

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.06137

浅水岸滩蚀积过程原位监测方法研究现状

夏欣^{1,2}, 贾永刚¹, 杨秀娟¹

(1 中国海洋大学, 青岛 266100; 2 青岛理工大学, 青岛 266033)

摘要: 系统介绍了具有短时间范围浅水岸滩蚀积过程动态原位监测方法, 这些方法监测时段为几天至几年时间尺度。按照时间分辨率大小, 这些监测方法可分为非连续监测和半连续监测; 按照工作原理, 可分为测试沉积量和测试沉积物-水界面高程变化两种类型。在分别介绍各种监测方法功能特点的基础上, 进一步分析了各方法的优缺点, 指出了今后的发展方向, 对相关研究具有很好的参考价值。

关键词: 浅水岸滩; 侵蚀; 淤积; 原位监测

中图分类号: P716

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2009)06-0137-08

浅水岸滩存在着日益严重的侵蚀问题, 威胁着岸滩及其上基础设施的安全。沉积物沉积在河口岸滩附近, 由于水动力作用而发生侵蚀和再悬浮运移是非常普遍的现象^[1]。风暴情况下, 泥沙及细颗粒沉积物侵蚀运移更为严重^[2]。港口地区由于水动力作用常常产生淤积现象, 影响海洋运输和港口正常运营。沉积物蚀积直接影响河口海岸地区港口、航道、环境、围垦、渔业和水资源^[3]。研究清楚浅水岸滩沉积物蚀积状况和蚀积机理, 对保护生态环境至关重要。

浅水岸滩细颗粒黏性沉积物侵蚀淤积是一个很复杂的问题, 影响因素诸多, 如受水动力、电化学力^[4]、生物扰动因素、季节因素和风暴潮作用等影响^[5-7], 不能通过了解沉积物几个有限的可方便测得的参数, 如粒度、比重、水或有机物含量等, 来预测侵蚀运移量。国内外学者对细颗粒沉积物蚀积原位监测方法开展了大量的研究工作, 目前, 还没有一个可以分析黏性沉积物再悬浮的通用监测方法和理论, 只能靠基于经验的现场和实验室实验。现存原位监测设备有些适用于监测侵蚀, 有些适用于淤积, 有些可同时监测蚀积。本文主要介绍监测时段为几天至几年时间尺度的短时间范围监测方法。这些方法, 按照时间分辨率, 分为非连续监测和半连续监测; 按照监测原理, 分为悬砂量或沉降量测量和沉积物-水界面高程变化测量。迄今为止众多学者采用过的原位蚀积监测方法总结如表 1。

本文对这些方法按照表 1 对其进行分类, 介绍

它们的功能特点及优缺点, 并进行对比分析, 希望为相关研究提供有用的参考。

1 非连续监测方法

该类方法监测周期一般大于 24 h, 采用简单的机械设施, 一般为自制, 在退潮方便的时候选择合适位置布设在岸滩浅水地区; 在一个或者多个潮周期后, 测试悬砂量和沉积量或观察高程变化, 得到一段时间内的蚀积量。特点是时间分辨率低。

1.1 测试悬砂量或沉积量

1.1.1 泥沙捕获

一般利用机械装置捕获泥沙, 结合流速测量, 经室内分析计算得出沉积物通量^[8]。

1.1.2 沉积物陷阱方法(又称沉降管)

沉积物陷阱方法采用各种设计的陷阱来收集低波能量条件沉积下来的沉积物, 为确定沉积物在一段时间内的沉积量, 可以经常添加标记粒珠^[9]。Emerson(1991)设计的一个进行侵蚀淤积测试的沉积物陷阱如图 1 所示。该方法设计巧妙, 允许收集移动颗粒样品, 以备今后分析; 已经获得了广泛应用, 但采样偏移是一个问题, 陷阱得到的沉积物蚀积量需仔细推断解释; 实施简单, 造价低廉, 易于在潮滩地区使用^[10]; 比较适用于测量净运移量, 但不能记录基于过程的实时数据, 因而也很难进行沉积物运移机理分析; 更适合测量淤积, 而不太适合侵蚀, 尤其是风暴海况下的大量侵蚀状况。因为侵蚀情况下, 测试设备周围的沉积物被侵蚀掉, 设备突出于沉积物存在会改变其周围流状态, 影响沉积物运移而加大误差, 侵蚀越严重误差越大。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2008AA09Z109)

作者简介: 夏欣(1975—), 女, 博士, 讲师, 主要从事环境监测智能仪器开发, E-mail: mail_xia@sohu.com

收稿日期: 2009-06-10; 改回日期: 2009-10-15. 周立君编辑

表 1 蚀积监测方法汇总

Table 1 Methods for monitoring erosion and deposition

非连续监测方法				半连续监测方法			
悬砂量或沉积量测量		高程变化测量		悬砂量或沉积量测量		高程变化测量	
泥沙捕获	I O	木桩方法	I O	测量 SSC 变化方法	I O	光学方法	O
沉积物陷阱	I O	水平标记法	I O	OBS 测量沉积量方法	O	声学方法	O
示踪剂	I O	SET 侵蚀台方法	O			电阻率方法	O

注: 国内应用的方法后面标记 I, 国外应用的方法后面标记 O。

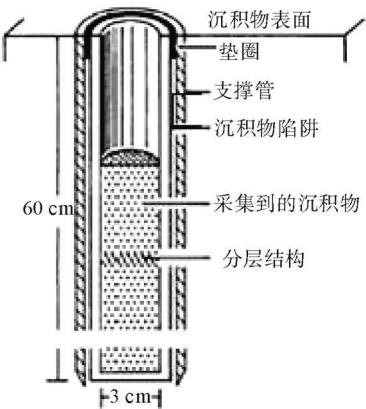


图 1 沉积物陷阱采样设备的纵剖面图(据文献[10])

Fig. 1 Longitudinal cross section of sediment trap sampling device

1.1.3 示踪剂方法

把示踪剂放入环境中, 一段时间后, 在周围区域进行沉积物或水采样, 实践中可以采用各种各样的采样方案, 也可以采用上述的沉积物陷阱方法, 处理分析采样数据^[11]。示踪剂可以采用荧光或者磁性的^[11], 也有采用放射性核的^[9], 可以同时用来确定沉积物的年代等信息, 并通过长期监测重建沉积的季节及年变化等情况。颗粒示踪方法提供了一种新的测试沉积物传输的新工具, 是对于更方便方法(如过程监测和数值模拟)的一个补充, 该方法采样方便, 与前面两种方法相比造价相对高, 使用上有一定局限性, 后续实验及数据处理工作烦琐^[12]。

1.2 测量沉积物-海水界面高程变化

1.2.1 木桩方法

很多人采用过木桩和杆的方法实施测试, 如 Pestrong (1965), Reed (1989), Daborn 等 (1991)。这些方法是在沉积物中设立木桩, 或者测距塔尺^[6]作为参考, 定期观测海底面高度相对变化量来确定蚀积情况。对该方法的一个改进方法是桥方法^[13](图 2)。木桩方法是简单易行, 成本低廉的一个测试

方案, 但木桩会对周围环境产生扰动, 从而影响其附近的侵蚀淤积变化情况。

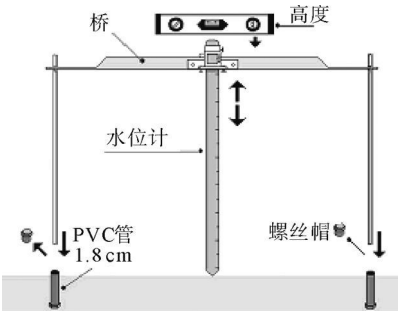


图 2 桥方法示意图

Fig. 2 Schematics of the new bridge system

1.2.2 水平标记法

在自然沉积物表面用一些稀有物质或者埋置金属板, 扩展一个水平面。一般 6 个月以后, 采样或用直尺测量并记录扩展水平面距离表面的高度^[14]。Cahoon(1995 年)给出的该方法与 1.2.3 中介绍的 SET 方法测试数据对比, 发现该方法不能测试侵蚀, 导致了基准平面发生变化, 从而导致其后续数据出现相对错误。该方法可以达到 $\pm 1\text{ mm}$ 数量级的分辨率, 优点是实施方便简单, 成本低。

1.2.3 沉积物侵蚀台

沉积物侵蚀台 (Sediment Erosion Table, SET) 是适用于潮间带地区的便携式测试仪器 (图 3)。2002 年 Cahoon 研制的 SET 如图 3 所示, 测量台放在预先用水泥固定在沉积物内部的永久底座管中, 高度可调; 台上放下探针 (一般为 9 个) 到海床沉积物表面, 记录探针在 Table 上面的长度即可得出高程变化。该方法可以给出 $\pm 1.4 \sim \pm 2\text{ mm}$ 的测量分辨率^[15]。侵蚀台方法和木桩方法相比, 测试更为复杂些, 成本也更高。

1.3 非连续监测方法特点

上述非连续测试方法中, 应用和研究最广泛的为木桩方法和沉积物陷阱方法。从总体上看, 此类

方法具有简单易行、成本较低、实施方便的优点, 因而很多方法得到广泛应用, 且一直沿用至今, 并在使用过程中不断改进和创新, 得到了很好的发展。但这些方法存在的共性问题是: (1) 测试靠人工操作和人工记录测试数据, 属劳动密集型, 测试过程简单, 但测试耗费的时间和人力都很多, 后续数据处理工作烦琐; (2) 测试时间分辨率低, 一般为几天到数月不等, 只能测得上次测量到本次测量整个时间段的净变化量, 无法得到海床蚀积精确变化过程^[1]; (3) 第 2 点中存在的无法得到蚀积变化过程数据问题, 导致了无法分析波浪作用及不同水动力条件^[9]与海床蚀积的关系和影响以及分析蚀积变化的机理。

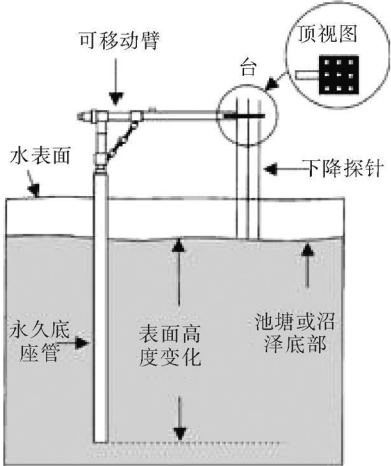


图 3 沉积物侵蚀台(SET)结构

Fig. 3 Sediment elevation table (SET)

2 半连续监测方法

监测周期在几分钟到几小时时间范围内, 一般采用电子监测仪器, 布设在选定位置, 一次布设, 长期监测, 数据在测试结束后可直接读入计算机。该类型方法特点是自动化程度高, 时间分辨率高。

2.1 测试悬砂量或沉积量

2.1.1 测量 SSC 变化

该方法认为测量区域的沉积为均一沉积, 用 SSC 值来推断沉积量。具体实施有 3 种方式:

(1) 出入相减: 现场采用该方法通常是在监测区域的出入口处分别进行 SSC 和流监测。出口处颗粒通量减去入口处颗粒通量, 即为监测区域内泥沙沉积量。该方法通常进行沉积量数量级的估计, 而非精确地测量沉积量^[16]。

(2) 侵蚀水槽方法: 通过各种方法构造流, 启动水槽底部泥沙, 模拟实际的波或者流, 然后用流速计和 SSC 设备实施测试, 按照公式计算得出侵蚀量。从 1978 年 Young 的第一次应用水槽进行实验测试后^[17], 先后产生了很多种不同结构的水槽^[18-24], 图 4 给出了常用的 4 种不同类型水槽的结构, 详细结构说明请参考相关文献。值得一提的是, 1992 年 Amos

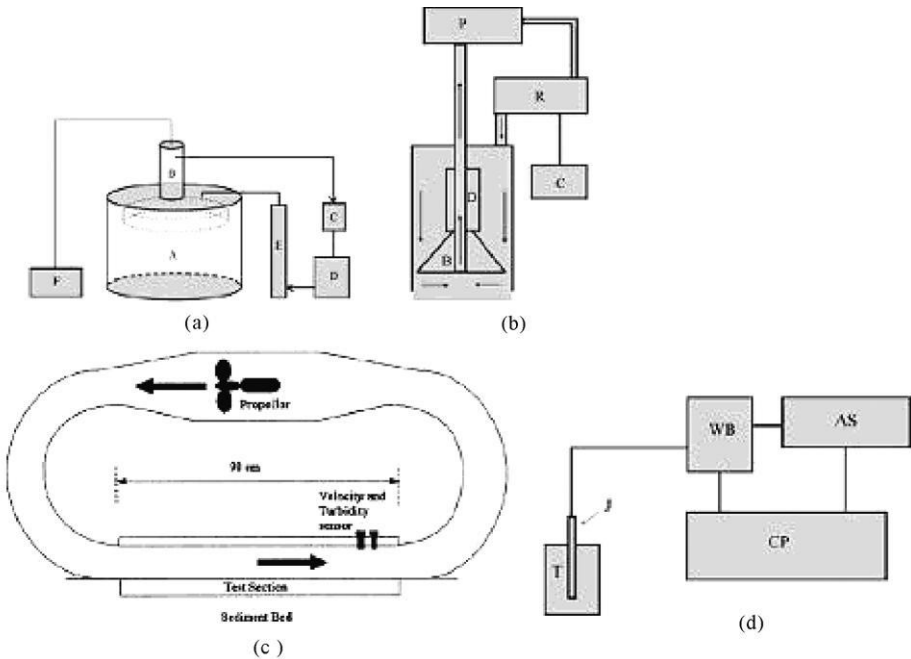


图 4 侵蚀水槽中不同类型水槽的结构

(a) Microcosm 系统示意图; (b) SedErode 示意图; (c) ISEF 示意图; (d) CSM 示意图

Fig. 4 Structures of different water tanks for monitoring erosion

(a) The Microcosm system schematic; (b) SedErode schematic; (c) ISEF schematic; (d) CSM schematic

采用环形水槽——Sea Carousel Flume 对两个自然条件完全不同的区域进行了测试,并根据观察到的侵蚀过程和测量结果,在前人划分的基础上,把侵蚀分成 Type I a, Type I b, Type I, Type II 等不同类型^[18],这种分类方式被很多人借鉴^[25]。水槽方法测试数据很大程度上依赖于水槽结构的设计,因而多种水槽测得的数据相差较大^[24, 26]。

(3)三脚架方法:将自容式浊度计、激光粒度仪、流速计、压力计等仪器,固定在三脚架不同位置,其底部有防止其陷入泥沙的承重板。三脚架放置在海底,经过一段时间自动观测记录后(一般记录时间长达几个月),取回并对记录的数据进行输出、处理,计算出观测期间观测点位置处的海洋沉积物通量^[27]。Cacchione 给出了一个典型的三脚架结构^[27](图 5)。三脚架方法发展过程划分为 3 个阶段:1960s 早期到 1970s 中期;1970s 中期到 1980s 中期;1980s 中期到现在。其发展主要是其上配置电子仪器的升级换代和沉积物传输理论方面的进展^[27]。当然,除了三脚架,也有四脚架等类似的测量方式^[28]。在过去的 40 年里,海洋沉积物通量的三角架观测装置在世界各地被广泛应用^[29],对揭示海底沉积物传输过程起到了至关重要的作用^[7, 27, 30-31]。该方法涉及的仪器设备多,造价相对较高,技术成熟,应用广泛。



图 5 1996 年拟用于旧金山的 USGS GEOPROBE 三脚架
Fig.5 USGS GEOPROBE tripod being readied prior to deployment in San Francisco Bay, CA in 1996

方法 2 和 3 有成熟的计算侵蚀公式:
$$E=E_0(\frac{\tau}{\tau_c}-1), \text{ 其中, } \tau_c=\rho u_c^{*2}, u_c(Z)=\frac{u_c^*}{k} \ln(\frac{Z}{Z_0})$$

这里: E_0 为经验侵蚀系数;下标 C 代表临界;剪切力 τ ; ρ 为水的密度; u^* 为剪切速度; U_c 为距离海底面高度 Z 处的速度; Z_0 为底部粗糙度^[29]。

2.1.2 OBS (Optical backscatter sensors) 直接测

量沉积量
把 OBS 面向上放置,这样沉积物就会沉积在 OBS 表面,颗粒聚集量增加,OBS 相应也增加,即可测得沉积物的沉积量。仪器上的自动清洁器会适时清除 OBS 表面沉积物,该 OBS 结构见图 6^[32]。该方法具有高时间分辨率和高垂直分辨率、可长期使用(长达几个月时间)的优点;缺点是由于传感器表面和周围沉积物表面的差异性,导致沉积物沉积到 OBS 表面的情况和实际情况会有所差别。

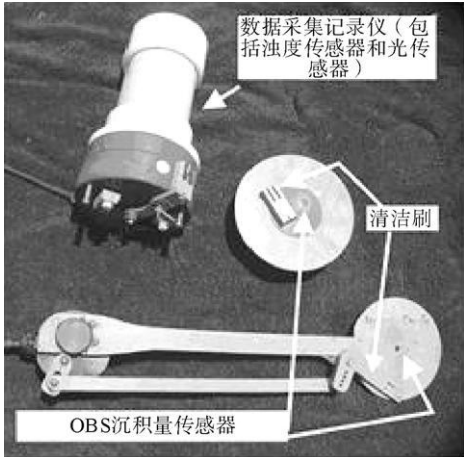


图 6 带有 OBS 的沉积物沉积量测试仪器
Fig.6 Sediment accumulation testing instrument with OBS

2.2 测量沉积物-海水界面高程变化

2.2.1 光电方法

(1)Sedimeter: Erlingsson (1991 年)研制了一个 sedimeter,是采用红外 LED 及带红外滤波的光电三极管构成的光电探测装置,如图 7 所示^[33]。如果探杆外部有沉积物阻隔,就会反射红外光,从而被光电三极管接收。

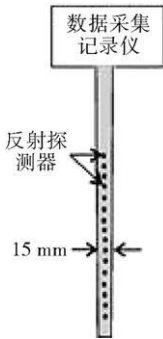


图 7 由传感器及放在密封舱里面的数据采集记录仪构成的 Sedimeter 仪器
Fig.7 Sedimeter instrument, consisting of a sensor and a data logger in a water-tight housing

(2)光电沉积物陷阱: 原有沉积物陷阱的共同缺陷是: 它们是非连续测试系统, 不能确定沉积物何时沉积。Lamoureux (2005) 研制了一个采用 LED 发光管阵列和对应的光敏三极管阵列构成的沉积物沉积传感器, 布设在一个沉积物采集管两侧构成光电沉积物陷阱, 图 8 为该设备结构示意图^[9]。右端的光敏三极管根据是否接受光照给出不同的电流信号, 根据输出信号的大小来确定沉积物高度变化。系统测量沉积物深度的分辨率依赖于转换三极管个数。

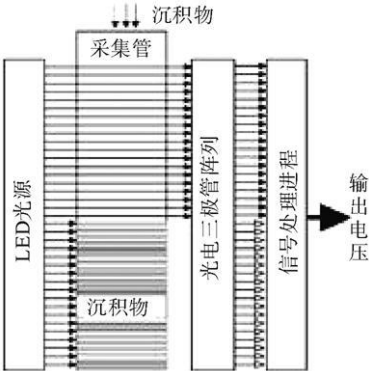


图 8 表示主要功能部件关系的沉积传感器结构
Fig. 8 A block diagram of the sediment accumulation sensor showing the relationship between the main functional components

(3)PEEP(Photo-Electronic Erosion Pin): 1991 年 Lawler 研制了一个 PEEP 系统, 自称是第一个半连续记录侵蚀情况的电子设施。事实上, Lawler 的 PEEP 系统和 Erlingsson 的 Sedimeter 几乎同时出现^[1, 33]。PEEP 系统由一系列封装在防水透明聚丙烯管中的多个光电单元构成; 这些单元在有光入射时会产生一个小的模拟电压, 原理与光电沉积物陷阱类似。Lawler 应用该仪器在 1992、1994 及 1997 年分别对不同的地区进行了监测试验, 期间不断地对该仪器进行改进, 2008 年产生了 PEEP-3T^[34-36]。整合 TCT (Thermal Consonance Timing) 概念实现夜间的监测, 这样就构成了一个日夜连续监测系统, 如图 9 所示^[39]。

Sedimeter、光电沉积物陷阱及 PEEP (包括 PEEP-3 和 PEEP-3T) 这 3 种方法都是利用光电监测原理, 实现海底沉积物侵蚀和淤积的监测。监测系统的输出都是所有感光器件信号的和, 根据这一和信号得到蚀积状况。在侵蚀发生时, 引起海水高浊度, 导致海水透光度变差, 从而影响该类型的方法测试数据的正确性。

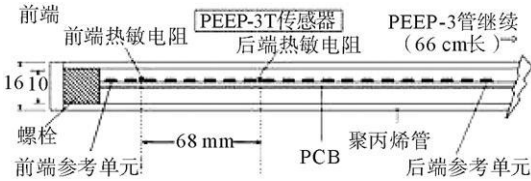


图 9 重新设计的 PEEP-3T 自动侵蚀淤积监测传感器
(光电单元安放位置有相互重叠区域, 可产生连续响应)
Fig. 9 The redesigned PEEP-3T automatic erosion and deposition monitoring sensor
(Photocells are positioned to give an overlapping field of view and continuity of response)

2.2.2 声学方法

采用声纳高度计测量仪器到海床平面高度的变化, 数据自动记录和存储。体积小的声学仪器在实施测试过程中需要固定在一个距离海床底面有一定距离的支架上, 如图 10 所示^[37-38]。该仪器体积小, 易于实施测试, 但测得参数惟一。

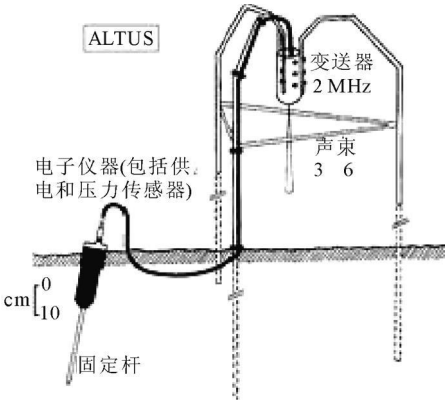


图 10 ALTUS 海床高度监测系统示意图
Fig. 10 ALTUS; sketch of the bed elevation system

2.2.3 电阻率方法

电阻率方法最初主要应用于地质勘探中, 通过探测介质深层电阻率来探测矿藏和地下水等地层资源。一些学者发现电阻率和沉积物的很多参数存在密切关系, 可以用电阻率方法来测量沉积物的孔隙度、渗透性及含水量、结构因子等物理参数。Ridd 在 1992 年对 WON (1982 年) 设计的环形电极结构的电阻率结构实施的测试^[39-40], 首次把电阻率方法用于海底沉积物-水界面的测量, 仪器分辨率为全范围的 2%; Thomas 等于 2002 年又改进了该测试仪器。

Ridd 的电阻率方法利用了海水和沉积物电阻率的明显差异。Ridd 在文中给出海水和沉积物两者的电阻率大约是 4 倍关系; 而 Wheatcroft 的测试表明, 两者大约是 2 倍的关系^[41]。2007 年开始中国

海洋大学环境科学与工程学院岩土组的贾永刚、夏欣、李红磊和王玉等也正在进行电阻率方法的研究,包括仪器的开发和实验研究,经现场实验测得黄河口地区海水-沉积物电阻率大约是 3 5 倍的关系,相关的文章正在撰写中。这主要是因为沉积物类型不同导致的电性差异^[40-41]。另外,沉积物电阻率是密度的函数,该方法也许最终会推断出沉积物密度信息。

2.3 半连续监测方法特点

半连续监测方法中的三脚架方法和水槽方法得到广泛应用,主要由于测量 SSC 的方法在理论上有比较成熟的计算侵蚀量的方法,仪器容易购买,有成型的产品可用。而其他的方法,如测量高程变化的三种方法,理论上尚不完善,没有准确的关于泥沙蚀

积量的计算方法,这些理论有待于进一步研究。

3 对比分析

1991 年, Lawler 的 PEEP 监测系统及 Sedimeter 出现之前,还没有自动测试的主动监测设备可供使用,精细监测侵蚀和淤积的高精度、高时间分辨率的仪器设备的缺乏,导致很多相关的研究受到阻碍^[1]。现在,半连续监测方法虽然可以有效实施测试,但有些还未有成型的产品出现,因而也没法方便地获得测试仪器。

从表 2 可以看出,非连续和半连续监测系统各有优点缺点,在具体应用时,可以根据测试要求和实验条件选择合适的方法。

表 2 被动测试和主动测试方法比较

Table 2 Comparison between passive and active testing methods

	非连续监测方法	半连续监测方法
设施	简单, 无需购置, 可自行构建	复杂 一般需购置
布设	劳动密集型	一次布设, 无需人工干预
数据处理	人工记录数据	自动记录
时间分辨率	低, 几天到几个月	高, 可达到几秒数量级
空间分辨率	毫米级, 和人眼分辨率有关	毫米级, 有望达到高分辨率
过程数据	无, 得到的是一段时间内的总蚀积量	有, 可以用于分析蚀积机理等
理论	简单, 完善	复杂 有些不完善

4 结语

目前, 浅水及潮滩地区适用的蚀积监测涉及到的方法有十几种之多。国内对蚀积原位监测设施研究的还比较少, 多数停留在简单的机械设备上, 而国外研究的较多, 涉及到仪器的类型也很丰富。总的来看, 非连续监测方式中的泥沙捕获、沉积物陷阱、示踪剂及木桩方法, 易于实施, 半连续监测方法中的三脚架方法和侵蚀水槽方法, 仪器易于购买且理论成熟, 这些方法在国内外获得了广泛应用。半连续监测方法中对高程变化监测的方式, 应该还是比较有前途的监测方式, 但至今未有成熟的理论与该类型方法相匹配, 影响了该类型方法的发展和广泛应用。

众多学者对侵蚀发生的运移及沉积情况不断有新的发现, 却无法准确解释侵蚀运移机理。这些问题的合理解释, 有待于高时间分辨率和空间分辨率的蚀积监测理论的进一步完善, 及采用合适的仪器进行长期、多次观测和对监测结果的深入分析。下

一步对于原位蚀积监测的研究, 应集中于高时间分辨率、高精度、便携式、易于使用 and 控制的仪器的开发和相关理论的完善。

参考文献(References)

[1] Lawlar D M. A new technique for the automatic monitoring of erosion and deposition rates[J]. Water Resources Research, 1991, 27(8): 2125-2128.

[2] Verlaan P A J, Spanhoff R. Massive sedimentation events at the mouth of the Rotterdam waterway[J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16(2): 458-469.

[3] 吴华林, 沈焕庭, 朱建荣. 河口泥沙通量研究综述[J]. 泥沙通量, 2001, 5: 73-79.[WU Hualin, SHEN Huanting, ZHU Jian-rong. Estuarine sediment fluxes: An overview[J]. Journal of Sediment Research, 2001, 5: 73-79.]

[4] 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.

[5] Alvisi Albertazzi S, Frignani M, et al. Sampling and dating strategies in studying environments with high spatial and temporal variability[J]. Arch. Oceanogr. Limnol., 2001, 22: 207-

- 216.
- [6] Anderson F E, Black L, Watling L E, et al. A temptral and spatial study of mudflat erosion[J] . Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51(3): 729-736.
- [7] Ogston A S, Cacchione D A, Sternberg R W, et al. Observations of storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf[J] . Continental Shelf Research, 2000, 20(16): 2141-2162.
- [8] 印萍, 金永德, 吕京福, 等. 北戴河海滩泥沙捕获实验及其初步结果分析[J] . 海岸工程, 2003, 22(2): 67-77. [YIN Ping, JIN Yongfu, LÜ Jingfu, et al. Sediment trap experiment in the Beidaihe Surf Zone and its preliminary result analysis[J] . Coastal Engineering, 2003, 22(2): 67-77.]
- [9] Lamoureux S F. A sediment accumulation sensor for use in lacustrine and marine sedimentation studies[J] . Geomorphology, 2005, 68(1-2): 17-23.
- [10] Emerson C W. A method for the measurement of bedload sediment transport and passive faunal transport on intertidal sandflats[J] . Estuaries, 1991, 14(4): 361-371.
- [11] Black K, Athey S, Wilson P, et al. Particle tracking: a new tool for coastal zone sediment management[J] . Littoral, 2004: 20-22.
- [12] Black K, Athey S, Wilson Peter, et al. The use of particle tracking in sediment transport studies: a review[J] . Geological Society London Special Publications, 2007, 274: 73-91.
- [13] Perillo G M E, Santos E P D, Piccolo M C. An inexpensive instrument for sediment erosion-accumulation rate measurement in intertidal environments[J] . Wetlands Ecology and Management, 2003(11): 195-198.
- [14] Cahoon D R, Reed D J, Day Jr J W, et al. Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastem United States[J] . Mar. Geol., 1995, 128: 1-9.
- [15] Cahoon D R, Lynch J C, Hensel P, et al. High-precision measurements of wetland sediment elevation: I. Recent improvement to the sedimentation-erosion table[J] . J. Sediment. Res., 2002, 72(5): 730-733.
- [16] Thomas S, Ridd P V. Review of methods to measure short time scale sediment accumulation[J] . Marine Geology, 2004, 207: 95-114.
- [17] Young R N, Southard J B. Erosion of fine-grained marine sediments; sea-floor and laboratory experiments[J] . Geological Society of America Bulletin, 1978, 89(5): 663-672.
- [18] Amos C L, Daborn G R, Christian H A, et al. In situ erosion measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy[J] . Marine Geology, 1992, 108(2): 175-196.
- [19] Maa J P Y, Wright L D, Lee C H, et al. VIMS Sea Carousel: A field instrument for studying sediment transport[J] . Marine Geology, 1993, 115(3-4): 271-287.
- [20] Maa J P Y, Lee C H, Chen F J. Bed shear stress measurements for Sea Carousel[J] . Marine Geology, 1995, 129(1-2): 129-136.
- [21] Houwing E J, van Rijn L C. In Situ Erosion Flume (ISEF): detemination of bed shear stress and erosion of a kaolinite bed[J] . Journal of Sea Research, 1998, 39(3-4): 243-253.
- [22] Maa J P Y, Sanford L, Halka J P. Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland[J] . Marine Geology, 1998, 146(1-4): 137-145.
- [23] 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.
- [24] 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(10-11): 1397-1418.
- [25] 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.
- [26] Widdows J, Friend P L, Bale A J, et al. Inter-comparison between five devices for detemining erodability of intertidal sediments[J] . Continental Shelf Research, 2007, 27(8): 1174-1189.
- [27] Cacchione D A, Sternberg R W, Ogston A S. Bottom instrumented tripods: History, applications, and impacts[J] . Continental Shelf Research, 2006, 26(17-18): 2319-2334.
- [28] Heffler D. RALPH- A Dynamic Instrument for Sediment Dynamics[C] // OCEANS' 96. MTS/IEEE. Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings, 1996, 2: 728-732.
- [29] Schaaff E, Grenz C, Pinazo C, et al. Field and laboratory measurements of sediment erodibility: A comparison[J] . Journal of Sea Research, 2006, 55(1): 30-42.
- [30] Ogston A S, Guerra J V, Sternberg R W. Interannual variability of nearbed sediment flux on the Eel River shelf, northern California[J] . Continental Shelf Research, 2004, 24(1): 117-136.
- [31] Wheatcroft R A, Sommerfield C K. River sediment flux and shelf sediment accumulation rates on the Pacific northwest margin[J] . Continental Shelf Research, 2005, 25(3): 311-332.
- [32] Ridd P V, Day G, Thomas S, et al. Measurement of sediment deposition rates using an optical backscatter sensor[J] . Estuarine Coastal and Shelf Science, 2001, 52: 155-163.
- [33] Erlingsson U. A sensor for measuring erosion and deposition [J] . J. Sediment. Petrol., 1991, 61: 620-623.
- [34] Lawler D M, West J R, Couperthwaite J S, et al. Application of a novel automatic erosion and deposition monitoring system at a channel bank site on the tidal river Trent, U. K. [J] . Estuarine Coastal and Shelf Science, 2001, 53: 237-247.
- [35] Lawler D M, West J R, Couperthwaite J S. The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: examples from estuarine and fluvial systems[J] . Geomorphology, 2005, 64: 1-23.
- [36] Lawler D M. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Development and applications of the new PEEP-3T system[J] . Geomorphology, 2008, 93: 17-39.

- [37] Jestin H P B, Hir P Le, L' yavanc J, et al. Development of AL-TUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments[C] // Oceans' 98 Conference Proceedings, 1998: 189-194.
- [38] Bassoullet P, Hir P Le, Gouleau D, et al. Sediment transport over an intertidal mudflat; field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France) [J] . Continental Shelf Research, 2000, 20: 1635-1653.
- [39] WON I J. The geometrical factor of a marine resistivity probe with four ring electrodes[J] . IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987, 12(1): 301-303.
- [40] Ridd P V. A sediment level sensor for erosion and siltation detection[J] . Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1992, 35: 353-362.
- [41] Wheatcroft R A. In situ measurements of near-surface porosity in shallow-water marine sands[J] . IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 561-570.

METHODS FOR MONITORING IN-SITU EROSION AND DEPOSITION IN SHALLOW WATER AND TIDAL FLAT AREA

XIA Xin^{1,2}, JIA Yonggang¹, YANG Xiujuan¹

(1 Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;)

Abstract: This paper introduced methods for monitoring in-situ erosion and deposition on short-time scale in shallow water and tidal flat area. Monitoring time scale using these methods is about a few weeks to a few years. In according with temporal resolution, these monitoring methods can be divided into discontinuous and semi-continuous ones; in accordance with the working principles, they are used to test accumulation or elevation changes in sediment-water interfaces. After separately introducing the features of a variety of monitoring methods, this paper further analyzes their different advantages and disadvantages, pointing out future development direction. This paper may have a good reference value to related research.

Key words: shallow water and tidal flat; sediment; erosion; deposition; in-situ monitoring