



高含沙水流挟沙能力

舒安平^{①②*}, 费祥俊^②

① 北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

② 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: shuap@bnu.edu.cn

收稿日期: 2007-06-08; 接受日期: 2008-03-06

国家自然科学基金(批准号: 10672024)和教育部留学回国人员启动基金资助项目

摘要 作为河流动力学中的核心问题之一, 水流挟沙能力的研究一直受到众多学者的重视. 首先以固液两相挟沙水流紊动能量平衡时均方程为理论出发点, 在二维、恒定、均匀、充分紊动的流态条件下, 经过详细推导了悬移质运动效率系数的表达式, 并进一步推导得出水流挟沙能力的结构公式. 在此基础上, 依据 115 组天然沙和粉煤灰两种平衡输沙实验的实测数据, 结合高含沙水流的流变特性及输沙特性, 确定挟沙能力结构公式中的有关参数, 获得了具有普遍意义的高含沙水流挟沙能力公式, 最后采用大量的黄河、无定河、长江等天然河道实测资料对公式的可靠性进行验证, 结果表明计算值与实测值相符合的程度令人满意. 该成果对完善河流动力学特别是高含沙水流的理论体系、建立黄河生态输沙需水量模型以及指导治黄工程规划设计等均具有十分重要的现实意义.

关键词

高含沙水流
紊动能量平衡
悬移质运动效率系数
挟沙能力

黄河是一条闻名于世的多沙河流, 每年汛期高含沙洪水频发, 历史上最高的含沙量竟达 1600 kg/m^3 之多, 多年平均输沙量为 $1.6 \times 10^9 \text{ t}$, 居世界之冠. 根据中国河流泥沙公报和黄河泥沙公报统计数据^{1), 2)}, 若选取黄河干流潼关、花园口和利津等 3 个水文站为代表站进行分析, 到 2001 年实测多年平均径流量为 $3.65 \times 10^{10} \text{ m}^3$, $4.01 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $3.31 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 多年平均输沙量分别为 $1.19 \times 10^9 \text{ t}$, $1.054 \times 10^9 \text{ t}$ 和 $8.39 \times 10^8 \text{ t}$, 多年平均含沙量分别为 32.4 kg/m^3 , 26.4 kg/m^3 和 25.2 kg/m^3 , 潼关以下黄河河道泥沙淤积量达到 $3.46 \times 10^8 \text{ t}$. 1999 年 10 月小浪底水库拦蓄泥沙后, 尽管下游部分河道出现不同程度的冲刷, 但 2001 年以后艾山以下局部河段仍出现了淤积, 河床抬

1) 水利部. 中国河流泥沙公报(长江、黄河). 2001

2) 黄河水利委员会水文局. 黄河泥沙公报. 2001

高的趋势并未得到明显的缓解,其主要原因在于黄河流域中游黄土高原粗沙来源区大量的来沙条件没有得到根本改变,同时黄河干流水少沙多、水沙异源、水沙搭配不协调性以及时空分布的不均匀性等水沙特性以及下游河槽形态宽浅游荡等因素决定了下游河道淤积的态势,归根到底就是现有的河道水流挟沙能力不足以将大量的来沙输送入海所致。因此,高含沙水流挟沙能力来源于黄河流域的泥沙治理工程的实际需要,已经成为治黄工程中重要的瓶颈性问题之一,一直受到了河流动力学学术界与治黄科技工作者的极大关注。

所谓高含沙水流是指在挟带一定黏性细颗粒、具有高浓度固体颗粒的一种复杂挟沙水流,也是一种典型而特殊的固液两相流动。而水流挟沙能力是指在一定的水流泥沙条件下单位水体所能挟带和输送的全部泥沙数量,是涉及水流、泥沙及河床边界条件为一体的综合性参数。与一般挟沙水流相比,高含沙水流挟沙能力要复杂得多。一方面,受水流紊动的扩散作用,使得泥沙得以悬浮和输移,高含沙水流挟沙能力的形成正是来自于这种水流的动力因素;另一方面,泥沙条件包括含沙浓度、颗粒组成及床面补给条件也将对高含沙水流的挟沙能力产生重大的影响。在高含沙水流中,由于细颗粒的存在,改变了流体的流变特性,导致水流挟沙除了要克服黏性阻力与紊动阻力以外,还要克服流体本身结构应力 τ_b 的作用。同时,黏度增大,加之粗颗粒受细颗粒的悬浮作用,降低泥沙的有效重率和群体沉速,从而增大了挟沙能力,而且往往对挟沙能力起着主导作用,也使得高含沙水流具有“多来多排”等独特的输沙特性。因此,高含沙水流挟沙能力的研究首先必须建立在一般水流挟沙能力的基础上,然后再结合高含沙水流的流变特性及输沙特性再进行更加深入的研究。

最初的水流挟沙能力的研究开始于Gilbert^[1]的水槽输沙实验,其后人们陆续对这一问题展开了大量的研究工作^[2,3]。从研究发展的历程来看,国内外水流挟沙能力的研究大致经历了以下3个阶段:20世纪50年代以前处于初步定性探索和经验分析阶段;20世纪50年代到80年代初期,水流挟沙能力的研究取得长足的进步,表现在水流挟沙能力的定量化和许多半理论半经验公式的问世,其中典型代表性公式有Einstein公式^[4,5]、前苏联的Velikanov公式^[6]、武汉水利学院公式^[7]、Yang等等^[8~11],许多公式至今仍受到广泛的应用^[3];自20世纪80年代中期以来,挟沙能力的研究进入了一个新的发展阶段,许多研究者试图将一般水流挟沙能力公式向高含沙水流范围扩展,例如曹如轩^[12]和张红武等人^[13]、费祥俊与舒安平^[14]和刘兴年等人^[15],这些公式均能在某种程度上反映出高含沙水流挟沙力与水流携带泥沙数量和颗粒粒径组成之间的相互关系^[2]。最近,国内外还有一些水流挟沙力有关的成果相继发表,国内有窦国仁的波浪和潮流的挟沙能力以及余明辉、杨国录的非均匀沙水流挟沙力公式等^[16~20],而国际上也有Cellino和Graf^[21]从水流含沙量垂线分布等角度研究水流挟沙力,Huang等人^[22]研究输沙能力与侵蚀过程的变化特点,Song等人^[23]采用列举法对水流挟沙力公式系数进行优化遴选,Milhous^[24]从气候变化角度研究美国Colorado高原水流挟沙力变化特点,Yang等人^[25,26]研究河道水流挟沙力以及水沙因子之间的关联性等,这些国内外近期研究成果大多只是以一般低含沙水流为对象、侧重于水流挟沙力的某一方面展开的,而真正对高含沙水流挟沙力进行研究的成果并不多见,但值得参考的高含沙水流方面的近期成果包括Dieter^[27]研究陡坡形成高含沙水流输沙能力,许炯心^[28~30]研究黄土高原侵蚀过程及黄河高含沙水流浓度与颗粒组成之间关

系, 得出了“浓度越高、悬沙粒径越大”等初步结论, Guo^[31]和Cao等人^[32]从数学模型应用的角度提出高含沙输沙能力的计算处理方法等, 但这些成果均未涉及到高含沙水流挟沙能力的系统研究. 而目前针对现有国内外大量的水流挟沙力研究成果, 也有不少学者进行过比较、验证与评述^[33~39], 但由于各家资料来源与侧重方法的不同, 带来不尽相同的比较结果, 特别是由于高含沙水流运动本身的复杂性及其水沙因子测量的困难性, 导致目前有关高含沙水流挟沙能力的研究成果尚未达到完全实用的阶段, 尤其缺乏普遍认可的高含沙水流挟沙能力公式, 充分说明对其研究的重要性与必要性.

鉴于此, 现阶段对高含沙水流挟沙能力的研究需要采用全新的方法, 比如基于多流体运动动力学理论和能量平衡方程等途径研究泥沙悬浮输移运动的物理实质及能量耗散规律, 在此基础上再研究挟沙能力的定量关系和输沙机理. 作为一种有益的尝试, 本文基于固液两相流理论, 从全新的角度系统研究水流挟沙能力问题. 从悬移质运动效率系数入手, 经过推导得出水流挟沙能力的结构公式, 结合平衡输沙实验的实测数据与高含沙水流的输沙特性, 最终建立高含沙水流挟沙能力公式, 并应用大量的黄河等天然河流实测资料对公式的可靠性进行验证, 其研究成果对丰富河流动力学基本内容、确定治黄工程水沙设计参数、构建黄河输沙需求模型等均具有十分重要的理论价值和现实意义.

1 两相挟沙水流紊动能平衡方程

1.1 紊动能平衡方程

作者^[3]曾根据固液两相流连续、运动及能量平衡的基本方程, 经过详细的数学推导, 并在二维、恒定、均匀、充分紊动的前提下进行简化, 得到如下形式的两相挟沙水流(混合相)紊动能平衡方程式为

$$-\rho_m \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_B} \cdot \frac{\partial B_t}{\partial y} \right) + \overline{\rho'_m v' g} + \mu_m \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2}. \quad (1)$$

将上式简写为

$$E_1 = E_2 + E_3 + E_S, \quad (2)$$

其中紊动能产生项为

$$E_1 = -\rho_m \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \quad (3)$$

紊动能扩散项为

$$E_2 = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_B} \cdot \frac{\partial B_t}{\partial y} \right), \quad (4)$$

紊动能黏性耗散项为

$$E_3 = \mu_m \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2}, \quad (5)$$

泥沙悬浮功为

$$E_s = \overline{\rho'_m v' g}. \quad (6)$$

从紊动能平衡方程(1)可看出, 挟沙水流紊动能由其扩散项、黏性耗散项和泥沙悬浮功等三大部分构成, 并进一步揭示了用于消耗于泥沙悬浮的能量(即悬浮功)是来自于紊动能这一物理实质.

1.2 紊动能各分项表达式

为了便于应用, 这里有必要对以上紊动能平衡方程式中的紊动能各分项作进一步分析.

1.2.1 紊动能的产生项

对于二维均匀的挟沙水流, 泥沙的悬浮对水流具有制紊作用, 使水流紊动强度减弱, 因此要描述挟沙水流的紊动强度变化, 尚需在清水紊动强度公式^[40]中引进与泥沙条件有关的比例系数 η_s , 即

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{u_*} = 1.60\eta_s \left(\frac{y}{h}\right)^{1/6} \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{1/2}. \quad (7)$$

考虑挟沙水流的泥沙影响, 引用修正掺长公式为^[41]

$$\frac{l_m}{h} = \kappa^2 \sqrt{\frac{y}{h}}. \quad (8)$$

根据量纲分析, 紊动速度与时均速度之比等于紊动尺度与时均速度之比, 即

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{l_m} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \quad (9)$$

由(8)和(9)式可得到紊动能产生项为

$$E_1 = -\rho_m \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \rho_m l_m^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^3 = \rho_m \left(\overline{v'^2}\right)^{3/2} / l_m = 4.1 \frac{\rho_m u_*^3 \eta_s^3}{\kappa^2 h} \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{3/2}. \quad (10)$$

1.2.2 紊动能的耗散项

仿效Prandtl混合掺长理论中动力黏性系数 μ_m 的表达方法, 紊动黏性系数可表示为

$$\mu_T = C_\mu \rho_m \left(\overline{u'^2 + v'^2}\right)^{1/2} l_m = \sqrt{2} C_\mu \rho_m B_t^{1/2} l_m, \quad (11)$$

式中 l_m 为两相挟沙水流的掺长; ρ_m 挟沙水流混合相密度; $B_t = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) = \frac{1}{2}(1 + C_1^2) \overline{v'^2}$ 表示平均紊动能; C_1 为纵向与横向紊动强度之比值, 在各向同性紊流中 $C_1 = 1$, 在各向异性紊流中 $C_1 > 1$; C_μ 为紊动黏性修正系数, 清水中取值为 1, 挟沙水流中 C_μ 与流体的黏度等因素有关.

因此

$$E_3 = \mu_m \left(\frac{\partial \bar{u}'}{\partial y}\right)^2 = C_d \mu_T \frac{2B_t}{l_m} = C_\mu C_d (1 + C_1^2)^{3/2} \rho_m \left(\overline{v'^2}\right)^{3/2} / l_m = C_\mu C_d (1 + C_1^2)^{3/2} \cdot E_1, \quad (12)$$

式中 C_d 为紊动能耗散比例系数, 与流体紊动交换系数等因素有关; μ_m 为挟沙水流动力黏性系数.

1.3 紊动能水深平均方程

将以上两个紊动能各分项公式代入紊动能平衡方程式, 即得两相挟沙水流紊动能平衡方程微分形式

$$E_1 \cdot \left[1 - C_\mu C_d (1 + C_1^2)^{\frac{3}{2}} \right] = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_{Bt}} \frac{\partial B_t}{\partial y} \right) + E_s. \quad (13)$$

对上式沿水深方向 $[a, h]$ 进行积分, 并考虑到从水面到河底紊动能扩散项总和为零, 可最终得到水深平均意义下的紊动能平衡方程为

$$r_m \Phi \frac{\sqrt{f_m} U J}{\kappa^2} \int_a^h \left(1 - \frac{y}{h} \right)^{3/2} dy = \int_a^h E_s dy = \overline{E_s} (h - a), \quad (14)$$

式中 Φ 为综合系数, 即 $\Phi = 1.64 \left[1 - C_\mu C_d (1 + C_1^2)^{3/2} \right] \eta_s^3$; $\overline{E_s}$ 为泥沙悬浮功沿水深方向的平均值; a 为床面推移层厚度.

2 水流挟沙能力的结构公式

2.1 悬移质运动效率系数 e_s

2.1.1 效率系数 e_s 的定义表达式

如前所述, 对于紊动挟沙水流, 泥沙悬浮功来自于紊动能, 将两者比值定义为悬移质运动效率系数 e_s (简称效率系数), 即得

$$e_s = \frac{E_s}{E_1} = \frac{\overline{\rho'_m v'g}}{-\rho_m \overline{u'v'} \frac{\partial u}{\partial y}}. \quad (15)$$

由于 e_s 的定义式描述的是流体内部泥沙悬浮功与单位时间紊动能两者之间的比值关系, 因而 e_s 沿水深方向是变化的. 对于悬移质运动效率系数 e_s 的变化规律, Bagnold^[42] 和钱宁等人^[43] 先后进行过大量的研究, 得出了一些有意义的成果, 舒安平^[44] 也曾应用黄河、长江等实测资料分析水深平均意义下的 e_s 随含沙量 S_v 变化规律. 因此对于以悬移质运动为主的挟沙水流, 可将泥沙悬浮功与单位时间紊动能分别沿水深方向积分, 得到水深方向平均值, 即

$$\overline{E_s} = \frac{1}{h-a} \int_a^h \rho'_m v'g dy = \frac{1}{h-a} \int_a^h (\gamma_s - \gamma_m) S_v \omega dy = (\gamma_s - \gamma_m) \overline{S_v} \cdot \overline{\omega} \quad (16)$$

和

$$\overline{E_1} = \frac{1}{h-a} \int_a^h \tau' \frac{\partial u}{\partial y} dy = \frac{1}{h-a} k_t \cdot \int_a^h \tau \frac{\partial u}{\partial y} dy = k_t \gamma_m U J, \quad (17)$$

于是得到水深平均意义下的悬移质运动效率系数 e_s 定义式

$$e_s = \frac{\overline{E_s}}{E_1} = \frac{(\gamma_s - \gamma_m) S_v \omega}{k_t \gamma_m U J}, \quad (18)$$

式中 γ_s 和 γ_m 分别为泥沙和挟沙水流的容重; S_v 为体积含沙量; ω 为泥沙沉速; U 为垂线平均流速; J 为水力坡降; k_t 为挟沙水流紊动能转化率.

我们曾经推导得出紊动能转化率表达式^[5]

$$k_t = 1 - \frac{1}{\tau_0 h} [\tau_{BT} (2h - y_0) + 2\mu_m k_d U], \quad (19)$$

式中 $y_0 = \frac{\tau_{BT}}{\tau_0} h$ 为高含沙水流流核厚度, h 为水深; $u_{\max} = k_d U$ 为垂线最大流速; k_d 和 U 分别为流速分布形状系数和垂线平均流速.

悬移质运动效率系数 e_s 的定义(18)式表明, e_s 作为反映紊动水流的悬浮泥沙能量变化的重要定量综合指标, 呈现出随着紊动能转化率 k_t 增大而减小的变化规律.

2.1.2 效率系数 e_s 的理论表达式

将(18)式代入挟沙水流紊动能平衡方程(14), 不难得到悬移质运动效率系数 e_s 的理论表达式为

$$e_s = \Phi \frac{1}{\kappa^2 k_t} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{a}{h} \right)^{3/2}. \quad (20)$$

对于以悬移质运动为主的挟沙水流, 推移质运动数量很少, 其厚度 $a \ll h$, 因此上式可简化为

$$e_s = \Phi \frac{1}{\kappa^2 k_t} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{1/2}. \quad (21)$$

由于综合系数 Φ 包含了 4 个系数, 即紊动黏性修正系数 C_μ 、紊动能耗散比例系数 C_d 、纵向与垂向紊动强度比例系数 C_1 以及反映泥沙条件对挟沙水流垂向紊动强度影响系数 η_s . 我们经过对这 4 个系数逐一进行分析发现^[3], 挟沙水流的相对黏度 μ_r 、泥沙容重 r_m 和 $r_s - r_m$ 、反映流速分布的卡门常数 κ 、泥沙沉速 ω 、流速 U 、水深 h 或水力半径 R 以及阻力系数 f_m 构成了影响以上 4 个系数的 7 个因子, 因此综合系数 Φ 可表述为

$$\Phi = f(\mu_r, r_m, r_s - r_m, \kappa, \omega, U, R, f_m). \quad (22)$$

通过因次分析进行无量纲化, 可得综合系数一般表达式

$$\Phi = f\left(\mu_r, \kappa, f_m, \frac{r_m}{r_s - r_m}, \frac{U^2}{gR}, \frac{\omega}{U}\right). \quad (23)$$

由此可见, 综合系数 Φ 与流体黏度 μ_r 、流速分布(卡门常数 κ)、流动阻力 f_m 、相对容重 $r_m / (r_s - r_m)$ 以及水流紊动扩散作用 U^2 / gR 和重力作用 ω / U 有关, 影响因素十分复杂, Φ 的具体表达式有待于采用平衡输沙实验实测资料加以确定.

2.2 水流挟沙能力的结构公式

在水流输沙平衡的条件下, 依据悬移质运动效率系数 e_s 定义(18)式, 可以得出水流挟沙能力的一般表达式为

$$S_{v*} = e_s k_t \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{UJ}{\omega}, \quad (24)$$

如引进阻力公式

$$u_* = \sqrt{\frac{f_m}{8}} \cdot U = \sqrt{gRJ}. \quad (25)$$

将(23)和(25)式代入(24)式, 即得到水流挟沙能力的一般表达式为

$$S_{v*} = \Phi \frac{1}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{U^3}{gR\omega}. \quad (26)$$

由(26)式可见, 确定水流挟沙能力的关键在于如何确定综合系数 Φ , 而在综合系数 Φ 的几个影响因子中, 除了流体黏度 μ_r 以外, 其他因子均出现(26)式等式的右侧, 根据数学中分离变量法, 可将流体黏度 μ_r 从综合系数 Φ 中分离出来单独考虑, 即

$$\Phi = f_1(\mu_r) f_2 \left(\kappa, f_m, \frac{r_m}{r_s - r_m}, \frac{U^2}{gR}, \frac{\omega}{U} \right). \quad (27)$$

再仿照武汉水利学院公式中系数 $K = f \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right)$ 相类似的处理方法, 对 f_2 影响因子进行组合, 并假定组合因子与 f_2 成指数关系, 即

$$f_2 \left(\kappa, f_m, \frac{r_m}{r_s - r_m}, \frac{U^2}{gR}, \frac{\omega}{U} \right) = f_3 \left[\frac{1}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{r_m}{r_s - r_m} \frac{U^3}{gR\omega} \right] = p \left[\frac{1}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{r_m}{r_s - r_m} \frac{U^3}{gR\omega} \right]^q, \quad (28)$$

式中 p 和 q 分别为系数和指数.

经过以上推导与处理后, 综合系数 Φ 可表达成

$$\Phi = pf_1(\mu_r) \cdot \left[\frac{1}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{r_m}{r_s - r_m} \frac{U^3}{gR\omega} \right]^q. \quad (29)$$

将(29)式代入(26)式, 最终可得到水流挟沙能力的结构公式为

$$S_{v*} = p \left[\frac{f(\mu_r)}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{U^3}{gR\omega} \right]^N, \quad (30)$$

式中指数 $N = 1 + q$; $f_1(\mu_r) = [f(\mu_r)]^N$ 为待定函数.

上式即为本文经过推导而得出的水流挟沙能力的结构公式, 不仅能适用于一般挟沙水流, 而且更重要的是该公式能全面反映高含沙水流黏度 μ_r 、容重 r_m 、颗粒级配、流速分布(卡门常数 κ)、流动阻力 f_m 等高含沙水流特有主要变量的影响, 因此从这个意义上说可将其称为高含

沙水流挟沙能力的结构公式, 以有别于其他一般水流挟沙力公式.

3 水槽平衡输沙实验

实验的主要目的在于通过测量高含沙水流输沙平衡状态下的基本水力泥沙因子, 以此确定卡门常数 κ 和悬移质运动效率系数 e_s 中的综合系数 Φ 表达式, 为建立高含沙水流挟沙能力公式的奠定基础. 为此我们在室内两种水槽实验系统中分别实施了天然沙和粉煤灰高含沙水流平衡输沙实验, 前者是以冲刷床面铺沙建立的相对平衡状态, 后者则是通过淤积方式建立的相对平衡状态, 两者互为补充、互为佐证, 以便使实验成果具有较强的代表性和实用性. 以下就对这两种实验的情况进行概述.

3.1 两种输沙实验系统

天然沙输沙实验系统(The experimental system for natural sediment transport, 简称为 NST)由水槽主体、直流泵、板孔流量计、变坡装置以及计算机数据采集系统等组成, 如图 1 所示; 粉煤灰输沙实验系统(The experimental system for coal-powder sediment transport, 简称为 CST)由水槽主体、交流泵动力系统、电磁流量计、变坡装置以及计算机控制与数据采集系统等构成, 如图 2 所示. 两种输沙实验系统的基本特征参数见表 1.

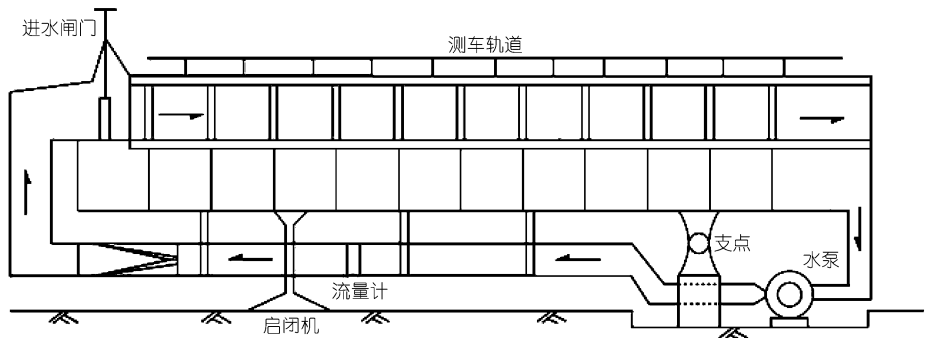


图 1 天然沙输沙实验系统(NST)

表 1 两种输沙实验系统的基本特征参数

实验系统	水槽尺寸 (长 m×宽 m×高 m)	底坡可调范围 $i_b/\%$	最大调节流量 $Q_{\max}/L \cdot s^{-1}$
NST	16.0×0.5×0.6	0~2.0	130
CST	25.0×0.5×0.5	0~10.0	150

在NST和CST实验过程中均采用改进型超声测淤仪测量水深, 各测点含沙量采用虹吸管采取悬沙沙样再通过称重法测得, 两种实验系统中泥沙颗粒级配分别采用筛分法($d \geq 0.1 \text{ mm}$)与比重计($d \leq 0.1 \text{ mm}$)相结合以及NSY-2 型宽域粒度分析仪测定. 在稳定的水流区布设固定测流断面及测流垂线, 采用自行研制的新型感压式高浓度水流流速仪(舒安平和任裕民)^[45]实测垂线流速分布, 通过A/D转化和计算机数据采集以实现流速测量系统及数据处理的自动化.

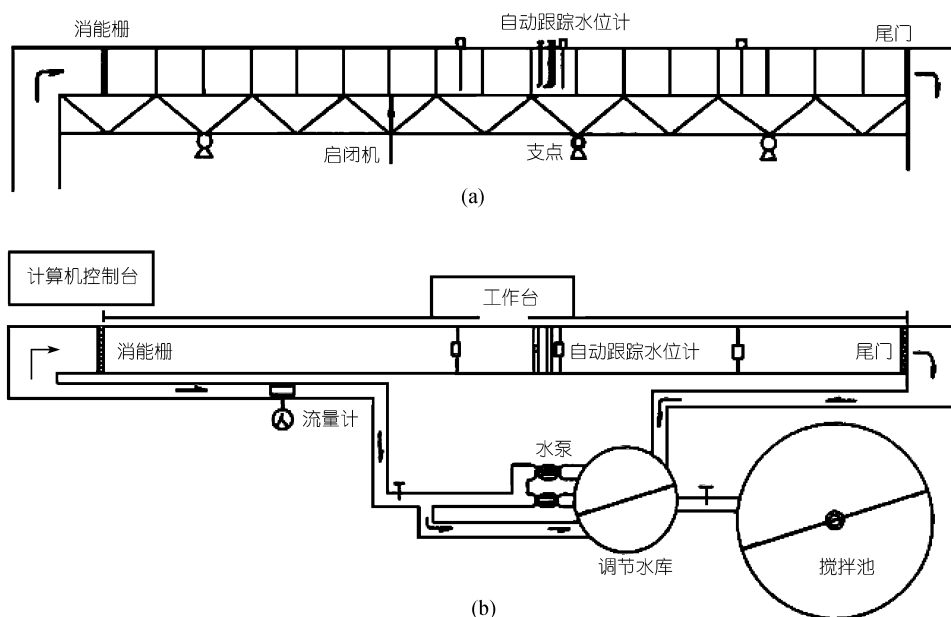


图 2 粉煤灰输沙实验系统(CST)

(a) 水槽立面示意图; (b) 水槽平面示意图

3.2 实验条件

天然河流水流泥沙条件错综复杂, 一般很难达到真正意义下的输沙平衡状态. 相比之下, 矩形水槽实验可以通过人为控制与调节水流泥沙条件以及水流与床面相互调整来实现一种相对平衡状态, 而且这正是保证测量成果可靠性的基本前提条件. 输沙实验过程中, 通过实验现象的实时观察以及仪器跟踪测量, 现场判断挟沙水流处于通过冲刷或淤积方式达到一种相对输沙平衡状态, 在此状态下再实测水力泥沙参数. 两种输沙实验所依据的水沙条件如表 2 所示.

表 2 输沙实验所依据的水沙条件

实验系统	泥沙比重 $\gamma_s/t \cdot m^{-3}$	泥沙颗粒粒径 d/mm		水槽底坡 $i_b/\%$	含沙量 $S/kg \cdot m^{-3}$
		范围	中径 d_{50}		
NST	2.65	0.0016~0.40	0.076	1~15	2.61~765.61
CST	2.17	0.0009~0.20	0.0172	0~5.5	3.10~539.70
实验系统	流量 $Q/L \cdot s^{-1}$	水力坡降 $J/\%$	水深 h/cm	宽深比 B/h	有效雷诺数 Re_m
NST	9.06~94.87	0.17~5.40	7.00~17.20	2.91~7.14	3950~142600
CST	12.50~55.00	0.26~3.13	5.50~14.96	3.34~9.10	2700~64700

3.3 实验步骤与方法

根据以上两种实验系统的不同结构确定了不同的实验方法, 即 NST 系统适合于铺沙冲刷形成的高含沙水流输沙实验, 而 CST 系统则适合于经加沙搅拌形成的高含沙水流输沙实验.

在 NST 实验中, 首先在水槽底部均匀铺放约 20 cm 厚度的天然沙, 再小心放入清水. 通过加大系统的流量来造成槽底泥沙的冲刷, 实现增大挟沙水流含沙浓度, 建立一种相对稳定的

动平床平衡输沙状态, 使用改进型超声测淤仪测量水深, 采用虹吸管采取测点沙样, 并在流动的稳态段设置固定测流断面及测流垂线, 采用自行研制感压式高浓度水流流速仪实测垂线流速分布. 通过加大系统流量, 使水流与河床重新发生调整, 直至建立新的输沙平衡的状态, 再实测这种新的水沙条件下的水深和垂线流速分布等. 如此类推, 可以测得不同水沙条件下挟沙水流的水深、流速分布、含沙量及颗粒级配等, 总共完成 70 组挟沙水流输沙实验.

CST 实验则不然, 而是通过在浑水水库中不断加沙、搅拌, 促使泥沙在槽底发生少量淤积, 再通过调节水流流量与尾门开度直至淤积停止, 最后建立相对的输沙平衡状态, 总共完成 45 组实验. 实验中采用与 NST 实验类似的方法测量了各组次的流量、水深、比降、水温、含沙量分布、床沙与悬沙颗粒级配等水沙因子.

4 高含沙水流挟沙能力公式的建立与验证

4.1 挟沙能力公式的建立

根据悬移质运动效率系数 e_s 表达式(21), 可反求出综合系数为

$$\Phi = e_s \kappa^2 k_t \left(\frac{8}{f_m} \right)^{1/2}. \quad (31)$$

为了便于分析, 假定挟沙能力综合参数为

$$T = \frac{1}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{r_m}{r_s - r_m} \frac{U^3}{gR\omega}. \quad (32)$$

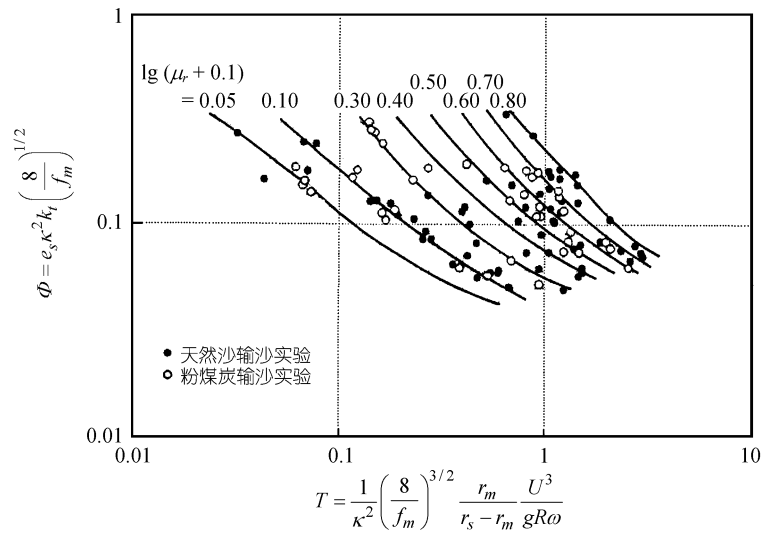
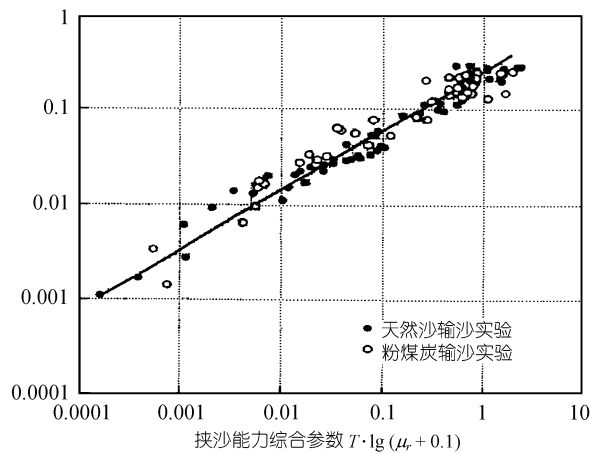
由(29)式可将综合系数简写为

$$\Phi = pf_1(\mu_r) \cdot T^q. \quad (33)$$

显而易见, 综合系数 Φ 只与黏度函数 $f_1(\mu_r)$ 和挟沙力综合参数 T 有关. 根据两种水槽输沙实验实测资料, 可由(31)式计算出综合系数 Φ , 并建立 Φ 与 T 关系图, 如图 3 所示. 可见, Φ 与 T 的关系在相同的黏度参数 $\lg(\mu_r)+0.1$ 的条件下呈现极好的规律性. 具体地说, Φ 值随着变量 T 值的增大而减小, 而在相同 T 值的条件下, Φ 值则随着 $\lg(\mu_r)+0.1$ 的增大而增大, 表明黏度函数 $f_1(\mu_r)$ 直接与黏度参数 $\lg(\mu_r)+0.1$ 有关. 进一步以 $\lg(\mu_r)+0.1$ 直接替代挟沙能力(30)式中的黏度函数 $f_1(\mu_r)$, 点绘 $T \cdot \lg(\mu_r + 0.1)$ 与输沙平衡时对应的含沙浓度 S_v 之间的关系图(图 4), 可以看出, 输沙平衡状态下含沙浓度 S_v 与 $T \cdot \lg(\mu_r + 0.1)$ 呈现很好的线性关系. 因此, 可以近似将 $\lg(\mu_r)+0.1$ 视为黏度函数 $f_1(\mu_r)$ 的具体函数表达式, 由此可获得高含沙水流挟沙能力的实用型结构公式为

$$S_{v*} = p \left[\frac{\lg(\mu_r + 0.1)}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{U^3}{gR\omega} \right]^N. \quad (34)$$

进一步依据两种水槽输沙实验实测数据资料, 点绘 $S_v-T \cdot \lg(\mu_r + 0.1)$ 关系图, 如图 4 所示, 通过回归分析确定(34)式中的系数 $p = 0.3551$, 指数 $N = 0.72$, 在双对数坐标上得出的相关系


 图 3 $\Phi-T \cdot \lg(\mu_r + 0.1)$ 关系图

 图 4 $S_v-T \cdot \lg(\mu_r + 0.1)$ 关系图

数和均方差分别为 0.974 和 0.328, 表明 $S_v-T \cdot \lg(\mu_r + 0.1)$ 相关性很好, 因此最终得到高含沙水流挟沙能力公式为

$$S_{v*} = 0.3551 \left[\frac{\lg(\mu_r + 0.1)}{\kappa^2} \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \frac{r_m}{r_s - r_m} \cdot \frac{U^3}{gR\omega} \right]^{0.72}. \quad (35)$$

上式反映了水流处于输沙平衡状态下水力泥沙诸因子对挟沙能力的制约关系, 从理论上讲, (35)式可用于一般挟沙水流挟沙能力的计算, 尤其适用于高含沙水流.

这里需特别指出的是, 对于某一特定河流, 受到前述实验实测资料范围的限制, 可以采用

相应的现场实测资料重新拟合确定并修正(34)式中的系数 p 和指数 N 数值, 如此确定的挟沙能力表达式将会更加切合实际.

4.2 挟沙能力公式的验证

4.2.1 基本参数的确定

要使高含沙水流挟沙能力(35)式达到实用阶段, 首先必须确定公式中所涉及的有关参数, 包括相对黏度 μ_r 、宾汉极限切应力 τ_B 或 τ_{BT} 、阻力系数 f_m 及卡门常数 κ .

根据我们验证的结果^[3], 可以直接采用文献[46,47]研究结果计算阻力系数 f_m 、相对黏度 μ_r 和宾汉极限切应力 τ_B 或 τ_{BT} , 而反映流速分布的卡门常数 κ 则由作者提出的如下公式进行计算^[48]:

$$\kappa / \kappa_0 = 1 - 1.5 \lg \mu_r (1 - \lg \mu_r), \quad (36)$$

式中当 $\mu_r > 10$ 时, $\kappa / \kappa_0 = 1$, κ_0 为清水的卡门常数 κ , 取值为 $\kappa_0 = 0.4$.

4.2.2 验证资料的选取

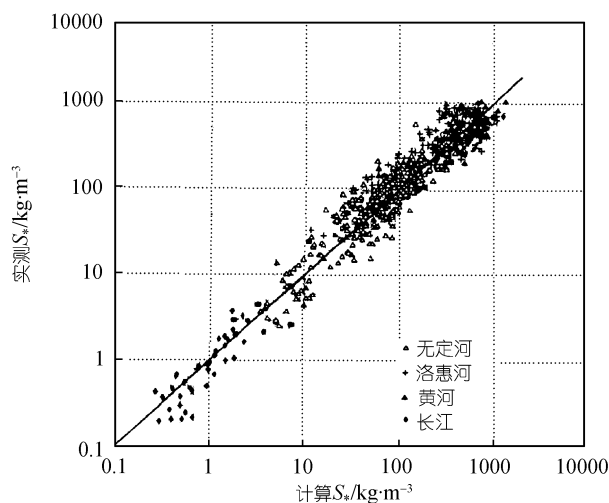
为了反映验证资料的广泛性, 我们不仅收集了黄河中下游、无定河和洛惠渠等天然多沙河道的实测资料, 而且还收集长江中游新厂站的实测资料. 在资料选取方面, 注意到水力泥沙因子变化不大和断面形态较稳定等基本条件, 以便尽量使天然河道水流处于一种相对稳定的平衡或者微冲微淤的状态. 所选择的 536 组验证资料, 既具备完整的水力泥沙数据, 也兼有悬沙与床沙级配数据资料, 公式验证所采用的野外实测资料基本情况见表 3.

表 3 公式验证所采用的实测资料

资料来源	测站	测量时间	组次	含沙量范围 $S/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粒径范围 d/mm
黄河中下游	花园口等 7 站	1958~1988	266	2.91~605.00	0.005~0.25
无定河	丁家沟站	1964-07~08	90	43.40~1051.00	0.01~0.50
洛惠渠	东干渠、中干渠、洛西干渠	1974~1980	140	6.00~893.00	0.007~0.50
长江	新厂站	1982~1985	40	0.20~3.76	0.005~0.25
合计			536		

4.2.3 验证结果

采用以上选取的 536 组现场实测水流、泥沙及河床实测数据资料, 依据挟沙能力(35)式得出挟沙能力计算值 S_* , 建立计算值 S_* 与输沙平衡时实测含沙量 S 比较关系图(图 5), 由图 5 可见, 无论含沙量的高低, 验证点据均紧密分布在 45° 斜线的两侧, 而且计算值与实测值在双对数坐标上相关系数达到 0.965, 均方差为 0.414, 计算值与实测值比值处在 0.5~2.0 范围内即计算值与实测值偏差处在 $\pm 50\%$ 之内所占比例达到 85% 以上. 以上采用实测资料验证结果表明, 采用本文(35)式计算得出的挟沙能力 S_* 与实测值 S 相符合的程度令人满意, 而且应用该公式能正确地揭示高含沙水流输沙特性^[49], 即在高含沙水流中, 即使含沙量进一步增大也不会给水流输沙造成更大的能量负担, 从而使高含沙水流具有“多来多排”等输沙特性, 充分证明应用(35)式计算高含沙水流挟沙能力 S_* 是可靠的、可信的, 是可以用于计算高含沙水流挟沙能力 S_* .

图 5 挟沙能力计算值 S^* 与实测值 S 比较

5 结论

(i) 本文基于固液两相挟沙水流紊动能方程, 经过详细理论推导提出了悬移质运动效率系数表达式, 以此为出发点进而得出水流挟沙能力的结构公式, 为建立挟沙能力的定量关系式奠定了坚实的理论基础.

(ii) 应用天然沙(70 组)和粉煤灰(45 组)两种水槽平衡输沙实验实测资料, 确定水流挟沙能力结构公式中有关参数, 最终得出高含沙水流挟沙能力公式, 而且该公式可以将高、低含沙水流挟沙能力统一起来, 具有很强的实用性.

(iii) 通过应用大量的黄河、无定河、长江等天然河流实测资料, 对水流挟沙能力公式进行检验, 特别是对高含沙水流挟沙能力进行验证, 结果表明本文提出高含沙水流挟沙能力公式可靠性较好, 可以用于挟沙能力的计算.

(iv) 值得指出的是, 在本文研究中水流挟沙能力主要是指在一定的水流泥沙条件下单位水体所能挟带和输送的全部泥沙数量, 未涉及到床沙质与冲泻质的划分问题. 但我们主张采用颗粒粒径分组计算方法来提高挟沙能力计算精度, 对此尚有待于今后进一步加以完善.

致谢 本文两个高含沙水流输沙实验分别是在清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室和黄河水利科学研究院的玻璃水槽中完成的, 在实验研究过程中得到了清华大学王光谦、张红武等教授们的亲切指导, 也得益于两个实验室同行专家的大力帮助与支持, 在此表示由衷的感谢.

参考文献

- 1 Gilbert G K. The transportation of debris by running water. US Geol Sur Prof Pap, 1914, 86: 59
- 2 王光谦. 河流泥沙研究进展. 泥沙研究, 2007, 2: 64—81
- 3 舒安平. 高含沙水流挟沙能力及输沙机理的研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 1994. 22—100
- 4 Einstein H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Bulletin, U S Dept of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950, 1026: 71
- 5 Einstein H A, Ning C. Transport of sediment mixture with large range of grain sizes. Sediment Series No.2, Missouri River Div, Omaha: U S Corp of Eng, 1953. 49
- 6 Velikanov M A. Alluvial Process. Moscow: State Publishing House for Physical and Mathematical Literature, 1958. 241—245
- 7 武汉水利学院水流挟沙力研究组. 长江中下游水流挟沙力研究. 泥沙研究, 1959, (2): 54—73
- 8 Yang C T. Incipient motion and sediment transport. J Hydraul Eng, ASCE, 1973, 99(10): 1679—1704
- 9 Yang C T. Minimum unit stream power and fluvial hydraulics. J Hydraul Div. ASCE, 1976, 102(7): 769—784
- 10 Yang C T, Molinos A. Sediment transport and unit stream power function. J Hydraul Div, ASCE, 1982, 108(6): 774—793
- 11 Yang C T. Sediment transport and river engineering. Proc of 3rd Inter River Sedimentation. Mississippi: University of Mississippi, 1986. N7—132
- 12 曹如轩. 高含沙引水渠道输沙能力的数学模型. 水利学报, 1987, (9): 39—46
- 13 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力的计算公式. 人民黄河, 1992, (11): 7—9
- 14 费祥俊, 舒安平. 多沙河流水流输沙能力的研究. 水利学报, 1998, (11): 38—43
- 15 刘兴年, 曹淑允, 黄尔, 等. 粗细泥沙挟沙能力研究. 泥沙研究, 2000, (4): 35—39
- 16 宾国仁, 董凤舞. 波浪和潮流的挟沙能力. 科学通报, 1995, 40(5): 443—446
- 17 刘峰, 李义天. 新的水流挟沙力计算公式. 长江科学院院报, 1997, (3): 17—20
- 18 余明辉, 杨国录, 刘高峰, 等. 非均匀沙水流挟沙力公式的初步研究. 泥沙研究, 2001, (3): 25—29
- 19 郭庆超. 天然河道水流挟沙能力研究. 泥沙研究, 2006, (5): 45—51
- 20 王炎良. 长江下游河道不同时段水流挟沙力探讨. 人民长江, 2006, 37, (12): 51—53
- 21 Cellino M, Graf W H. Sediment-laden flow in open-channels under noncapacity and capacity conditions. J Hydraul Eng, ASCE, 1999, 125(5): 455—462 [\[DOI\]](#)
- 22 Huang C, Wells L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion processes: Model concepts and reality. Earth Surf Proc Landf, 1999, 24 (6): 503—516 [\[DOI\]](#)
- 23 Song Z Y, Zhang W S, Kong J, et al. Optimum approach to determine the coefficients in sediment-carrying capacity formula. Proc of the 9th Inter Symposium on River Sedimentation. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 1462—1466
- 24 Milhous R T. Climate change and changes in sediment transport capacity in the Colorado Plateau. USA: Sediment Budgets, 2005, 2(292): 271—278
- 25 Yang S Q. Sediment transport capacity in rivers. J Hydraul Res, 2005, 43(2): 131—138
- 26 Yang S Q, Koh S C, Kim I S, et al. Sediment transport capacity—An improved Bagnold formula. Int J Sediment Res, 2007, 22(1): 27—38
- 27 Dieter R. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. J Hydraul Eng, ASCE, 1991, 117(11): 1419—1439 [\[DOI\]](#)
- 28 许炯心. 河型对含沙量空间变异的响应及其临界现象. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1997, 27(6): 548—553
- 29 Xu J X. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the loess plateau of China. Catena, 1999, (36): 1—19
- 30 Xu J X. Grain-size characteristics of suspended sediment in the yellow river China. Catena, 1999, (38): 243—263
- 31 Guo J. Logarithmic matching and its application in computational hydraulics and sediment transport. J Hydraul Res IAHR, 2002, 40(5): 555—566

- 32 Cao Z X, Gareth P D, Paul C L. Shallow water hydrodynamic models for hyperconcentrated sediment-laden floods over erodible bed. *Adv Water Resour*, 2006, (29): 546—557
- 33 舒安平. 水流挟沙力公式的验证与评述. *人民黄河*, 1993, (1): 7—9
- 34 曹文洪, 舒安平. 潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力研究述评. *泥沙研究*, 1999, (5): 74—80
- 35 陈雪峰, 陈立, 李义天. 高、中、低浓度挟沙水流挟沙力公式的对比分析. *武汉水利电力大学学报*, 1999, (32)5: 1—5
- 36 Wang G Q, Xia J Q, Zhang H W. Theory and practice of hyperconcentrated sediment-laden flow in China. *Adv Hydraul Water Eng*, 2002, 1-2: 1055—1071
- 37 张羽, 洪建, 李远发, 等. 黄河水流挟沙力公式的验证. *人民黄河*, 2006, (11): 16—18
- 38 吴腾, 李远发, 洪建, 等. 聚类统计方法在高含沙水流挟沙力公式验证中的应用. *水利学报*, 2007, 38(7): 852—856
- 39 韩巧兰, 王艳平, 王敏, 等. 杨国录水流挟沙力公式验证及看法. *吉林水利*, 2007, (7): 4—8
- 40 张红武, 张清, 江恩惠. 悬移质挟沙水流研究中的几个问题. *全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集*, 1992: 67—74
- 41 陈立. 高含沙水流流变参数和阻力的变化规律. *武汉水利电力学院学报*, 1992, 25(4): 384—392
- 42 Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics. *U S Geop Surv, Prof Paper*. 1966, 4220I: 1—37
- 43 钱宁, 万兆惠. *泥沙运动力学*. 北京: 科学出版社, 1986. 346—363
- 44 舒安平. 悬移质运动效率系数初步分析研究. *武汉水利电力学院学报*, 1992, 25(S1): 133—138
- 45 舒安平, 任裕民. 高含沙水流流速的研制与应用. *泥沙研究*, 2007, (4): 59—64
- 46 费祥俊. 伪均质流紊流阻力的研究. *水利学报*, 1990, (12): 48—54
- 47 费祥俊. 黄河中下游含沙水流黏度的计算模型. *泥沙研究*, 1991, (2): 1—13
- 48 舒安平, 刘青泉, 费祥俊. 高低含沙水流流速分布的统一规律. *水利学报*, 2006, 37(10): 1175—1180
- 49 舒安平, 张科利, 费祥俊. 高含沙水流紊动能转化与耗散规律. *水利学报*, 2007, (38)4: 383—388