{1}{\bar{U}_{y,d}} \right) \quad (20)$$

悬移质输移速率相对于水流流速存在滞后性, 引入泥沙颗粒流速修正系数 [20]:

$$\beta_s = \int_0^H uSdy / \left( U \int_0^H Sdy \right) \quad (21)$$

式中:  $\beta_s$  为流速修正系数;  $H$  为水深, cm;  $u$  为流速分布, cm/s;  $S$  为含沙量, g/cm<sup>3</sup>;  $U$  为平均流速, cm/s。

则泥沙颗粒在其悬浮历程中沿水流方向的平均流速为:

$$U_s = \beta_s U_h = \frac{\beta_s}{h} \int_0^h udy \quad (22)$$

式中:  $U_s$  为泥沙颗粒平均流速, cm/s;  $U_h$  为泥沙颗粒悬浮高度  $h$  范围内的水流平均流速, cm/s; 其余符号同上。

则泥沙颗粒悬移步长为:

$$L_4 = t \cdot U_s = \beta_s \left( \frac{1}{\bar{U}_{y,u}} + \frac{1}{\bar{U}_{y,d}} \right) \cdot \int_0^h udy \quad (23)$$

### 3.3 恢复饱和系数公式

将式(13)、式(23) 代入式(1) 即得到恢复饱和系数  $\alpha$  的计算公式:

$$\alpha = \frac{q(1 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_4)}{u_* \omega \int_0^h \left( \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_i}{k_s} + B \right) dy \left( \frac{1}{\bar{U}_{y,u}} + \frac{1}{\bar{U}_{y,d}} \right)^{-1}} \quad (24)$$

由式(24)可知,恢复饱和系数  $\alpha$  是一个与泥沙颗粒悬浮止动概率、湍流脉动条件有关的综合系数,其值大小取决于泥沙颗粒大小和水流条件。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 颗粒单步悬浮高度及步长分析

从河流实测资料<sup>[21]</sup>分析来看,黄河中下游的水流摩阻流速  $u_*$  通常在  $3 \text{ cm/s} \sim 30 \text{ cm/s}$ <sup>[5]</sup> 之间,比降较大的山区河流的水流摩阻流速  $u_*$  也基本不超

过  $100 \text{ cm/s}$ ,因此,以下仅分析摩阻流速  $u_*$  介于  $1.9 \text{ cm/s} \sim 100.0 \text{ cm/s}$  范围内的泥沙单步悬浮高度及步长。

因式(13)为积分表达式,不能直接求解,可通过数值方法求解得到  $h$ ,再将  $h$  代入式(23)计算得到颗粒单步悬浮步长  $L_4$ 。图 4 为粒径  $0.05 \text{ mm} \sim 1.50 \text{ mm}$  的泥沙在水流摩阻流速  $1.9 \text{ cm/s} \sim 100.0 \text{ cm/s}$  条件下单步悬浮高度的变化曲线。

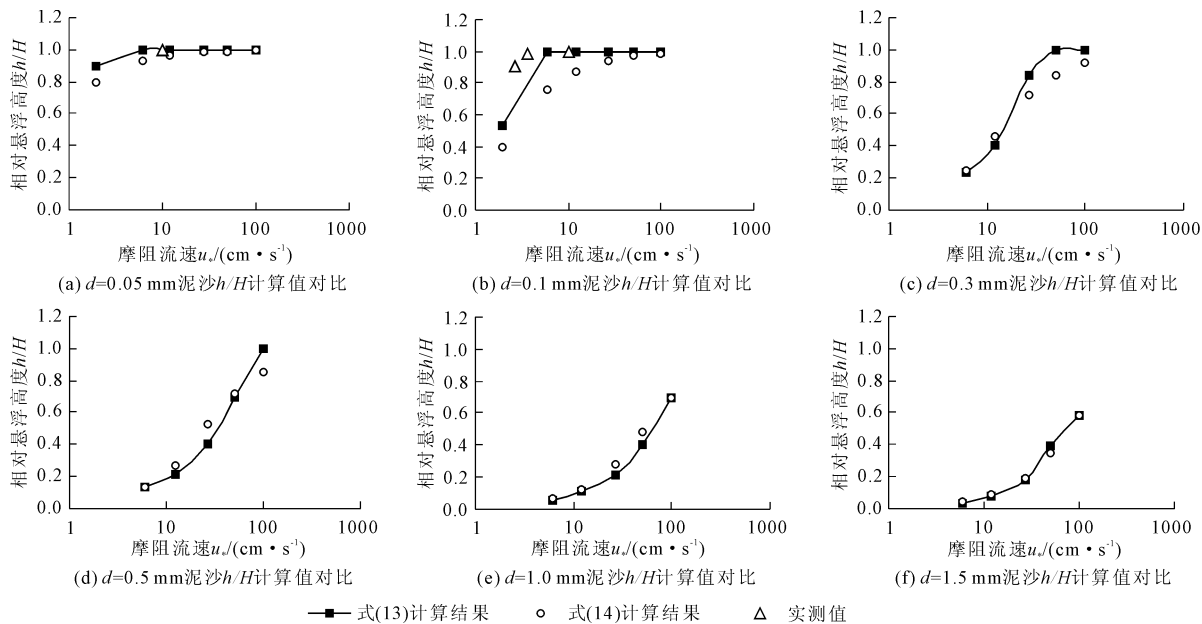


图 4 泥沙颗粒相对悬浮高度  $h/H$  与摩阻流速  $u_*$  的变化关系

由图 4 可以看出,不同粒径泥沙的相对悬浮高度均随水流摩阻流速的增加而增加。此外,从图 4(a)、图 4(b)可以看出,在水流摩阻流速为  $10 \text{ cm/s}$  条件下,粒径  $0.05 \text{ mm}$  和  $0.10 \text{ mm}$  的泥沙相对悬浮高度均可达到 1,这个结果间接得到了文献<sup>[18,22]</sup>中有关实测数据的验证。文献<sup>[18]</sup>给出了比降  $j = 0.0001$ 、水深  $h = 2.4 \text{ m}$ 、平均流速  $U = 1.9 \text{ m/s}$ (对应的水流摩阻流速  $u_* = 10 \text{ cm/s}$ )等条件下两种不同粒径的泥沙( $0.04 \text{ mm}$  及  $0.10 \text{ mm}$ )在水流冲刷作用下的含沙量恢复过程。在水流摩阻流速  $u_* = 10 \text{ cm/s}$  条件下,粒径  $0.04 \text{ mm}$  的泥沙悬浮到水面的相对含沙量可达  $0.50 \sim 0.75$ ,粒径  $0.1 \text{ mm}$  的泥沙悬浮到水面的相对含沙量可达  $0.12$ 。其它粒径泥沙悬浮高度及水流条件还有待进一步验证。

图 5 为泥沙颗粒的单步悬浮步长随水流摩阻流速变化的曲线。由图 5 可以看出,泥沙颗粒的悬浮步长和悬浮高度随摩阻流速的变化趋势一致,即泥沙颗粒的单步悬浮步长及悬浮高度均随水流摩阻流

速的增加而增加。

结合图 4 和图 5 可以看出,在摩阻流速  $u_* = 1.9 \text{ cm/s} \sim 100.0 \text{ cm/s}$  条件下,随着水流摩阻流速的增大,粒径  $d \leq 0.4 \text{ mm}$  泥沙的相对悬浮高度将逐渐达到 1,同时其单步悬浮步长也随之增加;在相对悬浮高度达到 1 后,单步悬浮步长不再显著增加;在泥沙颗粒粒径  $d > 0.4 \text{ mm}$  的情况下,其相对悬浮高度和悬浮步长均随着摩阻流速的增加而增加,但由于其泥沙自身重力较大,其相对悬浮高度达不到 1 的上限。此外由图 5(a)可见,在摩阻流速  $u_* = 2 \text{ cm/s}$  的条件下,粒径  $d = 0.025 \text{ mm}$  的泥沙就可以悬浮到水面,并一直保持着悬浮状态,因此可认为此粒径以下的泥沙属于冲泻质,这一点也得到了钟德钰等<sup>[23]</sup>的研究成果佐证。钟德钰等<sup>[23]</sup>的研究表明,在  $u_* = 2 \text{ cm/s} \sim 4 \text{ cm/s}$  的水流条件下,水流挟沙能力足以使  $d = 0.02 \text{ mm} \sim 0.03 \text{ mm}$  的泥沙颗粒成为冲泻质。

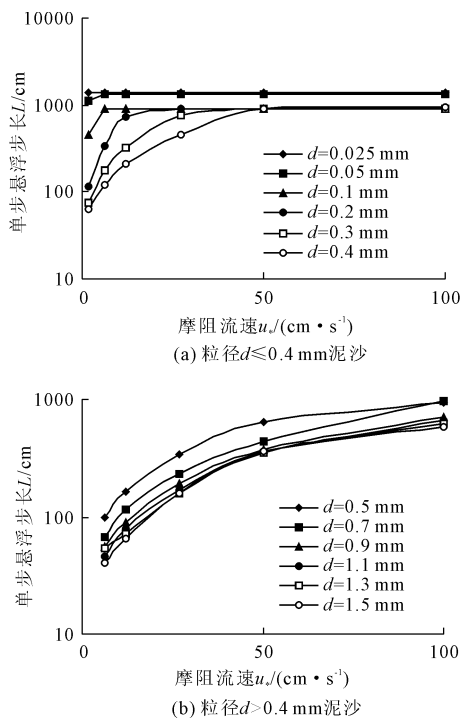


图 5 泥沙颗粒单步悬浮步长  $L_4$  与摩擦流速  $u_*$  的变化关系

### 4.2 恢复饱和系数公式计算结果

将悬浮高度式(13)及步长式(23)代入式(24)即得到恢复饱和系数值。

图 6 为恢复饱和系数  $\alpha$  随摩擦流速  $u_*$  的变化曲线。由图 6 可见,细颗粒泥沙( $0.025 \text{ mm} \leq d < 0.1 \text{ mm}$ )与粗颗粒泥沙( $0.1 \text{ mm} \leq d \leq 1.5 \text{ mm}$ )的恢复饱和系数  $\alpha$  随摩擦流速  $u_*$  的变化趋势有所不同。前者恢复饱和系数  $\alpha$  随  $u_*$  的增大而增大,粗颗粒泥沙的恢复饱和系数  $\alpha$  整体上随着  $u_*$  的增加先减小再增加。 $d = 0.025 \text{ mm}$  的细颗粒泥沙恢复饱和系数  $\alpha$  值介于  $0.09 \sim 1.20$ ,在  $u_* \approx 30 \text{ cm/s}$  时即可达到 1; $d = 0.05 \text{ mm}$  的细颗粒泥沙恢复饱和系数  $\alpha$  介于  $0.01 \sim 0.50$ ,在摩擦流速  $u_* = 100 \text{ cm/s}$  时达到 0.5。

### 4.3 与前人研究成果的对比

本文选择了具有一定代表性的韩其为等<sup>[5]</sup>、韦直林等<sup>[8-9]</sup>、王新宏等<sup>[9]</sup>学者的研究成果进行对比分析。

韩其为公式:

$$\alpha = \frac{(1 - \varepsilon_{0,i})(1 - \varepsilon_{4,i})}{\eta_i + 0.176\eta_i \ln \eta_i} \frac{\bar{U}_{y,u,i}}{\omega_i} \left(1 + \frac{\bar{U}_{y,u,i}}{\bar{U}_{y,d,i}}\right)^{-1} \quad (25)$$

韦直林公式:

$$\alpha = 0.001/(\omega_i^{0.5}) \quad (26)$$

王新宏公式:

$$\alpha_i = 0.055(\bar{\omega}/\omega_i)^{0.65} \quad (27)$$

其中: $\eta_i$  为第  $i$  级粒径泥沙的相对悬浮高度;其余同上。

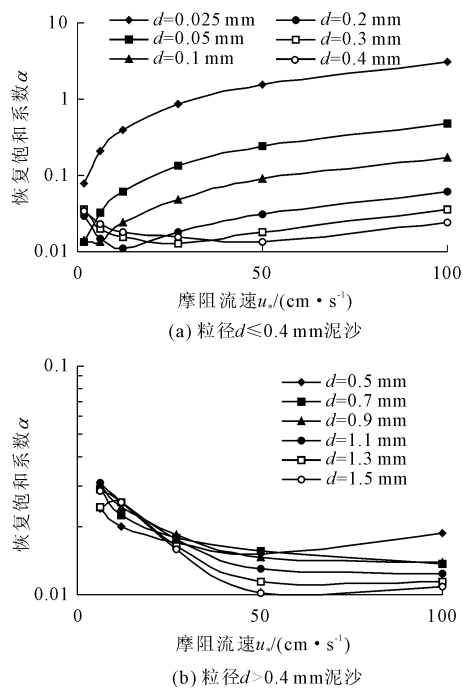


图 6 恢复饱和系数  $\alpha$  与摩擦流速  $u_*$  的变化关系

由式(25)、式(26)及式(27)可见,韩其为<sup>[5]</sup>公式不仅包含泥沙沉速条件,还包含水流运动条件,因此韩其为公式可以计算不同水流条件的恢复饱和系数。韦直林<sup>[8-9]</sup>公式和王新宏<sup>[9]</sup>公式比较简单,仅包含泥沙沉速条件。根据文献资料,王新宏<sup>[9]</sup>公式率定了摩擦流速  $u_* = 8.5 \text{ cm/s}$  的恢复饱和系数,韦直林<sup>[8-9]</sup>公式给出了不包涵摩擦流速的恢复饱和系数。

图 7 为本文公式与韩其为公式计算结果比较。可以看出,在  $0.1 \text{ mm} \sim 1.5 \text{ mm}$  的粒径范围内,本文公式计算结果同韩其为公式计算结果基本一致,但本文公式计算结果整体大于韩其为公式计算结果。

将本文公式和式(25)一式(27)及黄河中下游非均匀沙平均恢复饱和系数率定值<sup>[5]</sup>进行对比,见图 8。图中选择  $d = 0.1 \text{ mm}$  的泥沙颗粒进行计算分析是基于黄河中下游粒径介于  $0.02 \text{ mm} \sim 0.15 \text{ mm}$ <sup>[24]</sup>的考虑。从图 8 可以看出,本文公式曲线与韩其为公式、黄河中下游非均匀沙平均恢复饱和系数率定值曲线符合较好,曲线趋势也基本一致;且本文公式曲线基本位于韩其为公式和黄河下游非均匀沙平均恢复饱和系数率定值曲线之间;在磨阻流速  $u_* = 8.5 \text{ cm/s}$  时,王新宏<sup>[9]</sup>公式计算值大于本文公式、韩其为公式、黄河中下游非均匀沙平均恢复饱和

系数率定值,韦直林公式计算值则整体偏小于本文公式、韩其为公式、黄河下游非均匀沙平均恢复饱和

系数率定值。仅就计算结论而言,本文公式更接近黄河下游非均匀沙平均恢复饱和系数率定值。

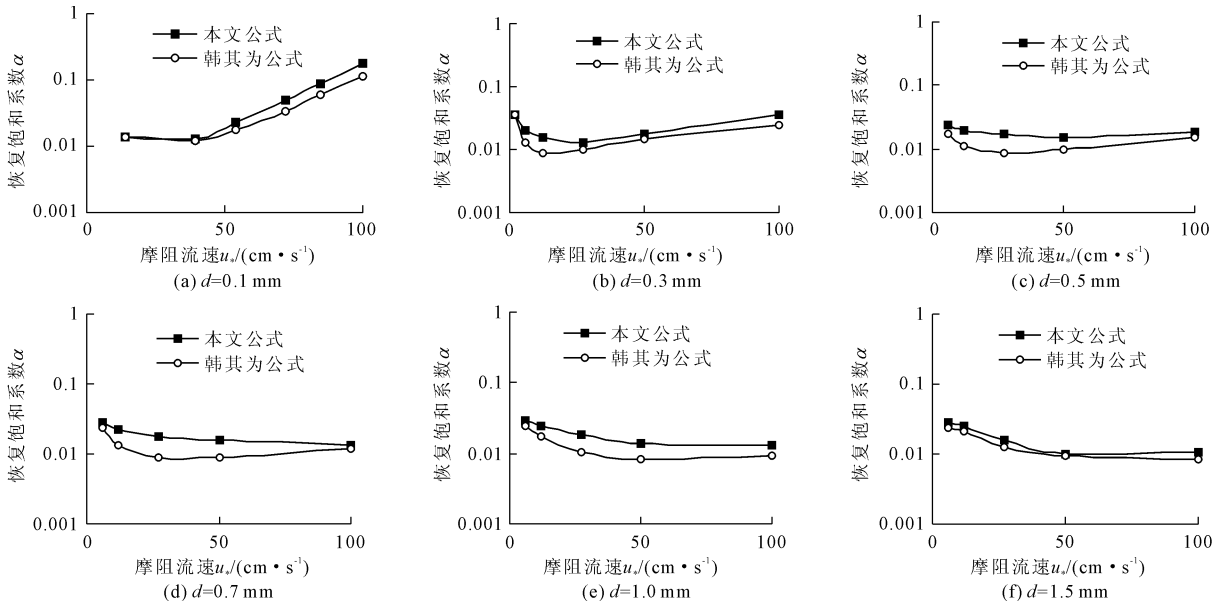


图 7 恢复饱和系数  $\alpha$  与摩擦流速  $u_*$  的变化关系

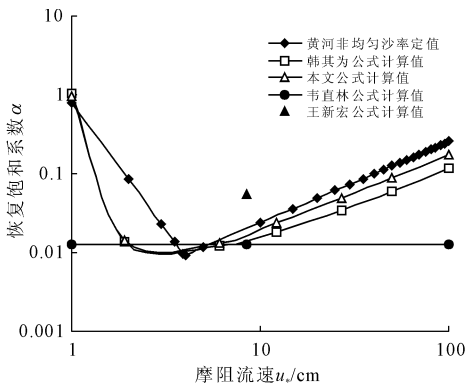


图 8 各公式对比图

## 5 结 论

基于泥沙颗粒悬浮高度的假设,研究了次饱和输沙过程的泥沙颗粒悬浮机理,提出并率定了湍流能量传递系数  $\varepsilon_D$ ,推导了泥沙颗粒在挟沙水流中的悬浮高度及步长表达式,改进了坝后单向冲刷条件下的恢复饱和系数公式,公式可靠性较好,可以在实际工程应用中为不平衡输沙数学模型提供恢复饱和系数的取值参考。主要结论有:

(1) 湍流能量传递系数  $\varepsilon_D$  随泥沙粒径  $d$  的增大而增大,随摩擦流速  $u_*$  的增大而减小,整体处于一较低值,粒径  $d=0.025\text{ mm} \sim 1.000\text{ mm}$  的泥沙在摩擦流速  $u_* = 1.92\text{ cm/s} \sim 100.00\text{ cm/s}$  范围内,其  $\varepsilon_D$  介于  $0.0001 \sim 0.6990$  之间,表明支持泥沙颗粒产生悬浮的

紊动能只占水流自身紊动能中的较小一部分。

(2) 不平衡输沙过程的悬移质恢复饱和系数与泥沙粒径、水流摩擦流速等因素有关。在  $u_* = 1.9\text{ cm/s} \sim 100.0\text{ cm/s}$  的水流条件下,细颗粒泥沙 ( $0.025\text{ mm} \leq d < 0.100\text{ mm}$ ) 的恢复饱和系数  $\alpha$  随摩擦流速  $u_*$  的增大而增大,  $\alpha$  取值范围  $0.01 \sim 3.00$ ;粗颗粒泥沙 ( $0.1\text{ mm} \leq d < 1.5\text{ mm}$ ) 的恢复饱和系数  $\alpha$  随摩擦流速  $u_*$  的增大先减小再增大,  $\alpha$  取值范围  $0.01 \sim 0.20$ 。

(3) 细颗粒泥沙与粗颗粒泥沙的恢复饱和系数  $\alpha$  随摩擦流速  $u_*$  变化趋势的不同将导致非均匀沙恢复饱和系数  $\alpha$  随  $u_*$  的变化情况变得复杂,后续的研究中需要针对非均匀沙恢复饱和系数做更深入的理论研究。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘金梅,王士强,王光谦. 河流冲刷过程中表层床沙粗化对不平衡输沙的影响[J]. 水科学进展,2000(3):229-234.
- [3] 刘金梅,王光谦,王士强. 沙质河道冲刷不平衡输沙机理及规律研究[J]. 水科学进展,2003(5):563-568.
- [4] 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.

- 数的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(2): 231-236.
- [2] 郭璐, 陈馈, 李风远, 等. 一种岩石磨蚀性实验[J]. 隧道建设, 2015, 35(1): 28-32.
- [3] 胡江涛, 乔晓锋. 关埠引水隧洞超高强度岩石 TBM 刀具选型及布置[J]. 广东水利水电, 2021(5): 78-82.
- [4] 余磊, 张社荣, 和孙文, 等. 基于密实核理论的 TBM 盘形滚刀磨损预测模型研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 970-978.
- [5] 谭青, 孙鑫健, 夏毅敏, 等. TBM 盘形滚刀磨损预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 54-60.
- [6] 曾洪飞. 岩土磨蚀性试验在盾构法隧道工程中的应用[J]. 中华建设, 2012(5): 202-203.
- [7] 刘颖超. 斜井 TBM 滚刀破岩机理及刀具磨损研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [8] 朱事业. 岩石磨蚀性指标(CAI)分析研究[J]. 广东水利水电, 2018(5): 48-52.
- [9] 龚秋明, 许弘毅, 李立民. 岩石磨蚀性指数分级讨论[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 748-758.
- [10] Plinninger R, Käsling H, Thuro K, et al. Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar Abrasiveness Index (CAI) value[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 259-263.
- [11] Michalakopoulos T N, Anagnostou V G, Bassanou M E, et al. The influence of steel styli hardness on the Cerchar Abrasiveness Index value[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(2): 321-327.
- [12] Selmer-Olsen R, Blindheim O T. On the drillability of rock by percussive drilling[C]//Proc. 2nd Congress of ISRM, Belgrade, 1970: 65-70.
- [13] Hansen A. Boreability Testing, in Norwegian TBM Tunnelling[M]. Trondheim: Norwegian Tunnelling Society, 1998: 21-26.
- [14] Nilsen B, Dahl F, Holzhauser J, et al. SAT: NTNU's new soil abrasion test[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2006, 38(5): 43-45.
- [15] 赵斌, 王芝银, 伍锦鹏. 矿物成分和细观结构与岩石材料力学性质的关系[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 59-63.
- [16] 张威, 刘新义, 郑小燕. 矿物成分强度对岩石单轴抗压强度的影响[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 8085-8088.
- [17] 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法: SY/T 5163—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- [18] X 射线衍射仪技术条件: JB/T 9400—2010[S]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

(上接第 36 页)

- [5] 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.
- [6] 王士强. 黄河泥沙冲淤数学模型研究[J]. 水科学进展, 1996(3): 10-16.
- [7] 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.
- [8] 韦直林, 赵良奎, 付小平. 黄河泥沙数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(5): 22-26.
- [9] 王新宏, 曹如轩, 沈晋. 非均匀悬移质恢复饱和系数的探讨[J]. 水利学报, 2003(3): 120-124, 128.
- [10] 杨晋营. 沉沙池超饱和输沙法恢复饱和系数研究[J]. 泥沙研究, 2005(3): 42-47.
- [11] 史传文, 罗全胜. 一维超饱和输沙法恢复饱和系数  $\alpha$  的计算模型研究[J]. 泥沙研究, 2003(1): 59-63.
- [12] 葛华, 朱玲玲, 张细兵. 水库下游非均匀沙恢复饱和系数特性[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(6): 711-714, 764.
- [13] 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.
- [14] 邓安军, 陈立, 林鹏, 等. 紊动强度沿垂线分布规律的分析[J]. 泥沙研究, 2001(5): 33-36.
- [15] 叶小云, 陈立, 吴门伍. 挟沙水流泥沙浓度分布的试验研究[J]. 泥沙研究, 2003(4): 36-40.
- [16] 董曾南, 陈长植, 李新宇. 明槽均匀紊流的水力特性[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1994(1): 8-22.
- [17] 韩其为, 何明民. 泥沙运动统计规律[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [18] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [19] 舒安平. 挟沙水流悬移质运动效率系数的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 209-216.
- [20] 张小峰, 徐顺, 卢新华, 等. 一维悬移质泥沙输移方程及其滞后和离散效应[J]. 泥沙研究, 2018, 43(4): 8-15.
- [21] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [22] 李丹勋. 悬移质颗粒运动特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [23] 钟德钰, 王士强, 王光谦. 水流的冲泻质输沙机理研究 II: 实验研究及验证[J]. 水利学报, 2000(11): 9-14.
- [24] 孙维婷, 穆兴民, 赵广举, 等. 黄河干流悬移质泥沙粒径构成变化分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(5): 4-9.