

河道水流泥沙运动基本理论研究进展

陈雄波, 俞国青, 唐洪武

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:对泥沙运动基本理论研究的近期进展进行综述,并作了简要的评述:挟沙后的紊动强度变化,应考虑是推移质颗粒还是悬移质颗粒,并将固相和液相分开考虑;研究床面抗冲性时引入“床面惯性”,认为河床具有记忆作用,可用量化的指标来表示;从两相流能量方程出发推导挟沙力公式;光电高新技术引入流场测量;将混沌动力学、分形几何学、人工神经网络方法和熵原理用来研究水流泥沙运动,等等.以上这些理论和做法已经取得了丰硕的成果.

关键词:泥沙运动;流速分布;紊动强度;河道阻力;冲淤变动;综述

中图分类号:TV14

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)02-0059-06

包括河流泥沙动力学和河道演变学在内的泥沙研究,它的母体在欧美为水力学,属技术科学范畴;在前苏联常归之于地球物理学,属基础科学范畴.江河里的泥沙,都是从流域地表侵蚀、沟壑冲蚀而来.影响流域地表侵蚀所形成的流域产沙量的因素有:降雨强度、风力、地形特征、土壤结构、植被情况、人类活动等.目前,人类活动对生态环境的影响日趋剧烈,1998 年长江、松花江特大洪水留给人们的思考很多,其中之一是有些河段的洪峰流量并没有达到历史记录最大,但最高水位超过或接近历史最高记录.出现上述现象的最主要原因是河道和湖区内的泥沙淤积.以长江为例,现在干流的淤积速度估计为 0.01 m/a ,洞庭湖 1951 ~ 1996 年平均每年淤高 0.029 m ,鄱阳湖的淤积也较严重.像这样“小雨量,高水位”和“小流量,高水位”的现象,在太湖流域、淮河、汾河、渭河等均有出现.1998 年洪水造成的直接经济损失达 2000 亿元.国外也有很多泥沙问题,如水库下游清水侵蚀、港口航道淤积、岸滩和桥墩冲刷、泥石流灾害等.

泥沙问题引起了学者们的广泛关注.20 世纪 90 年代中期以前,对欧美各国的泥沙研究进展,王兆印等^[1]已经作了详细的叙述.王光谦^[2]对泥沙学科的特点进行了简要说明,介绍了我国泥沙研究取得的代表性重要成果,讨论了泥沙学科未来的发展趋势.张红武^[3]介绍了河工动床模型相似率研究进展.本文将重点介绍 20 世纪 90 年代中后期以来国内外泥沙运动基本理论的研究进展情况.

1 水流流速分布的研究

水流流速分布是计算阻力的基础,要分析挟沙水流,先要分析清水水流.传统水力学在 Prandtl 混合长假设的基础上,认为水流流速服从对数分布.1993 年, Bartenblatt^[4]根据紊流卡门相似理论,在研究光滑壁紊流的标度律时使用不完全自相似假设,得到流速分布规律为

$$\frac{u}{u_*} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \ln Re + 2.5 \right) \left(\frac{u_* y}{\gamma} \right)^{\frac{3}{2 \ln Re}} \quad (1)$$

式中: u 为距离壁面深度为 y 处的速度; u_* 为摩阻流速; Re 为雷诺数; γ 为运动粘性系数.肖勇等^[5,6]用相似理论分析了河道水流流速分布的结构形式.分析结果表明:流速分布的指数型公式和对数型公式具有同样严格的理论基础,即相似理论,但是它们却基于本质上不同的两类假设,即不完全自相似假设和完全自相似假设.不完全自相似假设反映了壁面效应;完全自相似假设则忽略了壁面效应.通过对壁面绕流结构及尼库拉兹实验资料的分析,建立了能够统一描述紊流三区(光滑区、过渡区、粗糙区)的指数型流速分布公式.

Wosnik 等^[7]引入几个新的变量,紊流分区得到的公式为对数加上尾流函数形式,用数值方法得出这些变量与雷诺数的关系,并得到了实测资料的验证.值得一提的是,大涡数值模拟(DNS)的成果也用来检测所得出的关系式的合理性.

水流挟沙以后的流速分布,1981 年 Coleman 引

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59979005)

作者简介:陈雄波(1973—),男,湖北天门人,博士研究生,主要从事河流动力学研究.

入 Coles 的尾流函数,提出挟沙水流流速分布服从尾流定律:

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta}{y} + \frac{2W}{\kappa} \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2\delta} \right) \quad (2)$$

式中: κ 为卡门常数; W 为尾流系数. 但已有很多研究指出了其缺点^[1]. 近年来,该问题的研究进一步深入. Ferro 等^[8]利用水槽实验,分析断面流速分布、尾流函数的形式,并给出了小粗糙度时尾流函数中系数的建议表达式. Nezu 等^[9]首次在水槽实验中,用激光多普勒测速仪(LDV)测量了水位变动区表面的紊动参数,他们分析了从近壁到水面的紊动情况,得出在非恒定流下卡门常数仍为 0.41.

以上这些学者在进行研究时,都应用了新的研究手段和试验技术,重视紊流内在机理与流速分布的关系. 同时,随着计算机技术的高速发展,数值模拟研究成果也用来与理论分析进行对照. 以上这些探索将使得人们对紊流这个世界难题的研究进一步深入.

2 泥沙运动与紊流强度和猝发的关系

泥沙的存在对水流紊动强度的影响是一个十分重要的问题. 关于这种影响,国内外有着不同甚至尖锐对立的观点. 王兆印等^[1]在清水或粘土悬浮液中加入粗沙后测量流场,发现平均流速减小而紊动强度增加,流速的能谱向高频率尺度方向转移,他们认为粗沙的加入增加了平均能量向脉动能量方向转移的机会,故而紊动强度增加,如果颗粒较细,在水中悬移运动,则吸收紊动能,使紊动强度减弱. Song 等^[10]在管道中进行了宾汉流体挟沙的实验,发现从静止开始粗沙厚度随流速增大而增加,但到一临界值后反而减小. 他们认为这是紊动增强后,紊动的随机性破坏了宾汉体结构,使泥沙颗粒的沉降速度加大.

Muste 等^[11]使用带鉴频器的激光测速仪,测量水中有悬浮颗粒时的平均流场和脉动流场情况. 根据仪器的分辨性能,他们将水体分为三种情况:清水、浑水中的固体颗粒和浑水中的液相. 发现浑水中固体颗粒平均速度比液相小 4%,而液相与清水流速基本相同;固体颗粒存在时摩阻流速和水面比降增加,而其他水力参数改变很少;固体颗粒的紊动强度小于浑水中的液相,且随着含沙浓度的增加差别增大,而液相与清水紊动相差无几. Best 等^[12]用相位多普勒测速仪,在水槽中测量了低强度输沙时的紊动强度、混合层长度,并与清水作了对比,发现在水槽底部紊动增强,他们分析了这种情况出现的动力机制.

总的说来,学术界认为泥沙存在对紊动强度既有增强的一面,也有减弱的一面,至于表现为哪一

种,与泥沙粒径、浓度、水流强度以及颗粒是否悬浮等有关,目前尚未有公认的量化成果. 笔者认为, Muste 将浑水中的固体颗粒与液相区分开加以测量和分析,是非常值得借鉴的.

从 20 世纪 50 年代起, Kline 等许多学者用氢气泡等对平板边界层中的紊流的发生进行了大量的观察,发现在一定的条件下,壁面上有个别点突然爆发为紊流斑点,然后进入流动深处. 这种突然爆发为紊流斑点的现象叫猝发. 泥沙的起悬与紊动猝发有密切联系. Cao 等^[13]用猝发强度和猝发持续时间来描述这种力学机制,其中的参数用实测资料进行了率定. 他们认为更进一步的研究将有助于对猝发现象有更深刻的了解.

Nikora 等^[14]使用超声多普勒测速仪(ADV)测量准二维流场下两种泥沙未起动,一种弱动时的平均流速沿垂线分布、紊动强度、猝发频率等,发现三种情况下没有大的变化. 唯一显著不同的是弱动时卡门常数减小. 这种结果与光滑流场时情况不同. Gyr^[15]对泥沙输运与紊动猝发现象和紊动强度的关系进行了研究,并基于紊动相干结构的象限分析法进行了讨论.

当前研究紊动猝发与泥沙运动关系时,近床面泥沙跟随性、浓度难以得到可信的定量结论. 如果这一难题解决,将是泥沙基本理论的一次重大突破,对发展三维泥沙数学模型也会起到很大的推动作用.

3 河道阻力规律

对阻力问题的研究,不仅具有重要的理论意义,在生产实践上也具有重要意义. 沿程阻力系数 λ 可表示为

$$\lambda = 8 \left(\frac{u_*}{\bar{u}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: $\bar{u}$ 为断面平均流速.

如果已知流速分布,通过一定变换可得到管道和明渠相应的阻力系数. 所以肖勇等^[5,6]给出了阻力系数的表达形式,并用尼库拉兹实验资料对管道阻力系数进行了验证,结果表明符合程度好. 其他的流速公式也可得出类似的关系式,在此不作多述.

实际工作中常将河床阻力划分为河底阻力和河岸阻力两部分,河底阻力又包含沙粒阻力和沙波阻力. Robert^[16]计算了平滩流量下的沙粒阻力和沙波阻力. 发现沙波阻力可能占总阻力的 0% ~ 90%. 他指出沙波的存在将对阻力有很大的影响,但未给出具体的曲线形式. Cellino^[17]计算了床面沙波存在时的泥沙扩散系数和动量扩散系数,得到 Rouse 公式中的参数,比较了无沙波和有沙波时浓度分布的不同之处,并分析了流层结构. Sieben^[18]从理论上分析

了床沙的粗化过程.当初始状态为均匀沙时,通过解床面高程的偏微分方程,辅以初始条件得到分析解,其计算结果与实测值符合较好.随着量测技术的发展,人们对河床近底处的认识日趋深入,也相应推动着对整个动床阻力规律的探索,从微观现象的观测分析探索其宏观规律是河流动力学基本方法之一.

Wang^[19]在研究床面抗冲性时,提出了“床面惯性”的新概念,认为它是床面的一个重要特性,并将其初步应用于冲刷河床的情况.他提出的指标为

$$I_b = \frac{g_b - g_{bin}}{dD/dt} \quad (4)$$

式中: g_b 为水流的推移质挟沙力; g_{bin} 为进入河段的推移质输沙率; dD/dt 为河床冲刷率.他为了研究冲刷率,通过 100 多组清水试验和 33 组挟沙水流试验,得出了冲刷率公式和最大冲刷深度的计算方法,并指出床面惯性随泥沙的分选而增加.笔者认为,王兆印提出的“床面惯性”,以及有人提出河流具有记忆作用等,其根本的原因是河床的形态、床沙组成乃至河漫滩范围等,都是河流在较长的历史时期形成的,当上游来水来沙情况相同时,不同的河床调整的幅度、迟滞时间等显然大不一样.随着泥沙科学的发展,迫切需要引进新的定量指标来描述这种不同,所以这种方法有广阔的发展前景.实际上,淤积河床也应该有类似的指标.如果这种方法进一步深入,甚至可以认为该指标是河型的分类最重要的标准之一.

4 水流挟沙能力规律

水流挟沙能力是指在一定的水流泥沙和本河段河床组成条件下,单位水体所能挟带和输送的泥沙数量.在研究解决工程泥沙问题时,水流的挟沙能力规律是最关键的问题.因此,水流挟沙能力一直是工程界和学术界研究的核心理论问题,受到人们的普遍关注.

张瑞瑾在分析水流挟沙对其能量损失的影响时提出“制紊假说”,并建立了经典的挟沙力公式: $S_* = K \left(\frac{v^3}{g\omega R} \right)^m$. 该公式在南方少沙河流的无潮沙影响段得到了广泛的应用.余明辉等^[20]以“制紊假说”为理论基础,从能量平衡出发,考虑了浑水相对粘滞性、上游来水来沙条件和床沙级配等因素对水流挟沙力的不同影响,建立了新的非均匀沙分组水流挟沙力公式.

王士强等^[21]从床沙、推移质、悬移质互相交换、衔接的物理图形出发,在力学、随机及紊动扩散分析

基础上,提出了颗粒跃移及推移质、悬移质和全沙统一的新的非均匀沙挟沙公式,计算结果与实测值符合良好. Wu 等^[22]针对非均匀沙时的遮蔽作用和暴露作用,引入与颗粒直径和级配统计相关的修正系数,得出冲积河流非均匀沙新的方程,计算结果与实测资料符合很好. Atkinson 等^[23]以 1 506 组实验资料为依据,讨论了泥沙颗粒剪应力在浅层地表流中对输沙率的影响,认为浅水中颗粒阻力并不是主控因素.他们应用水流能量分割方法,进一步研究输沙率. Patel 等^[24]用广泛的实测资料,修正了 Misri (1984)提出的半理论公式,提出一个能联合考虑影响非均匀推移质输沙几个因素的经验公式.

王国兵^①从两相流能量方程出发,引入若干近似条件,通过解单宽输沙率的一阶线性微分方程,探讨了水流挟沙规律,结合大量的实测资料给出的计算式为

$$S_* = \frac{K}{C_0} \ln(1 + 1000 \sqrt{S_*}) \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{v}{\omega} \left(\frac{v^2}{gH} \right) \quad (5)$$

式中: S_* 为以含沙量表示的挟沙能力, kg/m^3 ; $C_0 = C/\sqrt{g}$ 为无因次谢才系数, g 为重力加速度; S_p 为以体积的百分比表示的含沙浓度; $\omega = (1 - S_p)(1 - K_\omega S_p)^{3.5} \omega_0$, ω_0 为泥沙颗粒在静水中的平均沉降速度, K_ω 为有效浓度修正系数, $K_\omega = 1 + 0.14 \sum \frac{P_i}{\sqrt{d_i}}$,

其中 P_i , d_i 分别为分组泥沙的百分含量和粒径; γ_s , γ 分别为泥沙和水的容重; v 为流速, m/s ; H 为水深, m ; K 为系数,天然沙 $K = 0.018$,电木粉 $K = 0.00475$.与天然沙和电木粉的实测资料对比表明,该计算式基本能反映水流的挟沙规律.

显然,采用固液混合流运动方程和能量方程推导水流挟沙能力,物理概念清楚,力学思路明晰,是今后主要的发展方向之一.

总的说来,以上工作或是对原有公式的改进,或从颗粒运动的必然性和随机性相结合出发,或从两相流能量方程出发,得出水流挟沙规律.固液两相流理论是研究泥沙运动的基础.由于两相流的紊流结构十分复杂,目前还没有比较成熟的理论能描述其变化规律,因此在推导时往往要作一些近似处理.而实际水流挟沙时往往处在过饱和状态或欠饱和状态,即非平衡状态下的输沙,在某一特定的水文断面也需经过多次测验才能得出规律性的认识,并且这种认识并不能无限地推广到异地.从这个意义上讲,挟沙力的研究还有待深入.

①王国兵,水流挟沙能力的探讨.南京水利科学研究院河港研究所,1997.

5 河床平面形态变化和冲淤变化

冲积河道平面形态是不断变化的. 历来在河道整治上有许多争论, 最主要的可概括为对河道人工控制程度的争论. 这问题很难简单评判, 但有两点可以明确: ①必须尊重和利用河流运动的客观规律; ②必须加大对河流的人工控制程度. 这两点看似矛盾, 但不仅可以统一, 实际上本来就是一致的. 历来都主张治河要“顺水之性”, “因势利导”, 可今天能让河流自由行动的余地实在太小了, 必须加强人为控制. 这两点相结合很困难, 但必须结合, 必须使这两方面水平都提高一步, 这样就使治河工程进入了一个新阶段. 左东启^[25]曾指出: 长江中下游平均河宽一般也就 1~2 km, 就能大体安全地宣泄 80 000 m³/s 的洪水, 入海年径流量达到 9 700 亿 m³. 而海河流域“减河”、“新河”的总宽度若干倍于长江, 淮河流域已建的入江水道、拟建的人海水道宽度加起来也超过长江, 怎么总怕泄不了水呢? 这说明我们对河道平面形态变化的认识还远远不足.

Julien 等^[26]对泥沙颗粒进行了三维稳定分析, 论述了河道几何形态变化的理论及应用. Hagerty 等^[27]讨论了近岸水流冲击导致堤防失事的计算方法. Rooseboom 等^[28]应用能量原理分析恒定输沙时粗糙度和床面形态的关系, 发现可用“床面谱”代替以前用的简单关系式, 分析了平均流速、紊动能量大小、泥沙的沉积与再悬浮的关系, 进而推断出床面形态. 为确定各种水流条件下的阻力, 同时确定床面的分类, 给出了一张图表, 用实验室和野外观测资料进行了验证. 这表明功率理论在床面形态研究中大有用武之地. 国内也有人河道横向变形进行了研究和评述^[29,30].

大江大河的平原段水流输沙主要是悬沙, 在只考虑悬沙输移的情况下河床变形方程为

$$\gamma' \frac{\partial \eta_n}{\partial t} = \alpha \omega_n (S_n - S_*) \quad (6)$$

式中: γ' 为泥沙干容重; η_n 为第 n 组泥沙粒径造成的淤积厚度; α 为第 n 组泥沙的恢复饱和系数; ω_n 为第 n 组泥沙颗粒沉降速度; S_n 为第 n 组泥沙在实际水体中的含量. 从式(6)可以看出, 河床冲淤量对恢复饱和系数的变化十分敏感. 所以 Fang 等^[31]在介绍中国泥沙科技进步时, 重点讨论的两个问题之一就是恢复饱和系数. 张红武等^[32]在评述黄河泥沙数学模型研究时特别指出: 恢复饱和系数的确定是模型的关键难点所在, 而现有河流数学模型特别是黄河中下游模型, 无论理论认识或实际经验都甚感不足. 该问题的解决程度, 是黄河数学模型完善与否

的标志之一.

刘金梅等^[33]针对非均匀床沙, 提出了床沙交换速率的新物理概念, 计算研究了不同床沙交换速率时表层床沙的粗化过程及非均匀沙含沙量恢复饱和过程, 并对恢复饱和系数进行了重点研究. 王新宏^[30]在建立的准二维泥沙数学模型中对 α 值也作了讨论, 得出了 α 随含沙量的增大而逐步减小这一初步结论.

从目前情况来看, 对恢复饱和系数的认识远远不足. 公认的观点是: 恢复饱和系数是反映悬移质不平衡输沙时水体含沙量向挟沙能力接近的参数, 它既与水流动力、泥沙条件有关, 又与地形有关, 是个复杂的函数. 对河流、水库无好的初值可言. 一般认为: 在本河段有相当多的实测资料的前提下, 可先假定 α 为某一个常数, 进行河床淤积计算后取实际发生过的的水沙及河床变形过程对模型验算之, 直至估计 α 后的结果与实测值接近为止. 如此得出的 α 值有较高的可信度, 可用于该河段的演变分析预测中. 完全从数模演算的结果反推出 α 值, 不能解释为什么黄河 α 值特别小, 而南方河流 α 值较大, 甚至还有人认为其值大于 1. α 系数的最终解决还是要靠泥沙研究基本理论的进步来完成, 如刘金梅的研究思路就是未来发展的方向之一.

6 精密量测仪器及高新技术的应用

水利学是一门传统学科, 随着科学技术的不断发展, 高新技术必将在水利行业发挥越来越大的作用. 泥沙的来源虽然早已清楚, 但来沙量、来沙过程、河床冲淤多少等无一不需要靠精确的测量仪器来给出. 仪器的精度在很大程度上决定试验的成败. 近期 Wren 等^[34]对野外工作时悬移质测量的各种常用设备进行了比较, 建议在效率和经费允许的情况下, 优先考虑超声多普勒技术. Lemmin^[35]提出了用 ADV 测试实验室和野外断面流速分布的实用方法. Song^[36]用 ADV 测量了非均匀流中的紊动量. Kim^[37]采用四种方法: 近底部水流边界层协方差、紊动能、惯性扩散、断面流速法, 用 ADV 测量了水流的摩擦阻力流速, 在 95% 的可信度下得出了同样的结果, 以此表明 ADV 应用于河口地区有很高的可靠性.

Kadota 等^[38]用 LDA 仪器, 辅以注入颜色水染料来使流场可视化的方法, 研究在沙波峰顶后面紊流的三维时空结构, 提出了改进后的紊流相干结构模型. Lee 等^[39]通过摄像机录像, 用计算机分析床沙的扬动轨迹, 在进行量纲分析和受力分析后, 用龙格-库塔法得到近似解. 计算得到的扬动开始时的角度、扬动距离等, 与实测值符合较好. 清华大学研究表明, 将粒子图像测速 (PIV) 所获得的图像进行修正,

推荐的系统配置经校正后的图像几何变形误差小于 0.4 个像素^[40]。

一些成熟的仪器也在继续使用,比如测量压力差的 Preston 管,早在 20 世纪 50 年代就已经发明并得到应用,现仍在基础理论研究中应用。Rhodes 等^[41]就用 Preston 管道来验证 Patel 校对方程。Wu 等^[42]用 Preston 管测量的资料,基于流速的对数分布理论,分析时用 Labview 软件,提出一种计算剪应力的简单方法。

综上所述,水利是一个传统行业,必须用高新技术为其注入活力。在计算机、光电子方面的进展必然使得测量仪器和检测手段更加精良,也推动着泥沙基本理论研究的进步。本领域迫切需要采用计算机技术、微电子技术、现代通讯技术、遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)及自动化技术等泥沙研究方面进行技术改造。21 世纪是信息时代,信息技术以数字化手段为核心,3S 技术在水利行业中有极大的技术需求^[43]。国内目前 RS 在确定大体积水面的含沙量和水深、GIS 在防洪预报和河道冲淤计算、GPS 在河道水文测量中已经得到了广泛应用,但距实现数据采集、处理和输出一体化的要求还有较大差距,需要付出很大的努力。

7 一些新的数学理论和数学方法的应用

控制水流运动的 N-S 方程和泥沙输运中的对流-扩散方程都是非线性的。近年来,各种非线性数学方法在水流和泥沙研究领域有了很广的应用。紊流和输沙运动中都存在混沌和分形现象。利用分形理论研究初始及粗化床面粗糙度的分形特征,经过分析,对于初始床面应研究糙率 n 与分维数 D 的相关关系,而粗化床面糙率则可以以代表粒径为基础^[44]。

人工神经网络(ANN)理论是 20 世纪 80 年代中后期在世界范围内迅速发展起来的一个前沿研究领域,其发展已经对计算机科学、人工智能、认知科学等领域产生了重要影响。近年来,这种研究方法已经渗透到水力学和河流动力学研究领域。Morshed 等^[45]采用 ANN 方法计算地下水输移,并比较了误差逆传播(BP)算法和遗传(GA)算法在该领域的适用性。Dibike 等^[46]讨论了 ANN 在水力数值模型中的使用情况。张小峰等^[47]将 ANN 用于分析岸滩变形,李义天等^[48]将 ANN 与河网水沙连续方程联系,建立了具有河网水沙运动特点的人工神经网络模型,赋予神经网络内部参数物理概念,所建立的模型在结构和算法上与传统 BP 算法有很多相似之处。

熵是表示物体内能状态的参数,基于熵理论的方法是一种标量方法。Yang^[49]分析比较了最大信息熵原理、最小能量原理和最小能量扩散率原理,并应用于河流形态领域,结论是:由变量理论得出的结论是普适的,用其他方法也可以导出,这说明能量方法

在河工领域有广阔的应用前景。Deng 等^[50]用最大信息熵原理导出冲积平原河床形态变化的机理,并给出了弯曲度和稳定性的定量指标值。Cao 等^[51]提出应用熵原理确定临界渠道的水力断面尺寸,是一种新的设计方法,其预测值与实验室资料符合好。

综上所述,由于泥沙运动机理非常复杂,毫无疑问也需要用高超的数学工具来解决。这种力学和数学交叉结合的研究思路将在泥沙研究领域有广阔的应用前景。

8 结 语

泥沙科学经历了几十年的积累,随着国民经济的发展,水利工程和港口航道工程的建设,泥沙问题越来越突出,这对于学科发展提供了很好的机遇和条件。水流泥沙数学模型的发展推动着基本理论研究的进步。泥沙问题的进一步合理解决,必须依靠对它的内在运动规律的进一步探索,但要真正达到这一目的还有很多困难。

参考文献:

- [1] 王兆印,宋振琪.欧美泥沙运动研究述评[A].见:第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C].北京:建材工业出版社,1995.3~27.
- [2] 王光谦.中国泥沙研究述评[J].水科学进展,1999,10(3):337~344.
- [3] 张红武.河工动床模型相似率研究进展[J].水科学进展,2001,12(2):256~263.
- [4] Bartenblatt G I. Scaling laws for fully developed turbulent shear flows, part I, basic hypotheses and analysis[J]. J of Fluid Mech, 1993, 248: 513~520.
- [5] 肖勇,金忠青.固壁紊流流速分布指数型公式和阻力规律(I)——粗糙区[J].水科学进展,1997,8(2):148~153.
- [6] 肖勇,金忠青.固壁紊流流速分布指数型公式和阻力规律(II)——过渡区[J].水科学进展,1999,10(1):64~68.
- [7] Wosnik M, Castillo L, George W K. A theory for turbulent pipe and channel flows[J]. Fluid Mech, 2000, 421: 115~145.
- [8] Ferro V, Baiaomonte G. Flow velocity profiles in gravel-bed rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(1): 60~80.
- [9] Nezu I, Akihiro, Nakagawa H. Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(9): 762~763.
- [10] Song T, Chiew Yee-Meng. Setting characteristic of sediments in moving Bingham fluid[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(9): 812~815.
- [11] Muste M, Patel V C. Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(9): 742~751.
- [12] Best J, Bennett S, Bridge J, et al. Turbulence modulation and particle velocities over flat sand and low transport rates[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(12): 1118~1129.
- [13] Cao Zhixian, Zhang Xiaoxian, Xi Hezhong. Turbulent burst-

- ing-based diffusion model for suspended sediment in open channel flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 34(4):457~472.
- [14] Nikora V, Goring D. Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(9):679~690.
- [15] Gyr A, Schmid A. Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 35(4):525~544.
- [16] Robert G M. Grain and form resistance in gravel-bed rivers[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(3):303~312.
- [17] Cellino M, Graf W H. Experiments on suspension flow in open channels with bed forms[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(4):289~298.
- [18] Sieben J. A theoretical analysis on armouring of river beds[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(3):313~326.
- [19] Wang Zhao-yin. Experimental study on scour and river bed inertia[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(1):17~37.
- [20] 余明辉, 杨国录, 刘高峰, 等. 非均匀水流挟沙力公式的初步研究[J]. 泥沙研究, 2001(3):25~29.
- [21] 王士强, 陈骥, 惠遇甲. 明槽水流的非均匀挟沙力研究[J]. 水利学报, 1998(5):1~9.
- [22] Wu Wuiming, Sam S Y Wang, Jia Yafei. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(6):427~434.
- [23] Atkinson J F, Abranham A D, Krishnan C, et al. Shear stress partitioning and sediment transport by over/and flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(1):37~40.
- [24] Patel P L, Raju K G R. Fractionwise calculation of bed load transport[J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 34(3):363~379.
- [25] 左东启. 中国水问题的思考[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
- [26] Julien P Y, Wargadalam J. Alluvial channel geometry: theory and applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(4):312~325.
- [27] Hagerty D J, Spoor M F, Parola A C. Near-bank impacts of river stage control[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2):196~209.
- [28] Rooseboom A, Grange A. The hydraulic of sand streambeds under steady flow conditions[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(1):27~36.
- [29] 夏军强, 王光谦, 张红武, 等. 河道横向展宽机理与模拟方法的研究综述[J]. 泥沙研究, 2001(6):71~78.
- [30] 王新宏. 冲积河道纵向冲淤和横向变形数值模拟研究及应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- [31] Fang Hongwei, Wang Guangqian. Three-dimensional mathematical model of suspend-sediment transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(8):573~592.
- [32] 张红武, 江恩惠, 刘月兰, 等. 黄河河道数学模型的研究[A]. 见: 第二届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集[C]. 北京: 建材工业出版社, 1995. 459~464.
- [33] 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, 11(3):229~234.
- [34] Wren D G, Barkdoll B D, Kuhnle R A, et al. Field techniques for suspend-sediment measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(2):97~104.
- [35] Lemmin U, Thierry Rolland, Acoustic velocity profiler for laboratory and field studies[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(12):1089~1098.
- [36] Song T, Chiew Y M. Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic doppler velocimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(3):219~232.
- [37] Kim S C, Friedrich C T, Maa J P Y, et al. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from Acoustic Doppler Velocimeter data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(5):399~406.
- [38] Kadota A, Nezu L. Three-dimensional structure of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(1):59~80.
- [39] Lee Hongyuan, Chen Yenhsu, You Jiingyun, et al. Investigations of continuous bed load saltating process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(9):691~700.
- [40] 禹明忠, 王兴奎, 庞东明, 等. PIV 流量量测中图像变形的修正[J]. 泥沙研究, 2001(5):59~62.
- [41] Rhodes D G, New A P. Preston tube measurement in low Reynolds number turbulent pipe flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(5):407~415.
- [42] Wu S, Rajaratnam N. A simple method for measuring shear stress on rough boundaries[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(5):399~400.
- [43] 吴中如. 高新测控技术在水利水电工程中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2001(1):13~21.
- [44] 王协康, 方铎, 姚令侃. 非均匀沙床面粗糙度的分形特征[J]. 水利学报, 1999(7):70~74.
- [45] Morshed J, Kaluarachchi J J. Application of artificial neural network and genetic algorithm in flow and transport simulations[J]. Advances in Water Resources, 1998, 22(2):145~158.
- [46] Dibike Y B, Solomatine D, Abbott M B. On the encapsulation of numerical-hydraulic models in artificial neural network[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(2):189~198.
- [47] 张小峰, 许全喜, 谈广鸣, 等. 河道岸线变形的神经网络预测模型[J]. 泥沙研究, 2001(5):19~26.
- [48] 李义天, 李荣. 具有河网水沙运动特点的人工神经网络模型[J]. 水利学报, 2001(11):1~7.
- [49] Yang C T. Variational theories in hydrodynamics and hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(6):737~756.
- [50] Deng Zhiqiang, Singh V P. Mechanism and conditions for change in channel pattern[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(4):465~478.
- [51] Cao S, Knight D W. Entropy-based design approach of threshold alluvial channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 35(4):505~524.

(收稿日期: 2002-04-17 编辑: 张志琴)