

泥沙输移问题研究进展与展望

张根广, 周双, 王愉乐, 刘余

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 泥沙输移问题一直是国内外泥沙学者研究的热点问题。通过回顾推移质泥沙起动输移特性、悬移质运动规律, 分析阐述了泥沙输移领域的一些主流研究成果、存在的不足及今后研究的热点及难点。认为近底瞬时作用流速、床面泥沙非均匀性及床面泥沙随机分布规律仍将是当前及今后研究的热点和方向; 群体泥沙颗粒间的相互作用是揭示推移质群体运动机理的重要基础及前提; 悬移质泥沙输移理论尚不成熟的主要原因, 仍然是对泥沙颗粒悬浮、扩散与交换机理认识不清。

关键词: 泥沙输移; 研究进展; 推移质; 悬移质

中图分类号: TV142+.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)04-0008-08

Progress and Prospect on Sediment Transport

ZHANG Genguang, ZHOU Shuang, WANG Yule, LIU Yu

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

Abstract: Sediment transport is a hot topic for a very long time and has been studied by researchers all over the world. This paper briefly reviews the characteristics of bed load incipient motion, transport and the motion of suspended sediment. We analyzed some mainstream research results, the shortcomings and the hotspots as well as difficulties in the field of sediment transport in the future. It is believed that the near-bottom flow velocity, non-uniformity and random distribution law of bed grain will still be the hot spots and directions of current and near future research. The interaction between group sediment particles will also be an important factor to reveal the mechanism of bed load motion. Unclear understanding of the mechanism of suspension, diffusion and exchange of sediment particles is the main reason for the immature theory of suspended sediment transport, and it is also a difficult and hot issue in the field of river dynamics.

Keywords: sediment transport; progress; bed load; suspended load

床沙质、推移质及悬移质是并存于河道中的三种泥沙状态, 泥沙起动、起悬是床沙进入推移运动及悬浮运动的临界状态, 是探索推移质和悬移质运动规律的基础。因此, 泥沙起动输移问题一直是国内外泥沙学者研究的热点问题, 也是研究河床演变、水沙数值模拟、泥沙灾害防治等问题的重要基础, 在实际工程中得到广泛应用。

1 泥沙起动特性

泥沙起动问题是泥沙运动基本理论中的最基础问题, 也是国内外泥沙学者研究的热点问题和涉及泥沙工程中常常遇到的问题^[1]。泥沙起动概念最早提出于19世纪, 系统的研究则始于20世纪初, 并

取得了丰硕研究成果^[2-3]。但由于泥沙起动问题极其复杂, 所得结果并不令人满意。例如, Kramer提出的泥沙起动判别标准至今仍在沿用, 致使泥沙起动标准往往因人而异, 误差较大, 原因在于, Kramer提出的标准是一个定性的、而非定量的标准。

床面上泥沙起动具有必然性和随机性两方面: 一方面, 床面上泥沙颗粒位置及作用在颗粒上的水流流速是随机的, 这就造成水流强度在低于泥沙临界起动条件时, 床面上仍有少量泥沙投入运动; 而在水流强度高于泥沙临界起动条件时, 仍有大量泥沙停留在床面。另一方面, 泥沙颗粒运动又具有必然性和确定性一面。例如, 当水流底速及泥沙颗粒在床面上所处位置已知时, 泥沙起动又表现出确定性

一面。在以往研究泥沙起动时,多采用确定性方法推求起动条件,得到的是确定性的单值关系,如 Van^[4]、Wright 等^[5]、Elhakeem 等^[6]。随着湍流理论的发展,学者们将湍流的随机特性应用于泥沙起动研究中,形成了随机性研究方法,如 Papanicolaou 等^[7]。此观点认为,泥沙起动具有随机性,不存在确定的泥沙起动判别条件,由此引入泥沙起动概率问题。Einstein^[8]认为泥沙起动概率 P 等于有利于出现冲刷外移的情况与所有可能出现情况之比,此定义包含了三种不同表述方式:(1)作用在泥沙上的瞬时上举力大于水下重力的时间占总时间的比值;(2)在床面任意位置,泥沙被冲刷外移的时间占总时间的比值;(3)在任意时刻,泥沙被冲刷外移的床面面积占总床面面积的比值。但由于对近底湍流结构认识不同及测定方法的差异,学者们对近底水流特征的认识还存在较大差异,主要表现为:(1)水流瞬时上举力服从高斯分布,如 Einstein^[8]、孟震等^[9];(2)水流瞬时作用流速服从高斯分布,如韩其为^[10]、Dou^[11]、白玉川等^[12];(3)水流瞬时作用流速服从对数高斯分布,如 Wu 等^[13]、Dey 等^[14];(4)床面切应力服从对数高斯分布,如 Hofland 等^[15]、Elhakeem 等^[16],所以造成研究结果存在较大差异。此外,由于泥沙起动形式(滑动起动、滚动起动及跳跃起动)也是随机的,因此,在泥沙起动研究中,由于认识上的差异,部分学者采用了滑动起动模式(瞬时拖曳力大于摩擦阻力)作为泥沙起动判别条件,如 Li 等^[17];部分学者采用滚动起动模式(动力矩大于阻力矩)作为泥沙起动的判别条件,如 Wu^[13]、张根广等^[18];部分学者采用跳跃起动模式(瞬时上举力大于水下重力)作为判别条件,如 Einstein^[8]、Cheng 等^[19]、Dey 等^[14]。但由于泥沙运动极其复杂,在实际观察中,通常很难准确地将三种起动模式区分开来,一些学者只好采用概化理论公式推导三种模式的临界水流强度,如 Dey 等^[14]。

床面泥沙三维分布特性极其复杂,影响因素众多,概括起来可表述为:表层泥沙密实性、泥沙非均匀性、绝对暴露度及相对暴露度等参数。早在 1950 年, Einstein^[8]就发现了采用均匀沙代替非均匀沙引起的推移质输沙率的误差,并通过引入相对暴露度系数试图修正非均匀沙所引起的上举力偏差。之后, Paintal^[20]通过分析理论计算床面和平均床面高程,首次定义了暴露度新概念。韩其为^[21]在对泥沙起动流速研究中,基于床面泥沙颗粒相对位置,提出了概念清晰且便于应用的绝对暴露度和相对暴露度概念。刘兴年等^[22]通过对非均匀沙的暴露高度进

行实验测量,给出了暴露高度与粒径间的关系。近些年,学者们分别从理论分析及实验观测两个方面,对床面泥沙颗粒位置进行了深入研究,何文社等^[23]提出了暴露度定义的新方法,并给出了对应的计算公式,得到了基于等效粒径的非均匀沙暴露度系数取值范围。杨奉广等^[24]采用 Cheng 等^[25]的床面颗粒间相对步长概率密度分布的研究成果,结合床面泥沙暴露度与步长之间的几何关系,得到了河床泥沙颗粒相对暴露度的概率密度分布函数;孟震等^[26-27]对二维、三维泥沙颗粒相对隐蔽度进行了初步分析,并对其物理意义进行了讨论;白玉川等^[28]提出了双向暴露度的新概念,重点研究了垂向暴露度和纵向暴露度对泥沙起动流速的影响;周双等^[29]、邢茹等^[30]通过自行设计的实验装置,测量分析了随机堆放条件下均匀玻璃球及河卵石纵向水平间距、暴露角、绝对暴露度及相对暴露度,得到了玻璃球及河卵石相对暴露度的概率密度均服从偏正态分布。需要指出的是,以上研究虽然一定程度上揭示了泥沙位置的分布特性,但大部分学者多考虑的是均匀沙,这与实际河流中泥沙为非均匀沙、且长期受水流作用的影响还有一定出入。

总的说来,对于泥沙起动的研究,还未脱离确定性方法的老路。在将来的研究中,还应多考虑采用统计分析方法来描述泥沙起动状态,既要考虑水流的随机性,也要考虑床面泥沙非均匀性、随机分布、泥沙颗粒形状的不规则性及颗粒大小之间的隐暴效应等因素。

2 推移质运动规律研究

早在 19 世纪末期,法国 Duboys 基于水流剪应力,开创性地提出了推移质泥沙输移理论,之后众多学者对这一问题进行了深入研究^[31-37]。从研究方法上来说,推移质运动的研究方法可划分为实验研究方法与理论研究方法。实验研究方法以 Gilbert^[31]及 Meyer-Peter 等^[32]为代表,理论研究方法的途径则较多,且各有千秋。Gilbert 在 1909 年—1914 年,采用了 9 种沙样进行了 892 组试验,开创了水槽试验的先河,标志着现代泥沙运动力学的兴起,其研究成果至今仍在被引用;他们在孤立单因素分析基础上,通过系统的推移质输沙率与单因素、多因素的试验,逐步建立和完善了以水流切应力为水流强度指标的推移质输沙率公式。在理论研究方面,有基于流速为主要参变量建立的推移质输沙率公式,如沙莫夫公式、冈恰洛夫公式,列维公式等;有基于拖曳力为主要参数建立的推移质输沙率公式,

如耶格阿扎罗夫公式,恩格隆公式,阿克斯-怀特公式等;有基于能量平衡观点建立的推移质输沙率公式,如拜格诺公式,杨志达公式等;有基于统计方法建立的推移质输沙率公式,如爱因斯坦公式,韩其为公式等;有基于沙波运动建立的推移质输沙率公式,如 shionhara 公式等^[33];近几年来,张根广课题组^[17-18,29-30,34-39]将水流随机性及泥沙相对位置随机性同时引入泥沙起动输移中,从理论上推导出全概率泥沙起动及输沙率公式。随着非线性科学的发展,一些研究者试图从非线性角度对推移质输沙率进行研究,例如,白玉川等^[40]通过分析推移质运动过程的非线性动力学特性,证明了床面形态的演化决定于推移质运动过程的突变特性;杨具瑞等^[41]基于尖点突变理论,得到了推移质输沙率公式;在推移质泥沙运动的分形和自组织规律研究方面,姚令侃等^[42]基于非均匀沙水槽实验,建立了推移质输沙率与床面泥沙颗粒间的双曲关系,但这种分布的动力学机制尚需要进一步研究;汪富泉^[43]通过理论分析和实验数据论证,论述了推移质运动的自组织临界性和分形列维稳定分布的物理机制。综上分析,上述研究成果大多数均建立在均匀沙的基础上,即使部分成果是基于非均匀沙研究,但由于分析中均采用的是泥沙中值粒径或平均粒径,因此不算真正意义上的非均匀沙输沙率研究,而完全基于非均匀沙考虑的推移质输沙率计算方法有四类^[44]:直接分组计算法、修正剪切力法、床沙分组计算法、输沙率级配法。直接分组计算法采用床面泥沙分组计算输沙率方法,得到不同粒径组的泥沙输移率,最终累加求和得到总输沙率,如刘兴年等^[45]、孙志林等^[46]、陈有华等^[47]、Cao 等^[48]。修正剪切力法是通过引入剪切应力修正系数,得到床面不同粒径组的床面剪切力,将修正后的床面剪切应力引入到均匀推移质输沙率中,得到不同粒径组的推移质输沙率,如 Parker 等^[49]、Wilcock 等^[50]、Rickenmann 等^[51]、孙东坡等^[52]。床沙分组计算法,首先要确定床面总的可能输沙率,其次要确定床面泥沙级配,而后将床面总的输沙率与不同粒径组在床沙中的权重乘积作为床面分组输沙率。该方法的计算精度受粒径分组数目的影响较大,现有的计算公式精度均还有待提高。输沙率级配法类似于床沙分组计算法,首先要确定床面总的可能输沙率,其次是确定推移质运动泥沙级配,而后将床面总的可能输沙率根据推移质运动泥沙级配进行分配,从而确定各粒径组的输沙率。该方法有效的避免了床沙分组计算法中分组数目对总输沙率计算结果的影响,提高了公式的预测精度,如

窦国仁等^[53]、Hsu 等^[54]、Tayfur 等^[55]、Bombar 等^[56]。

综上可见,无论是均匀沙还是非均匀沙,目前的研究成果多以单颗粒泥沙及单一运动状态为研究对象。而在实际河流中,随着水流强度的增强,床面泥沙并不是以单颗粒泥沙运动和单一运动状态运动,而是以多种运动形式(滑动、滚动、跳跃等)和群体运动状态输移。惠遇甲等^[57]、Hu 等^[58]采用高速摄像技术对床面附近颗粒的运动状态进行了观测研究,初步得到泥沙滑动、滚动、跃移以及悬移等各种运动形式所占的比例,开创了研究群体泥沙运动状态及多泥沙运动形式的先河;Gao^[59]研究了泥沙滚动和跳跃之间的转化、单层和多层运动的转换。

在泥沙运动特性研究中,早期主要以泥沙受力结构为基础,通过构建显式力学平衡方程,求解得到推移质运动速度与水流强度之间的关系。随着近代计算技术的发展,使得求解复杂的微分方程成为可能,因此,基于经典力学,结合近代流体力学、概率论、随机过程等学科,构建基于单颗粒受力模型、考虑颗粒位置随机性或受力随机性的微分方程,通过数值求解泥沙颗粒运动速度取得一定进展,如 Lee 等^[60]、白玉川等^[61]、徐海珏等^[62]、范念念^[63]。

在实验研究方面,学者一方面结合最新的理论进展,尝试采用多影响因素进行实验研究;另一方面不断提高测试手段,例如高速摄影技术、图像识别技术、粒子示踪等。惠遇甲^[53]利用光学补偿照相机,刻画了单个泥沙颗粒的跃移轨迹,对颗粒的速度、加速度、旋转、受力等问题开展了研究;唐立模等^[64]基于三维粒子示踪测速技术,观测了 10 种水沙条件下推移质颗粒的三维运动情况,统计分析了推移质颗粒的三维平均运动规律;余国安等^[65]通过专门设计制作的推移质运动视频观测采集系统和河床结构发育程度测量装置,对几种经典床面条件的山区河流推移质颗粒强度运动状态进行了观测分析;Julien 等^[66]通过对光滑床面上的不同大小、不同形状和密度的泥沙颗粒的平均推移运动速度进行了观测,拟合得到了推移质运动速度计算公式;胡浩等^[67]采用 ADCP 定点观测方法,通过对长江河口南港和北港粉砂、细砂河床的推移质运动速度进行研究后指出,只有在床沙发生普遍运动时,ADCP 观测法才能进行有效的测量;Amir 等^[68]采用摄像粒子图像测速系统及脉动压力传感系统,测量了床面颗粒跃移参数及受力变化;等等。与均匀沙相比,非均匀推移质运动更加复杂,主要表现为不同床面形态下,河床粗糙度对颗粒运动的间歇性和变化程度产生直接影

响。Nicholas^[69]指出,颗粒顶部湍流强度将会随着颗粒糙率的增加而增大,这一变化将引起颗粒速度进一步加大;Ramesh等^[70]研究了水力过渡区内泥沙运动速度,得到了泥沙运动速度的分布规律;许琳娟^[71]在水槽中开展了非均匀推移质运动特性的实验,利用数字图像处理技术,获得泥沙位置及运动轨迹,对泥沙运动速度、走停时间等参数进行了研究。

总之,在推移质运动及输移方面虽然取得了丰富的研究成果,但大多成果主要基于单颗粒泥沙运动特性,很少有从群体泥沙颗粒运动角度去探索推移质输移规律,尤其是从群体颗粒内部颗粒间的作用力(例如颗粒碰撞力)角度去考虑。就是对于推移质运动特性的认识,仍停留在对相关现象的定性描述,缺乏对这种现象产生原因的认识。究其原因有多方面的,既有学科面窄,无法与基础科学、尖端技术等相比的原因,也有学科本身问题复杂、难度大,而测量仪器不能满足科研需求的原因。

3 悬移质运动规律研究

泥沙浓度分布是河流动力学中基本理论研究的重要内容之一。自1930年代,Rouse^[72]基于紊动扩散理论,首次建立了泥沙浓度分布公式以来,至今己有多种不同的理论模型,如混合理论、能量理论、相似理论及随机理论。而在众多研究成果中,又以紊动扩散理论居多,其中扩散系数的选取是导致浓度分布公式繁多的主要原因。倪晋仁等^[73]基于垂向脉动速度概率分布特性,推导出了悬移质浓度垂线分布的统一公式及悬沙紊动扩散系数表达式,并从理论上揭示了这些理论的出发点虽然不同,但最终都能得到与扩散方程类似结构形式,只是扩散系数略有不同;并进一步分析提出,含沙量沿垂线分布包括两种类型:(1)泥沙浓度沿垂线分布规律为从水面到河底由小逐渐增大,在近壁区达到最大值,然后再由最大值迅速减小为零,称为I型(普通型)浓度分布;(2)自水面到河底单调增加称为II型^[74]浓度分布。然而,采用传统的泥沙扩散理论很难解释室内试验和原型观测到的I型泥沙浓度分布,因此,学者们试图寻求其它理论和方法解释这一现象。如Wang等^[75]基于固液两相流动力学理论分析后指出,I型泥沙浓度分布规律的形成原因,主要来自于升力的影响。刘大有^[76-77]早期基于两相流的紊动扩散模型研究发现,传统的紊动扩散模型不能很好的描述颗粒脉动强度梯度引发的扩散;尤其是在固相颗粒脉动强度变化较大的区域,基于菲克第一扩散定律的泥沙扩散理论更是存在明显的缺陷,并定

性解释了I型固体浓度分布的成因;之后基于泥沙悬浮运动机理认为,悬浮泥沙颗粒在河流或水平管道中,除受到重力和浮力作用外,还将可能受到流体中其他升力和泥沙颗粒脉动强度梯度的作用。傅旭东等^[78]基于流体动力学理论,修正了传统的泥沙扩散方程,并对影响含沙水流泥沙浓度分布类型、形成机理及扩散系数的影响因素进行了定量分析。倪志辉等^[79]基于非线性方法中分形标度,从流体内部结构分析入手,探讨了挟沙水流的含沙量分布。

1950年代,Einstein等^[80]基于床沙质、推移质和悬移质三者之间的内在联系,构建了水流挟沙力理论公式。Bagnold^[81]基于水流功率理论,结合推移质、悬移质的研究结果,推导出了一个包含推移质和悬移质的全沙输沙率公式。可见,上述两个公式概念明确,具有较强的理论基础,但其适用性与经验性公式相比,还有一定的差距。例如以悬移质泥沙输移为主体的平原河流,推移质泥沙运动可以忽略的情况下,经验性公式更具适用性,类似的公式有武汉水利电力学院学者^[82]公式、Velikanov^[83]公式及范家骅^[84]公式。综上可见,上述几个学者的研究都是基于推移质和悬移质具有不同运动形式的基础上,在具体研究时区别对待,沙玉清^[85]则认为,推移质运动和悬移质运动都是泥沙一种运动形式,在本质上没有什么不同,并基于这一思想,构建了一个更具普遍性及适用性的公式。

高含沙水流具有与普通挟沙水流不同的运动特点和冲淤规律。自1980年代以来,高含沙水流的挟沙能力问题,得到了国内外学者的普遍关注,并确定丰富的研究成果^[86]。曹如轩^[87]结合陕西省水利科学研究所室内试验资料,通过对高含沙水流的浑水粘滞性、泥沙沉降特性、高含沙水流极限粒径的概念及输沙特性等因素分析研究,建立了高含沙水流挟沙力公式;张红武^[88]基于泥沙悬浮能量来自于水流运动动能、水流能量消耗与泥沙悬浮功之间必存在着内在联系的考虑,通过分析研究泥沙含量对卡门常数与颗粒沉速的影响,以及浑水粘滞系、水力泥沙因子对高含沙水流挟沙能力的影响,提出了一个半经验、半理论的高含沙水流挟沙力公式;吴保生等^[89]采用回归分析方法,分析研究了水流挟沙力的内在机理及影响因素,构建了基于浑水黏性系数、泥沙沉速的高含沙水流挟沙力经验公式;费祥俊^[90]基于黄河泥沙悬浮指标推导出黄河干流不冲不淤流速,并在建立黄河干流挟沙能力计算中,计入黄河床沙级配及河道断面形态特征的影响,得到了一个适合黄河挟沙能力计算的的经验性公式;舒安平等^[91]基

于泥沙悬浮和水流紊动之间的联系,借鉴两相流的相关研究成果和大量实测资料,构建了高含沙水流挟沙能力公式。总之,目前在悬移质浓度分布、水流挟沙力、高含沙水流等方面取得了不少研究成果,但总的来说,水沙两相流的理论发展还不够成熟,现有的理论研究成果或公式还存在较大缺陷。因此,在将来很长时间内,还要重点研究低浓度泥沙颗粒与水流间的相互作用,揭示颗粒悬浮、扩散与交换机理;在此基础上,研究高含沙对水流运动特性、能量耗散特性的影响,探求高含沙水流与一般含沙水流在水沙输移方面的区别与联系。这就要求研究者不断加强基本理论的研究与探索,不断提高试验观测技术水平,着力实现跨学科、跨领域合作,最终建立一个适合高含沙水流的悬移质浓度统一分布形式与水流挟沙力公式,在体系上完善悬移质输移机理。

中国北方灌区多属于干旱地区,灌溉水源多为渠灌引水。尽管灌渠挟沙水流的输移规律的研究可借鉴明渠挟沙水流的运动理论,但仍与天然河道存在一定差异,一方面,灌溉渠道边界条件规整,便于研究与应用;另一方面,由于不同灌区(或同一灌区不同时段)来沙特性、水力条件、以及管理方式的差异,灌渠泥沙的输移规律也表现出特殊性。相较天然河道而言,灌区渠道泥沙淤积给灌区正常运行带来了严重问题。因此,研究者对灌区泥沙运动特性及泥沙淤积成因(泥沙淤积与来水来沙间的机理)进行了研究。早在 1987 年,人民胜利渠灌区运用之初,河南人民胜利渠泥沙专题研究组^[92]就灌区水沙分配规律和泥沙淤积分布规律开展了细致的研究;随着工程的不断运行、改造,以及黄河水沙条件的变化,相关研究不断深入,王延贵等^[93-94]以渠道水流含沙量垂线分布和输沙能力为基础,对引水分沙的特性及其对渠道冲淤的影响进行了初步分析,之后,在大量水沙实测资料基础上,对泥沙起动规律、含沙量分布规律及挟沙能力进行深入分析,指出渠道挟沙能力主要受渠道糙率、渠道比降、横断面形状、来沙级配和引水流量的影响。此外,李春涛等^[95]、史红玲等^[96]对位山引黄灌区的泥沙淤积原因也进行了相关研究,其结论与王延贵等^[94]的结论基本一致。黄河水沙的总体特征是粒径小,含沙量高,而国内部分渠道所引水沙与黄河水沙并不相同,故输移规律也并不一致。山溪性河流的引水问题与黄河的引水问题的最大区别在于,除了悬移质外,对推移质的输移规律同样需要给予关注^[97]。

为了兼顾灌区浑水资源的可持续利用及防淤防堵两大目标,部分研究者以泾惠渠、渭惠渠灌区为

例,对渠系节点处的泥沙淤积特征以及对引水分流特性开展研究。王延召等^[98]对渠系节点区域悬移质淤积与支渠引水分流间的关系进行了研究,指出回流区水流挟沙能力减小,泥沙在口门前形成拦门沙坎,是产生淤积的主要因素。同时,为了实现灌区水沙资源的优化配置和泥沙运用,研究者们进行了大量的研究,史红玲等^[99]构建了基于入渠水沙资源分配目标的灌区配置能力指标的表达式,并对指标值进行了量化;胡健等^[100]指出灌区泥沙合理配置与利用的关键是非均匀沙的输送机理,进而对非均匀沙不同粒径组泥沙的起动与止动、沉降与悬浮的差异进行了研究,得到分组沙的输沙能力、沿程衰减规律和上限平衡含沙量的统计特征。

4 结 论

基于前人的研究成果及存在的不足,提出以下几个亟待解决的问题:

(1) 在泥沙起动研究中,确定性的力学方法存在较大缺陷,描述随机现象的统计学方法将更适合描述泥沙起动问题;近底水流作用流速、床面泥沙非均匀性及随机分布规律作为泥沙起动的非确定性因素,将是当前及今后研究的热点和重点。

(2) 在推移质运动研究中,单颗粒泥沙的运动规律不足以反映床面泥沙真实情况,群体泥沙颗粒间的相互作用将是揭示推移质运动机理的重要基础和前提。

(3) 对泥沙颗粒悬浮、扩散与交换机理认识不清,是悬移质泥沙输移理论尚不成熟的主要原因;高含沙的存在对水流运动特性与能量耗散特性的影响并不明确,目前尚缺乏可靠的、系统的研究成果,其根本的原因仍是对含沙水流的紊动结构认识不够成熟,这也是河流动力学领域的难点问题。

参考文献:

- [1] 胡春宏,曹文洪,郭庆超,等. 泥沙研究的进展与展望[J]. 中国水利,2008(21):56-59.
- [2] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报,1960(4):44-60.
- [3] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究,1999(6):1-9.
- [4] Van R J. Sediment transport, Part I: bed load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984,110(10):1431-1456.
- [5] Wright S, Parker G. Flow resistance and suspended load in sand-bed rivers: simplified stratification model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,130(8):796-

- 805.
- [6] Elhakeem M, Sattar A M A. An entrainment model for non-uniform sediment [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 40(9):1216-1226.
- [7] Papanicolaou A N, Elhakeem M, Krallis G, et al. Sediment transport modeling review – current and future developments [J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 134(1):1-14.
- [8] Einstein H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows [J]. *Technical Bulletin*, 1950, 1026.
- [9] 孟震, 陈槐, 李丹勋, 等. 推移质平衡输沙率公式研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(9):1080-1088.
- [10] 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] Dou G R. Incipient motion of sediment under currents [J]. *China Ocean Engineering*, 2000, 14(4):391-406.
- [12] 白玉川, 王鑫, 曹永港. 双向暴露度影响下的非均匀大粒径泥沙起动 [J]. *中国科学(技术科学)*, 2013(9):1010-1019.
- [13] Wu F C, Chou Y J. Rolling and lifting probabilities for sediment entrainment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(2):110-119.
- [14] Dey S, Ali S Z. Mechanics of sediment transport: particle scale of entrainment to continuum scale of bedload flux [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, 143(11):04017127.
- [15] Hofland B, Battjes J A. Probability density function of instantaneous drag forces and shear stresses on a bed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(11):1169-1175.
- [16] Elhakeem M, Papanicolaou A N T, Tsakiris A G. A probabilistic model for sediment entrainment; the role of bed irregularity [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(2):137-148.
- [17] Li L L, Zhang G G, Zhang J J, et al. Incipient motion velocity of sediment particles on the positive and negative slope [J]. *Taiwan Water Conservancy*, 2017, 65(2):72-81.
- [18] 张根广, 周双, 邢茹, 等. 基于相对暴露度的无黏性均匀泥沙起动流速公式 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 25(4):688-697.
- [19] Cheng N S, Chiew Y M. Pickup probability for sediment entrainment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(2):232-235.
- [20] Paintal A S. A stochastic model of bed load transport [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1971, 9(4):527-554.
- [21] 韩其为. 泥沙起动规律及起动流速 [J]. *泥沙研究*, 1982, 7(2):11-26.
- [22] 刘兴年, 陈远信. 非均匀推移质输沙率 [J]. *成都科技大学学报*, 1987(2):29-36.
- [23] 何文社, 杨具瑞. 泥沙颗粒暴露度与等效粒径研究 [J]. *水利学报*, 2002, 33(11):44-48.
- [24] 杨奉广, 刘兴年, 黄尔, 等. 唐家山堰塞湖下游河床泥沙起动流速研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(3):84-89.
- [25] Cheng N S, Law W K, Lim S Y. Probability distribution of bed particle instability [J]. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(4):427-433.
- [26] 孟震, 杨文俊. 基于三维泥沙颗粒的相对隐蔽度初步分析 [J]. *泥沙研究*, 2011, 36(3):17-22.
- [27] 孟震, 杨文俊. 基于三维泥沙颗粒相对隐蔽度的底坡上散体沙起动初步研究 [J]. *泥沙研究*, 2011, 36(5):1-10.
- [28] 白玉川, 王鑫, 曹永港. 双向暴露度影响下的非均匀大粒径泥沙起动 [J]. *中国科学(技术科学)*, 2013, 43(9):1010-1019.
- [29] 周双, 张根广, 王新雷, 等. 均匀泥沙相对暴露度的试验研究 [J]. *泥沙研究*, 2015, 40(6):40-45.
- [30] 邢茹, 张根广, 梁宗祥, 等. 床面泥沙位置特性试验研究——暴露角、纵向水平间距及相对暴露度概率密度分布 [J]. *泥沙研究*, 2016, 41(4):28-33.
- [31] Gilbert G K. *The Transportation of Debris by Running Water* [M]. Washington, D. C.: Government Printing Office, 1914:263.
- [32] Meyer – Peter E, Muller R. Formulas for bed-load transport [C]//*Proceedings of the Second Meeting of International Association for Hydraulic Research, Delft*, 1948:39-64.
- [33] 张瑞瑾, 谢鉴衡. *河流动力学* [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [34] 王愉乐, 张根广, 周双, 等. 斜坡上的推移质输沙率公式 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(5):100-106.
- [35] 王愉乐, 张根广, 李林林, 等. 基于泥沙状态概率的推移质输沙率公式 [J]. *泥沙研究*, 2018, 43(5):1-6.
- [36] 李林林, 张根广. 基于全概率的推移质输沙率公式 [J]. *泥沙研究*, 2018, 43(6):15-22.
- [37] Li L, Zhang G, Zhang J. Formula of bed – load transport based on the total threshold probability [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2019, 19(2):569-581.
- [38] 王愉乐, 张根广, 陈学彪, 等. 二维床面均匀沙双向位置特性及起动概率研究 [J]. *台湾水利*, 2019(待刊).
- [39] 许晓阳, 张根广, 王愉乐. 基于全概率的斜坡上推移质输沙率公式 [J]. *台湾水利*, 2019(待刊).
- [40] 白玉川, 徐海珏, 许栋, 等. 推移质运动过程的非线性动力学特性 [J]. *中国科学(E辑:技术科学)*, 2006(7):751-772.

- [41] 杨具瑞,曹叔尤,方 铎,等. 坡面非均匀沙起动规律研究[J]. 水力发电学报,2004(3):102-106.
- [42] 姚令侃,方 铎. 非均匀沙自组织临界性及其应用研究[J]. 水利学报,1997(3):27-33.
- [43] 汪富泉. 推移质运动的分形与自组织特征研究——Ⅱ推移质输沙率的分形分布及自组织临界性[J]. 泥沙研究,2014(3):6-11.
- [44] Wu B S, Molinas A. Modeling of alluvial river sediment transport[C]//Albertson M L, Molinas A, Hotchkiss R. Proceedings of the International Conference on Reservoir Sedimentation, Vol. I. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, 1996:281-325.
- [45] 刘兴年,陈远信. 非均匀推移质输沙率[J]. 成都科技大学学报,1987,19(2):35-42.
- [46] 孙志林,邵 凯,许 丹,等. 浑水推移质分组输沙研究[J]. 水利学报,2012,43(1):99-105.
- [47] 陈有华,白玉川. 平衡输沙条件下非均匀推移质运动特性[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(4):657-669.
- [48] Cao Z X, Peng H U, Gareth P, et al. Non-capacity transport of non-uniform bed load sediment in alluvial rivers[J]. Journal of Mountain Science, 2016,13(3):377-396.
- [49] Parker G, Klingeman P C, Mclean D G. Bedload and size distribution in paved gravel bed streams[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1982,108(4):544-571.
- [50] Wilcock P R, Crowe J C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. J hydraul eng[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,129(2):120-128.
- [51] Rickenmann D, Recking A. Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set [J]. Water Resources Research, 2011,47(7):209-216.
- [52] 孙东坡,刘明潇,王鹏涛,等. 双峰型非均匀沙推移运动特性及输移规律[J]. 水科学进展,2015,26(5):660-667.
- [53] 窦国仁,赵士清,黄亦芬. 河道二维全沙数学模型的研究[J]. 水利水运工程学报,1987(2):3-14.
- [54] Hsu S M, Holly F M. Conceptual bed-load transport model and verification for sediment mixtures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992,118(8):1135-1152.
- [55] Tayfur G, Singh V P. Kinematic wave model of bed profiles in alluvial channels [J]. Water Resources Research, 2006,42(6):376-389.
- [56] Bombar G, Elci S, Tayfur G, et al. Experimental and numerical investigation of bedload transport under unsteady flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,137(10):1276-1282.
- [57] 惠遇甲,胡春宏. 水流中颗粒跃移的运动学特征[J]. 水利学报,1991,22(12):59-64.
- [58] Hu C, Hui Y. Bed-load Transport. I: mechanical characteristics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996,122(5):245-254.
- [59] Gao P. Transition between two bed-load transport regimes: saltation and sheet flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(3):340-349.
- [60] Lee H Y, Lin Y T, Jing Y Y, et al. On three-dimensional continuous saltating process of sediment particles near the channel bed [J]. Journal of Hydraulic Research, 2006,44(3):374-389.
- [61] 白玉川,陈有华,韩其为. 泥沙颗粒跃移运动机理 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2012,45(3):196-201.
- [62] 徐海珏,沈 颖,白玉川. 推移质滚动的机理及统计规律[J]. 水利学报,2014,45(10):1184-1192.
- [63] 范念念. 从单颗粒受力到群体运动特征的推移质研究[D]. 北京:清华大学,2014.
- [64] 唐立模,王奎奎. 推移质颗粒平均运动特性的试验研究[J]. 水利学报,2008,39(8):895-899.
- [65] 余国安,王兆印,张 康,等. 山区河流推移质运动的野外试验研究[J]. 水利学报,2012,43(6):631-638.
- [66] Julien P Y, Bounvilay B. Velocity of rolling bed load particles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,139(2):177-186.
- [67] 胡 浩,程和琴,韦桃源,等. 基于 ADCP 测量的长江口推移质运动速度研究[J]. 泥沙研究,2015,40(5):1-6.
- [68] Amir M, Nikora V, Witz M. A novel experimental technique and its application to study the effects of particle density and flow submergence on bed particle saltation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2017,55(1):101-113.
- [69] Nicholas A P. Computational fluid dynamics modelling of boundary roughness in gravel-bed rivers: an investigation of the effects of random variability in bed elevation [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010,26(4):345-362.
- [70] Bhaskar Ramesh, Umesh C. Kothiyari, Krishnan Murugesan. Near-bed particle motion over transitionally-rough bed [J]. Journal of Hydraulic Research, 2011,49(6):757-765.
- [71] 许琳娟. 非均匀沙床面颗粒运动试验研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2016.
- [72] Rouse H. Experiments on the mechanics of sediment suspension [C] // Proceedings of the 5th international congress for applied mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1939:550-554.

- [73] 倪晋仁,王光谦. 泥沙悬浮的特征长度和悬移质浓度垂线分布[J]. 水动力学研究与进展(A辑),1992,7(2):167-175.
- [74] 倪晋仁,王光谦. 论悬移质浓度垂线分布的两种类型及其产生的原因[J]. 水利学报,1987(7):60-67.
- [75] Wang G Q, Ni J R. Kinetic theory for particle concentration distribution in two-phase flow[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990,116(12):2738-2748.
- [76] 刘大有. 现有泥沙理论的不足和改进—扩散模型和费克定律适用性的讨论[J]. 泥沙研究,1996(3):39-45.
- [77] 刘大有. 关于颗粒悬沙机理和悬浮功的讨论[J]. 力学学报,1999,31(6):661-670.
- [78] 傅旭东,王光谦. 细颗粒悬沙浓度分布的影响因素分析[J]. 水动力学研究与进展,2004,19(2):231-239.
- [79] 倪志辉,张绪进,胥润生. 长江黄河含沙量垂线分布的分形研究[J]. 人民长江,2011,42(19):73-76.
- [80] Einstein H A, Ning Chien. Transport of sediment mixture with large range of grain sizes[R]. Omaha: U S Corp of Eng, 1953:49.
- [81] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[R]. USA: Geological Survey Professional Paper 422-1, 1966:1-37.
- [82] 钱宁,万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社.
- [83] Velikanov M A. Alluvial Process[M]. Moscow, Russia: State Publishing House for Physical and Mathematical Literature, 1958:241-245.
- [84] 范家骅,陈裕泰. 悬移质挟沙能力水槽试验研究[J]. 水利水运工程学报,2011(1):1-16.
- [85] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社,1965:302.
- [86] 郑委,郭庆超,陆琴. 高含沙水流基本理论综述[J]. 泥沙研究,2011(2):75-80.
- [87] 曹如轩. 高含沙水流挟沙力的初步研究[J]. 水利水电技术,1979(5):55-61,34.
- [88] 张红武,黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河,1992(11):7-9.
- [89] 吴保生,龙毓筹. 黄河水流输沙能力公式的若干修正[J]. 人民黄河,1993(7):1-4.
- [90] 费祥俊. 黄河下游河道高含沙水流的输沙能力分析[J]. 人民黄河,1996(2):9-14.
- [91] 舒安平,费祥俊. 高含沙水流挟沙能力[J]. 中国科学(G辑:物理学力学天文学),2008,38(6):653-667.
- [92] 河南人民胜利渠泥沙专题研究组. 引黄人民胜利渠灌区水沙分配和淤积分布的现状及其泥沙处理措施[J]. 灌溉排水学报,1987(1):8-17.
- [93] 王延贵,李希霞,王冰伟. 典型引黄灌区泥沙运动及泥沙淤积成因[J]. 水利学报,1997(7):13-18,36.
- [94] 王延贵,史红玲. 引黄灌区不同灌溉方式的引水分沙特性及对渠道冲淤的影响[J]. 泥沙研究,2011(3):37-43.
- [95] 李春涛,许晓华. 位山引黄灌区泥沙淤积原因及处理对策[J]. 泥沙研究,2002(2):1-5.
- [96] 史红玲,许晓华,王延贵,等. 位山灌区渠首泥沙灾害分析[J]. 泥沙研究,2008(4):63-68.
- [97] 刘焕芳,宗全利,刘贞姬,等. 灌区高含沙输水渠道淤积成因分析[J]. 农业工程学报,2009,25(4):35-40.
- [98] 王延召,张耀哲. 渠系节点悬移质淤积分布数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2018,37(5):81-85.
- [99] 史红玲,胡春宏,王延贵. 黄河下游引黄灌区水沙配置能力指标研究[J]. 泥沙研究,2019,44(1):4-10.
- [100] 胡健,戴清,张志昊,等. 引黄灌区非均匀沙的输送机理研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(6):18-22.

特邀作者简介

张根广研究员,工学博士,博士研究生指导教师。中国水利学会泥沙专业委员会委员,中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会委员,《西北水资源与水工程》期刊编委。主持完成及在研国家自然科学基金面上项目2项,主持完成工程科研项目60余项。参加国家重点研发计划课题、国家“十二五”农村领域国家科技计划课题项目、国家科技重大专项、国家自然科学基金研究项目及水利部重大研究专题等纵向研究课题10余项。在泥沙起动输移基本理论、泄水建筑物下游冲刷数值模拟、水工及河工模型试验等方面取得多项成果。获得水利部科学技术进步三等奖1项,获得国家发明专利及实用新型发明专利5项,取得计算机软件著作权2项。在 Environmental Fluid Mechanics, International Communications in Heat and Mass Transfer, Flow Measurement and Instrumentation, Journal of Taiwan Water Conservancy,《水利学报》《应用基础与工程科学学报》《西安交通大学学报》《水动力学研究与进展》《水力发电学报》《泥沙研究》等期刊上发表相关学术论文80余篇,被SCI、EI收录20余篇。