

海岸带地理环境遥感监测综述

李清泉^{1,2}, 卢艺³, 胡水波^{1,2}, 胡忠文^{1,2}, 李洪忠^{1,2}, 刘鹏^{1,2}, 石铁柱^{1,2},
汪驰升^{1,2}, 王俊杰^{1,2}, 邬国锋^{1,2}

1. 深圳大学 海岸带地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室, 广东 深圳 518060;
2. 深圳大学 空间信息智能感知与服务深圳市重点实验室, 广东 深圳 518060;
3. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079

摘要: 海岸带作为连接海洋和陆地系统的特殊地理地带, 与人类的生存与发展密切相关, 但其自然和生态环境极其脆弱和敏感。气候变化和人类活动给海岸带环境带来了巨大压力, 导致其生态环境不断恶化。随着技术的发展, 近年来遥感技术已成为海岸带地理环境监测的重要手段之一, 在海岸带规划、管理和保护中扮演着举足轻重的角色。本文对遥感技术在海岸带地理环境监测典型应用(土地利用/覆盖、土壤质量、植被、海岸线、水色、水深和海底地形及灾害)中的主要数据源、方法、结果和局限性进行归纳和总结, 并对其未来发展提出展望。

关键词: 土地利用/覆盖, 土壤质量, 植被, 海岸线, 水色, 水深, 灾害

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A

引用格式: 李清泉, 卢艺, 胡水波, 胡忠文, 李洪忠, 刘鹏, 石铁柱, 汪驰升, 王俊杰, 邬国锋. 2016. 海岸带地理环境遥感监测综述. 遥感学报, 20(5): 1216-1229

Li Q Q, Lu Y, Hu S B, Hu Z W, Li H Z, Liu P, Shi T Z, Wang C S, Wang J J and Wu G F. 2016. Review of remotely sensed geo-environmental monitoring of coastal zones. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1216-1229 [DOI:10.11834/jrs.20166168]

1 引言

狭义地貌学上的海岸带指海洋向陆地延伸的过渡地带, 包括海岸、潮间带和海底岸坡; 广义地理学上的海岸带指以海岸线为基准向海、陆两个方向辐射扩散的广阔地带, 包括沿海平原、河口三角洲以及浅海大陆架一直延伸到陆架边缘的地带(苏奋振, 2015)。海岸带作为连接海洋和陆地系统的特殊地理地带, 与人类的生存与发展密切相关, 然而其自然和生态环境极其脆弱和敏感。在过去的几十年, 气候变化和人类活动给海岸带环境带来了巨大压力, 导致其生态环境不断恶化(陈军等, 2013)。

近年来, 随着传感器、物联网和遥感技术的发展, 以及计算机处理水平的提高, 国内外研究

特别关注海岸带地理环境监测理论、技术和方法, 以期对海岸带生态系统研究和管理、社会经济发展和规划以及可持续发展提供快速、高效和准确的信息支撑。遥感技术具有覆盖面广、空间和时间尺度多样、光谱信息丰富、观测灵活及数据获取方便等优势, 已成为海岸带地理环境监测的重要手段, 在海岸带规划、管理和保护中扮演着举足轻重的角色。本文将对遥感技术在海岸带地理环境监测中的主要应用(土地利用/覆盖、土壤质量、植被、海岸线、水色、水深和海底地形及灾害)进行归纳和总结, 并对其发展提出展望。

2 土地利用/覆盖

由于海岸带独特的地理位置及其在生态环境

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-06-03; 优先数字出版日期: 2016-07-10

基金项目: 深圳市科技创新委员会基础研究学科布局项目(编号: JCYJ20151117105543692); 深圳大学新引进高端人才财政补助科研启动经费

第一作者简介: 李清泉(1965—), 男, 教授, 研究方向为地理信息系统、智能交通以及海岸带测绘等。E-mail: liqq@szu.edu.cn

通信作者简介: 邬国锋(1969—), 男, 教授, 研究方向为遥感技术在水质、土壤质量和植被质量参数反演及海岸带等。E-mail:

guofeng.wu@szu.edu.cn

中的特殊作用，海岸带土地利用/覆盖分类一直是专家学者的研究热点(马万栋等, 2008)。遥感影像是海岸带土地利用/覆盖分类的主要数据源，世界各国根据区域特点采用了多种海岸带遥感分类体系，如美国NOAA采用的海岸带分类体系(Dobson等, 1995)、欧盟环境信息协作计划中的遥感分类体系(Bossard等, 2000)、澳大利亚(Lesslie等, 2006)和日本(Koarai等, 2012)的全国土地分类体系等。中国国家基础地理信息中心研制了全球30 m分辨率土地利用/覆盖分类体系，系统性地提供了中国乃至全世界海岸带遥感分类体系(Chen等, 2014)。在局部区域的海岸带生态系统研究中，针对不同的生态系统采取的分类体系也存在明显的差异，如不少学者针对中国江苏、广东、广西、黄河三角洲等海岸带区域分别进行了针对性的分类体系设计(邸向红等, 2014)。

海岸带土地利用/覆盖分类一般结合遥感影像、地表高程、岸线和坡度等辅助数据，以人工调绘或已有的专题图为依据获取地物样本，对影像进行监督解译，获取最终的结果(Klemas, 2010)。早期多利用中低分辨率的卫星遥感数据获取土地利用/覆盖信息，其中Landsat TM/ETM+影像是最为可靠和廉价的数据源(Klemas, 2010)，其宽广的覆盖范围、30 m空间分辨率和多波段光谱信息使其在区域性的海岸带遥感中得到广泛应用。然而，由于空间分辨率的限制，中低分辨率遥感影像难以满足精细的土地利用/覆盖变化监测等应用需求。随着对海岸带监测逐步的精细化，基于高分辨率遥感影像(如SPOT5、QuickBird、IKONOS、WorldView)的海岸带土地利用/覆盖分类等应用越来越广泛(Davranche等, 2010; McCarthy和Halls, 2014)。最近几年，无人机因其灵活方便、监测精度高等特点，在国内外海岸带监测中发挥越来越多的作用，成为当前海岸带遥感分类的重要数据源之一(Klemas, 2015)。

从方法的角度，针对中低分辨率的遥感数据，通常采用基于像素的监督分类方法获取分类结果(如最大似然法)；伴随着机器学习方法的发展，人工神经网络、支持向量机、决策树等方法也逐步在海岸带遥感分类中得到应用。伴随遥感数据空间分辨率的不断提高，面向对象的分类方法在小范围、高精度的海岸带土地利用/覆盖分类中也经常使用(陈建裕等, 2006; Heumann, 2011)。

海岸带湿地一直是海岸带土地利用/覆盖分类中的重要研究对象。遥感技术可以获取大范围、长时间的湿地分布信息，有助于分析其变化趋势及影响因素等。如张晓祥等人(2014)对江苏省的滨海湿地分布及变化进行监测，王小钦等人(2014)对福州海岸带湿地1986年—2009年间的地表覆盖分类变化进行了分析。大量工作基于遥感技术研究人类活动对海岸带的影响，如滨海水产养殖区域、人类工程建设等对滨海湿地和生态环境的影响(马田田等, 2015; 温礼等, 2016)；还有的通过土地利用/覆盖分类信息的挖掘，研究海岸带景观格局(宗玮, 2012)、湿地生态价值(邢伟等, 2011)以及湿地的变化驱动力(卢晓宁等, 2016)等。

当前的海岸带土地利用/覆盖分类研究取得了丰硕的成果，同时也面临着一些问题：(1)由于海岸带多云多雨以及卫星回归周期的限制，利用卫星遥感手段对海岸带土地利用/覆盖信息连续变化信息提取能力不足；(2)利用无人机遥感可以一定程度上克服这一不足，但由于无人机低空平台的限制，难以应用于大范围的海岸带土地利用/覆盖信息提取；同时适用于无人机搭载的小型化多光谱/高光谱传感器尚未普及，其进行高精度定量信息提取的能力仍显不足；(3)目前研究仍偏重于土地利用/覆盖信息的提取，对于其内部深层次的变化驱动因子、海岸带生态环境质量、生态价值等方面的研究仍然较为薄弱，有待进一步的研究。

3 土壤质量

滩涂土壤是海岸带湿地的重要组成部分，因其发育不明显以及理化性状差，易受到盐渍化和重金属污染的破坏(王晓辉等, 2007; 张祖陆和王琳, 2007)。实时精准地获取海岸带滩涂土壤属性信息，监测滩涂土壤盐渍化和重金属污染的空间分布状况，对于海岸带生态环境的保护意义重大。

基于偏最小二乘回归、逐步多元线性回归、支持向量机回归以及人工神经网络等建模方法，研究者主要利用土壤高光谱数据对海岸带滩涂土壤盐度(Farifteh等, 2007; Weng等, 2008; Akramkhanov和Vlek, 2012; 李薇等, 2014)和重金属含量(Shi等, 2014a)进行定量估测或空间制图。海岸带湿地植物的分布和生长均会受到滩涂土壤盐度和重金属污染的胁迫影响(Zinnert等,

2012; Shi 等, 2014b), 因此海岸带植被光谱信息能够间接指示土壤盐度和重金属污染状况及其空间分布。植被高光谱一方面可以解决利用影像数据反演土壤属性信息时所面临的植被覆盖问题, 另一方面也可以避免土壤水分、表面粗糙度以及有机质等因素对利用土壤光谱反演土壤盐度和重金属含量的影响(Zhang 等, 2011)。研究表明, 多种植被指数, 如归一化植被指数NDVI(Anne 等, 2014)、光化学植被指数PRI(Naumann 等, 2008; Zinnert 等, 2012)、红边位置REP(Shi 等, 2016)、土壤调整盐度指数SASI(Zhang 等, 2011)可以较为理想地指示土壤盐度和重金属等属性含量。

目前, 研究者主要利用地面实测的高光谱数据监测海岸带滩涂土壤盐度和重金属等属性信息, 基于星载或机载高光谱影像的研究仍处于起步阶段(Naumann 等, 2008; Anne 等, 2014), 主要制约在于缺乏可用且廉价的覆盖海岸带地区的高光谱影像数据。随着无人机高光谱遥感技术的发展, 基于高光谱影像的海岸带土壤质量研究及应用将迎来更大的发展机遇。

4 植 被

植被是海岸带自然资源的重要组成部分, 主要包括盐土植被(陆生、沼生及水生)与沙生植被, 直接影响海岸带湿地生态服务功能与价值。海岸带植被资源的遥感监测有助于海岸带生态系统的合理开发与利用, 并为入侵植物的控制与治理提供有效的信息支持。

目前, 学者主要利用中等空间分辨率的单时相、多时相或融合的多光谱影像(如Landsat TM和SPOT)研究海岸带植被覆盖度(贺肖芳 等, 2016)、分类制图(管玉娟和张利权, 2008)、生物量(吴涛 等, 2011)、碳储量(许振 等, 2014)、净初级生产力(宗玮 等, 2011)等, 为海岸带植被群落结构、滨海湿地景观格局变化、碳循环及海岸带生态系统健康评价的研究提供可靠依据。然而, 多光谱影像波段数较少, 难以精确反映地表植被信息; 且大多数影像空间分辨率不高, 严重影响小区域的植被分类精度。基于不同空间分辨率和光谱分辨率的AVIRIS影像对滨海湿地植物进行分类研究表明光谱分辨率越高分类精度越高(Underwood 等, 2007)。LiDAR与高光谱影像(AISA)的结合可进一

步提高海岸带植被分类精度(Jones 等, 2010), 为用户及研究者提供新的数据手段。对于面积较小的滨海区域, 高空间分辨率遥感卫星影像(如IKONOS)在植被分类与制图上具有精度高的显著优势(Gil 等, 2011)。方法层面上, 植被指数、马氏距离法、最大似然法、支持向量机、神经网络等是海岸带植被分类与定量遥感的常用方法。

红树林是海岸带重要的植被资源, 具有促淤造陆、防浪护堤以及维持生物多样性和全球碳平衡等功能。红树林识别及其时序变化是红树林宏观、区域尺度动态监测的一个重要领域。由于动态监测主要体现在地区、国家甚至大洲的尺度上, 时间间隔多以10年为监测尺度, 因此, 所使用的遥感数据以中低分辨率Landsat系列为主(Jia 等, 2014)。高空间分辨率数据的出现及商业化应用程度的提高, 为红树林种间分类提供了基础数据, 不同学者分别应用Worldview、IKONOS、QuickBird和CASI对红树林种间分类进行了识别, 分类种数均在4种以上(Wang 等, 2016)。群落结构是红树林监测的另一重要领域, 指标包括叶面积指数(LAI)、平均冠幅、树木高度、群落结构梯度等。国内外学者在此方面开展了广泛的研究, 结果表明借助光学植被指数可有效地对红树林LAI和平均冠幅进行监测(Held 等, 2003)。SAR数据依据其穿透性可对红树林林木高度、平均冠幅、健康状况、退化状况等进行有效监测, 能获得较准确的植被立体信息(Darmawan 等, 2015)。激光雷达(LiDAR)被学者们公认为监测森林结构信息最为有效的方法, 在红树林群落结构检测上具有巨大的潜力(Wannasiri 等, 2013), 然而由于数据源的限制, 目前激光雷达在红树林监测中应用的研究成果非常有限, 仍主要集中于分布(Chadwick, 2011)及灾后评估(Zhang 等, 2008)。

入侵植物严重威胁海岸带生态系统多样性及健康状况。互花米草(*Spartina alterniflora*)是中国海岸带最重要的入侵植物之一(章莹和卢剑波, 2010), 遍布中国各个沿海省份, 其扩张是导致滨海湿地本土植物碳储量下降的主要原因(许振 等, 2014)。遥感技术已成功用于互花米草的物种群落识别(高占国和张利权, 2006)、种群动态监测(黄华梅和张利权, 2007)、扩张机制分析(刘会玉 等, 2015)以及色素含量定量反演(艾金泉 等, 2015), 为互花米草的控制与治理提供可靠的信息基础,

其数据源主要为多时相Landsat影像、SPOT影像、机载高光谱影像(如CASI)及冠层高光谱数据等。近年来,高分辨率遥感卫星影像,如WorldView-2影像(陈利等,2014)和Pleiades-1影像(柳帅等,2014),被用来精确地提取另一种重要的滨海入侵植物薇甘菊(*Mikania micrantha*)的空间分布信息。在国外,星载高光谱影像(如Hyperion)(Pengra等,2007)、高空间分辨率影像(如QuickBird)(Laba等,2008)以及合成孔径雷达影像(如ALOS PALSAR)(Bourgeau-Chavez等,2013)被用来识别入侵植物(如芦苇, *Phragmites australis*)的空间分布并制图。

尽管遥感技术能快速获取海岸带植被或入侵植物动态分布信息,“同质异谱”与“同谱异质”的现象仍然突出,易造成植被种类的错分。中国南方海岸带地区多云多雨,往往难以实时获取高质量的影像,因此传统的星载影像较难获取海岸带植被或入侵植物在不同月份的动态变化,信息监测具有一定滞后性。大部分研究利用遥感技术探讨海岸带植被及入侵植物的生态学或生物物理参数,生物化学参数较少涉及,因此较难在大尺度上理解海岸带植被在碳氮循环中发挥的重要作用,有待深入研究。无人机作为一种新型的遥感平台,以其灵活、便捷、快速、高精度的特点,已经在红树林监测中展现出巨大潜力,然而现有的无人机红树林遥感监测的资料十分有限,且主要集中于高分辨率航空影像的应用(冯家莉等,2015)。

5 海岸线

海岸线为陆地与海洋之间的交界线,随潮水涨落而发生位置变动(Dolan等,1980)。海岸线可以大致划归为人工岸线与自然岸线两个一级类,进而根据形态和组成物质将自然岸线划分为基岩岸线、砂质岸线、生物岸线、淤泥质岸线等二级分类(毋亭和侯西勇,2016)。近年来,遥感以其覆盖范围广、重复周期短、获取成本低等特点,在海岸线研究和监测中表现出显著优势(张明等,2008),成为海岸线研究中的重要手段。

基于遥感技术的海岸线研究所用到的数据源主要是光学影像,包括Landsat TM/ETM+、MODIS(Huete等,2002)、FPMOSA-2、SPOT、CBERS、资源三号卫星等,其中使用最普遍的是

Landsat系列数据。同时,LiDAR也在岸线研究中有一定程度应用(Raber等,2007),受制于其成本高的缺点(隋立春和张宝印,2006),目前仅应用于小范围的岸线研究(Klemas,2011)。海岸线的提取多采用边缘提取算子如Canny算子(Chen和Chang,2009)和Sobel算子(王李娟等,2010),或利用归一化水体指数(NDWI)、修复归一化水体指数法(MNDWI)进行水陆分离后,利用轮廓边界跟踪技术进行岸线提取(McFeeters,1996)。在此基础上,结合影像上各类型岸线的地理及光学特征,建立岸线解译准则并对岸线类型进行人工目视解译,确定其类型。基于遥感影像的海岸线分类在一定程度上受到影像空间分辨率制约,误差较大,在分类精度上仍有很大提升空间。高空间分辨率遥感影像的应用将有助于改善海岸线的提取精度。

6 水色

近年来受沿海地区经济高速发展及全球气候变化的影响,沿岸水体正面临着越来越大的压力,主要表现为水质下降、赤潮频繁发生等。海岸带水色遥感通过获取海面上行的离水辐亮度,经大气校正和水色信息反演,得到水体中浮游植物色素浓度、悬浮颗粒浓度等要素信息,进而实现对河口、近岸水体水质的大范围动态监测,为近海初级生产力、海洋通量、渔业资源监测等方面提供一种有效工具(Pan等,2000;潘德炉和白雁,2008)。

大多数水色传感器的设计与使用主要针对全球开阔大洋,而专门用于海岸带水色遥感的卫星传感器非常少(HICO已于2014年9月停止运行)(Lucke等,2011;Mouw等,2015)。对于海岸带水体来说,受人类活动、潮汐、近海环流等影响,水体组分复杂且空间分布多变,因此对卫星传感器的光谱分辨率、时间分辨率及空间分辨率有着比大洋水体更高的要求(Lucke等,2011;Lee等,2012;Odermatt等,2012)。目前海岸带的水色遥感主要采用全球性太阳同步水色卫星产品如MODIS中等分辨率数据(250 m和500 m)、MERIS全分辨率数据(300 m)等,地球同步水色卫星如GOCI也可为近海水体动态监测提供高时间分辨率的遥感产品;然而已有水色卫星有限的空间分辨率阻碍了从遥感角度研究近岸及河口区域小尺度

物理过程的生态效应(Lee等, 2012)。未来将会有一系列适用于海岸带的地球同步水色卫星及高空间、高光谱分辨率的太阳同步水色卫星发射计划, 以期满足人们对研究和应用过程中的需求(McClain和Meister, 2012); 除此之外, 一些高分辨率非水色卫星如Sentinel-2和Landsat 8也可应用于近岸浑浊水体透明度、叶绿素浓度等水色要素的反演与监测(Pahlevan和Schott, 2013)。

近海区域大气校正是海岸带水色遥感的关键技术之一, 由于近海水体悬浮物浓度高, 且受吸收性沙尘气溶胶影响较大, 标准的大洋一类水体大气校正算法应用于该海区会出现“过校”现象(Pan和Mao, 2001; 潘德炉和白雁, 2008); 针对这一难题许多学者对算法进行了改进, 使其适用于近海浑浊水体, 但目前大气校正过程仍是近岸水色遥感重要的误差来源(Bailey等, 2010; Aurin和Dierssen, 2012; Kiselev等, 2015)。在水色反演算法研究方面, 应用对象已从最初关注的近岸叶绿素浓度扩展至多种水色参数(如透明度、悬浮泥沙浓度、黄色物质浓度等)和一些综合污染指标如营养状态指数等, 其类型可主要分为经验算法和半分析算法两种(Lee等, 2002; Bailey等, 2010; Matthews, 2011); 由于近岸水体物质组成多样、来源复杂, 水体生物—光学特性的差异较大, 水色反演算法的区域性特征明显, 未来需要在大量现场数据同步采集基础上不断优化现有算法, 以提高水色遥感的反演精度与应用范围(Odermatt等, 2012; Mouw等, 2015)。

7 水深和水下地形

近岸水深和水下地形是海岸带环境的重要要素, 其测量数据在航运安全保障、海洋科学研究、近岸风暴潮模拟、沿岸设施建设、海洋生态系统监测、海岸带管理、岸线侵蚀坍塌检测等方面有着重要应用。

最早的水深测深主要是通过船载铅垂线进行测量。这种作业方式效率低, 测点分布稀疏, 受海流影响很大。进入20世纪20年代, 出现了基于声呐技术的回声测深仪, 标志着海洋测绘进入了一个新的时代。但是它具有水深测量点间距太大, 反应地形信息很粗糙, 测深分辨率和精度较

低等显著缺点(李家彪, 1999; 赵建虎和刘经南, 2008)。为满足进一步海洋考察的需要, 20世纪70年代在回声测深仪基础上发展了多波束测深系统。该系统通过发射、接收波束相交在海底与船行方向垂直的条带区域形成数以百计的波束脚印, 根据波束到达时间和几何特征计算海底深度值, 从而获取船底一个条带覆盖区域多点的深度, 极大的提高了海洋测绘的作业效率。如今多波束测深设备经过近40年的发展, 其性能日益完善, 已经达到了较高的水平, 并逐步朝着宽覆盖、窄波束角、多功能一体化、小型化等方向发展(李海森等, 2013)。

基于船载的声呐测深系统虽然是当前近岸测深的主要手段, 但是其存在费时、人力成本高等缺点, 而且无法测量测深船只无法航行的区域。为弥补现场测量的缺陷, 基于遥感手段的近岸水深和水下地形测量的方法得以发展, 这些方法主要包括光学摄影测量、多光谱遥感测深、SAR浅海测深、卫星高度计测深和机载激光测深等(申家双和潘时祥, 2002; Klemas, 2013)。

光学摄影测量利用不同角度拍摄的水底立体像对, 通过摄影测量的方法提取水下地形(王有年等, 1988)。该方式只能在水色特别清澈的情况下进行, 受水体浑浊度、海水悬浮物、太阳照度、海浪大小等因素影响非常大。多光谱遥感测深是基于不同光学波段接收辐射亮度与水深之间的关系, 通过建立物理模型或者经验模型反演水深信息(Lee等, 2010)。水下地形在潮流、风的作用下会影响SAR的海表散射强度, 基于这样的物理过程可以从SAR散射强度信息中反演水深信息(范开国等, 2012)。卫星高度计测深是根据测高卫星获取的海面高程恢复海洋重力场, 再由重力异常计算海洋深度(Smith和Sandwell, 1997)。不过, 基于多光谱数据、SAR数据或卫星测高数据的水深反演都是间接测量方式, 其水深测量精度往往得不到保证。

机载激光测深是一种主动式的水深测量方法, 它通过发射可以穿透水体的蓝绿波段激光进行水深直接测量(Guenther, 2007; Wang等, 2015), 能够快速高效精确地测量近岸水深和水下地形。20世纪60年代, 美国军方为满足军队潜艇搜寻和两栖登陆的需求, 开始提出机载测深激光的概念。在20世纪60年代末, Syracuse University

Research Center开展的机载激光测深试验确定了可穿透激光在近岸水域的水深测量能力。进入20世纪70年代,包括加拿大、前苏联、瑞典、澳大利亚等国家都开展了大量关于机载测深激光的试验。到20世纪80年代,加拿大开发出世界上第1个可操作使用的机载测深激光系统(LARSEN-500)。其他国家也陆续推出了可实用的测深激光系统。随着定位、惯导、激光和计算机技术的飞速发展,激光测深系统从可实用阶段慢慢进入商业化阶段。

中国从20世纪90年代开始也进行了激光水下探测系统研发,包括中国海洋大学(Liu, 1990)、中国科学院上海光学精密机械研究所(胡善江等, 2006)等单位都进行了相关系统研制,但比较遗憾的是,这些机载激光测深系统都还处于试验阶段,尚未实现真正产业化应用。现在已经成功商业化的机载测深系统主要有SHOALS、ERRARL、CZMIL、LADS、HawkEye等系统(翟国君等, 2012)。这些系统已经被应用于一些近岸水下测绘工程中。与陆地机载激光系统相比,测深激光设备由于需要发射高能量穿透水体的激光,其体型和重量较大,对设备要求很高。目前,这些商用机载测深系统的成本较高,应用相对局限。近几年,为满足针对更浅海区域(<12 m)的低成本测深需求(Fernandez-Diaz等, 2014),Optech和RIEGL公司分别开发了Aquarius、RIEGL VQ-880-G轻型机载测深系统。深圳大学也在深圳市“创新链+产业链”未来产业专项资金资助下开始开展轻型浅水激光测深系统的研发工作。这些测深激光设备更轻便、成本更低、应用针对性更强。它们的发展也为机载测深激光更广泛的应用奠定了基础。

8 灾 害

海岸带灾害包括海岸带滑坡、海啸造成的海岸带地质灾害和海洋溢油污染造成的海岸带生态灾害等。对海岸带灾害进行全面系统的调查、监测、预警预报,对于海岸带防灾减灾和海洋经济的发展具有重要意义。

海岸带滑坡是一种破坏性极强的频发地质灾害。海岸带滑坡的遥感监测方法包括光学和微波遥感两类。光学遥感滑坡调查通过滑坡前后基础影像的地物特征点识别滑坡运动特征,提取灾害

点信息(李铁锋等, 2007; 王治华, 2007)。微波遥感滑坡监测方法有基于雷达相位信息和基于雷达幅度信息两种模式。基于雷达相位信息的合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是一种毫米级精度的大地测量工具,但传统的干涉测量的观测精度容易受到地形、大气和轨道等误差源的影响。此后,时序合成孔径雷达干涉测量(MT-InSAR)技术开始用于滑坡体长周期的运动趋势研究以及短周期的季节性活动研究(Liao等, 2012; Liu等, 2013)。MT-InSAR可通过多幅雷达影像干涉图对InSAR的误差源进行校正,从而提高滑坡监测的精度,监测成果可用于泥石流灾害预警(Sun等, 2015)、滑坡体积质量估计和滑坡动力学机制分析(Motagh等, 2013)。基于雷达幅度信息的监测模式适用于部分滑坡速度快的滑坡体存在形变量超过InSAR可检测的最大形变梯度的情况(Jiang等, 2011)。地表散射特性变化引起的时间去相干效应和垂直基线引入的空间去相干效应也会造成形变相位失真的情况。这两种情况下,无法通过相位干涉来获取滑坡的雷达视线方向形变量,可选择偏移量跟踪技术,获取SAR影像上地物对应像素点的位移量(Singleton等, 2014)。

海啸由海底地震、火山喷发、水下塌陷或滑坡触发得破坏性海浪。2004年印度洋海啸造成28万人罹难(崔秋文等, 2005),引起了全球对于海啸的监视和预测工作的重视(叶琳等, 2005)。海啸预警系统和实时监测工具包括:用于地震监测的实时强震传感器和卫星导航定位系统(BDS/GPS)网络(Chen等, 2015)、用于感应异常海浪的深海压力记录仪(BPR)网络(如美国NOAA运行的DART系统)以及海啸接近海岸时高频(HF)雷达海流速度观测(Lipa等, 2011)。海啸预警系统的正常运行可以为沿海居民在海啸发生过程中赢得宝贵的逃生时间。除实时预警系统外,遥感可用于海啸发生之前的潜在风险区域评估,用于海啸的前期预警(Theile-Willige, 2006)和高效疏散预案的制定(Wang和Li, 2008)。遥感可有效评估受灾区域房屋、建筑和工农业用地的受损程度(刘亚岚等, 2005);基于长期的遥感影像时序观测可以量化评估海啸后海岸带植被的破坏和恢复过程(Villa等, 2012)。

海洋油污污染的主要来源是船舶和石油平台,海洋溢油事故发生频率高、影响范围大、影

响程度深,因此溢油监测对于溢油污染的及时处理和海洋生态环境保护具有重要意义。遥感溢油范围监测手段包括可见光、近红外、高光谱和微波遥感监测。可见光范围的溢油监测主要数据源包括MODIS、MERIS和Landsat TM/ETM+等光学影像(Leifer等,2012),此外,Landsat 8影像还可识别海上的石油和天然气开发平台(Liu等,2016)。近红外光谱分析系统主要用于实地实时的溢油检测(毕卫红和张权,2010)。高光谱遥感根据光谱特征可区分不同类型的油污(陈蕾等,2009;Lammoglia和de SouzaFilho,2011)。微波遥感具备全天候的油污探测能力,但需要在一定的风力条件,油膜才会减少雷达波的后向散射,在SAR影像上以暗区域存在(Cheng等,2011)。另外,根据SAR影像的极化信息和散射特征,也可以实现溢油信息的提取(邹亚荣等,2011;Cai等,2016)。

遥感在海岸带灾害领域具有不可忽视的监测能力,但在突发性的海岸带灾害面前,获取任意时间地点的遥感数据暂时还无法实现。所以为了实现遥感对于海岸带灾害的快速反应,还需要进一步开发海岸带遥感监测平台,提高海岸带遥感观测技术水平。

9 展 望

海岸带地理环境监测的遥感应用经过几十年的发展已经取得了长足的进步,但仍存在很大的局限性,期待在以下几方面得到进一步发展和完善:

(1)在研究方法上,强化多学科协同。海岸带是海陆相互作用的交汇地带,具有复杂性和多变性的特点;遥感技术只能获得一定空间和时间尺度的数据,无法实现海岸带的实时和动态监测;其需要与动力学、大气学、生态学、水文学等学科协同,以实现基于多学科交叉的海岸带地理环境监测、模拟或预警,最终服务于海岸带的管理、保护和可持续发展。

(2)在监测手段上,发展各类传感器和监测平台。传感器包括物理的(监测对象为光、温度、和湿度等)、化学的(监测对象为气体分子、离子、有机分子等)和生物的(监测对象为生物化学物质),其中又有主动(SAR和LiDAR)和被动(传统光学传感器)之分;监测平台包括固定的和可移动的,机载(尤其是无人机)、船载和星载的等;多种传感器和

监测平台的发展是实现“水—岸”一体化、“地表—低空—高空”立体动态观测的基础。

(3)在数据处理上,注重多源数据融合与同化。获取的海岸带地理环境数据具有多平台(如机载和星载)、多传感器(传统光学、SAR和LiDAR)、多空间分辨率(点、米、十米、百米和千米)、多光谱分辨率(多光谱和高光谱)和多时间分辨率(小时、天和月)等特性;将这些多源数据进行融合与同化,互相补充,形成对海岸带地理环境相对较为完整的描述。

(4)在信息提取上,强调数据挖掘及智能化物理模型。基于遥感影像的传统信息提取方法,如基于最大似然法和决策树等的影像分类和基于经验模型和半经验模型反演算法等,在结果精度或信息提取机理上存在一定的局限性;发展面向多源数据的数据挖掘方法、遥感影像智能分类算法及信息反演物理模型等将有可能改善信息提取精度和稳定性,进一步满足各类应用的需求。

(5)在信息应用上,关注海岸带的综合管理和可持续发展。海岸带是一个复杂的系统,受海洋、陆地和大气的综合影响,具有高度的敏感性和强烈的脆弱性;海岸带管理需要多部门、多学科、多角度的信息和智慧;海岸带地理环境遥感监测为一些重要信息的获得提供了高效的技术、方法和手段,为海岸带综合研究、保护和管理决策提供信息支持,以维持其功能的可持续。

参考文献(References)

- Ai J Q, Chen W H, Chen L J, Zhang Y H, Zhou Y J, Guo X C and Zhu W D. 2015. Hyperspectral remote sensing estimation models for foliar photosynthetic pigment contents at canopy level in an invasive species, *Spartina alterniflora*. *Acta Ecologica Sinica*, 35(4): 1175–1186 (艾金泉, 陈文惠, 陈丽娟, 张永贺, 周毅军, 郭啸川, 褚武道. 2015. 冠层水平互花米草叶片光合色素含量的高光谱遥感估算模型. *生态学报*, 35(4): 1175–1186) [DOI: 10.5846/stxb201304270834]
- Akramkhanov A and Vlek P L G. 2012. The assessment of spatial distribution of soil salinity risk using neural network. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4): 2475–2485 [DOI: 10.1007/s10661-011-2132-5]
- Anne N J P, Abd-Elrahman A H, Lewis D B and Hewitt N A. 2014. Modeling soil parameters using hyperspectral image reflectance in subtropical coastal wetlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33: 47–56 [DOI: 10.1016/

- j.jag.2014.04.007]
- Aurin D A and Dierssen H M. 2012. Advantages and limitations of ocean color remote sensing in CDOM-dominated, mineral-rich coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 125: 181–197 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.07.001]
- Bailey S W, Franz B A and Werdell P J. 2010. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing. *Optics Express*, 18(7): 7521–7527 [DOI: 10.1364/OE.18.007521]
- Bi W H and Zhang Q. 2010. Design of oil spill detection system based on near-infrared optical sensing technology. *Instrument Technique and Sensor*, (9): 43–44, 49 (毕卫红, 张权. 2010. 基于近红外光电传感技术的溢油监测系统设计. *仪表技术与传感器*, (9): 43–44, 49) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2010.09.015]
- Bossard M, Feranec J and Otahel J. 2000. CORINE Land Cover Technical Guide-Addendum 2000. Technical Report No.40, Denmark: European Environmental Agency
- Bourgeau-Chavez L L, Kowalski K P, Mazur M L C, Scarbrough K A, Powell R B, Brooks C N, Huberty B, Jenkins L K, Banda E C, Galbraith D M, Laubach Z M and Riordan K. 2013. Mapping invasive *Phragmites australis* in the coastal Great Lakes with ALOS PALSAR satellite imagery for decision support. *Journal of Great Lakes Research*, 39(S1): 65–77 [DOI: 10.1016/j.jglr.2012.11.001]
- Cai Y, Zou Y R, Liang C and Zou B. 2016. Research on polarization of oil spill and detection. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(3): 84–89 [DOI: 10.1007/s13131-015-0817-x]
- Chadwick J. 2011. Integrated LiDAR and IKONOS multispectral imagery for mapping mangrove distribution and physical properties. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21): 6765–6781 [DOI: 10.1080/01431161.2010.512944]
- Chen J, Fu J and Sheng H. 2013. *The Principle and Application of the Coastal Environmental Remote Sensing*. Beijing: Ocean Press (陈军, 付军, 盛辉. 2013. *海岸带环境遥感原理与应用*. 北京: 海洋出版社)
- Chen J, Ban Y F and Li S N. 2014. China: open access to Earth land-cover map. *Nature*, 514(7523): 434 [DOI: 10.1038/514434c]
- Chen J Y, Pan D L and Mao Z H. 2006. Optimum segmentation of simple objects in high-resolution remote sensing imagery in coastal areas. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(11): 1195–1203 (陈建裕, 潘德炉, 毛志华. 2006. 高分辨率海岸带遥感影像中简单地物的最优分割问题. *中国科学D辑地球科学*, 36(11): 1044–1051) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2006.11.008]
- Chen K J, Zamora N, Babeyko A Y, Li X X and Ge M R. 2015. Precise positioning of BDS, BDS/GPS: implications for tsunami early warning in South China Sea. *Remote Sensing*, 7(12): 15955–15968 [DOI: 10.3390/rs71215814]
- Chen L, Deng R R and Xie J. 2009. Study on monitoring offshore platform oil spill based on AISA+airborne hyperspectral image taking the zhujiang river estuary as an example. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (1): 179–184 (陈蕾, 邓孺孺, 谢健. 2009. 基于AISA+机载高光谱的海上石油开发溢油监测研究——以珠江口海域为例. *海洋湖沼通报*, (1): 179–184) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-6482.2009.01.027]
- Chen L, Lin H and Sun H. 2014. Remote sensing of a Mikania micrantha invasion in alien species with WorldView-2 images. *Journal of Zhejiang AandF University*, 31(2): 185–189 (陈利, 林辉, 孙华. 2014. 基于WorldView-2影像的外来物种薇甘菊入侵遥感监测. *浙江农林大学学报*, 31(2): 185–189) [DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2014.02.004]
- Chen W W and Chang H K. 2009. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(1): 54–60 [DOI: 10.1016/j.ecss.2009.06.002]
- Cheng Y C, Li X F, Xu Q, Garcia-Pineda O, Andersen O B and Pichel W G. 2011. SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2): 350–363 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.10.005]
- Cui Q W, Li J Y, Dong J, Zhao Y, Wang Y and Ji S W. 2005. Review on the India ocean large earthquake and disaster caused by tsunami. *Earthquake Research in Shanxi*, (3): 42–48 (崔秋文, 李建一, 董军, 赵勇, 王禹, 纪寿文. 2005. 印度洋大地震与海啸灾害综述. *山西地震*, (3): 42–48) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6265.2005.03.014]
- Darmawan S, Takeuchi W, Vetrira Y, Wikantika K and Sari D K. 2015. Impact of topography and tidal height on ALOS PALSAR polarimetric measurements to estimate aboveground biomass of mangrove forest in Indonesia. *Journal of Sensors*, 2015: 641798 [DOI: 10.1155/2015/641798]
- Davranche A, Lefebvre G and Poulin B. 2010. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 552–562 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.009]
- Di X H, Hou X X and Wu L. 2014. Land use classification system for China's coastal zone based on remote sensing. *Resources Science*, 36(3): 463–472 (邸向红, 侯西勇, 吴莉. 2014. 中国海岸带土地利用遥感分类系统研究. *资源科学*, 36(3): 463–472)
- Dobson J E, Bright E A, Ferguson R L, Field D W, Wood L L, Haddad K D, Iredale III H, Jensen J R, Klemas V V, Orth R J and Thomsa J P. 1995. NOAA Coastal Change Analysis Program (C-CAP): Guidance for Regional Implementation. [s.l.]: US Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service
- Dolan R, Hayden B P, May P and May S. 1980. Reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4): 22–29
- Fan K G, Huang W G, Fu B, Yu X X and Gu Y Z. 2012. SAR shallow water bathymetry surveys: a case study in Taiwan Shoal. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(1): 310–316 (范开国, 黄韦良, 傅斌, 于

- 兴修, 顾颜镇. 2012. 台湾浅滩浅海水深SAR遥感探测实例研究. 地球物理学报, 55(1): 310–316 [DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.031]
- Farifteh J, Van der Meer F, Atzberger C and Carranza E J M. 2007. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: a comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). Remote Sensing of Environment, 110(1): 59–78 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.02.005]
- Feng J L, Liu K, Zhu Y H, Li Y, Liu L and Meng L. 2015. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring. Tropical Geography, 35(1): 35–42 [DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.002662]
- Fernandez-Diaz J C, Glennie C L, Carter W E, Shrestha R L, Sartori M P, Singhanian A, Legleiter C J and Overstreet B T. 2014. Early results of simultaneous terrain and shallow water bathymetry mapping using a single-wavelength airborne LiDAR sensor. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(2): 623–635 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2265255]
- Gao Z G and Zhang L Q. 2006. Identification of the spectral characteristics of saltmarsh vegetation using indirect ordination: a case study from Chongming Dongtan, Shanghai. Journal of Plant Ecology, 30(2): 252–260 [高占国, 张利权. 2006. 应用间接排序识别盐沼植被的光谱特征: 以崇明东滩为例. 植物生态学报, 30(2): 252–260] [DOI: 10.17521/cjpe.2006.0034]
- Gil A, Yu Q, Lobo A, Lourenco P, Silva L and Calado H. 2011. Assessing the effectiveness of high resolution satellite imagery for vegetation mapping in small islands protected areas. Journal of Coastal Research, 64: 1663–1667
- Guan Y J and Zhang L Q. 2008. Application of inter-tidal wetlands classified by image fusion technique. Marine Environmental Science, 27(6): 647–652 [管玉娟, 张利权. 2008. 影像融合技术在滩涂湿地植被分类中的应用. 海洋环境科学, 27(6): 647–652] [DOI: 10.3969/j.issn.1007-6336.2008.06.021]
- Guenther G C. 2007. Airborne lidar bathymetry//Maune D F, ed. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. Bethesda, MD: ASPRS:237–306
- He X F, Chen Y, Zhu M, Song X S and Wang Y H. 2016. Study on spatial and temporal vegetation coverage change of Yancheng coastal and response to its land-use dynamic change. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 36(2): 101–105 [贺肖芳, 陈燕, 朱敏, 宋新山, 王宇晖. 2016. 盐城海岸带植被覆盖度时空变化及其与土地利用变迁响应研究. 中南林业科技大学学报, 36(2): 101–105] [DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.02.019]
- Held A, Ticehurst C, Lymburner L and Williams N. 2003. High resolution mapping of tropical mangrove ecosystems using hyperspectral and radar remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 24(13): 2739–2759 [DOI: 10.1080/0143116031000066323]
- Heumann B W. 2011. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree—support vector machine approach. Remote Sensing, 3(11): 2440–2460 [DOI: 10.3390/rs3112440]
- Hu S J, He Y, Zang H G, Cui X M, Zhu X L and Chen W B. 2006. A new airborne laser bathymetry system and survey result. Chinese Journal of Lasers, 33(9): 1163–1167 [胡善江, 贺岩, 臧华国, 崔雪梅, 朱小磊, 陈卫标. 2006. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果. 中国激光, 33(9): 1163–1167] [DOI: 10.3321/j.issn.0258-7025.2006.09.003]
- Huang H M and Zhang L Q. 2007. Remote sensing analysis of range expansion of *Spartina Alterniflora* at Jiuduansha shoals in Shanghai, China. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 31(1): 75–82 [黄华梅, 张利权. 2007. 上海九段沙互花米草种群动态遥感研究. 植物生态学报, 31(1): 75–82] [DOI: 10.17521/cjpe.2007.0010]
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1/2): 195–213 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2]
- Jia M M, Wang Z M, Li L, Song K S, Ren C Y, Liu B and Mao D H. 2014. Mapping China's mangroves based on an object-oriented classification of Landsat imagery. Wetlands, 34(2): 277–283 [DOI: 10.1007/s13157-013-0449-2]
- Jiang M, Li Z W, Ding X L, Zhu J J and Feng G C. 2011. Modeling minimum and maximum detectable deformation gradients of interferometric SAR measurements. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(5): 766–777 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.05.007]
- Jones T G, Coops N C and Sharma T. 2010. Assessing the utility of airborne hyperspectral and LiDAR data for species distribution mapping in the coastal Pacific Northwest, Canada. Remote Sensing of Environment, 114(12): 2841–2852 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.002]
- Kiselev V, Bulgarelli B and Heege T. 2015. Sensor independent adjacency correction algorithm for coastal and inland water systems. Remote Sensing of Environment, 157: 85–95 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.07.025]
- Klema V. 2010. Remote sensing techniques for studying coastal ecosystems: an overview. Journal of Coastal Research, 27(1): 2–17 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00103.1]
- Klema V. 2011. Beach profiling and LIDAR bathymetry: an overview with case studies. Journal of Coastal Research, 27(6): 1019–1028 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00017.1]
- Klema V. 2013. Remote sensing of emergent and submerged wetlands: an overview. International Journal of Remote Sensing, 34(18): 6286–6320 [DOI: 10.1080/01431161.2013.800656]
- Klema V V. 2015. Coastal and environmental remote sensing from un-

- manned aerial vehicles: an overview. *Journal of Coastal Research*, 31(5): 1260–1267 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1]
- Koarai M, Okatani T, Nakano T, Nakamura T and Hasegawa M. 2012. Geographical information analysis of tsunami flooded area by the great east Japan earthquake using mobile mapping system, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B8:27–32 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-27-2012]
- Laba M, Downs R, Smith S, Welsh S, Neider C, White S, Richmond M, Philpot W and Baveye P. 2008. Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National Estuarine Research Reserve using quickbird satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 286–300 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.003]
- Lammoglia T and de Souza Filho C R. 2011. Spectroscopic characterization of oils yielded from Brazilian offshore basins: potential applications of remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2525–2535 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.038]
- Lee Z P, Carder K L and Arnone R A. 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(27): 5755–5772 [DOI: 10.1364/AO.41.005755]
- Lee Z P, Hu C M, Casey B, Shang S L, Dierssen H and Arnone R. 2010. Global shallow—water bathymetry from satellite ocean color data. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 91(46): 429–430 [DOI: 10.1029/2010EO460002]
- Lee Z P, Hu C M, Arnone R and Liu Z. 2012. Impact of sub-pixel variations on ocean color remote sensing products. *Optics Express*, 20(19): 20844–20854 [DOI: 10.1364/OE.20.020844]
- Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, Bradley E, Clark R, Dennison P, Hu Y X, Matheson S, Jones C E, Holt B, Reif M, Roberts D A, Svejksky J, Swayze G and Wozencraft J. 2012. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: application to the BP *Deepwater Horizon* oil spill. *Remote Sensing of Environment*, 124: 185–209 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.024]
- Lesslie R, Barson M and Smith J. 2006. Land use information for integrated natural resources management—a coordinated national mapping program for Australia. *Journal of Land Use Science*, 1(1): 45–62 [DOI: 10.1080/17474230600605244]
- Li H, Zhou T and Xu C. 2013. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar. *Technical Acoustics*, 32(2): 73–80 (李海森, 周天, 徐超. 2013. 多波束测深声纳技术研究新进展. *声学技术*, 32(2): 73–80) [DOI: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.001]
- Li J B. 1999. *Principles, Technology and Methods of Multi-Beam Survey*. Beijing: Ocean Press (李家彪. 1999. 多波束勘测原理技术与方法. 北京: 海洋出版社)
- Li T F, Xu Y R, Pan M, Cong W Q, Wen M S and Lian J F. 2007. Study on interpretation of rain-induced group shallow landslides based on multi-period SPOT-5 remote sensing images. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(2): 204–210 (李铁锋, 徐岳仁, 潘懋, 丛威青, 温铭生, 连建发. 2007. 基于多期 SPOT-5 影像的降雨型浅层滑坡遥感解译研究. *北京大学学报 (自然科学版)*, 43(2): 204–210) [DOI: 10.3321/j.issn:0479-8023.2007.02.009]
- Li W, Li Y Y, Tian Y, Liu Y, Liu C F, Guo X J and Mu M. 2014. Study on the PLSR salt content model of coastal shoals based on enveloping line method. *Advances in Marine Science*, 32(4): 501–507 (李薇, 李媛媛, 田彦, 刘远, 刘长发, 郭锡杰, 牟蒙. 2014. 基于包络线法的滨海滩涂 PLSR 盐分模型研究. *海洋科学进展*, 32(4): 501–507) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6647.2014.04.007]
- Liao M S, Tang J, Wang T, Balz T and Zhang L. 2012. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region. *Science China Earth Sciences*, 55(4): 590–601 [DOI: 10.1007/s11430-011-4259-1]
- Lipa B, Barrick D, Saitoh S I, Ishikawa Y, Awaji T, Largier J and Garfield N. 2011. Japan tsunami current flows observed by HF Radars on two continents. *Remote Sensing*, 3(8): 1663–1679 [DOI: 10.3390/rs3081663]
- Liu H Y, Lin Z S, Qi X Z, Liu J X and Xu X J. 2015. The dispersal mechanism of invasive plants based on a spatially explicit individual-based model and remote sensing technology: a case study of *Spartina alterniflora*. *Acta Ecologica Sinica*, 35(23): 7794–7802 (刘会玉, 林振山, 齐相贞, 刘金雪, 许晓娟. 2015. 基于个体的空间显性模型和遥感技术模拟入侵植物扩张机制. *生态学报*, 35(23): 7794–7802) [DOI: 10.5846/stxb201405090918]
- Liu P, Li Z H, Hoey T, Kincaid C, Zhang J F, Zeng Q M and Muller JP. 2013. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the three Gorges region, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 253–264 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.10.010]
- Liu S, Lin H, Sun H and Chen L. 2014. Information extraction of *Mikania micrantha* based on Pleiades-1 data. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 34(11): 116–119 (柳帅, 林辉, 孙华, 陈利. 基于 Pleiades-1 卫星数据薇甘菊信息提取. *中南林业科技大学学报*, 34(11): 116–119) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-923X.2014.11.023]
- Liu Y L, Wei C J, Wu X B, Ding L and Zhu C G. 2005. Monitoring and assessment for the tsunami disaster of Indian Ocean by remote sensing: a case study in Aceh Province of Indonesia. *Journal of Remote Sensing*, 9(4): 494–497 (刘亚岚, 魏成阶, 武晓波, 丁琳, 朱重光. 2005. 印度洋海啸灾害遥感监测与评估——以印度尼西亚亚齐省为例. *遥感学报*, 9(4): 494–497) [DOI: 10.11834/jrs.20050471]
- Liu Y X, Sun C, Yang Y H, Zhou M X, Zhan W F and Cheng W Y. 2016. Automatic extraction of offshore platforms using time-series Landsat-8 Operational Land Imager data. *Remote Sensing of Environment*, 175: 73–91 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.047]
- Liu Z S. 1990. Estimate of maximum penetration depth of lidar in

- coastal water of the China Sea//Proceedings of SPIE 1302, Ocean Optics X. Orlando, FL, United States: SPIE:655-661 [DOI:10.1117/12.21476]
- Lu X N, Zhang J Y, Hong J and Wang L L. 2016. Analysis of wetland landscape evaluation and its driving factors in Yellow River Delta based on remote sensing image. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 32(S1): 214-223 (卢晓宁, 张静怡, 洪佳, 王玲玲. 2016. 基于遥感影像的黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素分析. 农业工程学报, 32(S1): 214-223) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.030]
- Lucke R L, Corson M, McGlothlin N R, Butcher S D, Wood D L, Korwan D R, Li R R, Snyder W A, Davis C O and Chen D T. 2011. Hyperspectral imager for the coastal ocean: Instrument description and first images. Applied Optics, 50(11): 1501-1516 [DOI: 10.1364/AO.50.001501]
- Ma T T, Liang C, Li X W, Xie T and Cui B S. 2015. Quantitative assessment of impacts of reclamation activities on coastal wetlands in China. Wetland Science, 13(6): 653-659 (马田田, 梁晨, 李晓文, 谢, 崔保山. 2015. 围填海活动对中国滨海湿地影响的定量评估. 湿地科学, 13(6): 653-659) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2015.06.001]
- Ma W D, Zhang Y Z, Shi P and Xing Q G. 2008. Review of research on land use and land cover change in coastal zone. Progress in Geography, 27(5): 87-94 (马万栋, 张渊智, 施平, 邢前国. 2008. 海岸带土地利用/土地覆被变化研究进展. 地理科学进展, 27(5): 87-94) [DOI: 10.11820/dlxxjz.2008.05.012]
- Matthews M W. 2011. A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. International Journal of Remote Sensing, 32(21): 6855-6899 [DOI: 10.1080/01431161.2010.512947]
- McCarthy M J and Halls J N. 2014. Habitat mapping and change assessment of coastal environments: an examination of WorldView-2, QuickBird, and IKONOS satellite imagery and airborne LiDAR for mapping barrier island habitats. ISPRS International Journal of Geo-Information, 3(1): 297-325 [DOI: 10.3390/ijgi3010297]
- McClain C R and Meister G. 2012. Mission Requirements for Future Ocean-Colour Sensors. Canada:International Ocean-Colour Coordinating Group
- McFeeters S K. 1996. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7): 1425-1432 [DOI: 10.1080/01431169608948714]
- Motagh M, Wetzel H U, Roessner S and Kaufmann H. 2013. A TerraSAR-X InSAR study of landslides in southern Kyrgyzstan, Central Asia. Remote Sensing Letters, 4(7): 657-666 [DOI: 10.1080/2150704x.2013.782111]
- Mouw C B, Greb S, Aurin D, Digiacomo P M, Lee Z, Twardowski M, Binding C, Hu C M, Ma R H, Moore T, Moses W and Craig S E. 2015. Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: challenges and recommendations for future satellite missions. Remote Sensing of Environment, 160: 15-30.
- Naumann J C, Anderson J E and Young D R. 2008. Linking physiological responses, chlorophyll fluorescence and hyperspectral imagery to detect salinity stress using the physiological reflectance index in the coastal shrub, *Myrica cerifera*. Remote Sensing of Environment, 112(10): 3865-3875 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.004]
- Odermatt D, Gitelson A, Brando V E and Schaeppman M. 2012. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 118: 116-126 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.013]
- Pahlevan N and Schott J R. 2013. Leveraging EO-1 to evaluate capability of new generation of Landsat sensors for coastal/inland water studies. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 6(2): 360-374 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2235174]
- Pan D L, Mao T M, Li S J and Mao Z H. 2000. Study on ocean color environment of China coast by satellite remote sensing. Quaternary Sciences, 20(3): 240-246 (潘德炉, 毛天明, 李淑菁, 毛志华. 2000. 卫星遥感监测我国沿海水色环境的研究. 第四纪研究, 20(3): 240-246) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2000.03.004]
- Pan D L and Mao Z H. 2001. Atmospheric correction for China's coastal water color remote sensing. Acta Oceanologica Sinica, 20(3): 343-354
- Pan D L and Bai Y. 2008. Advances on the application of ocean color remote sensing engineering in China. Engineering Science, 10(9): 14-24 (潘德炉, 白雁. 2008. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展. 中国工程科学, 10(9): 14-24) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2008.09.002]
- Pengra B W, Johnston C A and Loveland T R. 2007. Mapping an invasive plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 Hyperion hyperspectral sensor. Remote Sensing of Environment, 108(1): 74-81 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.002]
- Raber B, Sanabria A M and Sanchez J C. 2007. Mapping Colombia's coastline: LIDAR helps preserve fragile marine ecosystems (Base Mapping). GEO World(June)
- Shen J S and Pan S X. 2002. A discussion on coastal bathymetric technique. Hydrographic Surveying and Charting, 22(6): 60-65 (申家双, 潘时祥. 2002. 沿岸水深测量技术方法的探讨. 海洋测绘, 22(6): 60-65) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2002.06.016]
- Shi T Z, Chen Y Y, Liu Y L and Wu G F. 2014a. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy—an alternative for monitoring soil contamination by heavy metals. Journal of Hazardous Materials, 265: 166-176 [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.11.059]
- Shi T Z, Liu H Z, Wang J J, Chen Y Y, Fei T and Wu G F. 2014b. Monitoring arsenic contamination in agricultural soils with reflectance spectroscopy of rice plants. Environmental Science and Technology, 48(11): 6264-6272 [DOI: 10.1021/es405361n]
- Shi T Z, Liu H Z, Chen Y Y, Wang J J and Wu G F. 2016. Estimation

- of arsenic in agricultural soils using hyperspectral vegetation indices of rice. *Journal of Hazardous Materials*, 308: 243–252 [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.01.022]
- Singleton A, Li Z, Hoey T and Muller J P. 2014. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sensing of Environment*, 147: 133–144 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.003]
- Smith W H F and Sandwell D T. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334): 1956–1962 [DOI: 10.1126/science.277.5334.1956]
- Su F Z. 2015. *Assessment of Remote Sensing of the Coastal Zone*. Beijing: Science Press (苏奋振. 2015. 海岸带遥感评估. 北京: 科学出版社)
- Sui L C and Zhang B Y. 2006. Principle and trend of airborne laser scanning remote sensing. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 23(2): 127–129 (隋立春, 张宝印. 2006. Lidar遥感基本原理及其发展. *测绘科学技术学报*, 23(2): 127–129) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2006.02.011]
- Sun Q, Zhang L, Ding X L, Hu J, Li Z W and Zhu J J. 2015. Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 156: 45–57 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.029]
- Theile-Willige B. 2006. Tsunami risk site detection in Greece based on remote sensing and GIS methods. *Science of Tsunami Hazards*, 24(1): 35–48.
- Underwood E C, Ustin S L and Ramirez C M. 2007. A comparison of spatial and spectral image resolution for mapping invasive plants in coastal California. *Environmental Management*, 39(1): 63–83 [DOI: 10.1007/s00267-005-0228-9]
- Villa P, Boschetti M, Morse J L and Polite N. 2012. A multitemporal analysis of tsunami impact on coastal vegetation using remote sensing: a case study on Koh Phra Thong Island, Thailand. *Natural Hazards*, 64(1): 667–689 [DOI: 10.1007/s11069-012-0261-y]
- Wang C S, Li Q Q, Liu Y X, Wu G F, Liu P and Ding X L. 2015. A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101: 22–35 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.005]
- Wang J F and Li L F. 2008. Improving tsunami warning systems with remote sensing and geographical information system input. *Risk Analysis*, 28(6): 1653–1668 [DOI: 10.1111/j.1539-6924.2008.01112.x]
- Wang L J, Niu Z, Zhao D G and Li Y X. 2010. The study of coastline extraction and validation using ETM remote sensing image. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(2): 235–239 (王李娟, 牛铮, 赵德刚, 李英霞. 2010. 基于ETM遥感影像的海岸线提取与验证研究. *遥感技术与应用*, 25(2): 235–239)
- Wang T, Zhang H S, Lin H and Fang C Y. 2016. Textural-spectral feature-based species classification of mangroves in Mai Po Nature Reserve from Worldview-3 imagery. *Remote Sensing*, 8(1): 24 [DOI: 10.3390/rs8010024]
- Wang X H, Zou X Q and Yu W J. 2007. Heavy metal contamination in coastal sediments of Waggang, Jiangsu Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 26(2): 784–789 (王晓辉, 邹欣庆, 于文金. 2007. 江苏王港海岸带沉积物重金属污染研究. *农业环境科学学报*, 26(2): 784–789) [DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2007.02.073]
- Wang X Q, Shi Y F, Wei L and Wu B. 2014. Wetlands classification and analysis in Fuzhou coastal zone. *Journal of Geo-Information Science*, 16(5): 833–838 (汪小钦, 石义方, 魏兰, 吴波. 2014. 福州海岸带湿地分类与变化的遥感分析. *地球信息科学学报*, 16(5): 833–838) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00833]
- Wang Y N, Han L and Wang Y. 1988. Experimental research of underwater close-range photogrammetry. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 17(3): 217–224 (王有年, 韩玲, 王云. 1988. 水下近景摄影测量试验研究. *测绘学报*, 17(3): 217–224)
- Wang Z H. 2007. Remote sensing for landslides in China and its recent progress. *Remote Sensing for Land and Resources*, (4): 7–10, 32, 123 (王治华. 2007. 中国滑坡遥感及新进展. *国土资源遥感*, (4): 7–10, 32, 123) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-070X.2007.04.002]
- Wannasiri W, Nagai M, Honda K, Santitamnont P and Miphokasap P. 2013. Extraction of mangrove biophysical parameters using airborne LiDAR. *Remote Sensing*, 5(4): 1787–1806 [DOI: 10.3390/rs5041787]
- Wen L, Wu H P, Jiang F F, Su W, Zhu D H and Zhang C. 2016. Establishment of remote sensing monitoring classification system and interpretation criteria for the reclamation area based on the high-resolution remote sensing image. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(1): 172–177 (温礼, 吴海平, 姜方方, 苏伟, 朱德海, 张超. 2016. 基于高分辨率遥感影像的围填海图斑遥感监测分类体系和解译标志的建立. *国土资源遥感*, 28(1): 172–177) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2016.01.25]
- Weng Y L, Gong P and Zhu Z L. 2008. Reflectance spectroscopy for the assessment of soil salt content in soils of the Yellow River Delta of China. *International Journal of Remote Sensing*, 29(19): 5511–5531 [DOI: 10.1080/01431160801930248]
- Wu T, Zhao D Z, Kang J C, Zhang F S and Cheng L. 2011. *Suaeda salsa* dynamic remote monitoring and biomass remote sensing inversion in Shuangtaizi River estuary. *Ecology and Environment*, 20(1): 24–29 (吴涛, 赵冬至, 康建成, 张丰收, 程璐. 2011. 辽东湾双台子河口湿地翅碱蓬(*Suaeda salsa*)生物量遥感反演研究. *生态环境学报*, 20(1): 24–29) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2011.01.005]
- Wu T and Hou X Y. 2016. Review of research on coastline changes. *Acta Ecologica Sinica*, 36(4): 1170–1182 (毋涛, 侯西勇. 2016. 海岸线变化研究综述. *生态学报*, 36(4): 1170–1182) [DOI: 10.5846/stxb201406181270]

- Xing W, Wang J X, Wang J S, Zhong C Q, Zhang W K and Mao X L. 2011. Effects of land cover change on the ecosystem services values in Yancheng coastal wetlands. *Research of Soil and Water Conservation*, 18(1): 71–76, 81 (邢伟, 王进欣, 王今殊, 仲崇庆, 张维康, 毛霞丽. 2011. 土地覆盖变化对盐城海岸带湿地生态系统服务价值的影响. *水土保持研究*, 18(1): 71–76, 81)
- Xu Z, Zuo P, Wang J J, Gao Z D and Wu Q J. 2014. Changes of vegetation carbon storage in Yancheng coastal wetlands for six periods. *Wetland Science*, 12(6): 709–713 (许振, 左平, 王俊杰, 高志东, 吴其江. 2014. 6个时期盐城滨海湿地植物碳储量变化. *湿地科学*, 12(6): 709–713) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2014.06.005]
- Ye L, Yu F J and Wu W. 2005. The disaster and warning of tsunamis in China and the suggestion in future. *Marine Forecasts*, 22(S1): 147–157 (叶琳, 于福江, 吴玮. 2005. 我国海啸灾害及预警现状与建议. *海洋预报*, 22(S1): 147–157) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-0239.2005.z1.021]
- Zhai G J, Wu T Q, Ouyang Y Z, Huang M T and Wang K P. 2012. The development of airborne laser bathymetry. *Hydrographic Surveying and Charting*, 32(2): 67–71 (翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 黄漠涛, 王克平. 机载激光测深技术研究进展. *海洋测绘*, 32(2): 67–71) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2012.02.021]
- Zhang K Q, Simard M, Ross M, Rivera-Monroy V H, Houle P, Ruiz P, Twilley R R and Whelan K. 2008. Airborne laser scanning quantification of disturbances from hurricanes and lightning strikes to mangrove forests in Everglades National Park, USA. *Sensors*, 8(4): 2262–2292 [DOI: 10.3390/s8042262]
- Zhang M, Jiang X Z, Zhang J R and Tian B. 2008. Progress of study on characteristic collection of coastline through remote sensing images. *Yellow River*, 30(6): 7–9 (张明, 蒋雪中, 张俊儒, 田波. 2008. 遥感影像海岸线特征提取研究进展. *人民黄河*, 30(6): 7–9) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2008.06.004]
- Zhang T T, Zeng S L, Gao Y, Ouyang Z T, Li B, Fang C M and Zhao B. 2011. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*, 11(6): 1552–1562 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.03.025]
- Zhang X X, Tang Y J, Yan C Q, Xu P, Zhu C X and Dai Y X. 2014. The study of Jiangsu coastal land use/cover change based on series of remote sensing images in the last 30 years. *Marine Sciences*, 38(9): 90–95 (张晓祥, 唐彦君, 严长清, 徐盼, 朱晨曦, 戴煜暄. 2014. 近30年来江苏海岸带土地利用/覆被变化研究. *海洋科学*, 38(9): 90–95) [DOI: 10.11759/hyxx20121201001]
- Zhang Y and Lu J B. 2010. Progress on monitoring of two invasive species Smooth Cordgrass (*Spartina alterniflora*) and Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) by remote sensing. *Bulletin of Science and Technology*, 26(1): 130–137 (章莹, 卢剑波. 2010. 外来入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)及凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)的遥感监测研究进展. *科技通报*, 26(1): 130–137) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7119.2010.01.024]
- Zhang Z L and Wang L. 2007. Driving mechanism of land use/cover change in southern Laizhou Bay. *Scientia Geographica Sinica*, 27(1): 40–44 (张祖陆, 王琳. 2007. 莱州湾南岸咸水入侵区土地利用/覆被变化驱动机理研究. *地理科学*, 27(1): 40–44) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2007.01.006]
- Zhao J H and Liu J N. 2008. *Multibeam Sounding Technology and Image Data Processing*. Wuhan: Wuhan University Press (赵建虎, 刘经南. 2008. 多波束测深及图像数据处理. 武汉: 武汉大学出版社)
- Zinnert J C, Nelson J D and Hoffman A M. 2012. Effects of salinity on physiological responses and the photochemical reflectance index in two co-occurring coastal shrubs. *Plant and Soil*, 354(1/2): 45–55 [DOI: 10.1007/s11104-011-0955-z]
- Zong W, Lin W P, Zhou Y X and Rui J X. 2011. Estimation of typical wetland vegetation NPP in Shanghai Chongming Dongtan based on remote sensing. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 20(11): 1355–1360 (宗玮, 林文鹏, 周云轩, 芮建勋. 2011. 基于遥感的上海崇明东滩湿地典型植被净初级生产力估算. *长江流域资源与环境*, 20(11): 1355–1360)
- Zong W. 2012. *Research on Land Use/Land Cover Change and Driving Forces Mechanism in Coastal Zone of Shanghai*. Shanghai: East China Normal University (宗玮. 2012. 上海海岸带土地利用/覆盖格局变化及驱动机制研究. 上海: 华东师范大学)
- Zou Y R, Liang C, Chen J L, Cui S X and Lang S Y. 2011. An optimal parametric analysis of monitoring oil spill based on SAR. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(1): 36–44 (邹亚荣, 梁超, 陈江麟, 崔松雪, 郎姝燕. 2011. 基于SAR的海上溢油监测最佳探测参数分析. *海洋学报*, 33(1): 36–44)

Review of remotely sensed geo-environmental monitoring of coastal zones

LI Qingquan^{1,2}, LU Yi³, HU Shuibo^{1,2}, HU Zhongwen^{1,2}, LI Hongzhong^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, SHI Tiezhu^{1,2},
WANG Chisheng^{1,2}, WANG Junjie^{1,2}, WU Guofeng^{1,2}

1. Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Coastal Zone of the National Administration of Surveying, Mapping and GeoInformation, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Spatial Smart Sensing and Services, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: A coastal zone is a special geographical zone that connects marine and terrestrial systems. It is closely related to human existence and development. However, its natural and ecological environments are extraordinarily vulnerable and sensitive. Climate changes and human activities have large impacts on coastal zones, including the deterioration of the ecological environment. With technical advancement, remote sensing has become an important method in the geo-environmental monitoring of coastal zones, as well as in the planning, management, and protection of coastal zones. This paper reviews the main data sources, methods, and limitations of the applications of remote sensing techniques (i.e., land use/cover, soil quality, vegetation, coastal line, water color, water depth, underwater topography, and disaster) in the geo-environmental monitoring of coastal zones. The prospects for future development are also discussed.

Moderate or low resolution (e.g., MODIS, Landsat TM/ETM+, and SPOT), hyperspectral resolution (e.g., ground-based ASD reflectance, Hyperion, Hymap, and CASI), and high resolution (e.g., Quickbird, WorldView, and Pleiades) remote sensing data have been widely used in the monitoring of land use/cover, soil quality, vegetation, coastal line, and water color in coastal zones. Airborne laser radar, microwave, and synthetic aperture radar (e.g., ALOS PALSAR and InSAR) data are mainly used in the monitoring of water depth, underwater topography, and disasters in coastal zones. Multi-source data fusion (e.g., LiDAR-hyperspectral and high-resolution hyperspectral) provides a new method for improving monitoring accuracy.

The classification and extraction or quantitative retrieval of land use/cover, soil quality, vegetation, coastal line, water color, water depth, underwater topography, and disasters are the main processes in the geo-environmental monitoring of coastal zones. The main methods for classification and extraction are maximum likelihood, vegetation index, support vector, artificial neural network, object-oriented, decision tree, and random forest. The main methods for retrieval are statistical regression, physical modeling, and semi-empirical modeling.

The cloudy and rainy environment in coastal zones is the biggest limitation in high-quality optical imagery and the continuous monitoring of land use/cover, soil quality, vegetation, coastal line, and water color. The retrieval of coastal soil quality with airborne and satellite-based hyperspectral images and the retrieval of the biochemical parameters of coastal vegetation have received minimal attention. The universality of water color models is mainly affected by atmospheric correction and study area. The retrieval accuracy of water depth is not guaranteed owing to the indirect measurement of water depth. Acquiring remote sensing data at random times and sites in the presence of sudden and catastrophic incidents in coastal zones remains difficult.

Finally, this study proposes the following research prospects to further develop and improve the geo-environmental monitoring of coastal zones with remote sensing techniques: strengthening the multidiscipline collaboration on research methodologies; developing multiple sensors and monitoring platforms for monitoring measures; focusing on multi-source data fusion and assimilation in data processing; emphasizing data mining, intelligence, and physical models in information extraction; and paying attention to the integrated management and sustainable development of coastal lines in information application.

Key words: land use/cover, soil quality, vegetation, coastal line, watercolor, water depth, disaster