

第1章 引言

1.1 研究的背景和意义

推移质指在运动过程中频繁与床面产生接触的泥沙颗粒,其运动形式包括滑动、滚动、跃移和层移等。推移质运动既是水流驱动的结果,同时也对水流的紊动结构产生深刻影响。推移质直接参与造床是控制河流冲淤过程的重要因素(Yalin,1972; 钱宁 等,2003; Church,2006),在卵砾石及粗沙河床演变中的作用尤为突出(Meunier,2006; Lajeunesse et al.,2010; 范念念,2014)。研究推移质的运动规律,具有重要的科学及工程意义。

推移质运动非常复杂,呈现出典型的随机性。早期的研究大多不考虑推移质运动的随机性,仅通过量纲分析/数据回归(Meyer-Peter et al.,1948)或力学分析/能量平衡(Bagnold,1966)等方法,建立时空平均意义上推移质输移与水流强度之间的关系,即推移质平衡输沙公式。Einstein(1949)引入概率论来描述颗粒起动-运动-落淤的过程,由此推求推移质输沙率,其思想对现代泥沙运动力学研究产生了深远影响(Yang et al.,1971; Lisle et al.,1998; Ancey et al.,2002; Ancey et al.,2006; Papanicolaou et al.,2002; 马宏博,2014; 范念念,2014; 孟震,2016; Bottacin-Busolin et al.,2017; Oh et al.,2018)。

显然,Einstein 理论/方法依赖于对推移质在颗粒尺度上运动特征的准确描述。近年来,高速摄像机和图像处理技术的快速发展为研究单颗粒尺度下的颗粒运动特征和瞬时水流与泥沙的耦合关系提供了高效研究手段(Lajeunesse et al.,2010; Roseberry et al.,2012; Heyman,2014; Shim et al.,2017),有力推动了推移质输沙理论的发展(Ancey et al.,2006; Furbish et al.,2012)。

目前,应用图像处理技术来观测推移质运动已成为泥沙研究的热点和难点之一。一方面,为了适应复杂背景下的高频率、高精度测量,需要不断对已有技术进行评估、改进与拓展,推动技术进步与应用;另一方面,通过

新技术的应用,可以在更高的时空分辨率下量化推移质的运动特征,合理评价过去的研究结果,在深化认识的基础上达成共识,这也是本书研究工作的重点。

1.2 推移质输沙研究现状综述

1.2.1 推移质输沙测量方法研究综述

1. 图像拍摄方式

图像测量法伴随图像采集技术及计算机发展应运而生,具有非接触不干扰流场、时空信息全面等优点,近年来在推移质运动测量中得到广泛应用。

Bagnold 在 20 世纪 40 年代就开始利用摄像机拍摄风沙运动轨迹,20 世纪 70~80 年代,图像测量技术被用于研究推移质颗粒的运动(Paintal, 1969; Grass 1970; Drake et al., 1988)。胡春宏和惠遇甲(1990a)在 20 世纪 90 年代初利用高速摄影技术获得了单颗粒泥沙的二维跃移轨迹,唐立模等(2006, 2008)利用 4 台摄像机记录了颗粒的三维运动图像。目前图像测量以二维为主,在技术上力争提高测量频率和测量精度。就二维测量而言,根据相机的安装位置可将图像测量方法分为顶面(底面)拍摄和侧面拍摄两种主要方式。

顶面(底面)拍摄将相机安装在水槽的顶部或者底部,并保证相平面与床面平行(Frey et al., 2003; Radice et al., 2006; Zimmermann et al., 2008; Lajeunesse et al., 2010; Roseberry et al., 2012)。其中底面拍摄方法(Séchet et al., 1999)只能应用于单层推移质且颗粒较为稀疏的情况,而顶面拍摄方法能够获得表层颗粒的运动特征(如运动颗粒在空间的分布特征)和单颗粒运动轨迹等,对于多层推移质运动的情况误差较大。明渠中的顶面拍摄方法会受到自由水面的影响,部分研究者(Tregnaghi et al., 2012; 孙东坡等, 2015)在拍摄区域水面上放置透明塑料板,也有部分研究者(Lajeunesse et al., 2010)利用图像处理算法来消除水面波动的影响。

侧面拍摄(胡春宏和惠遇甲, 1990a; Lee et al., 2000; Ancey et al., 2002; Nezu et al., 2004)将相机置于水槽侧面,能够获取颗粒沿水流方向及垂向的颗粒运动特征。为了固定成像比例,侧面拍摄一般只能观测某一

水流立面,有学者甚至在水槽宽度基本等于粒径的极窄水槽中(Ancey et al., 2003)进行拍摄(极窄水槽的边壁效应在一定程度上影响了颗粒的运动,因此其结果的可靠性存疑)。侧面拍摄无法获取断面的输沙率信息。

2. 图像处理技术

图像处理软件主要有 Khoros, ImageJ, MATLAB 和 OpenCV 等。Khoros(Papanicolaou et al., 1999)是由新墨西哥大学开发并运行在 UNIX 系统上的软件,其运行效率低(1.7min/frame),使用年代较早且应用范围较小,因而近年来鲜有使用。ImageJ 是由美国国立卫生研究院(National Institutes of Health, NIH)基于 Java 开发的图像处理软件,能够应用于多种平台,且占用内存空间小、运行速度快,被研究者(Roseberry et al., 2012)应用于图像识别中。MATLAB 是美国 MathWorks 公司开发的商业数学软件,其代码简洁,图像处理工具包和高级数学计算的功能完备,被广泛用于处理推移质颗粒的识别及追踪。OpenCV 具有丰富的函数、强大的图像和矩阵运算能力,近年来在多目标追踪方面应用较多,但其代码复杂,适用于熟悉 C++ 语言的研究者。综上所述, Khoros 和 ImageJ 没有包含高级数学计算函数,因此不能应用于颗粒追踪; MATLAB 与 OpenCV 都能够有效地识别和追踪颗粒,在运行速度和使用简洁程度等方面各有特点,因此目前两种软件各有拥趸。

无论采用何种软件处理推移质运动图像,其核心目标均为颗粒识别(如颗粒形状、面积、中心位置及特征点位置等)和多目标追踪。颗粒识别的算法包括图像预处理、图像分割(阈值分割,边缘检测和区域提取法)和特征提取(基于局部细节特征的算法)等核心技术,识别结果一般用于获得推移质颗粒组成和粒径分布、颗粒间的相互位置关系如暴露度等,以及作为颗粒追踪的初始位置(张家怡, 2010; Graham et al., 2005; 孙东坡 等, 2015; 周双, 2015; Frey et al., 2003; Roseberry et al., 2012)。

多目标追踪方法的一般步骤包括目标识别和多目标关联(匹配)。目标识别指获取颗粒的初始位置,有部分研究者采用图像相减(帧差法)进行图像识别(Papanicolaou et al., 1999; Keshavarzy et al., 1999; Radice et al., 2009),也有部分研究者(Séchet et al., 1999; Frey et al., 2003; Zimmermann et al., 2008; 刘春嵘 等, 2008; 孙东坡 等, 2015)采用无差别识别第一帧图像中所有颗粒的方法,还有部分研究者(Lajeunesse et al., 2010; Radice et al., 2017)采用染色颗粒进行识别。帧差法根据颗粒运动后图像的像素

值发生的变化,将最有可能发生运动的颗粒作为第一帧的目标颗粒,提高了运算效率和正确率。无差别识别方法适用于床面颗粒较大且稀疏排列的情况,若床面颗粒较小且排列密实,则颗粒的辨识度降低,颗粒的误匹配率增加(苗蔚等,2015)。染色颗粒方法仅能识别部分染色颗粒,识别结果会缺失部分信息。

多目标关联方法就是判定第二帧与第一帧目标的相似性,并持续追踪单颗粒泥沙的运动轨迹。匹配方法主要分为灰度互相关(Campagnol et al., 2013; Miao et al., 2015)、最小距离法(Böhm et al., 2006)和匈牙利算法(Heyman, 2014)等。灰度互相关是对连续两帧的原始图像进行互相关计算,以识别的颗粒中心作为诊断窗口在第一帧的中心,以颗粒粒径为诊断窗口边长,对两帧图像在一定范围内进行诊断窗口的互相关计算,相关系数峰值处为颗粒在第二帧的位置。最小距离指将相减后几何距离最小的两个正负区域匹配为同一颗粒在两帧中的位置。匈牙利算法的关键技术是寻找二分图的增广路径来实现完美匹配,二分图在本书中指相减后负值区域的集合与正值区域的集合,详细的计算步骤参见文献(谷稳, 2013)。早期也有部分研究者(Hu et al., 1990a, 1990b)采用人工判读的方法获取运动颗粒的轨迹。在较为相似且复杂的背景下,人工判读的准确率较高但效率低,难以提高样本容量以进行有效的统计分析。

理论上,若目标数量稀少、形状不变且保持持续运动,基于上述图像匹配的各种方法皆能追踪到多颗粒在图像序列中的运动轨迹。事实上,在低水流强度下,推移质颗粒多以滚动或跳跃形式进行间歇性运动,颗粒之间的遮蔽也多有发生,上述方法皆有局限性。针对目标追踪过程中的复杂情况,研究者(Bar-Shalom, 1987)引入了先验模型如卡尔曼滤波与粒子滤波等,根据前期运动规律估计当前目标状态。同时,针对每一时刻目标数量的变化和观测的不确定性等问题,研究者(彤丽等, 2013)提出了最近邻法(nearest neighbor, NN)、联合概率数据关联法(joint probability data association, JPDA)、多假设跟踪法和近年来的仿生算法。这些方法基本能够解决多目标追踪中的复杂问题。

3. 图像测量参数

在室内水槽试验中,不论采取侧面拍摄还是俯视拍摄,由于推移质在时空尺度上存在间歇性与随机性,图像测量参数对推移质运动的测量结果会产生不可忽略的影响。图像测量参数包括采样间隔、样本容量、采样历时和

采样面积等,但目前针对图像测量参数的研究较少。

由于推移质运动具有非连续的特点,若使用不同的采样间隔,测得的运动参数并不一致。在理论上,提高时间分辨率,采用较小的采样间隔进行测量,可以获取更精细的推移质运动信息;但在实际试验中,若采用很小的采样间隔,颗粒在两帧之间的位移可能太小以至于无法有效识别。Radice 等(2006)指出,采样间隔的合理值应该对应于 Nikora 等(2002)提出的推移质运动的中间尺度,但他未对采样间隔的影响进行定量研究。

床面推移质运动在空间上也呈现显著的非均匀性。研究者(Radice et al., 2010; Roseberry et al., 2012)通过试验发现,运动颗粒的位置在空间上的分布存在各向异性,而这种不均匀的空间分布可能与水流相干结构有关(Drake et al., 1988; Séchet et al., 1999)。另外,采样窗口的尺寸也会影响运动步长与时长的精度(Fathel et al., 2015)。因此,若对推移质运动结果进行空间平均,需要考虑运动颗粒分布的空间特性,选择合理的采样面积。

同时,由于推移质运动在时间尺度上具有随机性,根据统计理论可知,若采用时间平均的方法获取推移质运动结果,则结果能否收敛取决于相互独立的样本数量或者连续采样的样本时长。Roseberry 等(2012)研究发现,随着采样面积的增大,运动颗粒数量的变异系数降低,即波动性减弱,但他未分析合理的采样面积值。

1.2.2 推移质运动特征研究综述

在较低的水流条件下,泥沙运动表现出了间歇性与随机性(Einstein, 1950; Papanicolaou et al., 2002; Schmeeckle et al., 2007)。随着测量手段的提高,特别是图像测量技术的发展,研究者开始对颗粒尺度的推移质运动特征展开试验与理论研究(Lajeunesse et al., 2010; Furbish et al., 2012a, 2012b; Roseberry et al., 2012; Fathel et al., 2015; Furbish et al., 2016; Shim et al., 2017),主要包括运动颗粒数量、起动概率、运动速度、运动步长、运动时长、跃高、停时等参数。在理论研究方面,部分研究者主要依据颗粒力学与运动学特征建立滚动/跃移的运动模型。Wiberg 和 Smith (1985, 1989)基于对单颗粒受力的确定性分析,建立了跃移运动模型,根据模型能够得到随时间变化的单颗粒轨迹,进而能够得到运动步长、跃高和运动速度等参数。Sekine(1992)在跃移模型中考虑三维随机的颗粒与床面的碰撞过程,得到修正的跃移轨迹。白玉川等(2012)根据颗粒的受力分析,建立颗粒跃移运动模型,从而获取跃移轨迹,得到跃高、运动步长、运动时长和运动速

度等参数。沈颖(2013)和徐海珏等(2014)建立了滚动运动模型,并根据模型求解起动概率、起动流速、单步步长和单步时长等参数。这些研究均基于确定性的受力分析,忽略了水流脉动的影响。

随着对颗粒运动和水流随机特性的深入认识,基于力学与概率论相结合的推移质运动特征研究也取得了重要成果。Paintal(1971)基于 Einstein 随机理论,考虑了颗粒暴露度的影响,以此获取起动颗粒数量。韩其为和何明民(1980)将单颗粒泥沙运动近似视为马尔可夫(Markov)过程,建立了泥沙颗粒运动的随机模型,进而推导得到起动概率、运动步长和速度等参数。Parker 等(2000)将单步步长、起动/落淤率引入艾克纳方程(Exner equation)中,建立了随机理论体系。Kleinhans 和 van Rijn(2002)在 Meyer-Peter 输沙公式的基础上,增加了颗粒暴露度的随机特性,预测了非均匀沙的输沙率。Charru(2006)根据瞬时起动/落淤率建立输沙平衡方程,得到运动颗粒数量。Ancy 等(2008)同样将颗粒运动视为马尔可夫过程,在 Einstein 模型中加入群体输移的特征,得到单位面积床面的颗粒运动个数与随机变化规律。Heyman 等(2013)、Heyman(2014)和马宏博(2014)根据考虑群体输移特征的马尔可夫的随机模型,分析了停时的概率密度分布。范念念(2014)对于以滚动和滑动为主的推移质颗粒建立朗之万方程,推导得到用于描述颗粒运动速度概率密度分布的福克尔-普朗克方程,根据朗之万方程模拟得到运动步长与时长,认为运动步长符合长尾型的幂律分布而非窄尾型的指数分布。

试验观测是深入理解推移质运动规律的基本手段,室内水槽实验最早可追溯到 Gilbert(1914)。早期的水槽实验以观测输沙率与水流强度为主(Shields,1936),其后随着图像测量技术的引入,少量的且背景清晰的推移质颗粒的运动轨迹能够被人工或简单的图像追踪方法识别,例如,胡春宏和惠遇甲(1990b,1991,1993)通过人工识别跃移颗粒在中垂面的运动轨迹,得到运动步长、运动速度、加速度和跃高等参数的统计均值的变化规律。Fernandez Luque 和 Van Beek(1976)则从水槽顶部拍摄运动颗粒,追踪得到运动轨迹,并获得运动步长、速度等参数的时均统计值的变化规律。Niño 和 García(1994)从水槽侧面获取颗粒的运动步长、跃高与速度的统计均值与方差。Séchet 和 Le Guennec(1999)对采集的在光滑床面上稀疏分布的泥沙图像进行颗粒识别,得到运动步长、停时统计均值和概率密度分布。唐立模等(2006,2008,2013)开展了三维颗粒运动特性的测量,得到颗粒运动速度在 3 个方向的时均值和紊动特性。Ancy 等(2002,2003)、Böhm 等

(2006)、Heyman(2014)和马宏博(2014)均在极窄的水槽下进行中垂面泥沙颗粒的长距离追踪,得到运动颗粒数量与停时等参数的随机分布特性,其中运动颗粒的数量符合负二项分布,停时在较低水流强度呈现双隆起型。

最近的研究已经能够在粗糙动床条件下开展顶面拍摄高时空分辨率的精细测量。Lajeunesse 等(2010)通过对染色颗粒的追踪,得到颗粒的运动轨迹,统计分析了运动颗粒数量、运动速度、运动步长与时长的时均特征和概率分布,其流向的运动速度符合指数分布,展向运动速度符合正态分布。Roseberry 等(2012)精细地追踪了低水流强度下的运动颗粒轨迹,发现运动颗粒数量符合二项分布,流向与展向运动速度分别满足指数分布和正态分布,颗粒运动步长与时长均符合伽马分布。Campagnol 等(2013, 2015)通过精细化测量研究了颗粒运动速度的随机特性。Shim 和 Duan(2017)通过试验发现运动步长随水流强度呈现分段的规律,即在低水流强度下,运动步长与水流强度无关;而在高水流强度下,运动步长随水流强度线性增大。Ali 和 Dey(2017)及 Furbish 等(2017)基于精细测量研究不同时间尺度下颗粒的扩散特性。

除室内水槽外,在天然河流中也进行了大量的试验观测,研究者(Hassan et al., 1991, 2013; Liedermann et al., 2013)通过在河流中放置示踪颗粒,获得一次洪水过程或一段时间内示踪颗粒的位移分布。

目前,对于推移质运动特征参数存在多种理论假设与测量结果,参数的时均值与概率密度分布均未达成共识,对于运动参数时均值随水流强度的变化存在多种说法。表 1.1 统计了多位研究者的推移质运动参数中的运动步长和运动速度,可以发现其相互之间存在较大的差异。参数概率密度由于需要较多的样本量,在测量上也存在一定的难度,目前部分参数如运动速度的概率密度分布结果较为统一,均为类指数型分布,而如运动步长和时长的分布则存在争议。

表 1.1 文献中运动步长与运动速度的时均值的规律

研 究 者	运动步长 L	运动速度 U
Fernandez-Luque 和 Van Beek(1976)	$L/D=16$	$U=11.5(u_* - 0.7u_{*c})$
Abbott 和 Francis(1977)	L 与 D 无关	$U=a(u_* - u_{*c}),$ $a=13.4\sim 14.3$
Sekine 和 Kikkawa(1992)	$L/D=3000\theta^{0.25}(\sqrt{\theta}-\sqrt{\theta_c})$	$U=8(u_*^2 - u_{*c}^2)^{0.5}$

续表

研 究 者	运动步长 L	运动速度 U
Niño 和 García(1994)	$L/D=2.3\Theta/\Theta_c$	$U=a(u_*-u_{*c})$, $a=6.8\sim 8.5$
Hu 和 Hui(1996)	$L/D=27.5(\rho_s/\rho)^{0.94}\Theta^{0.9}$	$U=11.9(u_*-0.44u_{*c})$
Lajeunesse 等(2010)	$L/D=70(\sqrt{\Theta}-\sqrt{\Theta_c})$	$U/u_*=4.4(1-\sqrt{\Theta_c/\Theta})+0.11/\sqrt{\Theta}$
Shim 等(2017)	$L/D=4,\sqrt{\Theta}<0.25$ $L/D=32.2\sqrt{\Theta}-4.6,\sqrt{\Theta}\geqslant 0.25$	—

1.2.3 水沙耦合运动机理研究综述

推移质颗粒在水流作用下运动,当水流作用力大于摩擦阻力时,泥沙启动,开始输移过程(钱宁 等,2003)。而泥沙在输移过程中,不仅耗散水流的能量,使近底床面的雷诺应力变小(Dey et al.,2012),也会逐渐形成床面结构,如沙纹、沙波等,而床面结构也会反过来影响输沙(Einstein et al.,1952)和水流。因此,水流、泥沙输移与床面形态之间存在相互耦合的关系。

对于明渠床面附近而言,已发现的最重要的水流相干结构为条带结构与猝发事件。条带结构最早是由 Kline 等(1967)在利用氢气泡示踪的水流试验中发现的,指在近壁区存在的高速与低速相间的条带。经过统计研究(Schraub et al.,1965; Nezu,1997)发现,在黏性底层和部分缓冲区,低速条带之间的间隔为固定值,采用内尺度(ν/u_* = 水流黏滞系数/摩阻流速)进行无量纲的条带间隔为 100 左右,但条带间隔会在向外区喷射的过程中逐渐增大(Nakagawa et al.,1981; Carlier et al.,2005)。Lee(2011)和 Tomkins、Adrian(2003)在水流的外区和对数区均发现条带结构,Kinoshita(1967)在野外实验中也同样发现了与水深同尺度的条带结构。王浩(2016)通过图像处理得到条带间隔,如图 1.1 所示,发现条带间距在水深范围内连续发育。

猝发现象实际就是条带结构的破坏过程(钟强,2014),即条带向下游运动过程中的抬升和突发的振荡破碎。猝发现象又包含了喷射和清扫两个事件,喷射指床面附近的低速流带向外区运动,清扫指外区的高速流带向床面俯冲(Kim et al.,1971)。按照 Willmarth 和 Lu(1972)的象限分析法,喷射对应的水流脉动流速为 $u'<0,v'>0$ (u,v 分别对应沿流向和垂向的脉动

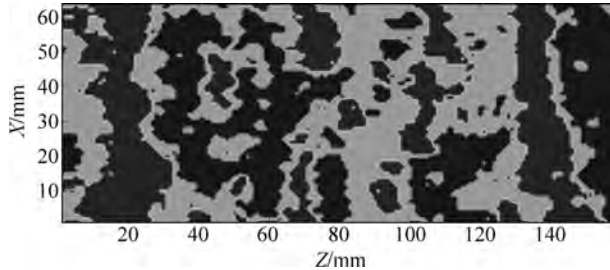


图 1.1 基于图像处理获取的水流条带结构(王浩, 2016)

流速), 由于处于 $u'-v'$ 坐标系中的第二象限, 因此也称为“Q2 事件”, 如图 1.2 所示; 相应的, 清扫对应的水流脉动流速为 $u' > 0, v' < 0$, 称为“Q4 事件”。

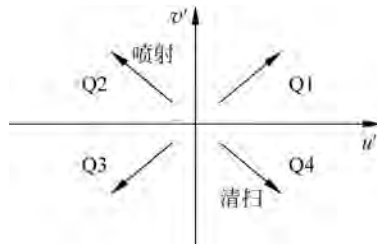


图 1.2 象限事件划分示意图

相干结构对推移质运动特性的影响, 在细颗粒稀疏沙的运动试验中已有明显表征。细颗粒稀疏沙对水流的跟随性较好, 能够清晰地反应水流对泥沙运动的影响规律。Niño 和 Garcia (1996) 发现细颗粒聚集在低速条带区, 可以形成稳定的间隔状分布, 形似水流条带结构的分布, 与图 1.1 中条带结构的分布十分相似。Nelson 等(1995)也在试验或者数值模拟中发现了相似现象。王殿常(2000)利用图像处理技术, 得到沙纹特征尺度在水槽中的分布, 以及其随水流强度的变化规律。基于该现象, Nakagawa 和 Nezu (1981) 认为沙纹是由于二次流形成的, 二次流产生沿展向分布的高低速流带, 高速流带区泥沙运动较多且床面无沙, 低速流带区泥沙运动较少且沙粒聚集, 间隔分布的高低速流带能够解释间隔分布的沙纹结构。但是研究者(王殿常, 2000; 王浩, 2016)发现, 沙纹在水槽中心较为明显, 而在边壁不明显, 因此认为二次流(边壁更明显)无法解释这一现象。

同样地, 在粗糙床面上的推移质运动一段时间后, 也会出现与稀疏颗粒类似的空间分布, 表现为间隔的凸起与凹陷, 分别称为“沙脊”和“沙槽”, 水

槽试验和野外河流中均出现此类现象(Shvidchenko et al., 2001; Karcz, 1973)。与稀疏沙在水槽中的分布一致,研究者(Colombini et al., 1995)发现沙槽与沙脊在水槽中心比较明显,而边壁不明显。王浩(2016)和 Zhong 等(2016)分析了沙纹的特征后认为:条带状的沙纹是由于流向涡引起的,流向涡即明渠中由壁面引起的瞬时随机的水流结构,其与二次流的相似点在于,二者在展向上的分布均为高低速条带;其与二次流的不同点在于,二次流是由边壁作用引起,而流向涡在时间平均上存在于边壁附近。流向涡的强度随水流强度发生变化,在水槽中心处,水流较强,流向涡较强,则形成明显的沙槽与沙脊;而在水槽边壁处,水流较弱,则沙槽与沙脊不明显。

二次流与流向涡的解释沙纹形成机理的模型,实际上都需要两步确认,一是确定象限事件与泥沙运动的关系,二是确定泥沙输移与床面形态的关系。对于象限事件与泥沙运动的关系,部分研究者(Sutherland, 1967; Nezu et al., 2004; Radice et al., 2013)通过象限事件与泥沙运动强度的间接相关,认为清扫导致床沙的运动;部分研究者(Thorne et al., 1989; Nelson et al., 1995)发现 Q4-Q1 事件与输沙率均随水流强度增加,因此认为 Q4-Q1 事件导致了床沙运动。Hofland (2005)则将单颗粒泥沙的起动与水流直接建立相关关系,发现 Q2 事件使得床沙运动。Shih 等(2017)通过对单颗粒泥沙的精确分析发现,连续的 Q4-Q1-Q4 事件可以促使泥沙起动。

可以发现,目前的研究或针对泥沙相和水流相的间接相关,或针对单颗粒起动,对于粗糙可动床面的泥沙输移与水流相干结构关系的直接量化研究较少,完全同时同地的测量水流与泥沙运动在技术上也存在一定难度。对于泥沙输移与床面形态的关系,目前的研究多为定性观察,缺乏量化的研究。

1.3 研究内容

通过研究综述可知,基于图像处理技术的推移质运动特征研究目前尚存在以下不足。

(1) 推移质追踪算法大多基于低频简单背景,对高频复杂背景下的算法较少,适应性有待验证;图像测量参数对推移质输沙结果的影响未引起足够的重视,且没有量化的分析研究。

(2) 对于均匀沙运动特征,以单颗粒为研究尺度的研究较少,对于时均运动特征值与水流强度的关系未形成统一认识,对于运动参数的试验数据