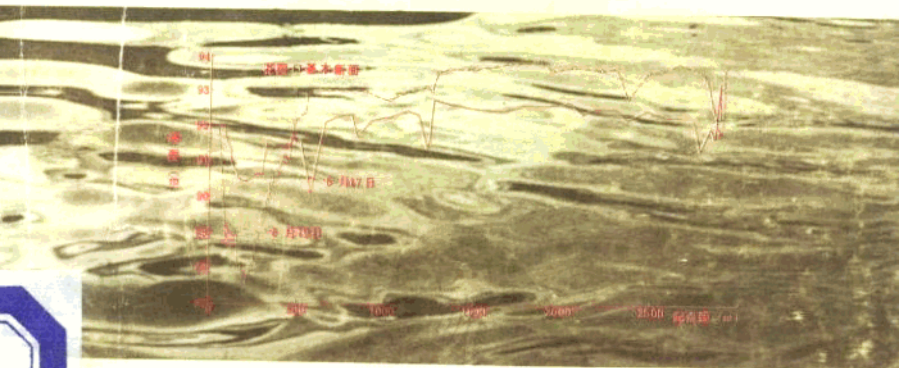


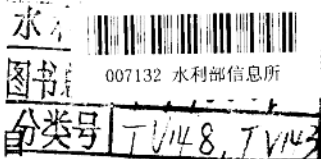
国家自然科学基金项目

黄河高含沙水流 运动规律及 应用前景

齐 璞
赵文林 编
杨美卿



国家自



黄河高含沙水流运动规律 及应用前景

齐 璞 赵文林 杨美卿 编

科 学 出 版 社

1993

2012/35 08

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书收集有关高含沙水流的研究论文 21 篇,主要介绍黄河高含沙水流的物理流变特性、运动特性和输移规律,以及利用高含沙水流减少黄河下游河道淤积,促进黄河治理等有关内容。

本书可供从事泥沙研究的科技人员、治黄工作者和大专院校有关专业师生以及研究生参考。

黄河高含沙水流运动规律 及应用前景

齐 璞 赵文林 杨卫卿 编

责任编辑 杨家福 胡庆泉

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

黄河水利委员会印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 6 月 第一版 开本:787×1092 1/32

1993 年 6 月 第一次印刷 印张:11 印张

印数:0—1200 字数:247 千字

ISBN 7-03-003609-3/P·684

定价:7.8 元

序一

黄河是世界上泥沙最多、治理最难的一条大河,随着上游龙羊峡、刘家峡等大型水库投入使用,汛期进入河道的水量大幅度减少,下游水少沙多的矛盾更加突出.黄河流经的西北、华北地区均严重干旱缺水,急需得到更多水资源的补给.如何更充分地利用黄河有限的水源,最大限度地满足这一需求,是黄河开发治理中的一个重要问题.

本书对高含沙水流的物理流变特性、运动特性、输沙特性等方面进行了理论研究,并结合黄河实测资料研究了河道输沙规律,认为窄深河槽具有极强的输沙能力,若能利用河道输送高含沙水流入海,可减少河道淤积,大量节省输沙用水.这是一个值得探索的研究课题.

黄河高含沙水流研究,从50年代钱宁教授开创距今已有几十年的时间,研究内容逐渐从理论发展到治黄应用.当前如何结合黄河已有和正在兴建中的工程,进行更加合理的调水调沙,各方面都在开展积极的研究,希望水利界的老老同志团结协作,共同努力,争取在黄河高含沙水流理论与实践,做出更大贡献.

钱宁

序二

1953年,我遵照竺可桢副院长的指示,参加由张含英副部长率领的黄河中游水土保持考察团,对黄河问题开始有一些直接的认识.自此以迄70年代,一直认为黄河隐患在于多沙,水土保持是根治河害的唯一途径.

1978年我出访美国,著名学者 G. Wolman 接待了我.作为钱宁教授的至交,他殷挚地询问钱宁教授的情况.他谈到:美国从30年代起,50年间对水土保持投入很多人力物力,却因农民不乐于接受,收效甚微.美国地多人少,自然条件又比中国好,保持土壤尚如此不易,黄河中游自更难上加难.从此以后,我便经常留意寻求又省又快,既能使当地农民有看得见、拿得到的经济效益,并能有效地控制侵蚀的措施,同时还探索其他解决河害的途径.

根据近10年的见闻,我相信:(1)自然界中存在着有希望的因素和条件,可以利用它们来设计为当地农民所接受的控制侵蚀的措施;(2)自然界中也存在着有希望的因素和条件,可以利用它们来解决高含沙水流所带来的河害.朝这两个方向的努力相辅而行,根治黄河,决不是可望而不可即的空想.以下就后一途径再谈几句话.

以70年代末期为开端,中国研究河流泥沙的科技人员对高含沙水流的流变特性、运动特性和输沙特性,进行了一系列的试验,对高含沙水流塑造窄深河槽及在窄深河槽中高含沙水流的强大输沙能力获得了新的认识,在三门峡水库采用蓄清排浑运

• ■ •

用方式取得了显著效果。所有这些清楚地表明,可以利用黄河高含沙水流的特性,结合适当的水库联合运用与必要的工程措施,改造黄河下游的宽浅河道成为稳定的具有长距离输送大量泥沙能力的通道。

由于黄河上中下游互相关联,自然因素与人为影响又非常复杂,尚需进行大量工作,才能作出稳妥可靠的设计。小浪底工程业已动工,有必要加速这项工作,以充分发挥小浪底水库的作用,早日实现上述理想。所取得的成果不仅可以用于治黄,也可用于其他河流及水利工程以外的事业。

《黄河高含沙水流运动规律及应用前景》一书,收集了 21 篇论文。手此一卷可概见这一方向的工作业已取得的成就,需要进一步研究的问题以及最后可得到的结果。此书的出版将使高含沙水流的研究受到有关方面的重视和支持,吸引更多科技力量协同工作。

我行年八十,来日无多,仍翘企能于就木以前,喜见土壤保持与高含沙水流两个研究领域确实地掌握了根治河害,永庆安澜的技能。黄河历史上灾害“史不绝书”将成为“史不再书”。中原人民咸登衽席之安,则古往今来,无数为治黄而殚精竭虑的先驱,亦可欣然瞑目矣。

黄秉维

目 录

序一	钱正英 (I)
序二	黄秉维 (II)

物理流变特性

黄河中下游含沙水流粘度的计算模型	费祥俊 (1)
高含沙水流运动中的宾汉切应力	费祥俊 朱程清 (20)
高含沙浆体絮凝的微观结构及其流变参数	杨美卿 (39)

运动特性

高含沙均质水流基本特性的试验研究	钱意颖 杨文海 赵文林等 (56)
1977 年黄河下游高含沙洪水的输移与演变分析	齐 璞 赵业安 樊左英 (75)
“揭河底”冲刷现象的分析	万兆惠 宋天成 (92)
黄河高含沙水流的阻力特性与计算	齐 璞 韩巧兰 (106)
高含沙层移质运动的试验研究	杨美卿 王立新 (122)
粘性土及粘性土夹沙的起动规律研究	华景生 万兆惠 (137)

输沙特性

- 黄河高含沙洪水的输移特性及河床形成…………… 齐 璞(150)
- 黄河艾山以下河道输沙特性研究
…………… 齐 璞 王昌高 孙赞盈(167)
- 无角隅窄深渠槽——高浓度输送渠槽的最佳形态
…………… 钱善琪(201)
- 悬移质高含沙输沙特性的研究
…………… 曹如轩 钱善琪 程 文(210)
- 高含沙洪水在三门峡水库中输移分析…………… 齐 璞(225)

应用前景

- 黄河中下游水沙变化趋势…………… 齐 璞(237)
- 黄河下游游荡性河道的形成与改造途径
——兼论河槽形态与河型 …………… 齐 璞(249)
- 利用窄深河槽输沙入海调水调沙减淤分析…………… 齐 璞(267)

输沙计算模式

- 泥沙数学模型在黄河下游的应用…………… 万兆惠 宋天成(286)
- 调水调沙引起河槽形态迅速调整时的输沙计算方法
…………… 齐 璞 梁国亭(302)
- 黄河一维泥沙数学模型
…………… 王新宏 曹如轩 武周虎等(316)
- 河槽断面简化对输沙能力确定的影响
…………… 华景生 万兆惠(332)
- 后记…………… 万兆惠

黄河中下游含沙水流粘度的计算模型^{*}

费祥俊

(清华大学)

[摘要] 本文提出了细颗粒悬液粘度的计算模型,该模型经黄河中下游十余个悬沙级配的试验验证,并与国内多家对悬液粘度试验结果进行比较,表明它具有较好的适应性.本文还列举了一些应用该模型计算不同条件下含沙水流的粘度及有关的水流泥沙运动参数的例子.

1. 引言

黄河中下游由于水流含沙量高,泥沙的存在对水流运动有强烈的反馈作用,因此与一般挟沙水流相比,有不少值得重视的特点,其中最明显的是水流挟沙力及含沙水流的阻力.

大量野外资料表明,黄河中下游的某一个站在相同流量下的输沙率与上游站来水含沙量有关,上站来水含沙量越大,该河段的输沙率也越大,即所谓的“多来多排”.有些科技工作者,根据实测资料整理出输沙率的经验公式

* 国家自然科学基金资助项目,试验用悬沙样品由黄委会水文局及有关水文站提供.本文原载《泥沙研究》1991年第2期.

$$Q_s = KQ^\alpha S_\pm^\beta \quad (1)$$

这里 Q 为流量, Q_s 为输沙率, $S_\pm$ 为上站含沙量, 系数 K 及指数 α, β 在不同河段和不同条件下各有不同的数值。

野外观测资料还表明, 黄河中下游河道的糙率很低, 在相同流量下, 水流阻力系数随含沙量增加有明显减少的现象, 图 1 所示是山东河段在流量 $Q=800\sim 1000\text{m}^3/\text{s}$ 时, 糙率系数 n 值随着含沙量增加而变小的趋势是明显的。

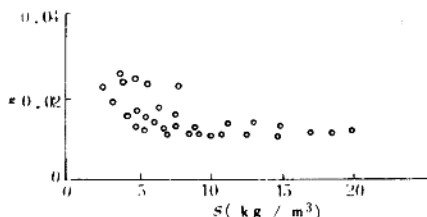


图 1 $n-S$ 的关系^[1]

以上两个问题虽然十分重要, 并早已众所周知, 但尚无统一的认识和定量的表达方法。此外, 还有因水流含沙量增大而引起的其他问题, 如泥沙颗粒在浑水中的沉速, 悬浮功随含沙量的变化以及由紊流过渡到层流的判别等; 要对这些问题作理论上的说明, 必须充分掌握高含沙水流的物理特征, 而悬液粘性及其变化规律将是其中最核心的问题。悬移质含沙量增加, 使水流的粘性提高, 因而水流挟沙力增加, 这和水温下降使水流挟沙能力提高具有同样性质。黄河中下游的输沙率经验公式(1)中引入上站含沙量因子, 实际上也即引入了水流粘性的因子。黄河中下游悬移质泥沙颗粒很细, 因此含沙水流的粘性对以上问题的影响显

得更突出。

2. 泥沙悬液粘性的试验研究

2.1 现有的试验研究成果

近年来对高含沙水流流变特性作了很多试验研究,提出各种流变参数的计算公式,但含沙水流的流型及粘性与泥沙矿物成分、含沙量体积比浓度、固体颗粒组成、以及水质和温度等很多因素有关,由于影响因素很多,难以通过有限的试验归纳出有一定普遍意义的计算公式。多数的试验研究结果,给出在一定的固体颗粒组成及其特性下不同浓度的粘滞系数或流变系数,而实际情况是河道中不同浓度的高含沙水流具有不同的粒度组成,因此这类试验研究结果的实用性受到限制,无法预料不同含沙量条件下泥沙悬液的粘性。

1985年我们以爱因斯坦在球形颗粒的稀悬液条件下,推得的相对粘度理论公式 $\mu/\mu_0 = (1 + 2.5S_r)$ 为基础,分析求得不同粒度组成下高浓度悬液的相对粘度表达式,并通过黄河花园口淤泥及掺入不同含量较粗颗粒配制成 10 余组泥沙悬液,作了比较系统的粘性试验,最后得出高浓度泥沙悬液相对粘度的公式^[2]为

$$\mu/\mu_0 = \left[1 - K \frac{S_r}{S_{rm}} \right]^{-2.5} \quad (2)$$

式中,系数 K 系对固体浓度的修正系数,即除考虑细颗粒表面的薄膜水外,又考虑了粒间封闭水对浓度的影响; S_r 和 S_{rm} 分别为固体体积比浓度及其极限浓度; μ 和 μ_0 分别是泥沙悬液及同温度清水的粘滞系数。悬液中当固体浓度较高时,已属非牛顿流

体,可用宾汉模型来描述其剪切力与切变率关系.宾汉极限剪切力的试验结果可用下列经验式表达^[2]:

$$\tau_B = 9.8 \times 10^{-2} \exp(Be + 1.5) \quad (3)$$

式中, τ_B 以 N/m^2 计;系数

$$B = 8.45 \quad e = \frac{S_e - S_{\infty}}{S_{\infty}}$$

这里 S_{∞} 为由牛顿体转变到非牛顿体的临界浓度(详见后文).公式(2)及(3)的特点是除了浓度 S_e 作为影响悬液流变参数的因素以外,且加入了反映颗粒组成特性的 S_{∞} 值对流变参数的影响,使其应用范围明显扩大.但以上关系式还存在缺点:首先,关系式(2)和(3)虽然对于试验的 10 余种组样品的几十个数据有良好的相关关系,但还没有用更多的悬沙级配取样对以上关系式作进一步的检验,其中包括以粘度趋近无限大时的浓度定义的所谓极限浓度 S_{∞} 及系数 K 也需要进行改进;其次,关系式(2)和(3)仍无法表示出由于泥沙颗粒矿物成分不同对流变参数的影响,因此只能用于泥沙矿物成分基本相同的同一流域或产沙条件基本相同的情况.这样,影响泥沙悬液流变参数的主要因素将是固体体积浓度及粒度组成.这种设想是符合实际的,也还需要进一步通过野外悬沙取样进行试验,用更多的数据进行检验.

2.2 黄河中下游含沙悬液的粘性试验及其结果

为验证上述泥沙悬液粘性的表达式是否适用于黄河中下游的情况,我们采集了黄河中下游有关水文站的悬沙沙样,利用内径 0.582cm、长 120cm 的立管式粘度计,仔细地作了各级浓度下的流变试验.这些悬沙沙样的特征值如表 1 所示.

表 1 悬沙级配的特征值

站名	γ_s (t/m ³)	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	$d < 0.01$ mm (%)	$\sum \frac{P_i}{d_i}$
神 木	2.64	0.160	0.700	6	22
绥 德	2.69	0.050	0.092	9	38.8
延 川	2.66	0.035	0.070	22	70.6
华 县	2.67	0.029	0.100	20	70.5
潼 关	2.65	0.022	0.075	29	110.7
大 宁	2.70	0.030	0.070	26	134.6
大 村	2.70	0.023	0.060	28	140
丁家沟	2.70	0.034	0.074	17	140
花园口	2.66	0.005	0.035	70	700
武 功	2.62	0.014	0.036	37	220

试验按 10 个样品进行, 每个样品的体积比浓度变化 4~7 次, 其总的范围为 $S_r = 0.072 \sim 0.433$, 相当于含沙量 $190 \sim 1150 \text{ kg/m}^3$, 共 54 组。试验结果进一步表明, 被测悬沙级配的黄河泥沙悬液在高浓度时均可用宾汉模型来描述其流型。将试验结果的悬液刚度系数相对值 $\eta_r = \eta/\mu_0$ 及宾汉剪切力 τ_B , 分别与悬液体积比浓度 S_r 点绘关系, 如图 2 及图 3 (为使图清楚, 并未将全部点据绘出) 所示, 在半对数纸上上述试验点据相当集中, 各自成很有规律的直线。各站 $\eta_r - S_r/(1 - S_r)$ 关系因颗粒粗细组成不同而有不同的斜率。在浓度较低时, $\eta_r - S_r/(1 - S_r)$ 关系不能用直线外延到原点, 这正是由于在浓度较低时颗粒间封闭水的存在, 使有效浓度有所提高的原因。而在浓度增加时, 颗粒间的封闭水逐渐被表面束缚水所置换, 因而使式 (2) 中的改正系数 K 减少, $\eta_r - S_r/(1 - S_r)$ 关系线近乎直线。图 3 中 $\tau_B - S_r$ 关系线因泥

沙粗细组成不同使横坐标上的截距不同;为测验时方便起见,我们采用 $\tau_B = 0.5 \text{ N/m}^2$ 时的浓度 S_{rv} 为牛顿体与非牛顿体(宾汉体)的临界浓度,这样各站 $\tau_B = 0.5 \text{ N/m}^2$ 线上(如图中所示)的截距即为相应的牛顿体过渡到非牛顿体的临界浓度 S_{rv} . 图 3 表明 S_{rv} 值因悬沙级配组成加粗而增大. 符合关系式

$$S_{rv} = 1.26 S_{rm}^{3/2} \quad (4)$$

图 2 及图 3 的关系明显地指出颗粒组成不同对悬液流变参数的影响,在同一体积浓度下,不同粒度组成的悬液,其流变参数可以相差几倍到几十倍. 因此,以往有些研究仅仅以体积浓度作为变量来反映流变参数的大小是远远不能满足要求的.

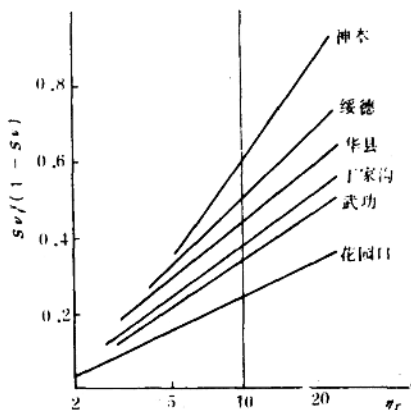


图 2 $\tau_r - \frac{S_v}{1 - S_v}$ 关系

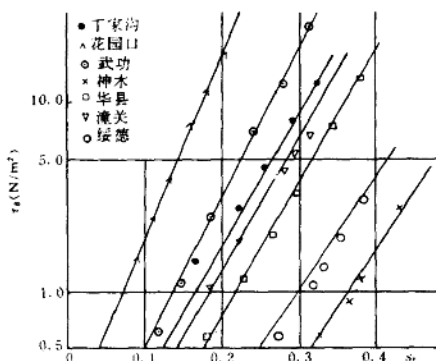


图3 η_B-S_w 关系

3. 泥沙悬液粘性计算模型

图2和图3所示为黄河中下游10个悬沙取样流变试验结果的一簇关系线. 在引入反映颗粒级配组成的参数 S_{lm} 以后, 可以将它们统一成单一的关系线. 对细颗粒较多的级配组成, 由于颗粒比表面积大, 颗粒之间的空隙率大, 极限浓度 S_{lm} 相对较低, 而粗颗粒的极限浓度相对较高; 此外, 颗粒组成不均匀, 由于细颗粒可以填充在粗颗粒的空隙中, 使颗粒间的空隙减少, 极限浓度增大. 而对均匀或接近均匀的颗粒组成, 由于不具相互填充作用, 粒间的空隙较大, 极限浓度就较低. 在文献[2]中, 我们曾按流变试验结果将 $\eta_r \rightarrow \infty$ 时的相应浓度定义为极限浓度, 并与被

测沙样的比表面积建立经验关系,即 $S_{sm}-\Sigma(p_i/d_i)$ 关系,这里 d_i , p_i 分别为某一粒径级的平均直径及相应的重量百分比。根据 10 余组试验资料得到的上述关系虽然良好,但这一关系线的下端精度不高,这是因为利用水文年鉴的颗粒级配曲线,其最小粒径只到 $d=0.005\text{mm}$ 或 $d=0.007\text{mm}$ 。对于悬沙粒径较细的级配, $d < 0.005\text{mm}$ 往往尚占全沙较大的重量百分比,如果将粒径小于 0.005mm 的全部泥沙都按接近 $d=0.005\text{mm}$ 来计算 p_i/d_i ,必然带来误差。根据对黄河中下游悬沙级配组成进行仔细分析,如果 $d=0.005\text{mm} \leq d_{10}$, 则最后一组颗粒的 p_i/d_i 可按 $p_i/d_i = \frac{\eta_{d=0.005}}{0.005 \times 0.8}$ 计算;如果 $d=0.005\text{mm} > d_{10}$, 则宜将颗分曲线顺势外延到 d_{10} , 再按 $p_i/d_i = \frac{0.10}{d_{10} \times 0.8}$ 计算最后一组粒径的比表面积。这样处理误差较小,并使 $S_{sm}-\Sigma(p_i/d_i)$ 关系得到改善。在半对数纸上(见图 4)这一关系可用直线方程表达。

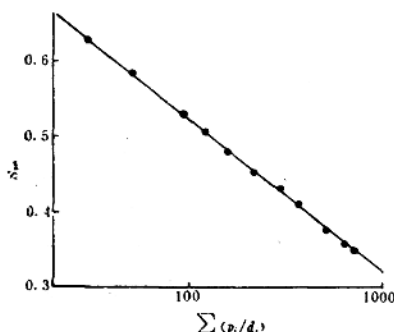


图 4 $S_{sm}-\Sigma p_i/d_i$

$$S_{\infty} = 0.92 - 0.21 \lg \Sigma (p_i/d_i) \quad (5)$$

当 $\Sigma \frac{p_i}{d_i} \leq 20$ 时, 由于颗粒较粗, 颗粒比表面积大小不能很好反映极限浓度的大小, 应用式(5)时应慎重。好在黄河中下游悬沙组成较细, 如 $\Sigma \frac{p_i}{d_i} \leq 20$ 的情况十分罕见。利用式(5), 可由悬沙颗粒级配确定相应的极限浓度。这样, 如将黄河中下游 10 个悬沙级配的流变试验结果的图 2 及图 3 引入级配因素, 重新以 $\eta_r - S_r/S_{\infty}$ 及 $\tau_B - \frac{S_r - S_{\infty}}{S_{\infty}}$ 为坐标进行点绘, 其结果如图 5、图 6 所

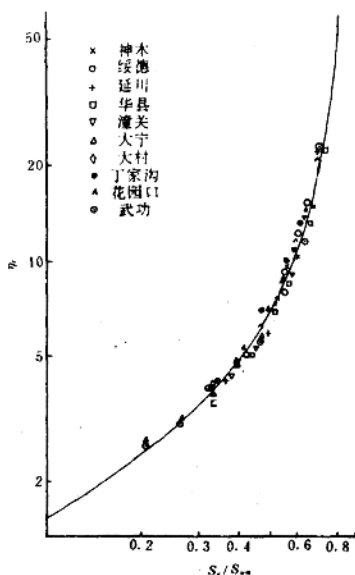


图 5 不同悬沙试样的 $\eta_r - \frac{S_r}{S_{\infty}}$ 关系