

引用格式:Chen Yong. Advance of Remote Sensing Application to Tidal Flat Resource Monitoring in Coastal Zone[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 296-304. [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, 27(2): 296-304. ]

# 海岸带滩涂资源遥感应用研究进展

陈 勇

(上海市地质调查研究院, 上海 200072)

**摘要:**海岸带滩涂环境复杂多变, 进入性、通达性差。遥感技术因宏观、快速、综合、高频、动态和经济等突出优势, 在海岸带滩涂资源动态监测中应用前景广阔。回顾了近年来国内外遥感技术在海岸带滩涂应用中的研究进展, 主要包括海岸线提取、潮滩冲淤分析、近岸水深调查、悬浮泥沙反演以及潮滩环境监测等领域。详细论述了航空遥感、卫星光学遥感、微波以及激光等遥感技术在这些领域应用中的技术原理与方法, 对近年来最新应用成果以及存在的主要问题进行了分析。指出要进一步提升遥感技术在海岸带滩涂研究领域的应用能力, 需要加强开展多源数据的融合、高光谱数据的信息挖掘、微波与激光雷达数据处理等方面的研究。

**关 键 词:**遥感; 海岸带; 滩涂

**中图分类号:** TP 79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2012)02-0296-09

## 1 引 言

20 世纪 80 年代以来, 随着传感器的不断发展, 理论与信息处理方法的不断进步, 遥感技术在资源、环境、水利、林业、农业等领域得到了广泛应用。海岸带作为海陆过渡的生态脆弱带和环境变化敏感区, 近年来由于人类活动的加剧, 加之全球气候变化的影响, 海岸带及其近海的资源环境发生了显著变化, 深刻影响着沿海城市的扩展空间与土地利用结构。由于海岸带环境复杂多变, 其进入性、通达性较差, 常规的海岸带调查在调查成本、资料获取、信息处理等方面存在诸多限制, 难以满足当前海岸带变化监测的需求。如何能及时、准确、高效地获取海岸带资源环境变化信息, 以实现海岸带资源的科学管理和持续利用已成为当前研究的热点。为了解地球而发展起来的卫星对地遥感观测技术, 因对地观测具有宏观、快速、综合、高频、动态和经济等突出优势, 为海岸带滩涂资源动态监测提供了新的技术手

段, 众多学者就此开展了大量的理论与应用研究<sup>[1-6]</sup>。近年来遥感在海岸带中的应用迅速发展, 呈现出数据源多样化、业务领域扩大化、调查成果精细化的特点。美国、英国、意大利、韩国等国家, 几乎所有大规模的近岸海区资源调查和开发规划中都把遥感技术作为重要调查手段。常用的海岸带滩涂遥感手段主要有 5 种<sup>[2, 6-7]</sup>, 即航空遥感、卫星光学遥感、微波遥感、激光雷达技术与声学测深。调查内容涉及滩涂岸线的时空变化、滩涂冲淤演变、滩涂水下地形变化、近岸悬浮泥沙信息以及与滩涂有关的地质环境信息等方面内容。

相比较于大气遥感、陆地遥感、海洋遥感等其他遥感重要应用分支, 海岸带滩涂遥感应用技术还不够成熟, 离业务化实用阶段还有一段距离。前人曾从多个角度对遥感海岸带应用进展, 存在的问题有过评述<sup>[1, 8-11]</sup>, 但针对海岸带滩涂资源的遥感调查技术现状的系统总结还不多见。本文围绕遥感在海岸带滩涂资源调查与监测中的几个重要应用领域, 系

收稿日期: 2011-06-03; 修订日期: 2011-12-21

基金项目: 国家公益性行业科研专项“典型海岸带地质环境监测关键技术与评价方法”(201011019), 上海市规划和国土资源管理局科研项目“上海市后备土地资源动态监测体系与应用研究”(Gtz20090012)。

作者简介: 陈 勇(1982—), 男, 湖北荆州人, 博士, 工程师, 主要从事海岸带遥感、城市地质等方面的研究。E-mail: chenyingcugb@126.com。

统回顾了国内外近年来的研究进展,对遥感应用水平与存在的问题进行了分析。

## 2 海岸线遥感识别与提取

海岸线被国际地理信息委员会(IGDC)定为最重要的27种地表特征之一,Dolan最早定义海岸线为水体与陆地的自然界面。实际应用中一般把平均高潮线作为海岸线。由于卫星过境时水边线正好位于平均大潮高潮线的影像难以获取,大部分遥感海岸线提取技术都是研究如何利用数字图像处理技术提取瞬时水边线。水边线是陆地与海水的交接线,它是潮汐波动下,起伏不平的海平面与陆地的瞬时交界线,随着涨落潮的变化,位置也相应改变。国内外学者利用航空遥感、航天光学遥感、微波遥感与机载激光测高技术均进行过海岸线提取研究,其技术原理、信息提取手段各有差异。

利用遥感技术提取具有高程的海岸线一般基于两种思路:第一种思路是通过建立潮滩DEM,从而得到不同高程的水边线;第二种思路是从瞬时水边线与潮位站数据中,利用时空模型来估计水边线。在第一种方法中,构建DEM主要通过立体像对。航空摄影时间一般选在平均高潮位时刻<sup>[12]</sup>。现在基于航片立体像对提取数字高程模型的方法已大大简化,需要的控制点数量也相应减少,同时具有成像时间灵活、数据空间分辨率高等优点。但航片获取成本较高,且不具备周期性回访特点,在动态调查与监测中受到限制。随着卫星传感器技术的不断进步,目前在轨的多颗光学遥感卫星如ASTER、QuickBird、Cartosat-1、Worldview-1和GeoEye-1也具备提供立体像对的能力。商业的遥感处理软件如ENVI、ERDAS、PCI等均具有依据立体像对构建DEM的功能模块,使数据处理过程大大简化。遥感卫星立体像对提取DEM成本较低,且能对调查区进行周期性回访,具备持续、动态监测的能力,但卫星过境时间固定,成像时间不灵活,很难获取高潮位时刻的影像,限制了其在海岸线提取中的应用。同时,在地势比较平坦的潮滩,利用立体像对方法精度较差,也是其广泛应用的一大阻碍。

鉴于上述立体像对构建DEM手段的缺陷,在实际应用中,海岸线提取更多地采用第二种思路,即光学卫星水边线提取方法。目前,在轨运行的涉海卫星约有30颗,数据源主要有NOAA卫星系列、Landsat卫星系列、MOS-1和JERS-1、GMS、“风云-

N”气象卫星、SPOT卫星、ERS卫星、SeaWiFS、“资源一号”及MODIS卫星等数据。其中以Landsat、SPOT等为代表的中空间分辨率为代表的数据源在海岸线提取中已被广泛运用<sup>[2,5,13]</sup>;卫星数据空间分辨率直接决定着水边线提取的精度<sup>[1,14]</sup>,Foody等<sup>[15]</sup>利用IKONOS数据进行岸线提取,达到1:5000精度水平。近年来,卫星数据空间分辨率提升迅速,目前已有多颗亚米级高空间分辨率卫星如GeoEye、WorldView投入运行,有望进一步提升调查精度。

瞬时水边线提取方法分为人工目视解译与自动信息提取。目视解译通过人机交互方式把海岸线描绘出来并保存成线性矢量图层,方法简单,但精度受人为主观因素的影响;自动信息提取方法快捷,计算过程可以多次重复,是遥感应用领域研究的热点。自动信息提取实质上是一个图像分割的过程,方法较多,国内外学者先后提出了阈值分割法、边缘检测法、数学形态学法、神经网络分类等多种算法,极大地推进了自动信息提取研究。不过这些方法从本质上讲,都是基于像元的,还无法从根本上摆脱基于像元分析方法特征单一的局限性。近年来,面向对象商业软件e-Cognition的问世,带动了基于面向对象遥感信息提取研究的热潮<sup>[16-17]</sup>。该方法综合考虑了地物波谱与纹理信息,通过基于对象的典型特征进行分析和判别来实现目标提取,较仅考虑像元波谱信息具有一定的优势。总体上,目前自动信息提取方法客观上解决了水陆边界清晰、水体洁净的海岸带地区水边线提取问题,很大程度上提高了海岸线提取效率。但是,与遥感传感器技术发展的速度相比,自动提取信息算法研制的速度相对缓慢得多<sup>[18]</sup>,目前海岸线自动提取结果中仍存在噪声多、计算量大、提取边缘容易中断、后续边缘处理工作量大等难题亟待解决。大江、大河入海口地区水体泥沙含量高,潮滩中大量残余水体的存在,使水、陆界线在光谱曲线上的诊断特征变得不够明显,是目前海岸线提取的又一大难点。Ryu等<sup>[2]</sup>通过遥感、光谱测试与野外实测调查,研究结果表明,在退潮的情况下,因残余水体的影响,热红外效果较好,但还没有某一个波段能完全满足要求,多波段的组合运用是解决这个难题的一个思路。高光谱数据波段多,波谱信息丰富,可以对不同地物光谱之间的细微差异进行精细刻画,可以有效提高潮滩水陆分类效果。但目前高光谱遥感在

沿海潮滩区域应用多以航空高光谱与地面实测高光谱为主,星载高光谱数据虽然探测面积大、精度高、成本低,但数据的稀缺性(唯一在轨的星载高光谱遥感卫星为 Hyperion),使其相应研究还处于起步阶段<sup>[19]</sup>。

随着 1978 年 Seasat 卫星发射开始,航天微波遥感(SAR)为海岸线提取提供了另一种技术手段。SAR 为主动遥感,侧视成像,可全天时、全天候监测,具有穿透力强、分辨率高、灵敏度高等特点,具有不受大气、云层等影响等优点。微波雷达探测水边线主要基于淤泥质潮滩上的淤泥和水体表面的粗糙度,复介电常数等参数的差异与变化。雷达成像基本原理与图像解译见文献<sup>[20]</sup>。基于微波的水边线算法主要是边缘检测算法<sup>[21-23]</sup>。该方法提取 SAR 图像的海岸线,但由于斑点噪声、风浪引起的海面粗糙等原因,SAR 图像上陆地和水的对比度常常不明显,影响了利用 SAR 数据提取海岸线的精度。从目前研究结果来看,提取直线精度较高,但对复杂的水边线效果较差。同时,微波遥感数据源相对稀缺,数据成本高,目前还多处于试验研究阶段。

激光雷达(LiDAR)是一种主动式的现代光学遥感设备,是传统的无线电或微波雷达向光学频段的延伸。它通过发射激光光束,并能精确记录传感器发生和接收激光脉冲信号的瞬时时刻,然后利用光速恒定原理,将脉冲发射和反射的时间间隔转换为斜距,同时参考传感器的高度,激光扫描角度以及从 GPS 得到的传感器位置信息准确计算出脉冲到达每个地面光斑的三维点坐标。通过三维坐标构建地表模型,再依据潮位资料,可以达到海岸线提取的目的<sup>[12,24]</sup>。机载激光扫描侧高技术发展已有近 20 年历史,硬件技术也不断发展,目前激光雷达测地技术已较为成熟,国际最先进的机载激光雷达系统 SHOALS3000 测地模式水平精度已达到 2 m,垂直精度 25 cm<sup>[26]</sup>。虽然绝大部分硬件技术及系统集成的问题已得到解决,但数据处理相对滞后,还没有通用的数据处理软件,用户无法根据自己的需要管理这些数据<sup>[27]</sup>。

航片、星载光学遥感、微波遥感、机载激光雷达等技术在水边线调查中有着各自的优势与不足。在实际应用中,精度、成本、数据可获取性、数据处理难易程度往往是决定遥感技术能否投入广泛应用的主要考量因素,Gens<sup>[11]</sup>对这 4 种遥感手段进行了对比分析,从调查精度上看,基本处于同一级别范围,水

平精度均可以控制在 10 m 以内;航空遥感调查虽然精度较高,但成本高昂,无法对某一地区开展持续性动态监测;微波雷达数据具有全天候特点,但数据源稀缺,数据成本较高,阻碍了其广泛应用;机载激光雷达在国外得到了广泛应用,我国目前的激光雷达系统还处于研制阶段,对引进的国外硬件系统,还没有系统掌握其数据处理技术;光学卫星遥感数据源丰富,成本较低,精度基本满足应用要求,但受天气、潮汐条件影响较大,在水体浑浊的海岸带地区,调查精度受限,是目前该技术的主要不足。鉴于各种手段的优劣势,在未来的研究中,开展高光谱信息分析,多源遥感数据综合调查,集中多源遥感的技术优势,将是未来海岸线调查的发展方向。

### 3 潮滩冲淤遥感分析

潮滩特别是淤泥质潮滩,是一种动态不稳定的土地资源,存在明显的冲淤变化,是岸滩长期作用的综合反映,查清其性质和分布对滩涂资源的合理开发和研究现代海岸带动态变化具有重要意义<sup>[4]</sup>。水边线提取的主要目的是对海岸带的变化进行动态监测。不同水边线间因潮位不同而不具有比较性。潮滩冲淤遥感分析一般通过构建 DEM,对 DEM 进行叠加分析而实现。

航空、航天立体像对、,激光雷达以及合成孔径雷达干涉测量(InSAR)等均可以直接生成 DEM。航空、航天立体相对生成 DEM 进行冲淤分析成像需要选择低潮位,潮滩暴露面积最大化时刻,这个时刻的卫星影像难以获取,航片具有成本高,且潮滩地势平坦,DEM 构建精度受限;激光雷达技术海岸带测高在我国的应用还处于起步阶段。InSAR 技术为获取快速精确的 DEM 提供了一个全新的方法,是雷达遥感新的研究方向,是当今世界各国地学领域研究的热点。用 InSAR 技术生成 DEM,可以测量地面高程,其精度可达数米。但是由于 InSAR 数据处理的复杂性和专业性,实现 InSAR 数据高精度配准、有效抑制噪声、高精度相位展开以及生成高精度的 DEM 等方面还存在较大的困难。目前用 InSAR 技术生成 DEM,其精度达数米。潮滩地区在一定时间段内,地形变化较大,数米级的精度难以满足应用的要求。但因成本与数据获取、数据处理等方面的障碍,目前还没有得到大规模应用。

卫星光学遥感可以通过水边线提取,利用潮位分带校正,获取水边线的高程,通过空间插值建立

DEM<sup>[5,28]</sup>,是目前最为常用的方法。这种方法中,海平面就如同高度计,水边线等同于等高线。这种方法的难点在潮位改正。潮位改正包括时间的改正与空间潮位分带改正。由于潮位数据通常是整点时刻的数据,若要精确获取该卫星成像时刻的潮位数据,一种方法是已知预报时采用潮汐调和常数,内插任意时刻的潮位数据;另一种方法是通过整点的潮位观测数据建立多项式,采用插值(或拟合)方法获取任意时刻的潮位<sup>[29]</sup>。潮位分带改正利用空间位置上不同的潮位站资料,采用不同的方法确定不同岸段水边线的高程。韩震等<sup>[10]</sup>提出了基于空间插值的潮位分带校正方法,郑宗生等<sup>[28]</sup>提出了借助水动力模型模拟出对应遥感成像时刻的水位。Zhao等<sup>[30]</sup>利用水边线,通过潮位校正方法建立了崇明东滩与九段沙 DEM 模型。沈芳等<sup>[31]</sup>把基于此方法构建的 DEM 与实测 DEM 进行了比较,结果表明,构建的 DEM 高程精度相对误差小于 0.5m 区域占总面积的 70%。

由于目前的商业卫星重访周期都在 10 d 以上,加上天气的干扰,要想达到构建一个时间段的 DEM 所需要的不同潮情水边线的数量,往往持续数年时间。冲淤演变速度很快,这数年间可能滩涂地形本身已发生较大变化,影响了所建 DEM 的代表性。NOAA 卫星的 AVHRR、SEASTAR 卫星的 SeaWiFS 的时间分辨率虽然提高到 2 h,但星下点地面分辨率近 1 km,影响成果精度。要实现时间、空间精度的兼顾,是目前面临的难题。

综上,潮滩冲淤演变分析目前仍然是遥感应用的薄弱领域。在实际调查中,仍然以野外实地测量为主,遥感冲淤分析多提供辅助信息。航空、航片立体像对、InSAR 等技术均受限于成本,精度要求离实际应用需求还有一定距离。卫星光学遥感水边线方法也存在可利用数据源不足的问题。但 InSAR 与激光雷达技术显示出良好的应用潜力,在未来的研究中,进一步加强数据处理技术研究,有望改变潮滩冲淤遥感应用能力不足的现状。

## 4 水深测量

目前,水深测量数据采集主要通过船载水深测量的方式进行,主要利用回声测深仪采集水深数据,利用 GPS 接收机采集定位数据。长期以来,单波束、多波束水深测量在海洋测绘中一直占据主导地位,测深数据广为应用。其中多波速与目前常规单

波束比较,具有测深点多、覆盖面宽、效率高的特点。目前,以单波束与多波束方法为代表的声学测深技术是我国海岸带水深测量最为常用的方法。该技术手段成熟、测量精度高,但测量周期长、成本高,且在近岸潮滩水浅地区,船舶无法通行,会形成测量空白区。较传统的船舶声纳测深方法,遥感水深探测具有速度快、成本低等优势。在浅海、岛礁或者船只无法到达的海域,具有良好的应用潜力。基于遥感的水下地形调查研究始于 20 世纪 60 至 70 年代,具有水下地形调查的遥感技术包括卫星光学遥感、雷达与激光雷达测深技术。其测量原理可以分别称之为:密度法、波浪法和视差法<sup>[3]</sup>。密度法是根据物理学理论分析浅水区的辐射传输过程,建立光谱反射率与水深的解析关系。波浪法是根据波浪模式(波速、波浪周期、波浪折射等)与水深、海底地形等的关系(如重力波在浅水区产生折射、潮流在经过浅水区会引起水面粗糙度的变化、水深陡变地形会产生内波),利用影像记录的水表面波动信息来分析波动模态的变化,得出水深。视差法是采用双介质摄影测量的,通过测量视差得出水深。卫星光学遥感水深测量属于密度法。利用光学遥感潜水区水深测量能力早已被认识<sup>[32]</sup>,其原理主要是利用太阳光在水体内部的穿透能力,通过遥感器采集水下一定深度范围内信息,再通过信息处理方法分离出水体厚度信息。传感器接收到的光谱信息包括大气散射、水气界面直接反射光,光线进入水体,经过衰减,经水底放射到达传感器。卫星接收到的能量中只有 5%~15%来自水体辐射,其他的都是噪声<sup>[9]</sup>。这 5%~15%能量又来自于水体中叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等多个因子的共同贡献,尝试如何建立削弱悬浮物质影响的水深反演模型是目前在遥感测深方法研究中需要解决的问题。根据解算方法的不同,解决思路可分为基于辐射传输的理论模型、半理论半经验模型和统计相关模型。统计相关模型操作起来简单,是目前水深反演应用最广泛的手段。它是在分析实测水深值之间与水体光谱反射率,或反射率随波长的变化规律之间关系的基础上,通过分析遥感图像的反射率与实测水深之间的相关性来选取水深反演因子,建立了线性与非线性统计模型<sup>[33-34]</sup>。张鹰等<sup>[3]</sup>在建立统计模型时考虑了悬浮泥沙浓度的影响,有效地提高了反演的精度。光学遥感方法的经费投入大约是常规方法的 1/6~1/4,而需时则不到常规方法 1/10<sup>[3]</sup>,总体平均相对误差在 20%左

右<sup>[3,33-34]</sup>。虽然在成本、效率上较常规方法具有很大的优势,但大气成分对辐射传输的影响等因素使得卫星遥感所能接收的离水辐射信息较弱,仅以简单的数学统计相关并不能准确地表达遥感信息和水深之间的关系,造成目前的反演精度离实际应用要求还有差距。未来随着高光谱遥感数据信息挖掘技术的深入,将会把实验研究的光谱规律很好地应用到模型中来,从而提高反演精度。

SAR 浅海水下地形遥感研究最早可以追溯到1969年<sup>[35]</sup>,第一颗海洋雷达卫星 Seasat 首次向人们展示了 SAR 浅海水下地形探测的巨大潜力。SAR 之所以探测到浅海水下地形信息,AH 成像理论模型认为<sup>[36]</sup>:由于浅海水下地形间接改变了海表面风致微尺度波的空间分布。海表层变化的流场会引起辐聚、辐散现象。在辐聚区海表面粗糙度变大,Bragg 波振幅增加;在辐散区海表粗糙度降低,Bragg 波振幅减少。对应于雷达图像上辐聚区亮度增强,而辐散区亮度减少。SAR 浅海水下地形图像所现的雷达后向散射截面的变化与浅海水深有着密切的关系,一般对应不超过 50 m 的水深。SAR 浅海水下地形成像的前提是较强潮流的存在和风致海表面微尺度波的产生。前人研究结果表明<sup>[37]</sup>:在 3~10 m/s 的中等风速和大于 0.5 m/s 的强潮流条件下,雷达可以探测到浅海水下地形。较具规模和影响的是荷兰科学家 1993 年开始建立的“水深估测系统”<sup>[38]</sup>,其精度在实验区达到 30 cm 的误差。国内学者近年也陆续开展了雷达水下测量的理论与应用研究<sup>[37,39-40]</sup>;雷达图像的后向散射截面强度与浅海水深变化的相关性依赖于风、潮流和浅海水下地形的相互作用,雷达图像反映的可能是内在的波浪信息,而非深度,目前这种相关性依然是国内外研究的难点。

机载激光水深测量系统是集光、机、电于一体的海洋探测新技术,是当今海洋测绘领域最先进技术的集中体现<sup>[26]</sup>。激光雷达测深是利用机载激光发射和接收设备,通过发射大功率脉冲激光,进行海洋水底探测的一种技术。Brock 等<sup>[24]</sup>对激光测高进行海岸带地形测量的原理进行了论述。其原理是基于海水中存在一个类似于大气的透光窗口(即海水对 0.47~0.58  $\mu\text{m}$  之间波长范围内蓝绿光的衰减系数最小),通过从飞机上由激光雷达向下发射高功率、窄脉冲激光,同时测量水面反射光(主要是红外激光)与水底反射的蓝绿激光的回波,两者的时间差乘

以光在水中的传播速度即可以得到水深。近年来激光测深硬件系统发展很快,其中最为著名的是加拿大研制的 Shoals 系统,现已发展到最新型号 Shoals3000T,该系统的测量精度,已完全能够达到《国际海道测量标准》规定的一级测量精度指标要求,测量频率为 3 000 Hz,测量深度为 0.2~50 m,扫描宽度为 300 m<sup>[26]</sup>,调查效率是常规调查的 5 倍以上,而调查成本仅为常规调查的 1/5。我国在 2004 年研制了机载激光测深系统 LADM-II,在海南三亚湾进行首次飞行试验,得到满意的试验效果,使得这一技术接近国际先进水平。目前我国新一代机载激光测深系统正处于研制阶段,陈卫标等<sup>[41]</sup>对该系统的理论分析,认为 50 m 水深的最终误差控制在 0.3 m 具有可行性。

与探测系统相比,机载激光水深测量数据后处理技术仍是国际上研究的难点<sup>[26,42]</sup>,主要原因在于:① 激光在大气—海水界面和水中的传播能量损失大,海底回波信号弱;② 海浪和水中悬浮物体对激光雷达探测回波信号方向和强度都有较大影响,而且影响是随机的;③ 由于海水中各种光的散射以及藻类的虚假目标,造成了回波的复杂性。激光测深技术很大的一个不足在于其测量深度,一般测量深度大约为透明度的 2~3 倍<sup>[42]</sup>,在清水区一般只能达到 50 m,到近海滨海浊海域小于 10 m,而对于极端浑浊海域则不再适用。我国河口地区海域一般悬浮泥沙浓度较高,从目前检索的文献来看,还鲜见在这些地区成功应用的案例。

机载激光水深测量是未来发展的主要方向,也是我国目前水深调查领域的研究重点,需要进一步加强数据处理研究。同时,还需要加强高光谱水深反演研究,反演模型中考虑悬浮泥沙反演因子,进一步提高光学遥感水深反演的精度。

## 5 悬浮泥沙浓度反演

悬浮泥沙含量时空变化是研究河口海岸冲淤变化,估算河流入海物质通量、海洋沉积速率与沉降环境的重要参数。由于受地形、径流、潮汐、波浪以及淡盐水混合等多因素的综合影响,悬浮泥沙的时空分布、运动特性以及沉积部位经常变化,是海洋遥感领域的一个重要研究方向。借助遥感手段可以快速地获取水体泥沙信息。国内外悬浮泥沙浓度反演方法一般分为两种:① 基于大气辐射传输理论模型法,该模式根据辐射在大气中传输的基本理论,分析

遥感探测中要处理的问题。在传感器获取数据的同时,需要对一系列的大气环境参数进行测量,其优点是能够比较合理地处理大气散射、气体吸收问题形成连续光谱,避免在光谱反演中出现较大的定量误差。Gordon 等<sup>[43]</sup>分析了光在水和大气中传输的机理,根据水体漫反射的(准)单散射模型建立了著名的 Gordon 关系式。目前,国内外许多遥感专家正在从事这方面的研究,结合地面场地外定标进行目标信息的反演研究,并取得了比较理想的结果;②基于地面实测法,是一种比较简便的反射率反演方法,它把从地面获取的辅助信息对传感器进行地面定标,然后用遥感数据计算地表物理参数。这也是国内外学者广泛应用的方法,一般利用 SeaWiFS、NOAA、Landsat、SPOT 等卫星数据与地面测量光谱进行分析,高光谱测量仪测得的水面光谱和悬浮颗粒浓度之间的统计关系,建立了两者的定量模型<sup>[44-45]</sup>。Doxoran 等<sup>[46]</sup>的研究表明,对于河口高混浊水体,SPOT 的近红外波段 XS3 (790~890 nm) 的遥感反射率  $R_{rs}(XS3)$  以及  $R_{rs}(XS3)/R_{rs}(XS1)$  和  $R_{rs}(XS3)/R_{rs}(XS2)$  与悬浮泥沙的浓度有很好的相关性。李四海等<sup>[47]</sup>利用 SeaWiFS 数据对长江口与杭州湾海域的悬浮泥沙进行了研究,在实测光谱数据的基础上,以波段比值的方式建立了遥感反演悬浮泥沙的模式。实测光谱数据在统计模型构建中往往具有重要作用,基于多光谱的悬浮泥沙反演精度一般在 65% 左右<sup>[46]</sup>;为进一步提高反演精度,还需要深化光谱实验方面的分析,对多光谱,特别是高光谱数据进行信息发掘<sup>[48]</sup>,充分了解不同水体环境、泥沙条件下的光谱规律,并利用更有效的大气校正模型消除大气的影 响,从而提高分析的精度和模型的适用性。

## 6 其他相关研究

在进行海岸带后备土地资源监测时,除需对其时空变化进行动态监测外,还有必要对滩涂生态和地质环境进行调查。潮间带环境在时空上都具有很大的变化性,利用常规采样方法费时、费力、且不具有代表性。目前相当一部分学者利用遥感对潮间带填图进行了一些很有意义的探索,取得的成果让人关注。Rainey 等<sup>[6]</sup>利用高光谱数据对沉积物粒度进行了分析,研究潮间带沉积物粒度。 $R^2$  最高能达到 0.8,为潮间带调查提供了新思路。Choi 等<sup>[49]</sup>利用 IKONOS 数据统计了 DN 值潮滩沉积物分布之间

的统计关系,利用 DN 值分类,准确率达到 90.7%。未来随着更多高光谱传感器的升空,高光谱提供数百个波段,2~3 nm 的空间分辨率,连续的波谱曲线,包含更多的波谱信息,使地物区分更加容易,为后续的潮滩环境信息提取与挖掘提供了广阔的空间。

## 7 结 语

遥感技术在海岸带滩涂资源动态调查与监测中较传统方法具有宏观、成本低、效率高等优势,在多个调查领域中取得了良好的成果,是当前海岸带滩涂调查中非常重要的手段。但遥感技术在海岸带滩涂调查中要完全达到业务化运行还有一定难度。数据源限制,较为苛刻的应用环境条件,调查精度,信息处理方法的不完善是其应用的主要障碍。为进一步提高海岸带遥感的应用能力,还需要在如下几个方面开展深入研究。

(1) 开展多源数据的融合研究,发挥遥感系统的综合优势。

因不同技术在经济成本、调查范围、应用领域、调查精度等方面的不同优势,加强多源、多模式、多时相的数据融合和应用研究是解决海岸带滩涂资源与环境问题发展的方向。为克服单一技术的各自缺陷,需要寻求不同遥感数据的融合技术,如雷达与光学遥感数据的融合,激光与微波信息的融合,充分挖掘各种方法和各种遥感数据的优势,将其进行融合,取长补短,实现不同方法和不同数据源的互补。

(2) 进一步开展高光谱数据的信息挖掘研究。

高光谱遥感无论是在水深调查、水体悬浮物、潮滩沉积环境调查中都显示出良好的应用潜力。随着高光谱数据源的不断丰富,需要加强大气校正模型研究。同时结合野外实测光谱,对光谱数据进行深度挖掘,建立光谱与调查因子之间的关系模型,进一步提高调查因子的反演精度。

(3) 加强主动遥感信息提取技术研究。

微波雷达与激光雷达技术在海岸带滩涂应用中显示出巨大的潜力,较之被动光学遥感,具有不受天气影响,调查精度高等优势。但微波遥感的成像机理、数据处理,激光雷达在数据处理、信息反演等方面仍存在诸多亟待解决的问题,需进一步深入研究。

## 参考文献(References):

- [1] Cracknell A P. Remote Sensing Techniques in Estuaries and

- Coastal Zones-an Update[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20: 485-496.
- [2] Ryu J H, Won J S, Min K D. Waterline Extraction from Landsat TM Data in a Tidal Flat, a Case Study in Gomso Bay, Korea[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 442-456.
- [3] Zhang Ying, Zhang Dong, Wang Yanjiao, *et al.* Study of Remote Sensing-based Bathymetric Method in Sand-containing Water Bodies[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(1): 53-57. [张鹰, 张东, 王艳姣, 等. 含沙水体水深遥感方法的研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(1): 52-57.]
- [4] Xu Junjie, Chen Yong. Study of Tidal Flat Reclamation at Eastern Nanhui based on RS and GIS[J]. Shanghai Land and Resources, 2011, 32(3): 18-22. [徐俊杰, 陈勇. 基于 RS 与 GIS 的南汇东滩围垦研究[J]. 上海国土资源, 2011, 32(3): 18-22.]
- [5] Li X J, Damen Michiel C J. Coastline Change Detection with Satellite Remote Sensing for Environmental Management of the Pearl River Estuary, China[J]. Journal of Marine System, 2010, 82: 54-61.
- [6] Rainey M P, Tyler A N, Gilvear D J, *et al.* Mapping Intertidal Estuarine Sediment Grain Size Distributions through Airborne Remote Sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 480-490.
- [7] Volpe V, Silvestri S, Marani M. Remote Sensing Retrieval of Suspended Sediment Concentration in Shallow Waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 44-54.
- [8] Malthus T J, Mumby P. Remote Sensing of Coastal Zone: An Overview and Priorities for Future Research[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(13): 2805-2815.
- [9] Pan Delu, Wang Difeng. Advances in the Science of Marine Optical Remotes Sensing Application in China[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 506-512. [潘德炉, 王迪峰. 我国海洋光学遥感应用科学研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 506-512.]
- [10] Han Zhen, Jin Yaqiu, Yun Caixing. Remote Sensing Application to Monitoring Resources and Environment in China's Coastal Zone and Nearby Ocean[J]. Remote Sensing Information, 2006, (5): 64-71. [韩震, 金亚秋, 恽才兴. 我国海岸带及其近海资源环境监测的遥感技术应用[J]. 遥感信息, 2006, (5): 64-71.]
- [11] Gens R. Remote Sensing of Coastlines: Detection, Extraction and Monitoring[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 31(7): 1819-1836.
- [12] Liu H, Sherman D, Gu S. Automated Extraction of Shorelines from Airborne Light Detection and Ranging Data and Accuracy Assessment based on Monte Carlo Simulation [J]. Journal of Coastal Research, 2007, 23: 1359-1369.
- [13] Frazier P S, Page K J. Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(12): 1461-1467.
- [14] Peter J M, Edwards A J. Mapping Marine Environment with IKONOS Imagery: Enhanced Spatial Resolution Can Deliver Greater Thematic Accuracy[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82: 248-257.
- [15] Foody G M, Muslim A M, Atkinson P M. Super-resolution Mapping of the Waterline from Remotely Sensed Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26: 5381-5392.
- [16] Yang Xiaomei, Gong Jianming, Gao Zhenyu. The Research on Extracting Method of Microscale Remote Sensing Information Combination and Application in Coastal Zone[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(2): 40-48. [杨晓梅, 龚剑明, 高振宇. 海岸带遥感微尺度信息及组合挖掘提取和方法应用研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 40-48.]
- [17] Zhang Hansong. The Research of Object-based Remote Sensing Change Detection for Coastal Surface[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. [张汉松. 基于对象的海岸带地物变化遥感检测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.]
- [18] Gong Peng. Some Essential Questions in Remote Sensing Science and Technology[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 13-18. [宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 13-18.]
- [19] Bruce W P, Carol A J. Mapping an Invasive Plant, Phragmites Australis, in Coastal Wetlands Using EO-1 Hyperion Hyperspectral Sensor[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108: 74-81.
- [20] Henderson F M, Lewis A J. Principles and Applications of Imaging Radar [M]. New York: Wiley, 1998.
- [21] Niedermeier A, Romanefssen E, Lehner S. Detection of Coastlines in SAR Images Using Wavelet Methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38: 2270-2281.
- [22] Han Zhen, Jin Yaqiu. Shoreline Extraction of Silty Tidal Flat in Yangtze Estuary Using Satellite Infrared and Microwave Multi-source Remote Sensing Data[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(8): 1000-1006. [韩震, 金亚秋. 星载红外与微波多源遥感数据提取长江口淤泥质滩涂水边线信息[J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 1000-1006.]
- [23] Kim D J, Moon W M, Park S E, *et al.* Dependence of Waterline Mapping on Radar Frequency Used for SAR Images in Intertidal Area [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4: 269-273.
- [24] Brock J C, Wright C W, Salienger A H, *et al.* Basis and Methods of NASA Airborne Topographic Mapper Lidar Surveys for Coastal Studies[J]. Journal of Coastal Research, 2002, 18: 1-13.
- [25] Mason D, Hill D, Davenport I, *et al.* Improving Inter-tidal Digital Elevation Models Constructed by the Waterline Technique [C]// Proceedings Third ERS Symposium, Florence: ERS Publications Division, 1997: 1079-1082.
- [26] Ye Xiusong. Research on Principle and Data Processing Methods of Airborne Laster Bathemetric Techniques[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010. [叶修

- 松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2010. ]
- [27] Liu Jingnan, Zhang Xiaohong. Progress of Airborne Laser Scanning Altimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(2): 132-137. [刘经南, 张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(2): 132-137. ]
- [28] Zheng Zongsheng, Zhou Yunxuan, Liu Zhiguo, *et al.* Dem Reconstruction based on Hydrodynamic Model and Waterline Method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 754-760. [郑宗生, 周云轩, 刘志国, 等. 基于水动力模型及遥感水边线方法的潮滩高程反演[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 754-760. ]
- [29] Shen Jiashuang, Zhai Jingsheng, Guo Haitao. Study on Coastline Extraction Technology[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(6): 74-77. [申家双, 翟京生, 郭海涛. 海岸线提取技术研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 74-77. ]
- [30] Zhao B, Guo H Q, Yan Y, *et al.* A Simple Waterline Approach for Tidelands Using Multi-temporal Satellite Images; A Case Study in the Yangtze Delta[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77: 134-142.
- [31] Shen Fang, Hao Ang, Wu Jianping, *et al.* A Remotely Sensed Approach on Waterline Extraction of Silty Tidal Flat for DEM Construction, a Case Study in Jiuduansha Shoal of Yangtze River[J]. Acta Geodaetica Cartographica Sinica, 2008, 37(1): 101-107. [沈芳, 郝昂, 吴建平, 等. 淤泥质潮滩水边线提取的遥感研究及 DEM 构建[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 101-107. ]
- [32] Lyzenga D R. Passive Remote Sensing Techniques For Mapping Water Depth Bottom Features[J]. Applied Optics, 1978, 17: 379-383.
- [33] Lafon V, Froidefond J M, Lahet F, *et al.* SPOT Shallow Water Bathymetry of a Moderately Turbid Tidal Flat based on Field Measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 136-148.
- [34] Tian Qingjiu, Wang Jingjing, Du Xindong. Study on Water Depth Extraction from Remote Sensing Imagery in Jiangsu Coastal Zone[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(3): 373-379. [田庆久, 王晶晶, 杜心栋. 江苏近海岸水深遥感研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 373-379. ]
- [35] De L G. The Observation of Tidal Patterns, Currents, and Bathymetry with SLAR Imagery of the Sea[J]. IEEE Journal Ocean Engineering, 1981, 6(4): 124-129.
- [36] Alpers W, Hennings I A. Theory of the Imaging Mechanism of Underwater Bottom Topography by Real and Synthetic Aperture Radar[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 10529-10546.
- [37] Huang Weigen, Gao Manna, Zhou Changbao, *et al.* Spaceborne SAR Observations of Underwater Bottom Topography off the North Coast of Penglai[J]. Donghai Marine Science, 1996, 14(1): 52-57. [黄韦良, 高曼娜, 周长宝, 等. 蓬莱附近海区水下地形的星载合成孔径雷达遥感[J]. 东海海洋, 1996, 14(1): 52-56. ]
- [38] Calkoen C J, Hesselmanns G, Wensink G, *et al.* The Bathymetry Assessment System; Efficient Depth Mapping in Shallow Seas Using Radar Images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22: 2973-2998.
- [39] Guo Huadong. Radar Observations of the Theory and Application [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. [郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. ]
- [40] Fan Kaiguo, Huang Weigen, He Mingxia, *et al.* Progress on Remote Sensing of the Shallow Sea Bottom Topography by SAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(4): 479-485. [范开国, 黄韦良, 贺明霞, 等. SAR 浅海水下地形遥感研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(4): 479-485. ]
- [41] Chen Weibiao, Lu Yutian, Chu Chunlin, *et al.* Analyses of Depth Accuracy for Airborne Laser Bathymetry[J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 30(1): 101-104. [陈卫标, 陆雨田, 褚春霖, 等. 机载激光水深测量精度分析[J]. 中国激光, 2004, 30(1): 101-104. ]
- [42] Guenther G C, Cunningham A G, LaRocque P E, *et al.* Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry [C]//The 20th EARSeL Symposium; Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea. Dresden, Germany, European Association of Remote Sensing Laboratories, 2000, 6: 16-17.
- [43] Gordon H R, Morel A. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery [C]//A Review, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, New York, 1983: 114.
- [44] Miller R L. Using MODIS Terra 250 m Imagery to Map Concentrations of Total Suspended Matter in Coastal Waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 32: 59-266.
- [45] Li J, Gao S, Wang Y P. Delineating Suspended Sediment Concentration Patterns in Surface Waters of the Changjiang Estuary by Remote Sensing Analysis[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(4): 38-47.
- [46] Doxoran D, Froidefond J M, Lavender S, *et al.* Spectral Signature of Highly Turbid Waters, Application with SPOT Data to Quantify Suspended Particulate Matter Concentration[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 149-161.
- [47] Li Sihai, Yun Caixing. A Study on the Quantitative Model of the Suspended Sediment Concentration from the Meteorological Satellite Imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(2): 154-159. [李四海, 恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(2): 154-159. ]
- [48] Jiang Guangjia, Liu Dianwei, Song Kaishan, *et al.* Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Shitoukoumen Reservoir based on a Semi-empirical [J]. Remote Sensing



Technology and Application,2010,25(1):107-111.[姜广甲,刘殿伟,宋开山,等.基于半分析模型的石头口门水库总量悬浮物浓度反演研究[J].遥感技术与应用,2010,25(1):107-111.]

[49] Choi J K,Ryu J H, Lee Y K,*et al.* Quantitative Estimation of Intertidal Sediment Characteristics Using Remote Sensing and GIS[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 88: 125-134.

# Advance of Remote Sensing Application to Tidal Flat Resource Monitoring in Coastal Zone

Chen Yong

(*Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China*)

**Abstract:** Along with the increasing development of urbanization, tidal flat is now serving as the most important resources of land reserves for coastal cities. As a sensitive belt of sea and land interaction, silt tidal flat is characterized as muddy surfaces, densely covered and frequently varied tidal creeks. Therefore, the traditional field observation has been restricted by the difficulty of access, however, the development of remote sensing techniques make it possible for the coastal investigator to monitor the dynamic changes of coastal zone at low cost and in an efficient way. This paper reviewed the current state of the use of remote sensing in estuaries and coastal tidal flat. Recent advances of four main application aspects including shore-line extraction, retrieval and analysis of elevation at mudflat, bathymetry and surface suspended sediment concentration retrieval are introduced. To date, the most common remote sensed techniques used in coastal zone can be classified into four categories: photogrammetry, satellite optical remote sensing, SAR as well as LiDAR. Through systematical analyzing the mechanism, technical characteristics and advantages and short-ages of the four categories techniques, the author finds that despite these considerable advances have been made, lack of suitable remote sensing data and not-perfect data processing methods are the remaining challenges to impede the improvement of survey accuracy in coastal zone. In order to improve this situation, it is to suggest that future studies should focus on the study of combination of different remote sensed information, hyperspectral data mining and data processing methods on SAR and Lidar data.

**Key words:** Remote sensing; Coastal zone; Tidal flat