



推移质泥沙输移研究回顾与展望^{*}

刘明潇¹, 张晓华², 田世民², 孙东坡¹

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 阐述推移质运动的特点, 讨论推移质运动在河床变形、沙波、弯道演变等方面的作用以及对工程的影响。此外, 分别从3个时期论述国内外推移质输移研究在理论分析、试验研究与河流原型观测两方面的发展历程及最新进展, 并对不同理论的依据、研究方法及试验观测技术进行对比分析, 并提出建议; 认为研究视角的拓宽、研究方法及观测仪器的改进是深化推移质输移研究必须考虑的问题。

关键词: 推移质; 输沙; 拖曳力; 概率论; 随机理论

中图分类号: TV 14

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0026-09

Reviews and prospects of the research on bed load transport

LIU Ming-xiao¹, ZHANG Xiao-hua², TIAN Shi-min², SUN Dong-po¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The characteristics of bed load motion is special, which makes the research on bed load transport one of the difficulties and focus in field of the River dynamics. Both Chinese and overseas scholars are very concerned about the study on bed load transport. The characteristic of the bed load movement is expounded succinctly in the article, and the role in riverbed deformation, sand wave, bending river evolution and the influence to the engineering of the bed load movement are discussed. In addition, the history and latest study development of the bed load on theoretical analysis, experimental research and prototype observation in natural river are discussed separately from three periods, comparative analysis about the bases of different theories, research methods and experimental observation techniques are also made in the article, and some suggestions are proposed. The broadening of research perspective and improvement on research method and observation instrument must be considered in deepening the research of bed load transport.

Key words: bed load; transport rate; drag force; probability theory; stochastic theory

1 推移质输沙研究的意义

水流与河床的交互作用表现为推移质输移运动, 因此推移质运动对河床冲淤演变有重要影响。河床演变的根本原因是输沙的不平衡, 更深层的原因是动床水沙两相流的内在矛盾和非恒定流外部条件, 即进口水沙、出口侵蚀基准与河床周界。在淤积和冲刷的发展过程中, 河床和水流

通过改变河宽、水深、比降及床沙组成, 使本河段的水流挟沙能力与上游的来沙条件趋于相互适应, 从而使淤积和冲刷向着停止的方向发展达到平衡状态。由于输沙的平衡状态是相对的、暂时的, 非平衡状态的调整过程是永恒的, 而床沙质输沙率是动床水沙两相流运动中的基本属性特征量, 所以很多学者都对确定推移质输沙率有强烈

收稿日期: 2012-10-25

^{*}基金项目: 973计划项目(2011CB403306-02); 国家自然科学基金(51039004); 水利部公益性科研专项(200901018)

作者简介: 刘明潇(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方向的研究。

的兴趣。

推移质泥沙随机运动与悬移质颗粒的随流运动不同,产生颗粒跳跃的力很难确定,其方向和大小取决于紊动的随机脉动和床面表层颗粒的随机几何形状。因此,推移质运动轨迹只能按随机因素来考虑。动床面上的沙波形状与尺寸也具有很强的随机性,影响推移质颗粒动态的“随机因素”较多,因此在探索推移质运动规律领域有较大的研究空间。

推移质运动与沙波的发展消长、河流弯道环流运动有密切关系。从河床的稳定性考虑,沙波的发展消长与当地的泥沙运动及床面附近流速间的相位差关系很大。在以推移运动为主时,这个相位差为正值,河床是不稳定的,会形成一系列的沙垄。在天然河流中量测推移质输沙量存在很多困难,沙波运动反映了推移质运动的集体形式,而沙波尺寸及运动速度又可以根据大面积连续测深来确定,因此可以利用沙波运动特点估算推移质输沙率。

出海航道多经过河口附近海区,而河口附近水沙运动复杂,不仅与上游来水来沙条件有关,还受时刻变化的海域来水来沙影响。海区泥沙活动性较强,推移质输沙率大致呈近岸大离岸小的分布规律,其所产生的航道年淤强亦呈近岸大离岸小的分布规律,可见推移质输沙对航道淤积的影响不容小觑,若同时再考虑悬移质的泥沙,则对航道淤积的影响将更不可忽视。如果只考虑疏浚则航道水深很难维护,在这种条件下修建导流防沙堤是很有必要的。因此对推移质输移运动规律的认识,有助于更深入地理解某些特殊河流地貌形成机理及河流演变过程,也有助于河流工程及航道工程的合理设置。

2 推移质运动特点

推移质泥沙颗粒的主要运动形式有滑动、滚动、跃动,其中跳跃运动是推移质运动的基本形式。推移质运动属剪切运动,以重力沿着水流运动方向的分力为推进力,向上的支持它的重量来自剪切过程中的粒间离散力,同时会对河床面产生

大小为其浮重的作用力^[1]。接触质及跃移质在水流中运动直接消耗水流的势能及水流内部紊动的动能,则随着这一部分泥沙含量的增大,水流所消耗的能量增多,水流所承受的阻力也随之加大。

推移质的运动具有间歇性,推移质在不同的水动力条件下会分别以推移质及床沙的面貌出现,当它转化为床沙时,从运动的角度来看,就出现了间歇。推移质与悬移质之间也存在交换,一颗泥沙在一个时候可以以推移的形式运动,另一个时候又可以以悬移的形式运动。但推移运动与悬移运动不只是泥沙运动位置的不同,在物理本质上存在差异。

3 推移质输移率的研究方法

研究推移质输沙理论及计算公式一般是基于推移质运动特点,从不同角度展开的。推移质输沙率的确定十分重要而又十分复杂,一个很重要的原因就是缺乏从天然河道中比较精确地量测推移质输沙率的工具和方法。缺乏来自天然河道中的可靠资料,输移规律的探讨便难以有坚实的基础与可靠的检验。不同江河及不同河段的泥沙粒径级配、河床比降、水流条件等因素各不相同,研究资料及方法也很众多,这里对推移质输移规律的不同研究方法予以系统的分析与评价。

3.1 早期的研究方法

早在19世纪末期,法国的P.Dubois第一次提出推移质运动的拖曳力理论。此后众多研究人员投入到推移质运动研究,不断有新的理论和公式提出。但立论的基础不一样,在选择水力要素形式上,有用拖曳力,有用流速,也有用功率,公式的结构及形式更是千差万别。从研究方法上考虑,主要是以下几类:以大量实验工作为基础建立起来的推移质公式,这以Meyer-Peter公式为代表;根据普通物理学的基本概念,通过力学分析建立起来的理论,以Bagnold公式为代表。采用概率论及力学相结合的办法建立起来的推移质理论,以Einstein公式为代表;以Einstein或Bagnold的某些概念为基础,并辅助以量纲分析、实测资料适线及一定的推理,以Engelund、Yalin公式为

代表。从研究内容及理论上,主要包括以下几个方面:

1) 以拖曳力为主要参变数。Dubois最早提出推移质拖曳力理论,假定泥沙在水流拖曳力作用下成层运动,则推移质输沙率是水流实际拖曳力与床沙起动拖曳力差值函数,推导出Dubois推移质公式。不少学者对Dubois提出的观点进行了补充和发展,有Straub公式、Meyer-Peter公式、Meyer-Peter-Muller公式等。Meyer-Peter和Muller等认为,只有沙粒切应力才对推移质泥沙运动起作用,提出了水力半径分割法,被广泛地应用于输沙问题的研究, Meyer-Peter公式采用了大量的推移质试验资料验证,包括了粒径偏大的卵石试验数据,因此这个公式引用相对广泛,特别是在应用到3mm以上粗沙及卵石河床上时,较其它公式更合理一些。

2) 以流速为主要参变数。许多学者认为把流速作为反映推移质输移强度的主要水力因素,要优于切应力,用流速表示的推移质输沙率更容易量测与检验。这类公式均体现推移质输沙率与流速的3~4次方成正比例,主要有Гончаров公式、Shamov公式、Goncharov公式等。

3) 从能量角度出发。Kennedy提出动平床条件下,阻力系数随雷诺数增加而增加的现象,表明有推移质运动的动平床较静平床要消耗更多的能量,因此推移质运动强度与水流能耗有关;进而提出从能量平衡观点研究推移质输沙率。Bagnold早期在此基础上提出关于推移质输移的水流功率理论,建立了推移质输沙率公式。

4) 根据统计理论建立公式。Einstein^[2]在推移质研究思路较以往学者有两大突破:其一,采用沉积率反映推移质泥沙输移、交换强度;其二,将床面泥沙运动与紊流的脉动相联系。从而泥沙运动和停止均可以用概率的形式表达。Einstein根据试验发现床面泥沙颗粒的运动具有随机性质,床沙与推移质之间存在持续的交换。单位床面上泥沙沉积的速率取决于通过给定断面的输沙率和水动力允许沙粒沉积的概率,冲刷速率取决于单位面积上沙粒的数量、特性以及作用

在沙粒上的瞬时水动升力大到足以移动沙粒的概率。根据平衡条件下床面冲刷外移的泥沙与推移质中沉降落淤的泥沙相等的认识,引入冲刷概率、泥沙单步运行距离与交换时间等概念,建立了推移质输沙率公式。Einstein公式在国内外应用范围较广,其研究方法影响较大。但Einstein理论也存在一些问题,他强调泥沙的单步距离的长短决定于泥沙的大小及形状,与水流条件、床沙组成和推移质的输沙率无关,事实上推移质跃移的单步距离应该与泥沙在跃移过程中所受的水流作用力有一定的内在关系;在建立推移质公式时仅考虑床沙与推移质之间的相互交换而未考虑悬移质的影响。虽然有时推移质向悬移质的转移很少,但从概率上来说是有存在的,甚至在某些条件下推移质与悬移质交换频繁会对冲淤计算有一定影响。

5) 基于流量因子的研究。1934年Schoklitsch尝试研究用流量确定推移质,通过分析引入床沙初始运动时的临界流量 q_c 、含沙量 S 、沙粒粒径 d 为变量,建立了推移质计算公式:

$$q_b = 7\,000\, S^{3/2} (q - q_c) / d^{1/2} \quad (1)$$

对于比重为2.65的天然沙:

$$q_c = 0.000\,019\,44\, d / S^{4/3} \quad (2)$$

1943年他又修正了推移质计算公式:

$$q_b = 2\,500\, S^{3/2} (q - q_c) \quad (3)$$

对于比重为2.65的天然沙:

$$q_c = 0.6\, d^{3/2} / S^{7/6} \quad (4)$$

3.2 近期的研究方法

近期的推移质研究是在早期理论和研究方法基础上展开的,这里主要按“原型观测与分析”和“理论与试验研究”两大类分述之。

3.2.1 原型观测与分析

3.2.1.1 原型观测阻碍因素

长期以来天然河流上原型推移质观测由于采样器的阻水作用,改变了床面运行的推移质泥沙的水力条件,造成器测推移质输沙量与天然状况下的偏差;同时推移质运动与沙波运动密切相关,定点观测难以全面覆盖完整的推移质运动过程,因此不能准确控制推移质输沙量^[3]。这两个问题一直影响着天然河流原型推移质的观测精度。

3.2.1.2 常用采样器

20世纪70~80年代，成都勘测设计院、四川水文总站、昆明水电设计院等多家单位参与了推移质采样器，有顶部封闭式（采集砂砾的顿式取样器和采集卵石的网式取样器）、顶部开敞式（如波里亚可夫取样器）、适用于沙质河床的压差式采样器等，但采样器普遍存在伏贴河床性能不稳定、采样效率不高等问题，获得的推移质输沙实测资料比较粗糙。有人直接使用坑测，但捕沙段位置和测坑的长度对观测结果有较大影响，操作难度较大。

近年来观测技术与取样器效率均有一定的改进。国外应用较广的是美国地质调查局设计的刚性框架的赫尔—斯密斯压差式采样器(HS-1型) 和它的加大型(HS-1a型)、沱特尔河TR-2型压差式采样器；国内应用较多的是中国长江委研制的Y78-1型刚性框架沙推移质采样器、Y80-2型软底网式采样器、AYT 型压差式砾卵石采样器（图1）。

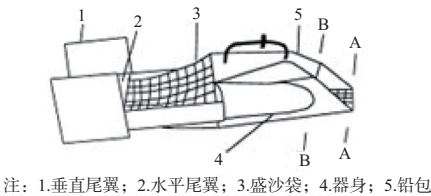


图1 AYT 型采样器结构

Y78-1型仪器器身前部上方装有加重铅块，尾部装有浮筒，仪器在水下的重心位于前半部，使仪器口门在复杂的床面上也能较好的伏贴河床。仪器口门底部的护板前沿做成向前倾斜的刀口形，可防止取样时在口门处形成淘刷坑；Y80-2型仪器有链网式的软底，软底上铺设带网眼的尼龙布，整个设计使采样器底紧贴河床；AYT 型采样器利用进口面积与出口面积的水动压力差，增大器口流速，使器口流速与天然流速接近，达到采集沙样的目的。口门段底板由特制的小钢块和钢丝圈连接而成，有较好的伏贴河床能力，负压在器身控制段和扩散段形成；HS-1型仪器由刚性框架和尼龙网眼布制成的样品收集袋构成；HS-1a由HS-1 型采样器等比加大1倍而成；TR-2型仪器组成为刚性框架、样品收集袋和大的尾翼，口门段同HS-1a。通过在不同河流上设置采样点^[4]，对上述几种采样器性能进行了比测，如表1所示。

经分析，比测点上流速和推移质粒度的明显差别可能是导致以上差异的主要原因。另外，采样技术和比测方法的差别对测量结果也有影响。虽然采样器性能有差异，但不同采样器的性能可以互补，可根据不同水流条件下选择合适的采样器（表2）。

表1 常用采样器性能比测成果

采样点	试验水深0.7~1.5 m	试验最大水深15 m	流量10 000~36 000 m ³ /s
	垂线平均流速0.95~2.17 m/s 床沙由细沙到中等砾度的砾石组成	最大流速3.85 m/s 床沙粒径为1~150 mm	水深9.0~21 m 流速1.7~3.8 m/s
HS-1：Y78-1（输沙率测值）	3：1	1.2：1	
HS-1a：Y80-2（输沙率测值）		4.4：1	
TR-2：Y80-2（输沙率测值）		2.2：1	
AYT:Y80-2（采样效率）			2.36：1

表2 采样器理想工作环境

采样器型号	理想工作条件	说明
Y78-1型	流速小于2.5 m/s，粒径小于2 mm的沙质河床	采样器与河床伏贴较好
HS-1型	1~16 mm的粗沙和中等粒度砾石河床	采样处床面的水力淘刷较小
Y80-2型	流速小于4 m/s砾石卵石河床	可塑变的软底可使采样器较好地与河床伏贴采取的推移质粒径范围：从底网孔径到卵石粒度
HS-1a型	低速流动的水流条件	采样器性能稳定
TR-2型	湍流和高速流动的水流条件富含泥沙的砾石粒度河床	采样器在该种水流情况下使用较为稳定
AYT型	测取2 mm 以上的砾卵石 水深5.0~40 m，流速1.2~4.0 m/s	水下定向灵活、阻力小采样效率较高、级配代表性较好

虽然现今国内外主流采样器的贴合河床性能及采样效率相对提高,但仍存在一些不足:

1) Y78-1型口门下面的护板可能使采样器在河床有砾石的地点不能很好伏贴河床。

2) HS-1型和HS-1a型的高水力效率可能造成沙质河床采样处床面的水力淘刷、导致采样偏多。

3) Y80-2敞口顶端可能使较小砾石在采样器向水面高速提升时,从采样器中冲出来,导致采样偏少。

4) TR-2型的刚性器底可能使它不能与卵石占优势的河床很好伏贴,导致采样偏少。

5) AYT型采样器仍是被动采样,采样效率受到水流速度、河床地质结构等因素的影响,所以其采样效率并不十分稳定。有些人在对仪器进行改进,以期实现主动采样,提高采样效率的稳定性。

可见,推移质采样器必须按照它们的使用条件设计。使用拉偏绳稳定采样器,可减少采样器在采样过程中对河床的挖取,从而减小误差。推移质输沙率的准确计算还需要采样器采样效率的合理估计。采样器的采样效率不同,使之测得的输沙率有很大的非偶然性差别,流速、推移质颗粒级配和输沙率等参数都可能影响采样效率,在输沙率计算时应考虑这些因素。

特别地,山区河流床沙和推移质由大小不同的卵石、沙砾和粗细沙组成,粒径分布很广,目前还没有一种推移质采样器能测得全部输沙率。现在普遍采用的软底式卵石采样器系,只能取得1 cm以上的卵石输沙率。根据长江、岷江几个水文站实测资料,卵石输沙率的变异系数 $C_v=1.06 \sim 1.94$,可见卵石推移质输移率十分分散。在水力条件变化不大的情况下,同一断面卵石输移率多个测值大小悬殊很大。因此,目前坑测法仍公认为是最准确可靠的测量方法,但由于操作难度大、花费高,仅适用于小型山区河流。

除常规手段外,一些新技术也应用于推移质观测中,日本、瑞士、意大利等国家及我国的赵贵德等人曾先后尝试使用地震仪定性监测推移质泥沙活动,但在定量监测推移质技术方面还有待展开进一步研究。

3.2.2 理论与试验研究

3.2.2.1 20世纪60年代—90年代

20世纪前中期,国内外众多学者为推求推移质输沙公式做了大量的研究,由于研究角度不同,推移质输沙率公式形式千差万别;但其理论基础及研究方法还大多是在早期学者的研究基础上开展的。有以下5方面的成果较为突出:

1) Mavis和Williams分别用近底流速 u_b 、水面流速 u_s 表示推移质输沙率,但由于 u_b 、 u_s 在量测上的困难及定义上的不准确性,这两个指标未能得到广泛应用。在实际问题中,使用更多的是平均流速 v ,如窦国仁、VanRijn、Karim-Kennedy等公式^[5]。但平均流速的水深校正问题影响了公式的精度。Williams将经一定水深校正的佛汝德数作为水流强度指标,利用此指标建立了推移质输沙率计算公式。

2) Pernecker-Volimers等^[6]在Meyer-Peter、Muller公式基础上以拖曳力为主要参数,考虑更多的影响床沙输沙率的因素。采用量纲分析法则,引入反映床沙可动性、沙波变化、相对输沙率的无量纲参数,通过分析水槽试验资料及原型实测资料确定无量纲参数间的关系式,进而建立了各自的公式。

3) Bagnold等^[7-8]以水流功率为基础推导出推移质输沙率公式。Yang等认为在各类与输沙率的相关关系中,单位水流功率与输沙率的相关性最好。Ackers-White、Engelung-Hansen、窦国仁等根据Bagnold水流功率理论也建立了推移质输沙率计算公式。这些公式是在基本假设及力学分析基础上得到,物理概念清晰,均采用无量纲的参数,对不同的水流条件有较好的适应性,在实际应用中可靠性较高。

4) Yang和Sayre根据Einstein引入步长和停留时间描述单颗粒泥沙做推移运动的概念,结合对床面形态的分析确定推移质输沙率,建立了通用的一维随机模型,模拟单颗粒泥沙沿冲积河床的运动,探索使用随机法推求推移质输沙率计算公式,主要是利用随机模型确定推移质运动平均速度,然后利用沙波连续方程积分得到的公式计算

推移质输沙率。通过示踪试验或床面形态分析确定相关参数,计算推移质移动的平均速度。

5) Parker等^[9]提出了等可移动性的假设以推导推移质或砂砾输移公式。假定砾石河床河道里的推移质运动是通过暴露在床面上的沙粒的移动来实现的,只有在局部或大范围内的冲刷使底层的沙粒暴露于床面时,底层沙粒才可能参与推移质运动。将推移质泥沙的粒径分布近似为底层中提供的且同一粒径的大部分能够被水流移动的砂砾的全体。这种近似使得Parker等人能够完全依靠天然河流原型资料建立一个经验性的砾石输送关系。通过选择合适的参数,给出无量纲推移质输送函数 W^* 和无量纲剪应力参数间的关系,并通过对砂石河流的天然河流原型资料经验回归得到 W^* 计算公式。

3.2.2.2 20世纪90年代至今

1) 能量角度的研究。陆永军、张华庆、Seminara G.等^[10-12]基于能量平衡观点,从输沙率和水流势能的消耗之间的关系推求输沙率。乐培九、王长海根据拜格诺水流功率理论,推出均匀沙和非均匀沙推移质输沙率公式,公式所涉及的水力泥沙要素比较全面;乐培九^[13]等建立了时均稳定阶段和衰减阶段的推移质输沙率公式。夏华永等根据床面层内的能量平衡关系率定推移质的输沙率公式,分别推求均匀沙和非均匀沙推移质输沙率公式;这些公式利用了水槽试验或长江等低含沙河流资料进行过验证,但在用于黄河等高含沙河流时的可行性还有待考证。

2) 拖曳力及沙波运动角度的研究。Swamee P. K. 等在拖曳力理论基础上,从沙粒切应力入手,采用水力半径分割法对推移质输沙问题做进一步研究,建立了自己的推移质输沙公式,并认为沙粒切应力也对悬移质运动起作用。Uchijima K. 等^[14]对沙波形态与推移质运动关系、沙波阻力等问题进行了相关研究,并通过模型试验证明交错沙波对水流的形状阻力最大不会超过全部阻力的20%。赵连白、袁美琦依据沙波运动尺度,由沙量连续和沙波运动方程推求推移质输沙率计算公式,研究成果局限于水槽试验、均匀沙及宽级配

非均匀沙的卵石床面资料,但未在不同特征的自然河流上验证。

3) 水流强度指标角度的研究。魏炳乾、早川博等采用佛汝德数作为水流强度指标,分别根据Brown公式、Meyer-Peter公式,结合模型试验建立了无沙波平整河床、沙波河床上推移质输沙率公式。在推算沙波河床推移质输沙率公式时,根据模型试验结果使用公式估算原型沙波河床上推移质输沙率。在保证原型与模型的粒径比尺较大,且模型与原型床面形态一致的条件下,沙波河床上的推移质输沙率推算结果较好。但由于公式的推算精度取决于原型与模型的粒径比尺,公式的精准性还有待完善。

4) 发展较快的是以概率统计理论为指导的研究。Einstein推移质理论在泥沙输移力学领域影响深远,王士强等^[16]对Einstein推移质公式建立过程中的冲刷概率、泥沙无因次单步运行距离和泥沙交换时间等方面进行了深入研究,改进了Einstein公式。

秦荣昱^[17]研究分析床沙组成和粗化、流量、断面形态对推移质输沙的影响,对不均匀输沙进行适当简化和假定,建立了推移质输沙率公式;随后又考虑了床沙运动状态转变和水温变化对公式进行了修正。

董永华等通过对宽级配非均匀推移质输沙率进行较为系统的实验研究,证明Meyer-peter公式和Einstein公式均不能用于非均匀推移质输沙率计算。分析床沙不动百分数和补给条件对输沙率的影响,提出了适用于非均匀推移质输沙率计算公式。

韩其为^[18]对推移质非均匀沙输沙率规律中推移质不平衡输沙问题、推悬比对推移质淤积的影响及沙质河床推移质估计等问题进行了分析研究,他认为沙质河床含沙量梯度较大,假定在推移质运动厚度内其速度不变,给出了推移质输沙率公式,并建议沙质河床推悬比是比较可靠的估计推移质数量的方法。韩其为还采用将非均匀沙分组,采用均匀沙推移质输沙率公式计算各分组输沙率,然后对所有分组求和得到总体的输沙率。

黄理军根据沙卵石在一般水流条件下不运动仅在大洪水时起动输移的床面最粗颗粒,通过水流结构、河流阻力以及床面可动泥沙的概率影响推移质输沙率及级配。利用随机理论和力学分析相结合的方法推求非均匀沙推移质级配分布函数关系式,进而推求推移质输沙率关系式。建立的关系式仅在卵砾石河道的比较适用。

5) 流量角度的研究。Whitting P. J. 等^[19]从流量与推移质输沙率建立关系入手计算预测推移质输沙率,提出一条河流不同断面流量与推移质输沙率关系可能不同,但单宽推移质输沙率是随流量增大而增大的。

王兆印等通过在西南河流上原型试验,发现同一时期不同断面推移质输沙率会出现巨大的波动,从上游到下游单宽推移质输沙率有逐渐增大趋势,单宽推移质输沙率仍会出现10~10 000倍的变化,可见流量不是决定推移质输沙的唯一因素,还有非水流因素的影响。只考虑流量单一要素推求推移质输沙率公式不够合理。

6) 由于推移质泥沙输移问题的复杂性及多变性,一些学者尝试从新的视角或方法展开研究。方铎、曹叔尤等通过人工神经网络模型模拟推移质输沙率与来水来沙等外界因素的非线性输入输出关系,建立推移质输沙率与其影响因素的网络模型,以具有反馈模式的回归神经网络模型对推移质输沙率进行模拟及预测。方铎等^[20]以输沙强度作为状态变量,水流参数、床沙密实系数作为控制变量,建立描述推移质运动的尖点突变模型。通过对尖点突变标准方程经过坐标变换和拓扑变换推导,建立推移质输沙率公式。由于泥沙运动机理十分复杂,从非线性科学角度对泥沙起动和输移方面的研究才刚刚起步,有待进一步探讨。

王兆印等^[21]通过实测原型推移质输沙率,发现推移质输沙与水流条件并不存在一个特定的关系,山区河流推移质输沙受到来沙量、来沙强度、级配、床面结构等条件的影响。他认为推移质输沙取决于具有独立概率分布的随机过程的水流条件、来沙条件、床面结构三者的联合概率分布。他又针对河床结构对山区河流推移质输沙

的影响进行了研究,引入河床结构强度 S_p 的量化计算公式,定性分析了 S_p 对推移质输沙率的影响,但没有给出推移质输沙率与 S_p 的定量计算关系式。

7) 王光谦等^[22]将动理学理论引入泥沙运动,以Boltzmann方程作为桥梁,将反映颗粒运动个性的颗粒运动方程与反映颗粒群宏观输运规律的宏观量输运方程相联系建立方程,既能反映颗粒运动的个性,又能体现颗粒运动的统计特征。基于颗粒速度分布函数及其演化方程建立了推移质输沙率公式,研究了颗粒碰撞对推移质输沙率的影响。弥补了以往只针对单颗粒微观特性或宏观运动规律单一层面研究的缺憾,有较好的发展前景。

8) 黄河清等^[23]根据推移质输沙函数对河道平衡断面形态具有极为明显的影响,发现冲积河流在达到静态平衡时具有线性特征,决定此线性特征的条件是河流输沙方程与阻力方程存在紧密联系。其中,输沙参数 β 是影响河道平衡形态的主要因素,对较大河流的影响极为显著。经率定,参数 $\beta=5/3$ 时,输沙公式计算结果与实测值最为接近,表明河流平衡理论可以在较大河流上有较好的应用。这些学者的研究成果为后续的推移质研究奠定了坚实的基础。

9) 目前推移质输移的水槽试验,多采用在主水槽安装输沙变化监测系统的方式采集推移质输沙率数据。监测系统跨越整个水槽断面宽度,由 N 个相邻的、同样的铝质称重盘构成,并独立测量截获的推移质的质量。每个称重盘由一个铝质框架悬挂在位于水槽顶部的传感器上,每个称重盘测量占据水槽断面 N 分之一的推移质输沙量。该种监测系统仍局限于室内水槽试验,无法在天然河流原型观测中使用。

4 展望

近年来推移质研究成果众多,无论是天然河流原型观测还是理论探求上都取得了一定程度的进展。但理论成果多具有半理论半经验的性质,在实际应用中,根据这些公式计算得出的输沙率数

值往往相差甚远。还没有一个公认的能够广泛适用于水槽和天然河流的具有宽级配的推移质输沙公式。推移质研究还需要在以下方面加强研究:

1) 推移质观测仪器及方法有待改进。目前推移质观测还是局限于水槽试验及小河流上使用,在大江大河上观测结果的精准性并不理想。通过地震仪定量监测推移质输沙、推移质遥感监测系统新的观测手段有待改进,使得推移质输移研究在天然河流原型观测方面产生新的突破。

2) 目前机理推理的研究角度大体上还是局限于能量、概率理论、水流强度指标、流量等方面,理论研究视角有待进一步拓宽,有些学者从河道平衡理论、河床结构强度、人工神经网络模型、尖点突变理论、动理学理论等新的角度展开研究,为推移质理论研究注入新鲜元素。其中,泥沙运动动理学理论的研究,是较有可能取得突破性进展的研究方法之一。该理论微观上可描述外力及水流紊动的影响下单个颗粒的运动,宏观上可推求输沙率等反映推移质运动统计特性的指标。对单个颗粒运动特性与颗粒群统计特性极强的耦合能力,理论体系较为严谨,若有可靠的系列性水槽试验资料相佐证,则可从全新的动理学角度研究单颗粒泥沙起动、水流紊动影响,群体泥沙起动、输移等泥沙运动理论中的传统问题,建立系统的泥沙运动动理学理论,有助于推动泥沙学科的研究进展。

3) 探求通过其它方法确定河段推移质输沙量。在水文资料缺失严重,又不便于进行天然河流原型观测的河段,推移质输沙可尝试从泥沙运动、河床演变的基本原理出发,采用理论研究和附近河段实测资料分析相结合的手段进行研究。考虑到水库运用初期阶段拦沙作用大,推移质几乎没有出库的机会,因此可通过收集水库运用初期的输沙和库区淤积资料,以沙量平衡原理为指导,计算推移质输沙量,进而确定断面输沙率。计算方法为:

收集初期运用阶段的进出库泥沙资料,以及库区淤积断面测量资料,根据沙量平衡法利用进出库沙量差算得的库区淤积量($\Delta W_{s沙}$),与利用

淤积断面算得的淤积量($\Delta W_{s淤}$)之差,即为水库拦截的推移质输沙量。黄河上游几乎没有实施过推移质观测,尝试根据青铜峡资料推算附近河段推移质输沙量,计算结果与理论公式计算值吻合程度较好。此类计算方法经过完善和改进,可用于估算推移质输沙量及理论公式计算值的校核。

4) 推移质输移规律的研究,可有效指导航道工程维护工作。目前航道工程大多通过定期疏浚清淤进行维护,成本较高,且呈周期渐短趋势。航道附近床面推移质运动活跃,可根据推移质输移特点,分析床面冲淤调整作用,推求航道回淤时空变化规律及航道集中回淤的机理,预测航道维护的方向变化,寻求航道减淤对策。对于内河航道,修建有导流、挡沙、减淤作用河道整治工程,保持航道通航能力,维护航道正常使用。

对推移质输移规律的研究有助于促进泥沙学科的发展,阐明推移质输沙量对河床冲淤变形的影响,对研究河道演变特性及工程应用具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] Einstein H A. The bed load function for sediment transportation in open channel flows[C]// Technical Bulletin, No.1026, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 1950: 1-72.
- [3] 张瑞瑾,谢鉴衡.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [4] 周刚炎,高焕锦.中国和美国的推移质泥沙采样器野外比测试验[J].泥沙研究,2000(5): 28-31.
- [5] Karim M F, Kennedy J F. Menu of coupled velocity and sediment-discharge relations for rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(8):973-996.
- [6] Carson M A. Measures of flow intensity as predictors of bed load[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1987, 113(11): 1 402-1 421.
- [7] Bangnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[C]//U.S.Geological Survey, Washington D.C., Professional Paper 422-1, 1996:1-37.
- [8] Yang C T. Sediment Transport: Theory and Practice[M].

- New York: McGraw-Hill, 1996: 1-396.
- [9] Parker G. Surface-based bed load transport relationship for Gravel Rivers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 28(4): 417-436.
- [10] 陆永军, 张华庆. 非均匀沙推移质输沙率及其级配计算[J]. 水动力学研究与进展, 1991(4): 98-106.
- [11] Seminara G, Solari L, Parker G. Bed load transport at low Shields stress on arbitrarily sloping beds: Failure of the Bagnold hypothesis[J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1 249.
- [12] Cheng N S. Exponential formula for bed load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2002, 128(10): 942-946.
- [13] 乐培九, 程小兵, 朱玉德, 等. 清水冲刷推移质输沙率变化规律[J]. 水道港口, 2006(6): 361-367.
- [14] Uchijima K. Experimental study on the sand waves and flow resistance under coexistence of bed and suspended load[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1992, 36: 117-122.
- [15] 詹义正, 刘金阳, 陆晶, 等. 沙波运动与推移质输沙率[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008(3): 1-4.
- [16] 张原锋, 龙毓骞. Einstein推移质公式的改进研究[J]. 泥沙研究, 1997(4): 62-67.
- [17] 秦荣昱. 不均匀沙的推移质输移规律的研究[J]. 泥沙研究, 1993(3): 29-38.
- [18] 韩其为. 推移质中的几个理论问题研究[J]. 中国水利, 2004(18): 48-52.
- [19] Barry J J, Buffington J M, King J G. A general power equation for predicting of bed load transport rate in gravel bed rivers[J]. Water Resources Research, 2004, 40: 1-22.
- [20] 杨具瑞, 方铎, 何文社. 推移质输沙率的非线性研究[J]. 水科学进展, 2003(1): 36-40.
- [21] 张康, 王兆印, 刘乐, 等. 山区河流河床结构对推移质输沙率的影响[J]. 天津大学学报, 2012(3): 202-208.
- [22] Zhong D, Wang G, Ding Y. Bed sediment entrainment function based on Kinetic theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2011, 137(2): 222-233.
- [23] Huang H Q, Chang H H. Scale independent linear behavior of alluvial channel flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2006, 132: 722-730.
- (本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

二航局被认定为全国高新技术企业

近日, 二航局被认定为全国高新技术企业, 认定有效期为3年, 这是二航局自2008年以来第二次被授予此项称号。

高新技术企业是指在国家颁布的《国家重点支持的高新技术领域》范围内, 持续进行研究开发与成果转化, 形成企业核心自主知识产权, 并以此为基础开展经营活动的居民企业, 是知识密集、技术密集的经济实体。企业取得高新技术企业资格后, 可依照国家相关法律法规申请享受税收优惠政策。

多年来, 二航局始终把推进科技发展作为立企之本, 坚持把自主创新作为提高企业竞争力、实现企业又好又快发展的核心战略和重要支撑, 不断抢占技术制高点。近年来, 二航局着力打造“产、学、研”紧密结合的自主创新体系, 以重大工程项目为依托, 以国家认定的企业技术中心、公路长大桥梁建设国家工程研究中心、交通运输部“长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室”及中国交建桥隧重点实验室的技术开发平台为载体, 通过引进吸收再创新—技术嫁接—自主创新—前瞻性研究, 保持并不断培育和发展核心技术, 自主技术创新体系催生出丰硕成果。目前, 二航局拥有专利总数已达136项, 其中2012年共获得国家专利60项。

此次被认定为全国高新技术企业, 是二航局多年来注重科技创新、成果转化及知识产权保护的结果, 对二航局增强市场竞争能力, 增加经济效益, 提升社会效益具有重要意义。

摘编自《中国交通建设网》