潮滩冲淤观测技术发展现状

张　颖[1], 闫玉茹[1], 章家保[2], 李　静[1], 裘露露[1]

(1. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对潮滩研究中最重要的冲淤观测工作, 本文对 20 多种可行的技术在点、线、面状观测分类的基础上进行了梳理。重点阐释每种观测技术的基本原理、适用性及技术间的异同点、发展路径, 对其中新型的手段进一步分析了其质量指标、核心技术要点及在潮滩的实践应用情况。以此实现了对潮滩冲淤观测技术发展现状的整体认识。

关键词: 潮滩; 冲淤观测; 技术分类; 研究现状

中图分类号: P714+.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2021)03-0152-11

DOI: 10.11759/hykx20200831002

潮滩一般指平均大潮高潮线和平均大潮低潮线之间的潮侵地带, 是海岸带的主要组成部分。潮滩是生物多样性地带、是极端气象下的海岸防护带, 同时还是港工码头、旅游观光、围垦造地等所依托的经济建设带, 自然成为各类研究关注的区域[1]。受泥沙供应、水动力等影响, 潮滩存在不同时间尺度的侵蚀或淤积现象, 对冲淤的观测是所有潮滩研究中一项重要的基础性工作。

和水下地形测量从原始的测深杆、测深锤逐步升级到多波束、机载 Lidar 等新方法的发展路径类似, 潮滩冲淤观测的技术发展也是一个由原始向现代、小范围向大区域、单一向多手段、低效率向高效率的逐渐进步的过程。本文梳理国内外现有可行的潮滩冲淤观测手段并进行技术分类, 重点阐释每种观测技术的基本原理和适用性, 对其中现代新型的手段同时分析质量指标、核心技术要点及在国内潮滩的应用情况。以此实现对潮滩冲淤观测技术发展现状的整体认识。

1　潮滩冲淤观测方法分类

中国潮滩岸线总长近 4 000 km, 本身特点不一, 必须要有多样化的潮滩冲淤观测方法与之匹配: 第一, 底质、表面特征不同。即以平原型的江苏潮滩一地而言, 其滩面就有草滩、泥滩、泥-粉砂滩、粉砂-细沙滩、贝壳堤等不同底质之分。底质不同, 物性指标迥异, 限制某些手段的有效探测(如激光测量对底质含水量敏感); 第二, 潮滩宽度、坡度不同。以厦门湾和江苏岸外潮滩为例, 厦门湾潮滩宽度数百米至 1~2 km, 坡度 1‰~2‰, 而江苏岸外潮滩宽 10~13 km, 最宽 36 km, 平均坡度仅 0.2‰[2]。悬殊的宽度和坡度, 不仅体现为施工效率不同, 在潮汐涨落之下表现为无水区、有水区及不同水深区, 完整的观测同一潮滩或需要多种技术相配合; 第三, 观测要求不同, 主要体现在观测的广度与精度上。即以遥感观测和断面点测比较, 前者优势在于观测广度, 后者优势在于观测精度。

在分类的基础上进行潮滩观测技术总结是必要的。以不同视角, 分类可以有多种方案, 如以接触式、非接触式观测分类, 陆基、海基、空基、天基观测分类, 观测精度、效率分类等。本文从潮滩冲淤观测的核心是滩面高程观测这一认识入手, 参比水下地形测量发展的分类模式, 拟从观测目标由点、线、面逐步扩大范围的角度进行归类分述。需要说明的是, 点、线、面三者之间并不存在一条明确的界线, 这三者更多的体现为一种过渡。事实上, 线和面也就是由密集的点所构成的。

2　点状观测技术

点状观测一般指定点的实地观测, 是较‘传统’

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-12-19

基金项目: 2020 年江苏省自然资源发展专项(苏财资环 202020 号)

[Foundation: Foundation of Jiangsu natural resources development project in 2020, No. 202020]

作者简介: 张颖(1983—), 男, 浙江嘉兴人, 高级工程师, 主要从事海洋测绘、海洋地球物理研究, 电话: 15062277270, E-mail: 309512867@qq.com

的观测手段, 不过也是较可靠、精确的观测手段。点状观测技术由纯人工或简单机械间断观测到利用主动或被动传感器连续观测, 是自动化程度逐步提高的过程。

2.1 标志桩法、SET(RSET)法、反射测距、沉降板法

标志桩冲淤观测法是将一标杆插入潮滩沉积物中, 插入深度需确保它的稳定性。设置好以后测量出露部分的长度, 记为 $D1$。以后每隔一定时间(按观测要求)重测出露标杆的长度, 记为 $D2$。$D1-D2$ 即为在此期间的冲淤变化, 正值为淤积, 负值表示侵蚀。为保证每次测量的准确性, 一般在桩的周围多次测量, 以平均值作为测定值。考虑到标杆本身对冲淤有一定的影响, 另有双标志桩测中间距离法, 即在滩面上相距 1 m 同时设置两根标志桩, 水平架一横杆于两桩之上, 以测量横杆的中点到滩面的距离代替单杆方法中的直接测量距离。标志桩法投入少、技术要求低、直观, 在严格作业质控下, 测量精度能达到厘米级, 主要的缺点是, 布设与观测效率低, 且设置的标志桩易受破坏而不能保证观测持续性[3]。

Boumans 等设计的沉积侵蚀水平面测量方法(SET)[4], Donald 等在此基础上改进的高程水平面基准杆测量方法(RSET)[5], 原理上和标志桩法(尤其是双标志桩法)是近似的。同样是测量装置上某一基准点到滩面的距离。所不同的是将标志桩操作中的直接测量改进为利用简单的机械装置来进行测量。其测量精度更高, 且可以同时测得测量点周围面上多个点的值以反映局域的变化趋势。SET 方法用来测量松散的浅水区或潮滩的高程变化, 精度达到±1.5 mm。RSET 精确度在红树林沼泽达到±1.3 mm, 盐沼为±4.3 mm。

如将上述测量滩面高程变化的机械类装置替换为基于声、光、电反射原理的反射测距仪进行自动测量[6-7], 可以避免人为误差得到更准确的滩面相对高程, 也易实现高频测量和无线实时传输。需要指出, 这一类测距仪适用的介质往往是单一的, 即有的需要退潮后在空气介质中运用, 有的需要涨潮后在水体介质中运用。

沉降板法也同样是测量装置上某一基准点到滩面的距离, 不同的是沉降板埋于潮滩面之下。测量的是滩面到板面的距离, 故和上两种方法正好相反, 两次测量变化值正值为侵蚀, 负值为淤积。沉降板法同样可以达到厘米级精度但一般用作短期的冲淤观测, 并选择在较平静的天气条件下使用[8]。

2.2 示踪沙、示踪沙棒法

人工示踪沙实验(ATE)是用人工方法标识的物质, 掺入天然母质沉积物中, 通过追踪示踪沙, 可获得沉积物的运动方向、搬运速度和搬运速率等信息。该方法的发展已有近 50 年的历史。根据采样、观测与统计计算的原理差异, 研究示踪沙的变化有空间积分法、时间积分法和连续投放法之分。但无论哪种方法, ATE 方法在实际操作上有一定的困难, 主要表现在确定实验的空间范围、活动层厚度、对‘充分混合’状态的理解、示踪沙的回收率及其代表性, 以及研究对象的时空尺度的影响等。ATE 的工作效率偏低, 一次实验只能获得一个测点或一条测线的沉积物输运率, 技术仍需进一步完善[9]。

示踪棒方法是利用荧光素染色的砂棒观测潮滩再沉积速率的一种精确的定量方法。用荧光素和琼脂对取自海滩的中砂进行染色, 将染色的砂子和水溶性胶制成 20 cm×2 cm×0.5 cm 的砂棒。使用时, 把砂棒竖直插入沉积物中, 并使顶端与沉积面一致。沉积物中的孔隙水会将砂棒中的胶溶解掉, 染色过的砂子即可被波浪和海流带走。准确测量残留砂棒的长度就可以了解侵蚀和沉积的量, 根据这些量还可以计算沉积平衡和沉积交换的量, 测量精度能达到 1 mm。

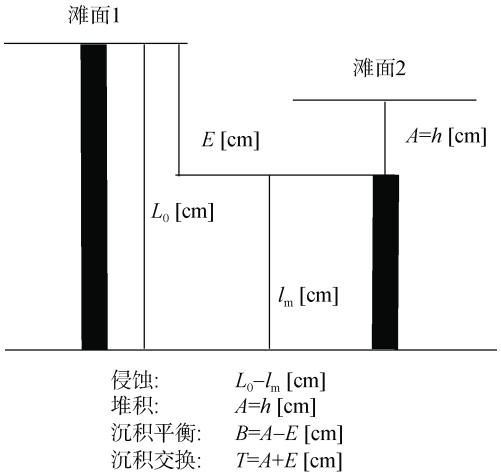

图 1 示踪砂棒测量再沉积值示意图[9]

Fig. 1 Schematic dof the measurement of redeposition values using the tracer stick[9]

按图 1 指示地貌变化的沉积平衡值、指示潮滩

物资交换总体程度的沉积交换值即可以通过砂棒原始长度值、残留砂棒长度值、沉积厚度值等通过简单的公式计算得到[10]。

砂棒法最大的特点是能定量测定沉积物的交换量(侵蚀和再沉积), 被用于近岸水下再沉积的测量分析和红树林潮滩再沉积影响因素的研究[11-12], 在我国黄河三角洲潮滩、辽河三角洲湿地和胶州湾潮滩的观测中都使用过这种方法。

2.3 光电管、光纤光栅等

利用光、电、热等现象的被动式传感器同样可以‘感受’潮滩的冲淤变化。以光学传感器为例:

光电侵蚀管(PEEP)可通过光感度变化记录冲淤数据。将装有多个可见光电池的透明丙烯酸电子管垂直插入潮滩面, 根据光电池暴露在外面的长度, 感应器产生相应的电压强度, 电压值通过一定的运算法即可转化成潮滩冲淤厚度而被记录下来。光电侵蚀管的缺点是依赖于光照, 水下光的强度不足时, 得到的水下冲淤值准确度也会降低[13]。

在水下则可以用光纤光栅技术代替。当光纤光栅受到外界应变变化时, 光栅栅格周期会发生变化, 同时光弹效应会导致光栅有效折射率变化, 从而改变光栅中心波长, 通过观测反射光谱中光栅中心波长的变化可得到外界应变的变化情况。有很多种光纤光栅传感器的设计和安装方法可以促使产生这种应变并被观测到[14-15]。

如将传感器按一定间距安装于一刚性支撑管侧壁, 将刚性管插入待观测点的滩面之下并确保固定。进行冲淤观测时, 位潮滩面以上的传感器能够观测到由水 流紊动所引起的振动, 而那些位于潮滩面以下的传感器则观测不到相同数量级的振动, 所以通过比对按一定间距沿轴线布置在管侧壁上的传感器观测到的振动能量值就能确定水沙交界面的位置, 如图 2 所示。这种装置不仅能精确地观测到各种水位条件下的冲淤深度, 还能观测到潮滩冲淤发展的整个过程, 并且观测精度主要取决于传感器的本身的尺寸、分辨率、布设间距等[16]。

在光学使用受限时, 类似的观测方式还可以使用热传感器[17]、电导率传感器[18]、时域反射计[19]等。总的来说, 传感器的使用(主动或被动)明显提高了观测的效率和精度。远距离实时数据传输, 使对潮滩的监测及对特殊冲淤事件作出快速反应成为可能。

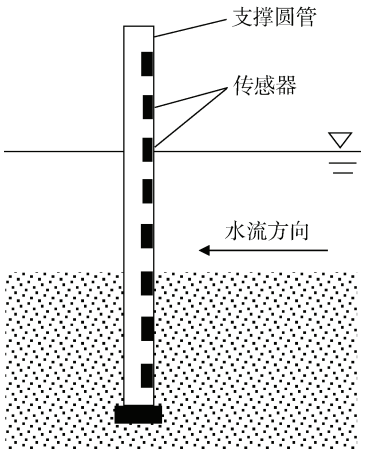

图 2 光纤光栅传感器冲淤监测示意图

Fig. 2 Schematic of erosion–deposition observation using the fiber Bragg grating sensor

3 线状观测技术

点位观测不便于在潮滩上密集展开, 要反应潮滩向海剖面线上完整的冲淤变化趋势, 更多采用线状观测技术。更高效观测设备和平台的使用, 是线状技术的特点。

3.1 全站仪、地面三维激光技术

全站仪是一种集光、机、电为一体的测量仪器, 有垂直角、水平角、距离、高差测量等多种功能, 广泛用于陆地精密工程测量或变形观测领域。由于其测点速度快, 同样适用于潮滩的冲淤线状观测。在测区进行实地踏勘后选择合适的点位作为测站点和后视点, 简单的标定调试后便可对潮滩剖面线进行测量[20]。

全站仪在潮滩的工作有棱镜法和免棱镜法两种模式。棱镜模式精度高、测距远, 但需要人工沿测线跑点, 效率较低, 同时不便于在人工跑滩困难区实施。对于宽度较小的潮滩, 免棱镜模式是更好的选择。全站仪免棱镜模式可以在不架设反射棱镜的情况下获取一定距离范围内目标的三维坐标, 这个特点使人员难至区的潮滩测量成为可能。部分全站仪免棱镜模式标称测距可以达到 2 000 m(如拓普康 GPT-4002LN), 高程分辨率达到毫米级。不过, 在现场反射条件、目标点入射角度等环境因素不利时, 测距和测量分辨率均会降低, 以测距 1 200 m 的拓普康 GPT-3002LN 为例, 测量条件不利时, 仅能在 300 m 范围内有效使用, 高程分辨率也仅为厘米级[21-22]。

地面三维激光扫描技术(TLS)是一种地形测量

新技术，能快速获取大面积、高精度的地形点云数据。在地学领域，TLS 技术被有效运用于火山活动观测、海岸线测绘、地表形变研究等工作[23-25]，近年来，有学者将 TLS 技术引入到潮滩地形地貌研究中。

地面激光三维扫描系统主要由地面三维激光扫描仪、坐标校正系统、扫描数据的后期处理系统三部分组成。其地形测量原理如下图：仪器发射器向物体发射激光，在物体表面反射后再被接受机接收，通过测量激光往返时间 t 可计算得仪器与目标之间的距离 r；同时测得激光光束的水平角度 ϕ 与垂直角度 θ，根据三角关系，可求得目标点相对于仪器的三维位置 x, y, h。由于仪器在地理框架下坐标已测定，故通过坐标系转换，最终可得目标点的三维地理坐标[26]，如图 3 所示。

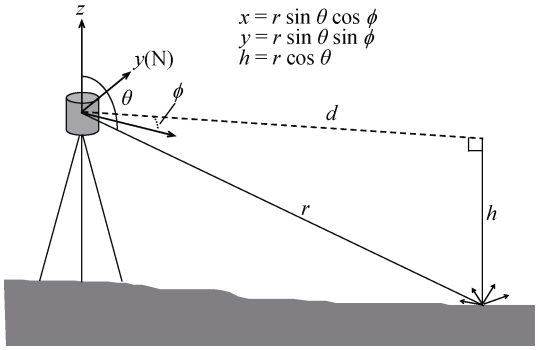

图 3　地面激光三维测量原理图[26]

Fig. 3　Principle diagram of 3D terrestrial laser measurement[26]

潮滩地形测量时，激光扫描设备置于岸边一固定点，确保一定的架设高度，经坐标准确校正后，向海进行滩面观测。不同的 TLS 设备，有效扫描距离不同，以 RIEGL VZ4000 为例，其有效扫描距离为 4 000 m，单次测量精度为 15 mm，重复测量精度为 10 mm，足以有效覆盖大多数的潮滩。由于地面物体表面的遮挡效应及其他环境因素对激光电磁波传播过程产生影响，获取的点云原始数据中不可避免地产生噪声点，为了从点云中提取裸露地表数据，TLS 最核心的数据处理技术是滤波算法的研究，目前主要的滤波算法有形态学方法、多重回波法、基于内插的滤波算法等几类[27]。滤波算法、多方位重复扫描技术对于大部分覆盖有盐沼植物的潮滩尤为重要[28]。

除了直接测定滩面高程，TLS 还可以在 91.94% 的精度下估算潮滩表层含水量[29]，结合有学者提出的利用含水量法反演潮滩地形的技术[30]，为 TLS 潮滩观测提供了一种新的思路。

3.2　RTK、PPK、测深技术

GNSS 测量是当前最通用的地形测量方法之一，同样适用于潮滩观测。由于卫星单点定位精度偏低，工作中多使用差分定位的方案。基于载波相位差分的实时动态定位技术(RTK)起源于 20 世纪 90 年代，目前业已普及。RTK 系统由基准站、流动站和软件系统三部分组成，其基本工作原理是基准站通过数据链将其观测值和测站信息一起传送给同样在独立记录观测值的流动站，两站的数据在系统内实时处理，在运动中初始化，数秒钟内即可得到流动站的高精度三维定位坐标。

使用 RTK 技术进行潮滩观测，一般在近岸选取控制点架设基准站，同时建立控制网计算坐标转换参数，流动站则需要按设定的测线进行人工‘跑滩’打点[31]。基准站和流动站之间的实时通讯有电台模式或网络模式，但无论是哪种通讯，要使 RTK 得到固定解，确保垂直观测精度达到厘米级，基准站、流动站之间的距离是有限制的(多在 5 km 内)[32]。

对于宽广的潮滩(如苏北潮滩)，使用动态后处理差分技术(PPK)则更合适。PPK 是近些年来发展使用的测量方法，测量原理是通过基准站和移动站同时采集最少两个历元的观测时间，从而解算主站和移动站的基线解。其点位的测量精度同样能达到厘米级。相较于 RTK 技术，PPK 技术最大的特点是基站流动站间无需数据通讯，但各自单独采集的数据需进行后处理[33]。有研究表明，PPK 技术能将有效作业距离拓展到 100 km[34]，这一距离足以覆盖所有的潮滩。

并不是所有的潮滩都适合直接‘跑滩’，对于人行不便的潮滩，可以将 RTK(PPK)设备架设在气垫船等平台上工作，不仅增加安全性，同时提高工作效率[35]。如果潮滩过于宽阔，潮下带等区域长时间被水覆盖，此时则需要利用浅水测深设备进行水下地形测量。浅水高精度水下地形测量需要从仪器选定、数据滤波等各方面作对应的特殊处理，但最核心的工作是水位控制技术[36]。在水位控制网完备的区域可以选用潮改方案；更多情况下，联合 RTK(PPK)采用无验潮一体化测深技术是更合适的方案，研究表明，该技术在潮滩高程测量中可达到 10cm 的精度级别[37]。

4 面状观测技术

由于观测范围和工作效率上的限制, 潮滩冲淤的点、线状观测手段主要针对有限的特定点位或重点研究区。要整体了解潮滩冲淤状况, 更宜选用当前多样化的面状观测技术。面状观测技术多采用空基平台以实现大面积覆盖及高效作业, 其特点不一定体现为对某一具体点或线的高精度调查, 但无论在时间尺度还是空间尺度上的宏观性是其他手段无法达到的。

4.1 机(星)载激光测量

机载激光测量是将脉冲式激光测距设备装配在飞机之上对地进行测量的一种新的测量手段。在测距基本原理上, 机载激光测量和地面三维激光扫描或其他脉冲式测距雷达并无本质上的区别, 也是通过测定脉冲激光光波在测线上的往返时间, 来求得测点至目标点之间的距离。不同点在于, 机载激光扫描依托高频激光器作连续的高速测量, 测量光束可按设计要求改变测量方向, 满足按一定的格网密度和航带宽度快速采集地形高程或海底水深数据的要求[38]。

在潮滩观测中使用机载激光测量有两种模式: 一种是采用单一红外激光器, 波长为 800~1 064 nm, 可以对潮滩干出部分进行测量; 另一种是同时采用红外和蓝绿两种激光器, 适用对被浅水覆盖的潮滩水底地形进行测量, 红外激光波长仍为 1 064 nm, 负责形成水面回波, 蓝绿激光波长 532 nm, 可以穿透海水形成水底回波, 利用水面与水底反射激光到达接收器的时间差, 加以系统校准、姿态改正、折射改正、潮位改正, 可计算得被水覆盖潮滩的水底三维坐标。

以单一红外激光器扫描系统为例, 整套系统集成了卫星定位(GNSS)、惯性导航(INS)、激光测距(SLR)三个主要模块。如图 4 所示, GNSS 模块获取投影中心点坐标(X_0, Y_0, Z_0), 地面点到投影中心的距离 S 由 SLR 测得, INS 模块获取投影中心处主光轴俯仰角 α、侧滚角 β、偏航角 γ 的姿态数据 (α,β,γ), 观测方向与平台法线间角度 φ 由姿态数据与 φ 组成的矢量矩阵算出。最后, 待测点 P 的坐标 $P(x, y, z)$可以表示为前面 8 个已知参数的函数而求得[39], 即: $P(x, y, z)=f(X_0,Y_0,Z_0,\alpha,\beta,\gamma,S,\varphi)$

机载激光测量获得的点云数据需要经过编辑、滤波、校验等过程才能最终提取到特征点的准确值。

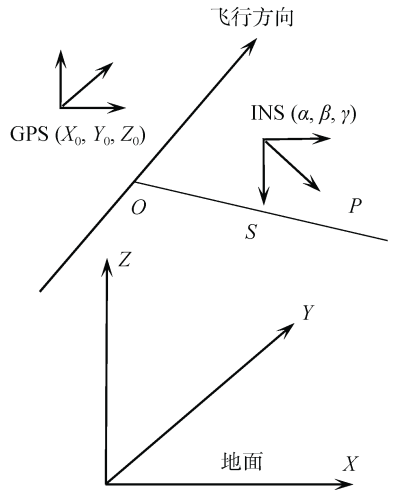

图 4 机载激光测量原理示意图[39]

Fig. 4 Schematic of the principle of airborne laser scanning measurement[39]

处理过程的重点和难点是针对不同环境设计选择不同的滤波算法[40], 以及测量过程中各种参数改正。使用机载激光方案进行潮滩观测最大的优势是高效与测量准确度。以 1 000 m 的飞行高度, 30°扫描角折算, 每条航线覆盖宽度即可在 500 m 以上, 实际更多的设备使用时能单次覆盖 1.8 km 以上[41]。潮滩测量准确度同样可以保证, 以 2014 年江苏省沿海滩涂加载 Lidar 航摄数据为例, 对两个测区共 218 个外业控制点的点云数据绝对精度检测显示, 高程中误差分别为 0.130 m 和 0.108 m, 可以达到潮滩观测要求[42]。不过, 对于红蓝激光穿透水层测水底高程而言, 潮滩浅水区水表波动、浑浊水体等因素对这种方法的使用仍带来诸多影响和限制。

随着无人机技术的发展及激光扫描设备的轻便化, 使用无人机机载激光测量使用更便捷, 也更具成本优势。以该技术在福建兴化湾附近几个典型滩涂海湾的应用为例, 测区为海水养殖密布的淤泥质潮滩, 属于传统测量难点区。无人机激光测量设置测线间距 250 m, 飞行高度 30 m, 速度小于 10 m/s, 无人机总飞行测线 229 km, 其中检测线 31 km, 已可覆盖 25 km^2 的区域。检测结果显示, 检测线交叉点的高程互差平均为 0.06 m, 最大互差仅为 0.15 m[43]。

星载激光高度计采用卫星平台, 运行轨道高, 观测范围广, 能全天时对地观测, 在地形地貌测绘、预警和观测等方面具有独特的优势。现有的星载激光高度计的平面和高程分辨率都较低, 还不适于进行潮滩观测。计划中美国的全球成像激光高度计(GILA)、激光

雷达地形测量系统(LIST), 据称能获得 5 m 平面分辨率、10 cm 垂直分辨率的全球高分辨率地形数据[44-45], 或可成为将来潮滩观测的重要数据源。

4.2 合成孔径雷达干涉测量

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是一种新的空间对地观测技术, 它利用雷达向目标区域发射微波并接收目标回波, 得到同一目标区域成像的 SAR 复图像对, 在有相干条件时, SAR 复图像对共轭相乘可以得到干涉图, 根据干涉图的相位值, 得出两次成像中微波的路程差, 从而计算出目标地区的地形、地貌以及表面的微小变化, 可用于数字高程模型建立、地表形变观测等[46]。

InSAR 技术对地观测获得的地面高程绝对精度并不高, 直接构建地面 DEM 模型的中误差多在 10m 以上[47], 但其特点是能大面积精确的获得地面高程变化量, 故目前多用于地面沉降观测, 其观测精度实测能达到 5 mm 量级[48]。不过, 潮滩高含水量环境不利于 InSAR 测量, 以该技术在江苏盐城大丰潮滩的试验为例; 旱地、水田、米草沼泽地、芦苇沼泽地、淡水养殖用地、潮沟、光滩七种地物的平均后向散射强度值由大到小, 光滩的雷达回波后向散射强度甚至接近于水体的回波强度。说明离海越近, 地物含水量越高, 后向散射强度越小, 进而失相干就越严重, 而失相干导致干涉效果差, 解缠不连续, 致使最终的探测结果可靠性低[49]。利用 InSAR 进行潮滩观测更适合潮上带, 整体上仍处于探索研究阶段。

4.3 无人机倾斜摄影测量

摄影测量是一种传统的测量技术, 对于陆地地形而言, 常采用航天、航空得到的正摄影像通过立体像对方法生成各种比例尺的 DEM 地形的工作模式。不过这类方法在潮滩使用几方面的限制: 首先, 所取影像成像时间需正处于低潮位, 潮滩暴露面积最大化的时刻, 这一时刻的卫星影像较难获得; 其次, 使用大型飞机针对性拍摄航片工作量和成本都很大; 另外, 潮滩地势平坦, DEM 构建的精度本身也受限[50]。与之对比的, 近年来发展的低成本的无人机倾斜摄影测量反而是一种潮滩观测更合适的手段。

无人机倾斜摄影测量通过在同一无人飞行器平台上搭载 5 镜头, 同时从一个垂直、四个倾斜五个不同的角度采集影像(也可使用单镜头 5 次飞行方法[51]), 拍摄相片时, 同时记录航高, 航速, 航向和旁向重叠, 坐标等参数。采集到影像数据导入软件进行建模计算, 经空三处理, 生成点云构建格网, 即可得到测量对象的三维模型。整个处理过程如图 5 所示。

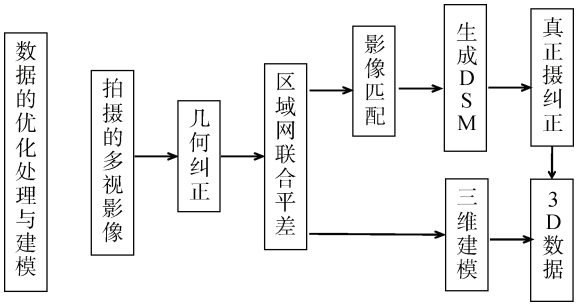

图 5 倾斜摄影测量数据处理流程[52]

Fig. 5 Data processing of tilt photogrammetry[52]

使用无人机倾斜摄影方法对潮滩进行测量, 除了方法本身的一般工作流程外, 更需要考虑潮滩特点而作相应处理, 如: 退潮后的潮滩往往仍有残余水分, 为了避免太阳耀斑的影响, 无人机适宜在多云天气或清晨、傍晚弱光时段进行数据采集[53]; 潮滩本身比较平坦, 为使影像有足够精细的分别率以获得纹理信息, 无人机的飞行高度要足够低; 需要人为大范围布设一定数量的高空清晰可见的滩面控制点等。

以该方法在江苏斗龙港潮滩的应用为例, 无人机飞行高度设置为 80 m, 单张照片拍摄范围为 92 m×69 m, 空间分辨率可达 2 cm。通过结合运动恢复结构算法等处理过程生成的 DEM 地形和正射影像, 对潮滩高程测量精度优于 9 cm, 水平精度优于 2 cm, 除了能有效观测滩面的冲淤变化, 正射影像还能直接的研究潮沟演变规律。不过, 对于植被覆盖的滩面, 倾斜摄影还不能像激光测量那样对植被有一定的穿透力, 只能获得植被顶部高程而无法得到滩面高程[54]。

4.4 遥感特征线技术

遥感特征线(多指水边线)技术是目前潮滩冲淤观测中最常用、宏观、便捷的手段。该技术是在水边线是一条等高线这一总的认识前提下, 通过从空基、天基的光学、微波遥感影像中, 识别提取水陆分界线, 进而分析潮滩的冲淤变化。根据具体提取特征线和分析方法的不同, 遥感水边线冲淤分析大致可归纳为定性、半定量、定量三类。

第一类定性分析主要有两种: 一种是从多期的影像中, 选出相近潮位时刻的影像资料提取瞬时水

边线，通过观察水边线的水平位移来分析潮滩的平面冲淤变化。这种方法由于影像的利用率较高、分析过程便捷，是潮滩冲淤定性对比的常用手段；另一种是提取瞬时水边线外的多元特征线作为分析对象进行冲淤判断，如冲刷痕迹线、植被发展下界及植被间的分界线等，这些线状目标在遥感影像上均清晰可见，有明显的空间分布规律[55]。第二类半定量分析是对定性分析的补充或修正。主要是从两期相近日期的影像中提取两条瞬时水边线(水平距要尽量大)，分别赋予影像成像时刻的潮位值，然后根据水平距和潮差求得潮滩平均坡度[1]，以此反推该时期的某一特定潮位线(如大潮高潮线)用于对比或者对该时期的其他瞬时水边线作小范围校正，如图 6 所示。这类利用‘平均坡度’的方法主要解决遥感影像不一定正好成像于大潮高潮时或几期数据准确的处于同一潮位下的难题。但平均坡度法理论上只适用于地形平缓、坡度单一的地区。第三类定量分析多用于潮滩的 DEM 反演，方法一般为从多期的影像中提取出不同位置的水边线，然后对每一条水边线给出精确的高程标定数据，这样所有的水边线即可构成一组潮滩地形等高线，进而得到潮滩的 DEM[56]。这种方法中，提取的水边线越多，等高线越密集，DEM 分辨率越高；高程标定越准确，DEM 精度越高。对水边线的高程标定数据可以是精确的水位高程值，或者是研究区潮滩上一条已测定了高程的断面线。

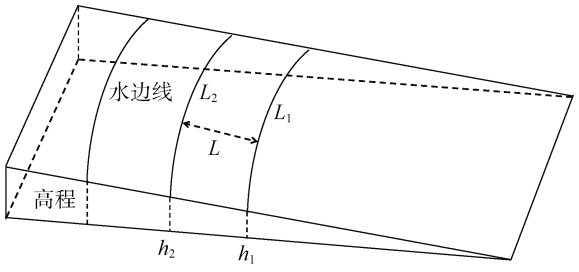

图 6　遥感水边线模型示意图

Fig. 6　Schematic of the remote sensing waterline model

遥感特征线潮滩冲淤分析技术的精度主要取决于特征线提取的准确度和匹配高程信息准确度两个方面。特征线提取准确度受不同传感器遥感影像质量、滩面含水量、潮滩底质、水体含沙量、提取算法等多方面的影响。匹配高程信息准确度取决于研究区已掌握的资料，特别是水位匹配法，不仅涉及水位的拟合赋值方法，更需注意到在潮滩浅水环境下水位观测或预报困难导致的数据本身的质量情况。综合目前国内使用遥感特征线技术在长江口、黄河口、等潮滩研究的成果，潮滩高程反演精度多在分米级别，且在高、中潮滩的精度优于低潮滩[57-58]。

4.5　高光谱反演

高光谱分辨率遥感是利用窄而连续的光谱通道对地遥感成像的技术。其在可见光到短波红外波段的光谱分辨率高达纳米级，可以收集到上百个非常窄的光谱波段信息，在对地观测和环境调查中有广泛的应用。潮滩地表光谱信息中隐含着滩面高程信息，通过分析高光谱影像反射率与实测高程之间的相关关系，建立两者的转换关系模型，可实现潮滩大范围概要地形信息的高光谱定量反演。

由于高光谱反演是建立在相关性分析基础上的反演技术，应用的重点是建立起光谱与高程之间有效而明确的相关性，故需要在地形分区、波段选择、反演模型等方面进研究。以该技术在江苏大丰潮滩的应用为例，研究者利用 1 164、1 275、1 336 nm 等高程反演理想波段对地形平坦区、起伏区分别建模，验证结果表明除了局部地形起伏较大区域外，高光谱反演高程能够较好的模拟出潮滩地形的平均变化趋势，研究区两处滩面高程的平均绝对误差分别为 7.5 cm 和 36.75 cm，可以为大范围潮滩冲淤变化分析提供可靠的依据[59]。另外，在 HOPE 等算法的支持下，高光谱遥感影像甚至可以反演浅水区水下地形，这也为潮下带的地形冲淤观测提供了一种可能的途径[60]。

5　结语

本文从点、线、面分类的角度梳理了潮滩冲淤观测技术发展现状。就观测技术本身而言，更高效、更高精永远是技术发展的主方向，在这一主线上，新型的设备、高效的平台、优秀的算法等都是重要的研究目标。另外，针对不同的潮滩条件选择合适的观测和计算方法也同样重要。就潮滩的冲淤研究而言，扩大观测范围、增加观测频次、融合多参数整体研究等，都值得进一步努力和提高，尤其是国内的潮滩冲淤研究。毕竟，潮滩冲淤是一种长期宏观的自然现象。

参考文献:

[1]　沙宏杰. 江苏淤泥质潮滩海岸线遥感推算方法与岸滩演变研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.

Sha Hongjie. Remote sensing method for coastline estimation and beach evolution of muddy tidal flat in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.

[2] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990, 10(4): 291-300.
Wang Ying, Zhu Dakui. Tidal Flat of China[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10(4): 291-300.

[3] 赵敏. 潮滩冲淤监测方法与实时监测系统设计[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(4): 437-441.
Zhao Min. Tidal Flat Erosion-deposition Observation Methods and Research of Real-time Observation System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(4): 437-441.

[4] Day B J W, Jr. High precision measurements of sediment elevation in shallow coastal areas using a sedimentation-erosion table[J]. Estuaries, 1993, 16(2): 375-380.

[5] Cahoon D R, Lynch J C, Hensel P, et al. High-Precision Measurements of Wetland Sediment Elevation: I. Recent Improvements to the Sedimentation-Erosion Table[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(5): 730-733.

[6] 胡湛, 周娟伶, 李裕龙, 等. 用于潮滩高程探测器的安装装置及潮滩高程测量系统: 中国, 201810693252.5[P/OL]. 2018-06-29[2020-08-31].
Hu Zhan, Zhou Juanling, Li Yulong, et al. Installation device for tidal flat height detector and tidal flat elevation measurement system: China, 201810693252.5[P/OL]. 2018-06-29[2020-08-31].

[7] Jestin H, Bassoullet P, Hir P L, et al. Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments[C]. oceans conference, 1998: 189-194.

[8] 何小勤, 戴雪荣, 顾成军. 崇明东滩不同部位潮周期沉积分析[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 106-108.
He Xiaoqin, Dai Xuerong, Gu Chengjun. Analysis of tidal periodic deposition in different parts of Chongming Dongtan[J]. Yangtze River, 2008, 39(6): 106-108.

[9] 贾建军, 高抒, 汪亚平. 人工示踪沙实验的原理与进展[J]. 海洋通报, 2000, 2: 80-89.
Jia Jianjun, Gao Shu, Wang Yaping. Artificial Tracer Techniques for Sediment Transport Studies: A Review[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 2: 80-89.

[10] 周良勇, 高茂生, 徐刚, 等. 黄河三角洲潮滩的侵蚀和再沉积: 示踪砂棒法的应用[J]. 地质通报, 2014(10): 1602-1608.
Zhou Liangyong, Gao Maosheng, Xu Gang, et al. Erosion and redeposition in tidal flats of the Yellow River delta: Result of tracer stick monitoring[J]. Geologcal Bulletin OF China, 2014(10): 1602-1608.

[11] Schwarzer K, Diesing M. Sediment Redeposition in Nearshore Areas: Examples from the Baltic Sea[C]// Coastal Dynamics O1, American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Conference, Lund, Sweden, 2001: 808-817.

[12] Schwarzer K, Thanh N C, Czemiak P, et al. The influence of tropical rainfall on sediment redeposidon in mangrove environments-examples from Can Gio, SE Viemam[C]//JSPS and CCOP/GsJ/AIST Joint Seminar on Monitoring and Evaluating Coastal Erosion in Deltas, Haiphong, Vietnam, 2010.

[13] Lawler D M, Couperthwaite J, Leeks G. Using the Photo-Electronic Erosion Pin (PEEP) automatic monitoring system to define bank erosion event timings: the River Wharfe, UK[C]// 7th Federal Interagency Sedimentation Conference on 'Sediment: Monitoring, Modeling and Managing', Reno, Nevada, USA, 2001: 25-29.

[14] 丁勇, 姚庆雄, 关云飞, 等. 基于侧向土压力确定冲淤深度的可行性研究[J]. 水利水运工程学报, 2015, 1: 47-52.
Ding Yong, Yao Qingxiong, Guan Yunfei, et al. Feasibility study of scour depth determination based on lateral soil pressure measurement[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015, 1: 47-52.

[15] 方海东, 施斌, 姚庆雄, 等. 基于光纤光栅技术的冲淤深度测量方法[J]. 工程勘察, 2016, 44(7): 27-30.
Fang Haidong, Shi bin, Yao Qingxiong, et al. Sediment depth measurement method based on the technology of fiber Bragg grating[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(7): 27-30.

[16] 房世龙, 施小飞, 倪飞. 桥墩局部冲刷远程实时监测技术研究进展[J]. 公路工程, 2015, 6: 88-95.
Fang Shilong, Shi Xiaofei, Ni Fei. Research situation of monitoring technologies for the local scour around piers in alluvial rivers[J]. Highway Engineering, 2015, 6: 88-95.

[17] Lawler D M. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system[J]. Geomorphology, 2008, 93(1): 17-39.

[18] Michalis P, Saafi M, Judd M. Capacitive sensors for offshore scour monitoring[J]. Proceedings of Institution of Civil Engineers Energy, 2013, 166(EN4): 189-196.

[19] Yu X, Yu X B. Assessment of an automation algorithm for TDR bridge scour monitoring system[J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(1): 13-24.

[20] 彭聪, 周兴华, 库安邦, 等. CORS联合全站仪在潮滩海岸线测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 6: 141-143.
Peng Cong, Zhou Xinghua, Ku Anbang, et al. Applica-

tion of CORS combined with total station in tidal flat coastline measurement[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 6: 141-143.

[21] 徐柏松. 免棱镜全站仪用于困难地区地形测量[J]. 地理空间信息, 2009, 6: 39-41.
Xu baisong. Non-prism total station use for survey in tough area[J]. Geospatlal Information, 2009, 6: 39-41.

[22] 夏立福, 李井春, 胡友健, 等. 免棱镜全站仪测距性能的测试及精度分析[J]. 地理空间信息, 2008, 2: 133-135.
Xia Lifu, Li Jingchun, Hu Youjian, et al. Test and precision analysis of ranging performance of reflectorless total station[J]. Geospatlal Information, 2008, 2: 133-135.

[23] Hunter G, Pinkerton H, Airey R, et al. The application of a long-range laser scanner for monitoring volcanic activity on Mount Etna[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 2003, 123(1): 203-210.

[24] 李杰, 孙楠楠, 唐秋华, 等. 三维激光扫描技术在海岸线测绘中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2012, 3: 90-95.
Li Jie, Sun Nannan, Tang Qiuhua, et al. Application of three dimensional laser scanning technology in coastline surveying[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012, 3: 90-95.

[25] 袁小祥, 王晓青, 窦爱霞, 等. 基于地面 LIDAR 玉树地震地表破裂的三维建模分析[J]. 地震地质, 2012, 34(1): 39-46.
Yuan Xiaoxiang, Wang Xiaoqing, Dou Aixia, et al. Terrestrial lidar-based 3D modeling analysis of surface rupture caused by yushu earthquake[J]. Seismology and Geology, 2012, 34(1): 39-46.

[26] 谢卫明, 何青, 章可奇, 等. 三维激光扫描系统在潮滩地貌研究中的应用[J]. 泥沙研究, 2015, 1: 1-6.
Xie Weiming, He Qing, Zhang Keqi, et al. Application of the terrestrial laser scanner to measuring geomorphology in tidal flats and salt marshes[J]. Journal of Sediment Research, 2015, 1: 1-6.

[27] 魏伟. 基于地面激光扫描的崇明东滩潮滩地形构建及冲淤演变分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Wei Wei. Study on topography retrieval and Scouring and Deposition of Chongming Dongtan Tidal Flat based on Terrestrial Laser Scanner[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.

[28] 魏伟, 周云轩, 田波, 等. 基于地面激光扫描的典型海岸带盐沼潮滩地形反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(6): 283-291.
Wei Wei, Zhou Yunxuan, Tian Bo, et al. Topography retrieval on typical salt marsh of coastal zone based on terrestrial laser scanning[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2018, 48(6): 283-291.

[29] 陈锦, 谭凯, 张卫国. 基于地面三维激光扫描强度数据的潮滩表层含水量估算[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 290-297.
Chen Jin, Tan Kai, Zhang Weiguo. Estimation of surface moisture of tidal flat based on intensity data of terrestrial laser scanner[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(2): 290-297.

[30] 李欢. 潮间带露滩地形的遥感测量方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
Li Huan. Study on remote sensing measurement method of open beach topography in intertidal zone[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.

[31] 王春瑞, 李景福, 王吉平. GPS RTK 技术在滩涂测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2002, 5: 40-41.
Wang chunrui, Li Jingfu, Wang Jiping. The Application of GPS RTK in the Tidal-Flat Area Surveying[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002, 5: 40-41.

[32] 张文祥, 杨世伦, 陈沈良. 一种新的潮滩高程观测方法[J]. 海岸工程, 2009, 28(4): 30-34.
Zhang Wenxiang, Yang Shilun, Chen Shenliang. A new method for observing tidal-flat elevation[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(4): 30-34.

[33] 李哲, 高立, 乔辉. GPS PPK 技术在测量外业中的应用探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 5: 120-121.
Li Zhe, Gao Li, Qiao Hui. Discussion on the application of GPS PPK technology in field measurement[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 5: 120-121.

[34] 赵建虎, 董江, 柯灏, 等. 远距离高精度 GPS 潮汐观测及垂直基准转换研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(6): 761-766.
Zhao Jianhu, Dong Jiang, Ke Hao, et al. High precision GPS tide measurement method in a far-distance and transformation model for the vertical datum[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 761-766.

[35] 吴敬文, 张正明, 杜亚南. 基于多技术融合的潮间带地形测量应用实践[J]. 现代测绘, 2018, 41(2): 44-47.
Wu Jingwen, Zhang Zhengming, Du Yanan. Application practice on topographic survey in intertidal zone based on multi technology fusion[J]. Modern Surveying and Mapping, 2018, 41(2): 44-47.

[36] 张颖, 赵刚, 李静, 等. 近岸浅水区测深数据精处理方案对比研究[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 2017.
Zhang Ying, Zhao Gang, Li Jing, et al. Comparative study on precision processing schemes of sounding data in nearshore shallow water area[C]// Proceedings of the 18th China Ocean Engineering Symposium. 2017.

[37] 张颖, 沈卫明, 李静, 等. 南黄海辐射沙脊群海域 GPS-PPK 海测方案应用分析[J]. 现代测绘, 2019, 42(3): 46-48.
Zhang Ying, Shen Weiming, Li Jing, et al. Application nalysis for GPS-PPK bathymetric survey in radial sand

ridges of South Yellow Sea[J]. Modern Surveying and Mapping, 2019, 42(3): 46-48.

[38] 陈炜, 胡广伦. 机载激光扫描测量原理及其发展与应用[J]. 测绘科技通讯, 1997, 20(2): 16-21.
Chen Wei, Hu Guanglun. Airborne laser scanning measurement principle and its development and Application[J]. Geomatics Technology and Equipment, 1997, 20(2): 16-21.

[39] 许宝华. 机载 LiDAR 测量技术在潮间带测量中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 95-98.
XU Baohua. Application of airborne LIDAR measurement technology in intertidal zone measurement[J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 95-98.

[40] 郭忠磊, 滕惠忠, 申家双, 等. 滩涂机载 LiDAR 点云数据滤波方法研究[J]. 海洋测绘, 2019, 4: 49-52.
Guo Zhonglei, Teng Huizhong, Shen jiashuang, et al. Fliter algorithms of airborne lidar data in coastal tidal flat[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 4: 49-52.

[41] 陈松尧, 程新文. 机载 LIDAR 系统原理及应用综述[J]. 测绘工程, 2007, 1: 27-31.
Chen Songyao, Cheng Xinwen. The principle and application of airborne LIDAR[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 1: 27-31.

[42] 郑斌, 王朝辉. 江苏省沿海滩涂机载 LiDAR 航摄数据质量评价[C]//江苏省测绘地理信息学会 2018 年学术年会论文集. 2018.
Zheng bin, Wang Chaohui. Quality evaluation of airborne lidar data in coastal beach of Jiangsu Province[C]//Collection essays of the academic annual meeting of Jiangsu society for geodesy photogrammetry and cartography in 2018.

[43] 蔚广鑫, 洪建胜, 王伟斌. 无人机激光测量技术在滩涂地形测量中的应用初探[J]. 应用海洋学学报, 2017, 1: 143-149.
Wei Guangxin, Hong Jiansheng, Wang Weibin. Application of laser measurement technology with unmanned aerial vehicle on the tidal flat topographic survey[J]. Journal of Applied Oceanography, 2017, 1: 143-149.

[44] 于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 52-61.
Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of Space-Borne laser altimetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 52-61.

[45] 王晓海. 国外星载激光高度计系统研究新进展[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/230985192_466840. 2018-05-08
Wang Xiaohai. New development of spaceborne laser altimeter system abroad[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/230985192_466840. 2018-05-08

[46] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Zhao Yingshi. Principle and method of remote sensing applications.[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[47] 靳国旺. InSAR 获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]. 解放军信息工程大学, 2007.
Jin Guowang. Research on key processing techniques for deriving accurate DEM from InSAR[D]. PLA Information Engineering University, 2007.

[48] 汪宝存, 远顺立, 王继华, 等. InSAR 地面沉降监测精度分析与评价[J]. 遥感信息, 2015, 30(4): 8-13.
Wang Baocun, Yuan Shunli, Wang Jihua, et al. Accuracy analysis and evaluation of InSAR land subsidence monitoring[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(4): 8-13.

[49] 王延霞. 顾及典型地理特征的时序 InSAR 地面沉降监测方法及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
Wang Yanxia. A time series InSAR image processing method for land subsidence monitoring with consideration of typical geographic features[D]. Xuzhou: China Mining University, 2015.

[50] 陈勇. 海岸带滩涂资源遥感应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012, 2: 296-304.
Chen Yong. Advance of Remote Sensing Application to Tidal Flat Resource Monitoring in Coastal Zone[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 2: 296-304.

[51] 曹爽, 马剑, 马文. 基于单镜头无人机倾斜摄影的建筑物三维模型构建[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(3): 643-649.
Cao Shuang, Ma Jian, Ma Wen. Construction of 3D model of building based on oblique photography of single lens UAV[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(3): 643-649.

[52] 杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 201(1): 13-15.
Yang Guodong, Wang Minshui. The tilt photographic measuration technique and expectation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 201(1): 13-15.

[53] Jaud M, Grasso F, Dantec N L, et al. Potential of UAVs for monitoring mudflat morphodynamics (Application to the Seine Estuary, France)[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, MDPI, 2016, Special Issue Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 5(4), pp.50.

[54] 戴玮琦, 李欢, 龚政, 等. 无人机技术在潮滩地貌演变研究中的应用[J]. 水科学进展, 2019(3): 359-372.
Dai weiqi, Li Huan, Gong Zheng, et al. Application of unmanned aerial vehicle technology in geomorphological evolution of tidal flat[J]. Advances in Water Science, 2019(3): 359-372.

[55] 张明, 蒋雪中, 郝媛媛, 等. 遥感水边线技术在潮间带冲淤分析研究中的应用[J]. 海洋通报, 2010, 29(2): 176-181.
Zhang Ming, Jiang Xuezhong, Hao Yuanyuan, et al.

Application of remote sensing waterline technique to analyze the changes of erosion and deposition in intertidal flat[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(2): 176-181.

[56] 苏国宾, 陈沈良, 徐丛亮, 等. 基于 GF-1 影像的黄河口潮滩高程定量反演[J]. 海洋地质前沿, 2018, 11: 1-9.
Su Guobin, Chen Shenliang, Xu Congliang, et al. Quantitative retrival of tidal flat elevation with GF-1 images in the Yellow River mouth[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 11: 1-9.

[57] 杨立君, 王得玉, 姜杰, 等. 多元特征线遥感识别的滩涂 DEM 构建[J]. 测绘通报, 2018, 8: 32-36.
Yang Lijun, Wang Deyu, Jiang Jie, et al. Using remote sensing identification multi-feature line construction of tidal flat DEM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, 8: 32-36.

[58] 苏国宾. 黄河口淤泥质潮滩高程定量遥感反演技术研究及应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
Su Guobin. Research and Application of Quantitative Remote Sensing Inversion Technology for Mudflat Elevation in the Yellow River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.

[59] 陶旭, 张东. 潮滩滩面高程的高光谱遥感反演研究[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(4): 498-507.
Tao Xu, Zhang Dong. Inversion of tidal flat elevation based on hyperspectral remote sensing[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(4): 498-507.

[60] 张源榆, 黄荣永, 余克服, 等. 基于卫星高光谱遥感影像的浅海水深反演方法[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1567-1577.
Zhang Yuanyu, Huang Rongyong, Yu Kefu, et al. Estimation of shallow water depth based on satellite hyperspectral images[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(7): 1567-1577.

Current situation of tidal flat erosion-deposition observation technology

ZHANG Ying[1], YAN Yu-ru[1], ZHANG Jia-bao[2], LI Jing[1], QIU Lu-lu[1]

(1. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Received: Aug. 31, 2020
Key words: tidal flat; erosion–deposition observation; technical classification; research status

Abstract: This study sorted the key considerations of the erosion–deposition observation strategy in tidal flat research on the basis of more than 20 feasible technologies of the classification of point, line, and surface observations. This study also focused on explaining each method's basic principles, applicability, and similarities and differences and each observation technology's development paths. Furthermore, the quality index, core technical points, and practical application case of new methods are analyzed. Therefore, our understanding of the development field of tidal flat erosion–deposition observation technology can be improved.

(本文编辑: 康亦兼)