

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.023

沉积物再悬浮测量方法综述

谢倩雯^{1,2}, 李一平¹, 孔文³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 深圳市规划国土发展研究中心, 广东 深圳 518040;
3. 南京智慧新城工程管理有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 为了研究沉积物侵蚀、再悬浮、运输等一系列行为机制, 从实验室装置模拟法、室外原位装置测量和野外直接测量 3 个方面总结了沉积物再悬浮测量方法。将沉积物再悬浮测量装置分为循环水槽、直流水槽及其他仪器, 描述了各类装置的基本工作原理、优缺点及适用环境, 并对不同装置的测量结果进行对比。基于现有的技术和方法, 主要是通过测量底床侵蚀剪切力和悬浮物浓度变化来定量分析沉积物再悬浮现象, 剪切力施加方式、测试时间及仪器大小等因素的不同造成了各类装置测量结果的差异性。

关键词: 沉积物; 再悬浮; 侵蚀阈值; 剪切应力; 测量方法

中图分类号: X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2015)06-0141-09

Review on methods of measuring sediment re-suspension

XIE Qianwen^{1,2}, LI Yiping¹, KONG Wen³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shenzhen Urban Planning & Land Resource Research Center, Shenzhen 518040, China;
3. Nanjing wisdom New Town Project Management Co., Ltd, Nanjing 210012, China)

Abstract: In order to study the series of behavioral mechanisms including sediment erosion, re-suspension, transportation, this paper summarized the sediment re-suspension measurement method in three aspects: laboratory device simulation, in situ measurement and directly measurement in field. Sediment re-suspension measuring device can be divided into circulating water flume, straight flow-through flumes, and other devices. Hydraulic working principles, advantages and disadvantages, range of application environment of different devices were described. And the measuring results of different device were compared. Based on existing technologies and methods, the phenomenon of sediment re-suspension was quantified by measuring seabed erosion shear stress and suspended solids concentration changes. Different shearing force, testing time and equipment size and other factors cause the diversity of the result from all kinds of devices.

Key words: sediment; re-suspension; erosion threshold; shear stress; measurement method

沉积物再悬浮是湖泊、河口、近海等环境中普遍存在的一种现象^[1]。沉积物再悬浮影响湖泊营养物质循环, 是大型浅水湖泊富营养化的内源^[2], 且黏性沉积物有吸附有机污染物和重金属的能力^[3], 一旦遇到洪水和风暴, 将发生大规模再悬浮, 从而影响水生生态系统健康, 降低水体透明度, 窒息底栖生

物群落^[4], 悬浮物所吸附的污染物也将释放到水体中去^[3]。此外, 沉积物侵蚀、再悬浮、输移、沉降等一系列动力学行为对水利工程应用来说也是十分重要的, 其影响航道和岸线的稳定性^[5]。黏性沉积物包括细颗粒粉砂和直径小于 0.075 mm 的黏土碎屑, 非黏性沉积物主要由直径介于 0.075 ~

基金项目: 中央高校业务费(2014B29114); 江苏省自然科学基金(BK20131370)
作者简介: 谢倩雯(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境数学模型和河湖富营养化机理研究。E-mail: 673565543@qq.com
通信作者: 李一平, 副教授, 博士生导师。E-mail: yipinglihhu@gmail.com

0.5 mm 之间的细砂组成^[6]。湖泊、河岸、河口潮间带等环境中的沉积物大都是细砂、淤泥和黏土的混合物。Lam 等^[7]指出水流速度达到 2 ~ 3 cm/s 就足以使土黏和粉砂颗粒再悬浮,而要使沙再悬浮,水流速度需达到 20 cm/s。由此可见,黏性沉积物是很容易发生再悬浮的,并以悬移质形式进行输移,而粗砂和砾石(直径大于 0.5 mm)通常情况下是呈推移质形式运动的。

非黏性沉积物的侵蚀阻力主要是重力沉降,而黏性底床的侵蚀阻力是由粒子间吸引力、聚合物摩擦力和电化学阻力共同决定的,而这些又随黏性沉积物性质和水流条件等变化^[8]。决定黏性沉积物再悬浮的两个因素是:①黏性颗粒之间的凝结强度;②水流所施加的剪切力。当水流产生的剪切力超过沉积底床凝结强度时,沉积物开始脱离底床,水流变得浑浊,这标志着侵蚀的开始^[9]。黏性底床的侵蚀过程通常被划分成两种侵蚀类型^[10]。类型 I 是深度受限侵蚀,由于底床剪切强度在垂向上存在一个很大的梯度,当达到某个侵蚀深度时,底床剪切强度与水流剪切力相平衡,则侵蚀停止。类型 II 是恒定侵蚀,其特点是匀质底床剪切强度不随沉积物深度的变化而改变,这种情况下的侵蚀速率是恒定的^[10]。相对于非黏性沉积物而言,黏性沉积物侵蚀、悬浮、运输等一系列行为机制要复杂得多,相关的物理、化学、生物进程都还尚未完全了解。目前,研究者们主要通过实验室研究和现场原位测量来了解沉积物再悬浮机制,研究者们根据不同的研究目的以及水动力情况,设计出了许多形状各异、大小不一的再悬浮测量装置,它们有着各自的适用环境、优势与弊端,如今正缺少对这些测量装置及方法的归纳与总结。笔者回顾了沉积物再悬浮测量技术的发展,描述了各种装置的基本工作原理、优缺点及适用范围,为研究沉积物再悬浮实验装置和方法的选择提供借鉴和参考。

1 实验室装置模拟法

对沉积物侵蚀性能及再悬浮机制的了解主要是基于实验室研究,实验室研究可以控制水动力条件及沉积物性质相关参数,比如沉积物颗粒大小、容积密度、水含量等。然而,自然黏性沉积物组成复杂,经人工处理的沉积物样品无法反映出自然环境中沉积物的物理、化学和生物特性^[5,10]。即使是从现场采集原状泥样,在采样和运输过程中也可能遭受扰动而使样品性能发生显著改变^[11]。

1.1 小型水流扰动模拟装置

小型沉积物再悬浮模拟装置通常是在烧杯、锥

形瓶等容器内装入一定量的沉积物和水样,通过搅拌或振荡产生扰动,模拟沉积物侵蚀的发生。如颗粒起动模拟器(PES)^[12]是通过振荡网格的来回运动生成湍流,对沉积物进行扰动。但 PES 不能直接得到侵蚀剪切力的大小,需要通过环形水槽校准实验来建立振荡频率与剪切力之间的关系^[13]。范成新等^[14]用振荡三角瓶法,结合太湖现场风力观测数据,以振荡频率模拟了不同风速对沉积物扰动产生的悬浮物量。该方法操作方便,但体系过小导致悬浮物浓度增长受限,与实际情况有差异。Y 型旋桨式沉积物再悬浮发生装置^[15]从斜向和垂向同时对底泥表面和水柱产生扰动,能够减低悬浮物与器壁碰撞几率,装置外壁不同高度处的取样口可以测定悬浮物浓度垂向分布。总体来说,小型模拟装置结构简单,可用于定性描述沉积物再悬浮现象,但封闭系统中湍流产生的涡流与自然水流条件下观察到的涡流大小没有可比性。

1.2 循环水流扰动模拟水槽

循环水槽是一个封闭系统,当沉积物开始发生侵蚀时,水槽中的悬浮物浓度逐渐变大直至饱和。水槽上覆水的高度一般较小,这使得悬浮物浓度远远超过自然水体情况。水体中的高悬浮物浓度可能会改变水流特性,有研究表明悬浮物浓度在 200 ~ 2400 mg/L 时,环形水槽内的湍流强度下降了将近 30%^[16],这将导致不良的絮凝和沉淀现象发生。循环水槽通常是由一组平行墙组成,有环形和跑道形两种外部形态。环形水槽通常由两个直径不同的同心圆环组成,通过不同的机械方法在沉积物表面形成侵蚀水流,如由旋转盖来推动水流产生剪切力^[17],还有通过旋转盖和其下方连接的 4 个等距桨来推动水流^[18],或者直接由旋桨生成水流^[19]。环形水槽的优点在于其“无限”的水流长度生成了充分发展的边界层,因此底床剪切力可通过测量流速分布利用对数法则计算得到^[20]。然而,剪切力在径向上的分布是不一致的,水槽的横截面上产生二次流^[21],有研究表明可以通过反向旋转水槽外墙来最小化二次流的影响^[22]。比如由覆盖水面的环形圈和环形水槽同时往相反的方向旋转形成均匀的剪切湍流^[23],还有河海大学的双向环形水槽^[24-25]通过上部环形盘片和下部基座底盘做相向运动产生水流,还能通过调节上盘高度来控制水深。与环形水槽不同的是,跑道形循环水槽有一个相对长直的侵蚀测试区域,两端由弯曲段连接而成,因此二次流的影响较小^[26],通常要在弯曲段布置平行导流墙来减小二次流的影响。水流驱动装置布置在水槽长直段,有通过泵产生动力的^[27],也有通过电机驱动旋转盘推

动水流的^[26],因此,悬浮絮体可能会被水流驱动装置破坏。

1.3 直型水流扰动模拟水槽

上述循环水槽主要限制是水流施加剪切力小于1Pa,只有沉积物表层几毫米发生侵蚀^[28]。这只能代表一般情况下的沉积物再悬浮,却无法模拟由洪水和风暴引起的大规模再悬浮现象。而 SED 水槽^[28-29]能在高剪切力情况下测量随沉积物深度变化的侵蚀过程,施加剪切力最高可达 10 Pa。SED 水槽实质为封闭的直流水槽,水槽底部可插入含有沉积物的取芯管,取芯管底部活塞推动沉积物向上移动,保证沉积物——水界面与水槽底部水平。然而,水槽底部与沉积物取芯管之间边界糙率的突变影响了计算的精确性^[30]。SED 水槽通过调节泵不断增大水流速度,测得发生初始侵蚀时对应的临界剪切力,侵蚀速率则是剪切力和沉积物深度的函数^[31]。目前大部分水槽都只测量悬移质,忽略推移质,而 ASSET 水槽^[30,32],除了包含 SED 水槽的所有性能,还增添了一个推移质捕获器,即能够测定侵蚀发生后推移质组分的比例。SED 水槽和 ASSET 水槽在实验开始时都存在不确定性,因为水槽从空始状态到充满水流的过程对沉积物表面 1~2 mm 施加的侵蚀剪切力很难准确获得。此外,还有底部非水平的直流水槽,如倾斜直槽^[33]的底坡变化范围为 0.002417~0.01,能够更加真实地模拟河道水流情况。另外,Mark^[34]除了利用倾斜金属架来调节水槽坡度以外,还在水槽底部和侧面分别插入一个沉积物取芯管来同时模拟河道底泥和河岸边坡的侵蚀,相比 SED 水槽,能更加全面的模拟河道沉积物再悬浮现象。

1.4 波浪扰动模拟水槽

上述循环水槽和直流水槽只是测量单向流引起的沉积物再悬浮,而在河口、近海环境,振荡波才是侵蚀主动力^[35]。因此,在 SED 水槽的基础上发展了单向流与振荡波共同作用的 SEAWOLF 水槽^[35-36]。其中单向流由两个储水池的水头差控制,能产生 0.1~3 Pa 剪切力,振荡波由水槽一端的活塞运动产生,剪切力范围为 0.1~10 Pa,叠加后最高可产生 12 Pa 剪切力。SEAWOLF 水槽能够模拟振荡波主导的侵蚀过程,实验证明在瞬时流速相同的情况下,振荡波产生的剪切力远远大于单向流产生的剪切力。像太湖这种大型浅水湖泊,沉积物再悬浮的主要动力来自于波浪和湖流的共同作用,尤其是在风速比较大的情况下,波浪对沉积物的扰动作用占主导地位^[37]。孙小静等^[38]利用波浪水槽模拟了不同波高情况下太湖底泥的悬浮情况,并计算了

波高与表层底泥切应力以及风速之间的对应关系,水槽实验结果与野外观测结果一致,说明能够反映太湖的实际情况。Zheng 等^[39]指出波浪作用包括水平周期性剪切力和垂向压力,研究发现临界剪切力随波浪周期数增大而减小,周期数大的波流更具破坏性。

2 室外原位装置测量法

自然黏性沉积物组成复杂且容易破碎^[40]。Tolhurst 等^[41]研究表明,在实验室和原位测得侵蚀阈值存在数量级上的差异,因为原状沉积物在采样和运输过程中会受到扰动,这使得实验室数据的可靠性受到限制,因此更好的方法便是在未经扰动的沉积物底床上进行原位测量。研究者们根据具体需求研制了各种各样的便携原位测量装置,这包括剪切板、持续垂直射流装置、搅拌装置和不同形态的水槽,部分原位装置总结如表 1 所示。

2.1 循环原位水槽

室外原位环形水槽是对实验室环形水槽进行修正得到的,因此结构类似,通常由两个不同直径的同心圆环组成,区别在于原位环形水槽的底部开放,可直接插入沉积物中。原位环形水槽可通过搅拌盘推动水流^[64],或者利用旋桨驱动水流^[51],还有旋转盖连接旋桨共同作用产生剪切力^[42-43],通常利用 ADV 测得流速分布,OBS 获得悬浮物浓度,从而计算得出侵蚀剪切力和侵蚀速率。Tolhurst 等^[65]在不同装置的对比研究中发现随着仪器覆盖底床面积的减小,侵蚀阈值增大。因为水槽覆盖面积的不同使得水槽包含的沉积物范围不同,而沉积物性质在空间上存在差异性,大型仪器将包含更多的性质不同的沉积物,从而造成不同尺寸的仪器在侵蚀阈值大小上存在差异。然而,Widdows 等^[66]在对不同尺寸的环形水槽比较中发现侵蚀阈值有较好一致性,而侵蚀速率则变化较大,这可能跟测试时间有关,大型水槽如 Sea Carousel^[42-43]平均测试时间为 0.5~1 h,而微型便携式环形水槽^[50]只要几分钟。Widdows 等^[66]并没有发现水槽大小和侵蚀阈值之间存在明显的相关关系,其中 PML's AF^[49]水槽外径 64 cm,与沉积物底床接触面积 0.17 m²,是 PML's MAF 微型水槽^[50]的 6.5 倍。Tolhurst 等^[40]指出只有当仪器占地面积小于沉积物空间异质性范围时才能检测到沉积物空间异质性。

2.2 直流原位水槽

直流原位水槽通常设计成一个底部开放的顺直通道,是一个开放的系统,悬浮物可以随水流夹带出水槽。因此,悬浮物浓度的分布通常是在施加剪切

表 1 原位测量装置

来源	名称	形态	适用范围	剪切力/(N·m ⁻²)	
Amos 等(1993) ^[42]	Sea Carousel	环 形 水 槽	河口泥滩	0.5 ~ 2.5	
Amos 等(1997) ^[43]			三角洲	0.11 ~ 0.5	
Amos 等(2004) ^[44]	湖泊		0.07 ~ 0.48		
Moreau 等(2006) ^[45]	峡湾		0.22 ~ 3.06		
Amos 等(2010) ^[46]	Sea Carousel		湖泊	0.31 ~ 2.69	
Maa 等(1998) ^[47]	VIMS Sea Carousel		河口泥滩	0.05 ~ 0.10	
Maa(2008) ^[48]			河岸	0.03 ~ 0.08	
Widdows 等(1998) ^[49]	PML AF		河口泥滩	0.02 ~ 1.60	
Bale 等(2006) ^[50]	PML MAF		河口潮间带	0 ~ 1.50	
Thompson 等(2011) ^[51]	Voyager II		海洋	0.66 ~ 1.27	
Black 等(1995) ^[52]	SEAFLUME	跑道形水槽	河口泥滩	0 ~ 0.27	
Young 等(1978) ^[53]		沿海大陆架	0.01 ~ 0.07		
Güst 等(1989) ^[54]	SEAFLUME	沿海大陆架	0.02 ~ 0.22		
Hawley(1991) ^[55]	Raven Flume	直 流 水 槽	大型湖泊	0 ~ 0.13	
Ravens 等(1999) ^[56]		浅湾	0 ~ 3		
Aberle 等(2003) ^[57]		NIWA I	各种河流与海洋	0.01 ~ 0.55	
Debnath 等(2007) ^[58]	NIWA II				
Tolhurst 等(1999) ^[1]	CSM	垂直射流	潮间带泥滩	0.2 ~ 9.05	
Houwing 等(1998) ^[59]	ISEF	直立环形水槽	河口泥滩	0.11 ~ 0.18	
Wiuiamson 等(1996) ^[60]	ISIS	湍 流 剪 切 板 湍 流	潮间带泥滩	0.02 ~ 5	
Kalnejais 等(2010) ^[61]	EROMES		海岸	0 ~ 3	
Barnes 等(2009) ^[62]	BEAST		近海冲浪带	0 ~ 30	
Grant 等(2013) ^[63]			海洋	0.86 ~ 2.5 (cm/s) *	

* 为侵蚀剪切流速。

力之后立刻变大,再随着时间减小。大部分直槽由收缩进口段、直线侵蚀段和固定床部分组成,用于水下操作时上盖封闭。典型直槽如 NIWA 水槽^[4,57],其进口段和侵蚀段底部开放,固定床部分有固定底部以防止螺旋桨对底泥侵蚀,最小操作水深大约为 0.4m,适用于各种河流和海洋环境,可在水下操作。NIWA II 水槽^[58]增加了超声波测距系统,该系统包含 7 个独立的声学传感器,可直接测量水槽内床底高程。此外,NIWA II 水槽还考虑了侵蚀发生后的推移质组分,通过直接测量床面高程获得侵蚀速率,再由 OBS 测得悬浮物浓度获得再悬浮速率,利用质量守恒方程得出推移质所占比例。一般认为二次流的影响在直槽中最小,但同时直槽的缺点在于侵蚀区域水流边界层没有得到充分发展,导致用对数法则评估底床剪切力时存在不确定性^[57]。Ravens 水槽^[56]为解决侵蚀区水流边界没有充分发展的问题,将进口前段底部封闭并增加横栏以确保水流在到达侵蚀区之前充分发展。Ravens 水槽由泵推动水流,应用剪切力范围为 0~3 Pa,适用于浅湾环境,可水下操作,但是侵蚀深度受限,只能精确测量到 3~4 cm。

2.3 其他原位监测设备

以上所述环形水槽和直流水槽都是利用水平流对沉积物表明产生侵蚀剪切力,还有一些设备是通过其他方式使沉积物发生再悬浮的,如垂直射流^[1]、湍流^[3,61]、剪切板^[62,67]等。CSM^[1,68]是利用垂

直射流产生侵蚀剪切力,校准后的等价水平应力范围为 0.2~9.05 Pa,适用于不同类型的潮间带泥滩和沼泽地,但不能水下操作。大型水槽因其较大的接触面积和较长的测试时间而无法反应沉积物的空间异质性,而 CSM 因其 0.000 7 m² 的接触面积和 5min 的测试时间,是目前唯一能够小规模检测沉积物时空异质性的仪器。但 CSM 的侵蚀水流形态与自然水流结构相比,缺乏相似性,通常会产生一个比自然流更大的剪切力,但这可以表示紊动湍流的突然涌入所触发的沉积物再悬浮。EROMES^[61]是通过螺旋桨产生扰动,模拟自然紊流条件下的侵蚀装置,装置内壁均匀分布的 6 块导流板抑制涡流形成,主要产生垂直湍流。ISEF^[59]是垂直站立的环形水槽,比传统环形水槽轻巧,易于携带。ISEF 水槽由上部的螺旋桨来驱动水流,对下部的沉积物形成单向流侵蚀,同时测量流速和悬浮物浓度,当悬浮物浓度保持稳定后(即沉积物不再被侵蚀),此时剪切力大小等价于沉积物侵蚀阻力。ISIS^[60]是将一个钟形头部放置在圆柱形容容器内,水流通过扩散器成放射状流下,再由泵将水从漏斗中心抽走,如此形成循环,可对整个沉积物表面产生 0.02~5 Pa 均匀的剪切力。但若泵汲水过于强烈,可能导致漏斗中心形成漩涡,从而使得沉积物表面剪切力分布不均。Widdows 等^[66]在不同装置的对比研究中发现侵蚀阈值的差异性主要源于不同的剪切力施加方式,而

这些不同方式的测量装置都需要通过实验校准才能获得真正的侵蚀剪切力。

3 野外直接测量悬浮物浓度法

沉积物再悬浮浓度可以通过光学、声学仪器直接测量,目前使用较多的有红外传感器、光学后向散射浊度计(OBS)和声学多普勒流速仪(ADV)等。光学仪器的基本原理是测量光束在水中的吸收(衰减)或者散射^[69],从而得到悬浮物浓度在时间和空间上的变化。水体上层夹带的悬浮物颗粒要比接近底部的少,因此水体悬浮物浓度随到底部的距离增大而减小的规律提供了一个很好的测量再悬浮强度的方法^[69]。红外传感器通过测量底部相对高程,从而计算出沉积物再悬浮量,但是,由于红外光在水中吸收非常迅速,因此红外传感器只能用于近岸或者几米深的浅水区^[70]。此外,光学仪器还会受到浊度的影响,比如光电检测器在低浊度时显示与悬浮物浓度呈线性关系,但一旦超过某值后就呈现非线性关系^[57],这导致无法准确估计悬浮物浓度的增长。相比之下,OBS则具有更大的适用范围,在悬浮物浓度5g/L范围内都能保持良好的线性关系。随后,激光和电子全息影像也开始用于沉积物再悬浮测量,它提供了一个可视化工具来量化沉积物侵蚀过程,可以追踪单独的颗粒或絮体从底床被侵蚀到水体中去的全过程^[71]。如SETEG系统^[72]是在SED水槽的基础上通过CCD摄像机连续的快照,依靠计算机分析某一时段内沉积物体积损失量,从而得出侵蚀速率;Bertrand^[73]在河岸布置光电探针测量河流侵蚀;Notebaert等^[74]用激光雷达成像技术研究了河道形态变化并评估河岸总体侵蚀量。该技术可用于评估整个湖泊或河流的再悬浮过程,不再局限于某个具体位置,可是由于其较高的技术要求和相对高昂的费用,并未得到广泛应用。

声学仪器的基本原理是通过回声探测和颗粒物反向散射获取信息,从而以获取底床剪切力^[69]。目前应用最广泛的为ADV,能够接近沉积物表面进行三维流速测量,提供较高的时空分辨率^[75]。基于恒定应力层的假设,利用ADV测量流速,通过以下4种计算方法可估计底床切应力^[76]:①协方差;②湍流动能;③流速对数分布规律;④能量耗散。如Andersen等^[77]基于流速剖面符合对数分布及粗糙紊流边界层的假设,利用ADV测量流速计算得出河口潮汐流作用下的泥滩侵蚀阈值。流速对数分布规律应用广泛,尤其在实验室水槽试验,适用于光滑沉积物;然而,湍流动能方法被认为是最稳定的,在不同高度处表现出最小的变异性,只需测量固定单点

的流速就能够记录一系列紊流触发现象^[75]。还有ADCP(声学多普勒流速剖面仪)广泛用于不同河口地区来检测靠近底床的水流结构以及垂向贯穿整个水体的湍流结构。如Rippeth等^[78]利用ADCP观测潮汐周期内湍流结构,并用方差的方法估计雷诺应力的大小、湍流动能产生速率以及涡流黏度。

相较于上述各种原位水槽,光学、声学仪器提供了一种无损性的测量方法,仪器通常固定在移动船或者实验平台上,无须像原位水槽那样插入沉积物从而造成入侵性损害,并且随移动船的水平移动还能测得悬浮物浓度在水平方向上的分布。越来越多的研究者利用光学、声学仪器在大规模现场试验中直接测量自然水动力情况下的再悬浮过程,如大规模波浪水槽CIEM^[79]就利用波高仪、ADV和OBS测得近岸冲浪地带水动力特性与再悬浮物浓度之间的关系。Aagaard等^[80]将ADV、OBS和压力传感器固定在H型不锈钢架上,在海滨波浪破碎地带测得不同波浪条件下的悬浮物浓度分布及悬浮物垂直混合运动过程。但是,这要求仪器布置在水中有足够长的时间,否则测量的只是瞬时的悬浮物浓度,而无法观测到再悬浮发生的全过程。

此外,还有一个能够获得水体垂向上悬浮物浓度分布的方法就是多点采样法^[81-82]。通常在沉积物——水界面以上不同高度处设置多个采样点来采集原状水样,利用真空设备将水样吸进采样瓶。然而,采样器的支撑结构固定到沉积物底部的过程可能会人为地引起沉积物再悬浮,因此需静待一段时间后再开始采样。

另外一个测量沉积物再悬浮的方法就是在接近底部沉积物表面处垂直放置沉积物捕获器来收集发生再悬浮的沉积物。Gasith^[83]于1975年提出了一个公式来计算再悬浮量,即沉积物捕获器收集量减去捕获器上方及附近水体悬浮物量等于再悬浮通量。该公式通常假设沉积物中有机质的含量小于水体悬浮物中有机质含量^[84]。李一平等^[85]用沉积物捕获器来测定太湖沉降通量,然后利用该公式来推算再悬浮通量,所用捕获器高宽比为3:1。因为Flower^[86]曾比较了高纵横比(高:直径>5)和低纵横比的捕获器,发现后者才能得出更准确真实的沉降通量。然而,Floderus^[87]指出在水体悬浮物快速沉降时(比如春天浮游植物爆发时常伴有生物碳酸盐沉淀),这个方法将低估再悬浮量。因为那些已经沉降但还未固结成沉积物的颗粒,它们的有机质含量与水体悬浮物相同,当它们发生再悬浮时并未被算作沉积物颗粒^[88]。

4 总结与展望

沉积物再悬浮现象(包括随后的悬浮物传输和再沉积)普遍存在于河流、湖泊、海岸等环境。沉积物再悬浮影响营养物质循环,并释放有机物和重金属等污染物到水体中,影响水生生态健康,而这一系列行为机理并没有完全被弄清楚。基于现有的技术和方法,可以通过测量底床侵蚀剪切力和悬浮物浓度变化来定量分析沉积物再悬浮现象。室内水槽实验能最大程度地控制包括水深、流速、沉积物性质在内的一系列参数,为沉积物再悬浮机制的研究奠定了坚实的基础。然而自然黏性沉积物性质复杂易碎,因此无法保证带回实验室的原状泥样未受扰动,使得实验室所得数据的可靠性受限,进而要求在未经扰动的沉积物表面进行原位测量。现有的原位测量装置可大致分为循环水槽、直流水槽和其他仪器,每一个装置都是根据具体的需要和边界条件所设计。因此,每一个装置都有其自身的优缺点及适用范围,所以无法评判哪一个是最好的,但这些装置都是在原有基础上不断改进的,新的装置将会更加轻便、易于操作,适用于更深的水域。目前大部分装置都忽略了推移质的存在,这将导致总侵蚀量和侵蚀速率测量的不准确性。不同装置之间的对比研究显示,基于同一工作原理的仪器所测结果一致性较好,而剪切力施加方式完全不同的仪器所得结果几乎没有可比性,此外测试时间、仪器大小等也会造成结果的差异性,而目前并没有一个衡量标准。值得一提的是,目前还没有将原位直槽与循环水槽或者其他装置在原位现场进行对比测试过。目前测量装置都依赖于动力系统引发沉积物再悬浮,而动力系统都预先设定了流速变化的范围,并不是在自然沉积物再悬浮事件中直接测量的。因此,开展大规模现场试验,直接测量再悬浮现象发生时的水力参数和侵蚀性能是有必要的,这有利于更加深入了解再悬浮机制。目前研究大都在浅水区域,今后可以往深水区域发展,研究适用于深水湖泊、深海等的测量装置,拓宽对不同沉积物类型的了解。

参考文献:

[1] TOLHURST T J, BLACK K S, SHAYLER S A, et al. Measuring the in situ erosion shear stress of intertidal sediments with the cohesive strength meter (CSM) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49 (2) : 281-294.

[2] 秦伯强,柳燕,陈非洲,等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51 (16) : 1857-1866. (QING Boqiang, LIU Yan, CHEN Feizhou, et al.

Lake eutrophication mechanism and control technology and its application [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (16) : 1857-1866. (in Chinese))

[3] KALNEJAIS L H, MARTIN W R, BOTHNER M H. The release of dissolved nutrients and metals from coastal sediments due to resuspension [J]. Marine Chemistry, 2010, 121 (1) : 224-235.

[4] ABERLE J, NIKORA V, WALTERS R. Data interpretation for in situ measurements of cohesive sediment erosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132 (6) : 581-588.

[5] BLACK K S, TOLHURST T J, PATERSON D M, et al. Working with natural cohesive sediments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128 (1) : 2-8.

[6] 王海龙,李国胜. 黄河入海泥沙在渤海中悬浮输送季节变化的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40 (2) : 129-137. (WANG Hailong, LI Guosheng. Floating in the sediment of the Yellow River into the sea in the Bohai Sea transportation numerical studies of seasonal change [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40 (2) : 129-137. (in Chinese))

[7] LAM D C L, JAQUET J M. Computations of physical transport and regeneration of phosphorus in Lake Erie, fall 1970 [J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1976, 33 (3) : 550-563.

[8] ANSARI S A, KOTHYARI U C, RAJU K G R. Influence of cohesion on scour under submerged circular vertical jets [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129 (12) : 1014-1019.

[9] KOTHYARI U C, JAIN R K. Influence of cohesion on the incipient motion condition of sediment mixtures [J]. Water Resources Research, 2008, 44 (4) : 1-15.

[10] PATERSON D M, BLACK K S. Water flow sediment dynamics and benthic biology [J]. Advances in Ecological Research, 1999, 29 : 155-194.

[11] BLACK K S, PATERSON D M. Measurement of the erosion potential of cohesive marine sediments: a review of current in situ technology [J]. Journal of Marine Environmental Engineering, 1997, 4 (1) : 43-83.

[12] TSAI C H, LICK W. A portable device for measuring sediment resuspension [J]. Journal of Great Lakes Research, 1986, 12 (4) : 314-321.

[13] JEPSEN R A. Uncertainty in experimental techniques for measuring sediment erodability [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2006, 2 (1) : 39-43.

[14] 范成新,张路,秦伯强,等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33 (8) : 760-768. (FAN Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. Under the action of wind and waves in Taihu Lake state suspended particulate matter in the

- dynamic release of phosphorus estimates[J]. Science in China; Series D, 2003, 33(8): 760-768. (in Chinese))
- [15] 尤本胜,王同成,范成新,等.太湖沉积物再悬浮模拟方法[J].湖泊科学, 2007, 19(5): 611-617. (YOU Bensheng, WANG Tongcheng, FAN Chengxin, et al. Quantitative simulative method of sediment resuspension in Taihu Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5): 611-617. (in Chinese))
- [16] CLOUTIER D, LECOUTURIER M N, AMOS C L, et al. The effects of suspended sediment concentration on turbulence in an annular flume [J]. Aquatic Ecology, 2006, 40(4): 555-565.
- [17] FUKUDA M K, LICK W. The entrainment of cohesive sediments in freshwater [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1980, 85(C5): 2813-2824.
- [18] MANNING A J, FRIEND P L, PROWSE N, et al. Estuarine mud flocculation properties determined using an annular mini-flume and the LabSFLOC system [J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(8): 1080-1095.
- [19] SATO T, TANIGUCH K, TAKAGAWA T, et al. Generation of tidal bedding in a circular flume experiment: formation process and preservation potential of mud drapes [J]. Geo-Marine Letters, 2011, 31(2): 101-108.
- [20] STONE M, KRISHNAPPAN B G. Floc morphology and size distributions of cohesive sediment in steady-state flow [J]. Water Research, 2003, 37(11): 2739-2747.
- [21] GRAHAM D I, JAMES P W, JONES T E R, et al. Measurement and prediction of surface shear stress in annular flume [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(9): 1270-1286.
- [22] KRISHNAPPAN B G. Rotating circular flume [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(6): 758-767.
- [23] PARCHURE T M, MEHTA A J. Erosion of soft cohesive sediment deposits [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(10): 1308-1326.
- [24] 李一平,逢勇,陈克森,等.水动力作用下太湖底泥起动规律研究[J].水科学进展, 2004, 15(6): 770-774. (LI Yiping, PANG Yong, CHNE Keseng, et al. Study on the starting principles of sediment by water force in Taihu Lake [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 770-774. (in Chinese))
- [25] WANG Y, YU Q, GAO S. Relationship between bed shear stress and suspended sediment concentration: annular flume experiments [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26(4): 513-523.
- [26] ANTA J, PENA E, PUERTAS J, et al. A bedload transport equation for the Cerastoderma edule cockle [J]. Journal of Marine Systems, 2013, 111: 189-195.
- [27] PIEDRA-CUEVA I, MORY M, TEMPERYILLE A. A race-track recirculating flume for cohesive sediment research [J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 35(3): 377-396.
- [28] MCNEIL J, TAYLOR C, LICK W. Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(6): 316-324.
- [29] LICK W, MCNEIL J. Effects of sediment bulk properties on erosion rates [J]. Science of the Total Environment, 2001, 266(1): 41-48.
- [30] ROBERTS J D, JEPSEN R A, JAMES S C. Measurements of sediment erosion and transport with the adjustable shear stress erosion and transport flume [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(11): 862-871.
- [31] ROBERTS J, JEPSEN R, GOTTHARD D, et al. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(12): 1261-1267.
- [32] JEPSEN R, ROBERTS J, GAILANI J. Effects of bed load and suspended load on separation of sands and fines in mixed sediment [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2010, 136(6): 319-326.
- [33] JAIN R K, KOTHYARI U C. Cohesion influences on erosion and bed load transport [J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): 1-17.
- [34] MARK W. Bank Erosion in the Petitcodiac River Estuary [D]. Kingston: Queen's University, 2011.
- [35] JEPSEN R, ROBERTS J, GAILANI J. Erosion measurements in linear, oscillatory, and combined oscillatory and linear flow regimes [J]. Journal of Coastal Research, 2004, 20(4): 1096-1101.
- [36] JEPSEN R, ROBERTS J, KEARNEY S, et al. Shear stress measurements and erosion implications for wave and combined wave-current generated flows [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2012, 138(4): 323-329.
- [37] 秦伯强,胡维平,高光,等.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J].科学通报, 2003, 48(17): 1822-1831. (QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. The dynamic mechanism of sediment suspension in Taihu Lake and endogenous release of conceptual model [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(17): 1822-1831. (in Chinese))
- [38] 孙小静,朱广伟,罗淑葱,等.浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究[J].中国科学: D 辑, 2005, 35(II): 81-89. (SUN Xiaojing, ZHU Guangwei, LUO Liancong, et al. Wave flume experiment research of the shallow water lake sediment phosphorus release [J]. Science in China: Series D, 2005, 35(II): 81-89. (in Chinese))
- [39] ZHENG J W, JIA Y G, LIU X L, et al. Experimental study of the variation of sediment erodibility under wave-loading conditions [J]. Ocean Engineering, 2013, 68: 14-26.
- [40] TOLHURST T J, BLACK K S, PATERSON D M. Muddy

- sediment erosion: Insights from field studies [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(2): 73-87.
- [41] TOLHURST T J, RIETHMULLER R, PATERSON D M. In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1317-1334.
- [42] AMOS C L, CHRISTIAN H A, GRANT J, et al. A comparison of in situ and laboratory methods to measure mudflat erodibility [C]. *Hydraulic and Environmental Modelling: Coastal Waters, Proceedings of the Second International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Bradford: wiley, 1993: 325-336.
- [43] AMOS C L, FEENEY T, SUTHERLAND T F, et al. The stability of fine-grained sediments from the Fraser River Delta [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45(4): 507-524.
- [44] AMOS C L, BERGAMASCO A, UMGIESSER G, et al. The stability of tidal flats in Venice Lagoon: the results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 51(1-4): 211-241.
- [45] MOREAU A L, LOCAT J, HILLP, et al. Resuspension potential of surficial sediments in Saguenay Fjord (Quebec, Canada) [J]. *Marine Geology*, 2006, 225(1-4): 85-101.
- [46] AMOS C L, UMGIESSER G, FERRARIN C, et al. The erosion rates of cohesive sediments in Venice Lagoon, Italy [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(8): 859-870.
- [47] MAA J P Y, SANFORD L P, HALKAJ P. Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland [J]. *Marine Geology*, 1998, 146: 137-145.
- [48] MAA J P Y. Sediment erosion characteristics in the Anacostia River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(8): 1102-1109.
- [49] WIDDOWS J, BRINSLEY M D, BOWLEY N, et al. A benthic annular flume for in situ measurement of suspension feeding/biodeposition rates and erosion potential of intertidal cohesive sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(1): 27-38.
- [50] BALE A J, WIDDOWS J, HARRIS C B, et al. Measurements of the critical erosion threshold of surface sediments along the Tamar Estuary using a mini-annular flume [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(10): 1206-1216.
- [51] THOMPSON C E L, COUCEIRO F, FONES G R, et al. In situ flume measurements of resuspension in the North Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 94(1): 77-88.
- [52] BLACK K S, CRAMP A. A device to examine the in situ response of intertidal cohesive sediment deposits to fluid shear [J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(15): 1945-1954.
- [53] YOUNG R A, SOUTHARD J B. Erosion of fine-grained marine sediments: seafloor and laboratory experiments [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1978, 89(11): 663-667.
- [54] GUST G, MORRIS M J. Erosion threshold and entrainment rates of undisturbed in situ sediments [J]. *Journal of Coastal Research*, 1989, 5: 87-100.
- [55] HAWLEY N. Preliminary observations of sediment erosion from a bottom resting flume [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, 17(3): 361-367.
- [56] RAVENS T M, GSCHWEND P M. Flume measurements of sediment erodibility in Boston Harbor [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(10): 998-1005.
- [57] ABERLE J, NIKORA V, MCLEAN S, et al. Straight benthic flow-through flume for in situ measurement of cohesive sediment dynamics [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(1): 63-67.
- [58] DEBNATH K, NIKORA V, ABERLE J, et al. Erosion of cohesive sediments: Resuspension, bed load, and erosion patterns from field experiments [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(5): 508-520.
- [59] HOUWING E J, VANRIJIN L C. In situ erosion flume (ISEF): determination of bed-shear stress and erosion of a kaolinite bed [J]. *Journal of Sea Research*, 1998, 39(3): 243-253.
- [60] WILLIAMSON H, OCKENDEN M. ISIS: An instrument for measuring erosion shear stress in situ [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42(1): 1-18.
- [61] KALNEJAIS L H, MARTIN W R, BOTHNER M H. The release of dissolved nutrients and metals from coastal sediments due to resuspension [J]. *Marine Chemistry*, 2010, 121(1): 224-235.
- [62] BARNES M P, O'DONOGHUE T, ALSINA J M, et al. Direct bed shear stress measurements in bore-driven swash [J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(8): 853-867.
- [63] GRANT J, WALKER T R, HILL P S, et al. BEAST-A portable device for quantification of erosion in natural intact sediment cores [J]. *Methods in Oceanography*, 2013, 5: 39-55.
- [64] GUST G, MUKLLER V. Interfacial hydrodynamics and entrainment functions of currently used erosion devices [C]//*Proceedings of the fourth Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference*. Chichester: Wiley, 1997.
- [65] TOLHURST T J, BLACK K S, PATERSON D M, et al. A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1397-1418.

- [66] WIDDOWS J, FRIEND P L, BALE A J, et al. Inter-comparison between five devices for determining erodability of intertidal sediments [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(8): 1174-1189.
- [67] HUO G, WANG Y, YIN B, et al. A new measure for direct measurement of the bed shear stress of wave boundary layer in wave flume [J]. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 2007, 19(4): 517-524.
- [68] VARDY S, SAUNDERS J E, TOLHURST T J, et al. Calibration of the high-pressure cohesive strength meter (CSM) [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(8): 1190-1199.
- [69] BLORSCH J. A review of methods used to measure sediment resuspension [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 284(1): 13-18.
- [70] ERLINGSSON U. A sensor for measuring erosion and deposition [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61: 620-622.
- [71] SUN H, PERKINS R G, Watson J, et al. Observations of coastal sediment erosion using in-line holography [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(7): 703-710.
- [72] WITT O, WESTRICH B. Quantification of erosion rates for undisturbed contaminated cohesive sediment cores by image analysis [J]. *The Interactions between Sediments and Water Developments in Hydrobiology 2003*, 169: 271-276.
- [73] BERTRAND F. Fluvial erosion measurements of streambank using Photo-Electronic Erosion Pins (PEEP) [D]. Iowa: The University of Iowa, 2010.
- [74] NOTEBAERT B, VERSTRAETEN G, GOVERS G, et al. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(2): 217-231.
- [75] POPE N D, WIDDOWS J, BRINSLEY M D. Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach—a comparison of annular flume and field data [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(8): 959-970.
- [76] KIM S C, FRIEDRICHS 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(6): 399-406.
- [77] ANDERSEN T J, FREDSOE J, PEJRUP M. In situ estimation of erosion and deposition thresholds by Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 75(3): 327-336.
- [78] RIPPETH T P, WILLIAMS E, SIMPSON J H. Reynolds stress and turbulent energy production in a tidal channel [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(4): 1243-1252.
- [79] ALSINA J M, CACERES I. Sediment suspension events in the inner surf and swash zone: measurements in large-scale and high-energy wave conditions [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(8): 657-670.
- [80] AAGAARD T, JENSEN S G. Sediment concentration and vertical mixing under breaking waves [J]. *Marine Geology*, 2013, 336: 146-159.
- [81] ROSA F, NRIAGU J O, WONG H K, et al. Particulate flux at the bottom of Lake Ontario [J]. *Chemosphere*, 1983, 12(9): 1345-1354.
- [82] 胡春华, 胡维平, 张发兵, 等. 太湖沉积物再悬浮观测 [J]. *科学通报*, 2005, 50(22): 2541-2545. (HU Chunhua, HU Weiping, ZHANG Fabing, et al. Taihu Lake sediment resuspension observation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(22): 2541-2545. (in Chinese))
- [83] GASITH A. Tripton sedimentation in eutrophic lakes—simple correction for the resuspended matter [J]. *Verh. int. Ver. Limnol*, 1975, 19: 116-122.
- [84] BLOMQUIST S, LARSSON U. Petrogenic metals as tracers of resuspended and primary settling matter in a coastal area of the Baltic Sea [J]. *Blomqvist*, 1992(S): 1-37.
- [85] 李一平, 逢勇, 李勇. 水动力作用下太湖底泥的再悬浮通量 [J]. *水利学报*, 2007, 38(5): 558-564. (LI Yiping, PANG Yong, LI Yong. Resuspended flux of sediment in Taihu Lake under hydrodynamic action [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(5): 558-564. (in Chinese))
- [86] FLOWER R J. Field calibration and performance of sediment traps in a eutrophic holomictic lake [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1991, 5(2): 175-188.
- [87] FLODERUS S. The effect of sediment resuspension on nitrogen cycling in the Kattegat—variability in organic matter transport [D]. Uppsala: Uppsala University, 1981.
- [88] HICKS R E, OWEN C J, AAS P. Deposition, resuspension, and decomposition of particulate organic matter in the sediments of Lake Itasca, Minnesota, USA [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 284(1): 79-91.

(收稿日期: 2014-07-17 编辑: 陈玉国)

