视频影像海滩监测技术研究进展与展望

戚洪帅[1]，尹航[1,2]，蔡锋[1,2]，张弛[3]，刘根[1]，曹祝宾[3]

1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋与海岸地质研究室,厦门 361005;
2. 厦门大学 海洋与地球学院,厦门 361104;
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院,南京 210098

摘　要：海滩作为海岸带中一种独特的极具景观属性且易损海滨地貌形态，既是抵御海洋动力、守卫后滨生态环境的前沿阵地，又是沿海绿色经济发展的重要载体。长期以来，针对海滩的监测手段以人工现场测量为主，当前海滩研究面临多维度、高质量、长时序数据难于获取这一瓶颈问题。视频影像监测是可用于海岸过程观测和定量信息提取的光学遥感技术，为海滩全天候监测提供了新的、有效的解决方案。本文概述了岸基视频监测系统的发展历程，梳理了摄影几何与海滩关键信息提取算法的研究进展，分析了视频影像监测技术在海滩管理、海岸防护工程建设与评估、风暴潮过程观测、风沙运移过程观测等场景的适用性。在此基础上，展望了该技术的发展趋势及在中国的应用前景。探索以视频监测为代表的新型海岸带资源环境监测技术，有利于推动中国海岸动力地貌学精细化研究。

关键词：视频影像，海滩监测，Argus，海滩养护，裂流，风暴潮，风沙运移

中图分类号：P2

引用格式：**戚洪帅,尹航,蔡锋,张弛,刘根,曹祝宾.2024.视频影像海滩监测技术研究进展与展望.遥感学报,28(11)：2761-2779**
Qi H S, Yin H, Cai F, Zhang C, Liu G and Cao Z B. 2024. Advances and prospects of the a shore-based video monitoring technology on beach research. National Remote Sensing Bulletin, 28(11):2761-2779[DOI:10.11834/jrs.20243311]

1 引　言

海岸带地处海陆交界面，是地球表面最活跃的自然区域之一。全世界约60%的人口和2/3的大型城市聚集于海岸带区域，使之成为社会经济发展的“黄金地带”(McGranahan等，2007；Small和Nicholls，2003)。然而兼受陆、海、气三相力交互作用，海岸带的地貌系统和生态系统异常脆弱(Bevacqua等，2018；Cai等，2009，2022)。海滩是由激浪和激浪流形成的松散沉积物堆积体，是海洋与陆地相互作用的重要的缓冲带，对沿海地区国土安全和国民经济发展贡献不小，长期以来都是海岸带研究领域的热点区(Jackson和Short，2020；Cai等，2007)。在当前全球气候变化的背景下，海平面上升、风暴灾害频发、入海泥沙锐减等自然因素和过度的人类活动，使海滩系统及其生态环境日益恶化。政府间气候变化专门委员会IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）第六次评估报告指出，整个21世纪，沿海地区的海平面将持续上升，会使低洼地区发生更频繁更严重的极端事件以及沿海洪水，这将导致砂质海滩广泛遭受侵蚀(IPCC，2021)。

稳定获取实时、连续、高时空分辨率的海滩动力地貌数据，是进行海岸过程研究的核心与关键问题(刘海江和时连强，2016)。囿于现场观测的不足，人类对海滩动力地貌系统过程的认知尚属有限，亟需有效手段对其进行更全面的监测(图1)。但传统的数据采集以人工现场测量为主，人力物力成本高，存在数据时间连续性差、极端天气条件下作业困难等弊端(于吉涛和陈子燊，

收稿日期：2023-07-24；**预印本**：2023-12-13

基金项目：国家重点研发计划(编号：2022YFC3106104)；国家自然科学基金(编号：41930538，42106165)；自然资源部华东海岸带野外科学观测研究站开放基金(编号：ORSECCZ2022203)

第一作者简介：戚洪帅,研究方向为海岸动力地貌观测、海滩过程、海滩养护和海洋生态修复技术。E-mail：qihongshuai@tio.org.cn

通信作者简介：蔡锋,研究方向为海岸动力地貌、海滩养护与修复、海岸带保护与管理。E-mail：fcai800@126.com

2009)；卫星遥感、航空摄影测量、无人机等技术的引入对解决这一难题有所帮助，但受卫星重访周期、传感器性能、后勤支撑成本等因素影响，仍难实现对以海滩为代表的小尺度海岸区域进行高频、持续的监测（李清泉 等，2016；张继贤等，2021）。由此带给我们关键的科学问题，即如何实现自动、高频、长时序的海滩资源环境监测，以及如何定量化获取高精度动力地貌数据。

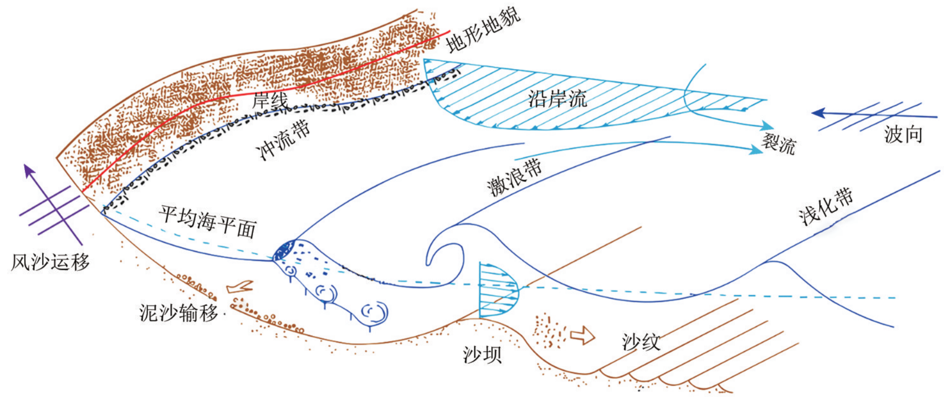


图 1 海滩动力地貌系统示意图

Fig. 1 Schematic of the beach geomorphologic & dynamic system

近年来，数字视频监测、网络存储及数字图像处理等技术发展迅猛。基于视频影像携带的丰富光学信号，挖掘海岸带要素信息，可对近岸多种动力地貌过程进行监测和量化。进一步地集成为影像采集、数据存储、传输及数据处理一体化的岸基视频监测系统（Shore-based video monitoring system），在涵盖更大时空尺度的同时，具有实时、连续、安全可靠、适用于复杂天气环境等优势（Holman 和 Stanley，2007）。依托该系统构建视频监测站已成为海岸管理新模式，在全球范围内得到广泛传播（Van Koningsveld 等，2007；Palmsten 和 Brodie，2022）。

现阶段，岸基视频监测技术硬件系统架构及数据采集、存储模式已发展得较为成熟；新进展重点聚焦两个方面：视频影像处理算法的提出和应用场景的开拓。本文在简要介绍视频监测技术发展历程的基础上，梳理了视频影像坐标转换及海滩动力地貌信息提取关键算法的研究进展，分析了该技术在海滩过程研究和管理方面的应用场景，展望了视频监测技术的发展趋势和应用前景。

2 发展历程与现状

岸基视频监测技术起源于20世纪80年代，近40年来不断精进（图 2）。起初，美国俄勒冈州立大学海岸图像实验室CIL（Coastal Imaging Laboratory）的Holman教授使用延时摄影的手段来观测破波带的次重力边缘波（Infragravity edge waves）（Holman，1981）。1992年，CIL研发了集数据采集、存储、传输、处理一体化的Argus系统，配备集成度较高的硬件系统和后处理软件（Holman 和 Stanley，2007）（图 3）。硬件系统包含现场图像采集站（4—8台高清摄像机）、数据存储和传输服务器、图像处理工作站以及专用通讯网络等；后处理软件基于 MATLAB 平台开发，包含地理坐标转换建模 autoGeom（Automatic generation of geometry solutions）、视野融合 AMT（Argus Merge Tool）、潮间带地形绘制 IBM（Intertidal Beach Mapper）等功能模块。

CIL 在除南极洲以外的 6 大洲部署了近百个 Argus 观测站，构建了颇具规模的沿海视频监测网络（Palmsten 和 Brodie，2022）。特别地，欧盟框架（European Framework）于2002年—2005年开展了 CoastView 项目，创建了一套视频影像衍生的海岸状态指标 CSIs（Coastal State Indicators）（Van Koningsveld 等，2007；Kroon 等，2007）。中国关于岸基视频监测技术的研究起步较晚但发展快：2006年以来相继部署多个近海视频测量项目，并于2015年开始引进 Argus 系统，陆续在浙江舟山朱家尖岛的东沙海滩、秦皇岛西海滩、威海文登南海新区金沙滩、上海崇明东滩等地建设（时连强等，2019；张锁平和张春田，2006）。另一方面，鉴于商业化的 Argus 系统价格昂贵，国内外很多的学术和管理机构从实际需求出发自研系统，例如欧洲（Nieto等，2010；Taborda 和 Silva，2012）、澳洲（Splinter等，2018）、亚洲（Cao 等，2020；Ramesh 等，2022）、非洲（Abessolo 等，2023）等的研究，使得岸基视频监测技术趋向经济性、灵活性。

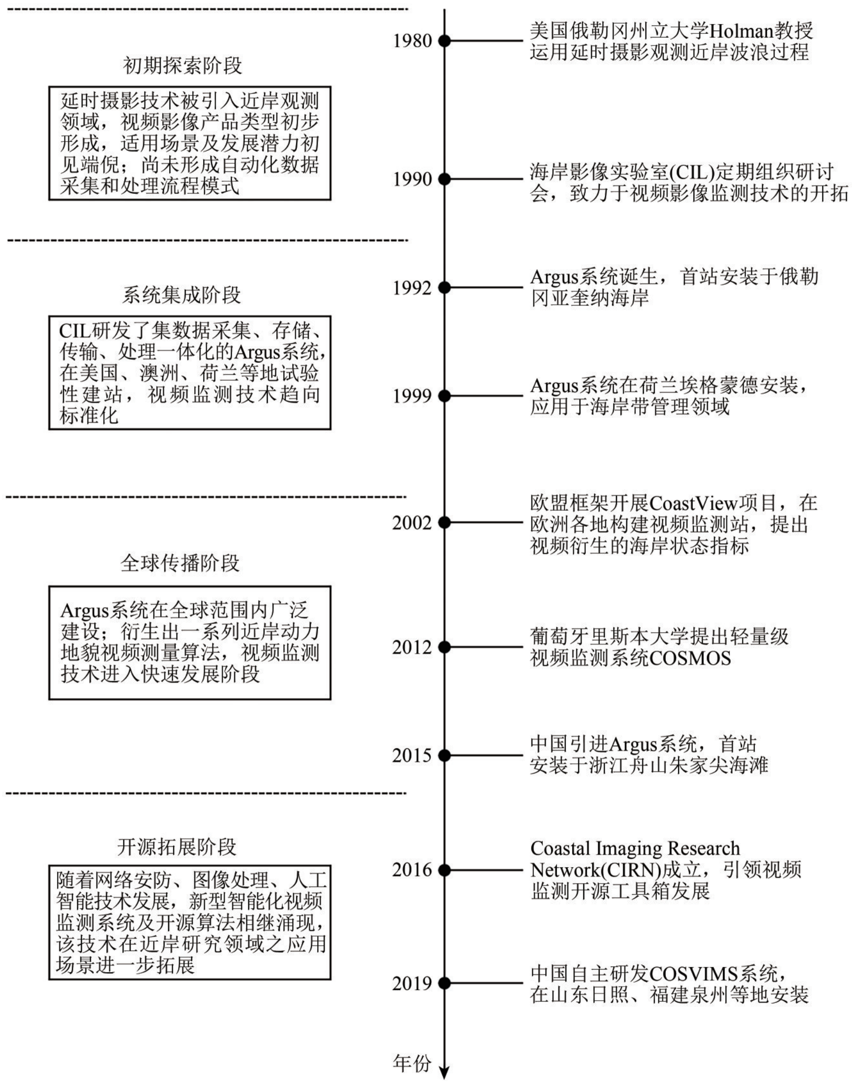


图 2　岸基视频监测技术发展历程

Fig. 2　Development history of shore-based video monitoring technology

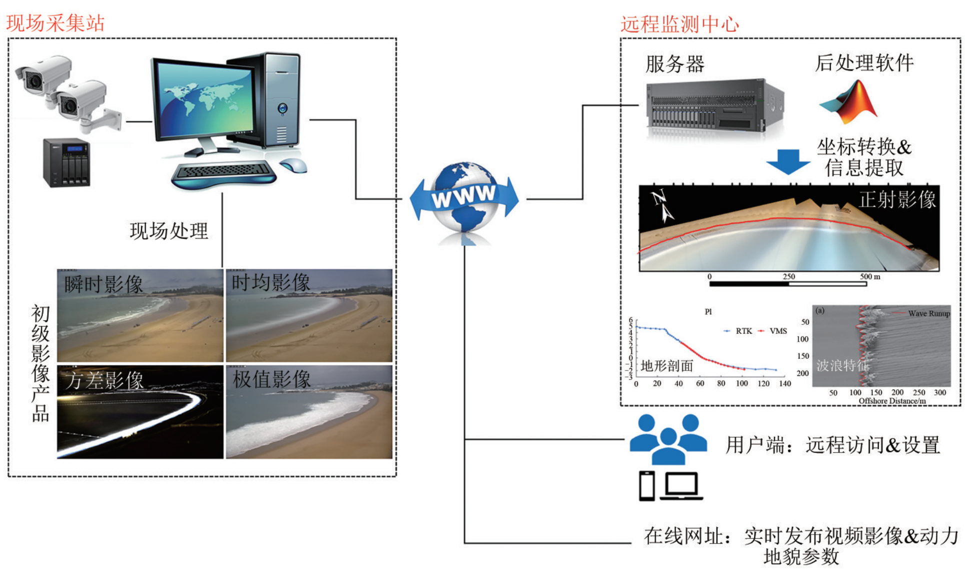


图 3　岸基视频监测系统运行模式

Fig. 3　Shore-based video monitoring system operating pattern

开发视频影像处理和信息提取算法，是视频监测技术的关键核心。2016年，脱胎于CIL的国际性研究团体CIRN（Coastal Imaging Research Network）成立，通过举办年度“boot camps”，教授测量摄影学基础和CIRN代码库的工具箱（Palmsten和Brodie，2022），以其为引领，一系列应用于海岸视频影像处理的开源工具箱相继涌现，如COSMOS（Taborda和Silva，2012）、ULISES（Simarro等，2017）、CoastalImageLib（McCann等，2022）等，极大地推进了视频监测技术的发展和在全球范围的传播。

3 视频海滩监测算法研究进展

3.1 坐标转换与参数校准

坐标转换，即将二维图像坐标系转换至三维世界坐标系的过程，是近岸信息量化的基础。对摄像机内、外参数执行的精细标定是坐标转换的关键。内参数是与摄像机光学传感器和镜头固有属性相关的参数，用于物理坐标与像素坐标之间的仿射变换，Zhang（1999）提出了兼顾便捷性与精度的单平面棋盘格内参数标定法，适用于视频监测内参数测量；外参数则是相机的实际安装参数，包括摄像机位置和姿态，需借助地面控制点GCPs（Ground truth points）进行求解。

对于给定的世界坐标系中的坐标点$\boldsymbol{x}=(x, y, z)$，与其匹配的图像坐标为（c，r），可通过“共线方程”建立二者之间的映射关系（Holland等，1997）（图4）。转换模型如下：

$$c=\frac{u(1+\boldsymbol{k}_1 d^2+\boldsymbol{k}_2 d^4)+\boldsymbol{p}_2(d^2+2u^2)+2\boldsymbol{p}_1 uv}{s_c}+o_c \quad (1)$$

$$r=\frac{v(1+\boldsymbol{k}_1 d^2+\boldsymbol{k}_2 d^4)+\boldsymbol{p}_1(d^2+2u^2)+2\boldsymbol{p}_2 uv}{s_r}+o_r \quad (2)$$

$$u=\frac{(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_c)\boldsymbol{m}_1}{(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_c)\boldsymbol{m}_3}+(k_c-o_c)s_c \quad (3)$$

$$v=\frac{(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_c)\boldsymbol{m}_2}{(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_c)\boldsymbol{m}_3}+(k_r-o_r)s_r \quad (4)$$

式中，（u，v）表示须求解的未畸变坐标，且$d^2=u^2+v^2$；$\boldsymbol{k}_1$、$\boldsymbol{k}_2$表示径向畸变（Radial distortion）系数；$\boldsymbol{p}_1$、$\boldsymbol{p}_2$表示切向畸变（Tangential distortion）系数；s_c、s_r表示像素尺寸；（o_c，o_r）为像主点（Principal point）的坐标；（k_c，k_r）为已知的像素坐标中心；$\boldsymbol{x}_c$=（x_c，y_c，z_c）为摄像机在平面世界坐标系中的位置；$\boldsymbol{M}$=（$\boldsymbol{m}_1$，$\boldsymbol{m}_2$，$\boldsymbol{m}_3$），是由欧拉角（azimuth ϕ，roll σ，tilt τ）定义的旋转矩阵：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{m}_1\\ \boldsymbol{m}_2\\ \boldsymbol{m}_3\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}\cos\phi & \sin\phi & 0\\ \sin\phi & \cos\phi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\tau & -\sin\tau\\ 0 & \sin\tau & \cos\tau\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\cos\sigma & -\sin\sigma & 0\\ -\sin\sigma & \cos\sigma & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (5)$$

完整的“共线方程”模型较为复杂。Simarro等（2020）深入探讨了一般摄像机的内、外参数特征，给出了如下合理的近似：径向畸变为抛物线（$\boldsymbol{k}_2$=0）；切向畸变可忽略不计（$\boldsymbol{p}_1=\boldsymbol{p}_2=0$）；像素点呈正方形（$s_c=s_r$）；偏心可忽略不计（$o_c=o_r$；$k_c=k_r$）。在此基础上提出了新型“简化”模型，经实验验证取得了较高的效率和精度。

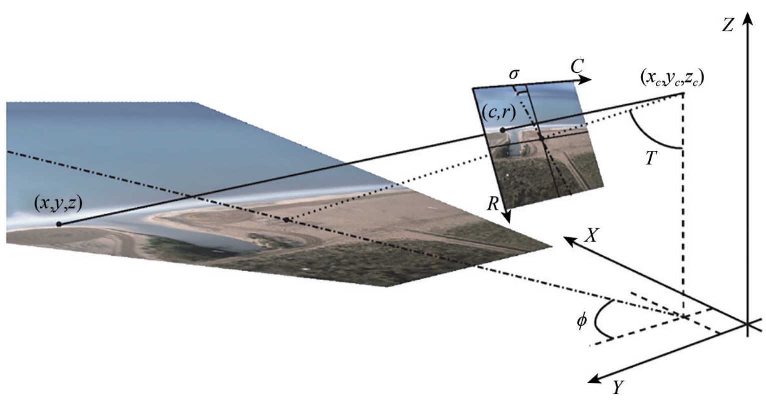


图4 视频影像坐标转换模型示意图（引自Simarro等，2020）

Fig. 4 Schematic of the video imagery coordinate transformation model (Cited from Simarro et al., 2020)

受到一系列外界因素（热效应、风效应等）的干扰，摄像机的标定参数表现出显著的日内或更长周期的变化，易引起数据提取误差（Pearre和Puleo，2009）。囿于野外标定工作繁琐，该问题往

往被忽视（Holman和Stanley，2007）。Bouvier等（2019）探索了影响标定参数的主要环境因素，提出了一个经验模型来校准摄像机的位置变动，但该模型依赖大量的人工标注，且在不同场景下的适用性不甚理想。另一种策略是识别图像中的特征点，并依此进行图像自动匹配和标定参数的后校准。Rodriguez-Padilla等（2020）利用Canny边缘检测算子识别感兴趣区ROI（Region Of Interest）中固定明显的元素，计算其相对参考点的位置偏移来校准摄像机外参数。然而，多数摄像机在其视野范围内较少，甚至不存在长期固定的标志物，使得该类方法在实际应用中颇受限制。针对上述问题，Simarro等（2021）基于少量手动校准生成的“基础”图像，通过单应性（Homography）原理实现特征匹配，提升了自动配准算法的精度和场景适应性。

总体来看，适用于视频监测系统的坐标转换模型，正朝着高精度、高效率、强稳健性、低复杂度的方向发展；随着摄影测量、计算机视觉等技术的进步，过去难以执行的参数后校准也逐渐得到关注。这将从源头上控制系统误差，保障近岸参数定量化提取的可靠性。

3.2 海岸线侦测

作为海滩地貌形态演化的重要指征，海岸线的侦测算法一直是海岸遥感领域的研究热点（冯永玖和韩震，2012）。卫星遥感受到重访周期的限制，难以实现对特定研究海滩进行连续性监测。相对而言，视频影像兼具高时空分辨率、长时序的优势，更适合于海滩岸线的数字化提取和演变分析等研究。

早期，研究者主要利用像素强度值判别出差异明显的替代岸线（Proxy shoreline），如水陆边界线。海陆交界处波浪破碎在Timex影像中表现为高亮的白色条带，Plant和Holman（1997）将其定义为SLIM（Shoreline Intensity Maximum），并依此实现水边线的数字化提取。该算法针对像素强度差异明显的反射型海滩（Reflective beach）效果良好，但不适用于地形相对平缓的耗散型海滩（Dissipative beach）（Aarninkhof等，2003）。为此，像素梯度、纹理等图像特征被引入，使海陆差异得到了进一步的表达。然而，受限于黑白影像较低的对比度和分辨率，不同情境下提取岸线的精度仍然难以保证（Aarninkhof等，1997；Davidson等，1997）。随着高分辨率全彩影像投入使用，衍生出一系列基于边缘、颜色特征的新算法。Aarninkhof等（2003）基于干湿像素在HSV（Hue-Saturation-Value）色彩空间中的鲜明对比，提出了像素强度聚类PIC（Pixel Intensity Clustering）算法，具有较高的精度和场景适应性，已集成为Argus后处理软件的IBM模块（Uunk等，2010）；Osorio等（2012）探讨了6种基于边缘或色彩对比的岸线检测算法，提出了物理与统计侦测模型PSDM（Physical and Statistical Detection Model）。值得注意的是，低潮时浸润线（Phreatic line）是影响水边线侦测精度的关键因子。为此，Vousdoukas等（2011）和Simarro等（2015）探索了方差影像在岸线侦测中的应用：相较于Timex影像，从方差影像提取的水边线可解释为波浪破碎后上冲流的平均位置，具有更为明确的物理意义。

受到多重、多变的环境因素制约，上述算法在应用于新站点时往往需辅以人工手段进行参数率定。近年来，深度学习技术快速发展，已被引入视频监测岸线识别领域，使得岸线侦测的精度和效率得到进一步的提升（Soloy等，2021）。需要特别指出，按照中国的一般制图标准，海岸线的定义是海面平均大潮高潮时的水陆分界线。基于遥感影像提取的瞬时水边线受潮位、波浪影响产生较大的位置偏移。为保障不同时期提取岸线的可比性，需考量探索海滩地貌剖面特征，构建高精度、强场景适应性的岸线校正模型（Stockdon等，2002；尹航 等，2022）。

3.3 海滩地形地貌测量

3.3.1 潮间带地形重建

潮间带地形监测是近岸测绘领域的热点和难点。人工现场实测所获数据的精度较高，但仅能在低潮前后较短的时间区间内作业，时空分辨率难以得到保证。视频监测系统具有高频、持续性监测的能力，为潮间带地形测绘提供了新的解决方案。

视频监测地形重建依赖像素点高程信息。Plant和Holman（1997）提出了如下方法论：（1）基于视频影像数据集提取一个完整潮汐周期的水边线；（2）将水边线与相应时刻的水位高程匹配，形成

潮间带等高线；（3）通过地形插值构建潮间带数字高程模型DEM（Digital Elevation Model）。在此基础上，Aarninkhof等（2003）给出了适用于视频影像水边线高程赋值的公式：

$$z_{sl} = z_o + \eta_{sl} + z_s \tag{6}$$

式中，z_{sl}表示水边线高程；z_o表示天文潮叠加风暴增水的水位高程；η_{sl}表示近岸波浪增水；z_s表示波浪爬高引起的水边线高程的振荡。

该方法显著降低了潮间带地形测绘的成本，但其精度取决于对潮汐、波浪增水、冲流等水动力过程的精细化描述。Uunk等（2010）使用了IBM模型，所得结果的平均垂直高程误差为0.34 m，该精度不足以对潮间带小幅度地形变动进行有效监测；Vousdoukas等（2011）引入人工神经网络ANN（Artificial Neural Networks）辅助水边线高程预测，将平均垂直高程误差降至0.22 m；Andriolo等（2018）则提出了耦合视频监测和LIDAR方法，可将潮间带地形重建的垂直高程误差控制在0.15 m以内。此外，Almar等（2019）指出潮周期内冲流带坡度与波浪反射之间具有较强的关联性，为视频影像潮间带地形重建提供了新的视角。

3.3.2 海滩特征地貌监测

海滩形态受控于多尺度动力过程，在不同的区域呈现出不同的特征地貌，诸如沙坝、滩角、滩肩、凹槽。这些特征地貌是海滩系统状态的重要指示，有着多样性、变异性、瞬时性等特点，传统手段难以对其进行有效识别和分类。视频监测系统具有实时连续观测能力，因而适用于海滩特征地貌研究（表1）。

表1 当前常用海滩特征地貌监测技术对比

Table 1 Comparison of commonly used observation techniques of beach characteristic landforms

监测手段	时间分辨率	空间分辨率/m	优/缺点
人工现场实测	一般低于1 d	高于0.1	数据精度最高 耗费大量人力物力，单次作业耗时较长，监测范围较小，极端天候难以作业
航空摄影测量	一般低于1 d	高于0.5	数据精度较高，监测范围较大 成本较高，对起降场地要求高，受气候条件影响大
开源卫星监测	低于5 d	低于10	成本相对最低，监测范围大 时空分辨率较低，仅能对大型沙坝等少数特征地貌进行监测
无人机监测	低于1 h	高于0.5	监测精度较高，相较于航空摄影测量受场地、天候条件影响小 空域使用申请不便，对操控人员技术要求较高
视频影像监测	高于2 Hz	高于0.5	实时连续、高时空分辨率、有光照条件下可进行全天候监测 影像拍摄角度受限，监测精度相对较低

近岸沙坝是一种重要的沉积地貌特征，普遍发育于耗散型或中间型海滩。沙坝可以影响近岸泥沙输移的方向和模式，并在一定程度上抵御中尺度甚至极端的动力事件（Román-Rivera和Ellis，2019）。在近岸破波带，波浪频繁破碎产生的白浪（White foam）在Timex影像中体现为白色的高亮条带，通过研究该信号与流体运动之间的联系，可对水下沙坝进行反演（Lippmann和Holman，1989，1990）。Lippmann和Holman（1989）基于条带像素强度与入射波能量耗散呈正比的假设，建立了经验模型用以定位水下沙坝，但由于潮汐的调制和入射波能量的变化，所得结果在垂直海岸方向偏移最高可达30—40 m；Kingston等（2000）引入人工神经网络法对模型进行校正，将垂岸方向偏移控制在10 m以内。进一步地，Guedes等（2011）将Timex影像和方差影像结合，使得沙坝的形态规模得到更优的估测，且在波浪参数难以测量的场景下亦具有良好的适用性。

滩角是发育在海滩前滨的一种韵律型的微地貌特征，通常由滩角脊（Cusp horn）和滩角湾（Cusp embayment）呈序列式分布（Coco等，2000）。滩角地貌具有尺度小、起伏大、分布集中的特点，需以亚米级分辨率对其进行高频、立体测绘。滩角脊和滩角湾在阳光斜射条件下于视频影像中表现出较强的差异性，Almar等（2008）由此提取得到滩角轮廓线，并对滩角间隔进行数字化；Vousdoukas（2012）使用为期5个月的视频影像监测滩角轮廓线的变化，探讨了多滩角海滩的侵蚀和淤积模式；Guest和Hay（2019）表征了滩角在砂砾混合的巨型潮汐海滩演化的时间尺度，并探

索了滩角的位置分布以及沉积物粒径分选性。Cai等（2023）则引入了特征嵌入的策略，结合等水位线法（Waterline method）（Mason等，1995）构建了多滩角海滩潮间带DEM，使滩角的微地貌结构得到了更为精细的表达（图5）。

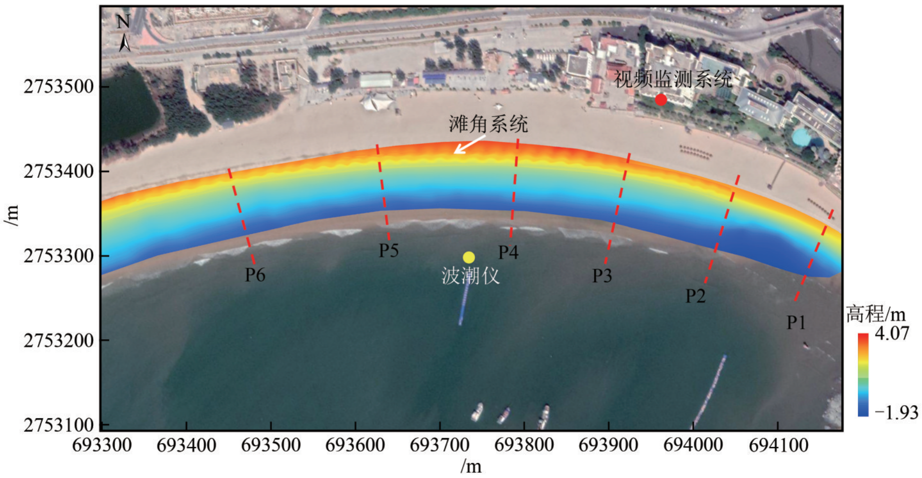


图5　特征嵌入的多滩角海滩潮间带DEM构建算法效果

Fig. 5　Result of the feature-embedded DEM reconstruction algorithm for the intertidal zone of a multi-cusps beach

得益于视频影像色彩、像素分辨率的升级，海滩地形地貌特征得到了进一步的表现。视频监测技术在近岸地貌形态测量方面的应用愈为广泛。如通过面向对象的分类算法，从图像中判别出沙坝、槽、沟渠等潮间带形态特征（Quartel等，2006）；结合数值模拟方法，对海滩形态进行客观分类（Ranasinghe等，2004）；研究多尺度动力耦合作用下的海滩形态响应特性（Masselink等，2014）等。随着深度学习、计算机视觉技术的引入，藉由视频影像的海滩特征地貌分类识别算法将迎来新的发展机遇。

3.4　近岸水动力过程观测

3.4.1　波浪参数提取

波浪是塑造海滩形态最重要的水动力过程，波浪强迫（Wave forcing）是近岸环流系统和底床泥沙运移的能量来源，相关波浪特征参数是近岸数值模拟的基础数据。传统上，针对波浪特征的测量以器测为主，包含压力式、声学式、浮标式等类型（左其华，2008）。原位测波手段普遍存在空间分辨率低、后勤成本高等弊端。海面波浪的多尺度光学特征推动了基于视频影像获取波浪参数的遥感技术发展。

视频测波基本原理是像素亮度值与海面反射的光照强度成正比，依仗调制传递函数MTF（Modulation Transfer Function）提取波浪相位速度、波高、波周期等参数（Stockdon和Holman，2000）。通常以2 Hz的频率采集特定位置的像素时间序列，得到相应的时间堆栈（Stockdon和Holman，2000；Holman和Stanley，2007）。Almar等（2014）对沿岸（Longshore）方向采集的时间堆栈进行拉东变换RT（Radon Transform）处理，实现了波向的识别，并分离了入射和反射波浪。Andriolo（2019）根据近岸不同区域波浪传播特性，提出了自动划分浅化带（Shoaling zone）、激浪带（Surf zone）和冲流带（Swash zone）的算法，拓展了视频测波的应用场景。随着深度学习技术的引入，Scardino等（2022）提出了耦合卷积神经网络CNN（Convolutional Neural Networks）和光流（Optical flow）法的LEUCOTEA新算法，具有在风暴极端事件下的观测能力。

3.4.2　冲流运动观测

冲流指入射波在近岸发生破碎后形成湍流水层，沿着滩面上涌爬高（Run up）而后回落（Run down）的运动过程，是波浪与岸滩进行强交互作用的重要瞬时过程。传统手段难以对其进行有效观测。依托视频监测的高频采样能力，可便捷地对冲流运动进行测量（Holman和Guza，1984）。Aagaard和Holm（1989）通过采集跨岸像素时间堆栈（Timestack），直观展现了冲流引起的水边线震荡过程。Timestack影像中冲流水层与背景沙滩像素亮度差异明显，可对冲流过程进行数字化提取，

用于研究波浪爬高极值的分布（Holland和Holman，1993）。Almar等（2017）发现使用拉东变换较之传统的颜色分割检测冲流运动过程具有更高的稳健性（图6）。得益于视频监测的长期数据库积累，催生出一系列波浪爬高参数化模型（Stockdon等，2006；Bujak等，2023；Atkinson等，2017），这极大地推动了海岸动力灾害风险评估和冲流运动机理研究。

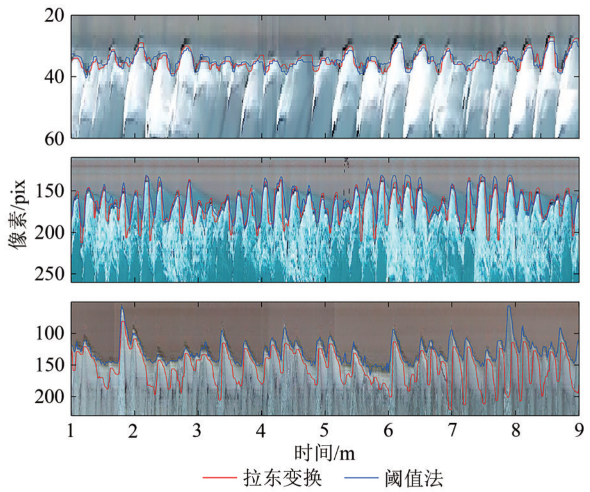


图6 基于视频影像时间堆栈的冲流运动检测效果图（引自Almar等，2017）

Fig. 6 Result of swash motion detection based on video time stack (Cited from Almar et al., 2017)

3.4.3 近岸流观测

波浪破碎后向岸的水流引起海岸壅水，形成调节海面高差的补偿运动——近岸流，包含沿岸流、离岸流等类型。针对近岸流的经典视频测量算法有两种：其一是粒子图像测速PIV（Particle Image Velocimetry）算法，即以视频影像中波浪破碎泡沫产生的图像纹理替代示踪粒子组量化流速（Holland等，2001；Perkovic等，2009）；另一种则是通过频率域分析获取频率波数谱，进而表征近岸流流速的“光学流速仪”OCM（Optical Current Meter）（Chickadel等，2003）。随着计算机视觉算法的发展，拉东变换（Almar等，2016）、深度学习（Kim和Kim，2020）等新方法被引入沿岸流识别和测速领域，具有更强的便捷性和稳健性。

离岸流又称裂流（Rip current），是一种垂直或接近垂直于海岸的流速较快的离岸水流，是影响海滩游客安全的主要灾害（MacMahan等，2006；Mucerino等，2021）。裂流具有隐蔽性、突发性的特点，难以被捕捉和观测；依仗视频影像连续采样能力，可对其进行针对性监测（Borra等，2022；de Silva等，2021）。相较于波浪破碎区域，裂流发生位置的像素亮度偏低。可采取阈值法对其进行提取（Gallop等，2009；Pitman等，2016）。然而，裂流的演变迅速且不稳定，经过Timex影像时间平均后其痕迹已不明显。此外，水深和光照条件的变化会对阈值的选取产生较大影响。光流法通过捕捉单帧影像之间的运动对裂流进行识别，但对近岸水深变化较为敏感，且受到计算量的限制，难以满足实时监测的需求（Dérian和Almar，2017）。随着深度学习技术的广泛应用，基于视频监测的自动化裂流识别算法得到快速发展（de Silva等，2021）（图7）。Rampal等（2022）引入了梯度加权类激活映射Grad-CAM（Gradient-weighted class-activation maps）算法，进一步提升了裂流识别的效率，使得高精度、实时裂流检测成为可能。

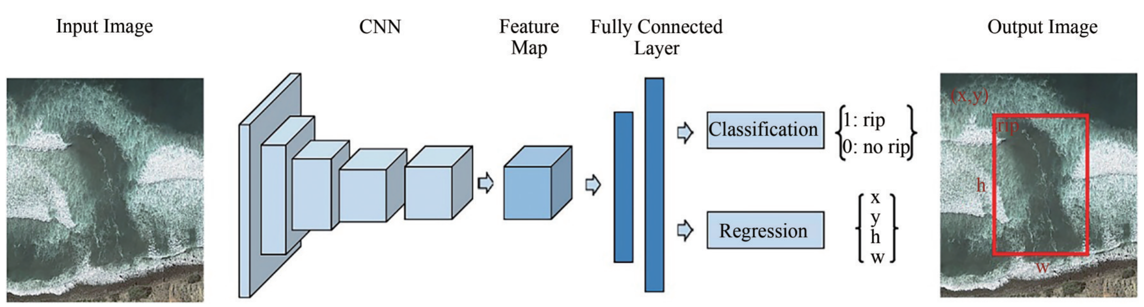


图7 基于卷积神经网络的裂流识别模式示意图（引自de Silva等，2021）

Fig. 7 Schematic of convolutional neural network-based rip currents recognition mode (Cited from de Silva et al., 2021)

3.5 近岸测深

近岸水深是近岸数值模拟的关键参量，对研究海滩动力地貌演变具有重要意义。传统测深方法包括人工水准测量，单波束、多波束声纳等，耗时费力且成本高昂。随着遥感技术的发展，光学摄影测量、高光谱和多光谱传感器、卫星高度计、机载激光雷达等被引进水深测量领域（Pacheco等，2015；Daly等，2022）。随着视频监测技术研究的不断深入，基于视频测量海表特征值反演水深成为一项极具吸引力的研究课题（表2）。

表2 当前常用近岸水深测量技术对比

Table 2 Comparison of commonly used nearshore bathymetry technologies

近岸测深手段	优势	劣势
船载声呐测量	测量精度高 可以无人船作为载体，灵活性强，适用性广泛	受限于船体航行能力 人力及后勤成本较高 受天候条件影响大，恶劣天气或大浪条件下无法作业
卫星重力反演	广域覆盖，可提供大范围水深数据 开源数据多，成本较低	时空分辨率较低，水深数据更新频率低 测量精度较低，在地形复杂的近岸区域适用性受限
机载激光雷达	空间分辨率高，适用于复杂地形 适用性强，可同时测量陆地和水下地形	成本较高，对起降场地要求高，空域使用申请受限 适用于清澈透明的水域，而近岸多为浑浊水域，使用受限
视频影像监测	时空分辨率高，受天候条件影响小，可进行连续性监测 数据获取便捷，成本较低	测量值由波浪参数反演得到，精度不稳定 在不同动力环境下的适用性需进一步验证

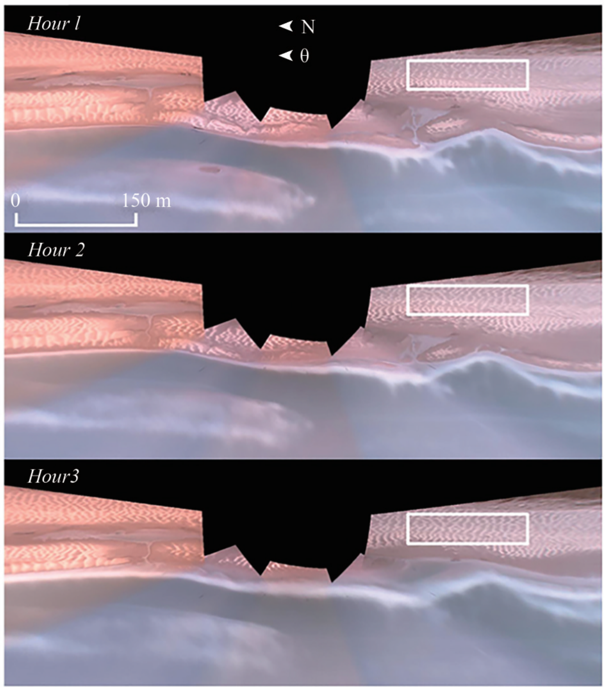
Stockdon和Holman（2000）提出使用视频影像测量波相速，进而通过线性频散关系获取近岸水深的算法；进一步研究表明，基于非线性频散关系的水深反演结果具有更高的精度（Misra等，2003；Kennedy等，2000）。考虑到自然海滩的动力环境，Aarninkhof等（2005）提出基于波能耗散模拟近岸水深的SBM（Subtidal Beach Mapper）算法。试验结果显示，波相速法在近海与海槽区域适用性强；而在破波带波浪大量破碎的环境下，SBM算法展现出更好的反演结果，二者形成优势互补。在此基础上，Wilson等（2014）将数值模拟与视频监测技术耦合形成数据同化（Data assimilation），可有效地控制水深测量的误差。近年来，面向近岸波群传播现实场景下水深测量的强烈需求，cBathy（Holman等，2013）、UBathy（Simarro等，2019；Simarro和Calvete，2022）、COCOs（Gawehn等，2021）等一系列集成式自动化算法应运而生，于实际应用中取得了良好的效果。

3.6 风沙运移过程观测

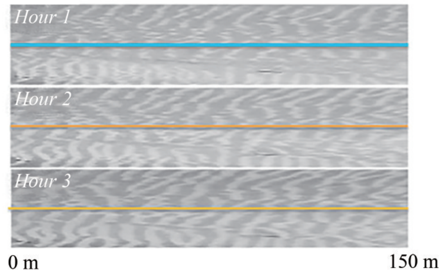
风沙运移（Aeolian transport）是砂质海滩表层沉积物搬运的重要驱动因素。接陆滨海的独特环境造就了海滩风沙不同于一般内陆风沙的独特运动特征（Aagaard等，2004，何岩雨 等，2018；张弛 等，2022）。

野外观测很难对以后滨沙丘为代表的风沙地貌特征演化周期形成有效的覆盖。高清高频的视频影像具有捕捉风沙运移细节的能力，为海滩风沙过程研究提供了新数据源。Delgado-Fernandez等（2009）设计了包含视频监测系统的遥感站，基于干燥风沙与潮湿滩面强烈的视觉对比，对加拿大Greenwhich海滩—沙丘系统的风沙搬运过程进行了识别。Hage等（2018）侦测到沙带（Sand strips）这一明显的风沙运动迹象（图8），通过连续采样时间序列法，研究了沙带的特征、形成机制及其演变对区域风场的依赖性，开发并验证了考虑风区效应的“Aeolus”风沙运移模型（Hage等，2020）。Tuijnman等（2020）的研究表明，风暴潮期间Egmond海滩后滨沙丘的风沙实际供应量约为潜在供应量的66%，究其原因，海滩地下水在风暴期间上升到远高于正常水平，在落潮时形成渗漏面，使得海滩持续饱和，进而导致实际风区长度小于临界风区长度。

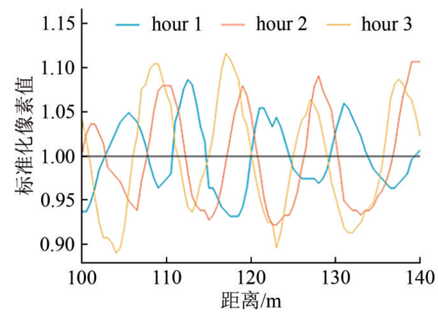
海滩风沙运动是固、液、气三相耦合的复杂系统过程，需要在不同时空尺度和事件下对其进行监测。视频监测技术的发展为海滩风沙过程观测提供了新的途径，有助于深入了解风沙活动规律，厘清风沙起动的控制因素，揭示风沙地貌特征演化机理。



(a) 连续时间序列Timex影像(白色框线内为感兴趣区)
(a) Continuous time-series Timex imagery (white boxed line shows the ROI)



(b) 感兴趣区灰度图像转换效果(彩色实线为采样条带)
(b) Result of grayscale image conversion of the region of interest (colored solid line shows the sampled strip)



(c) 采样条带像素强度时间序列,显示沙带运移过程
(c) Time series of pixel intensity of the sampled strip showing the sand strip transport process

图 8 荷兰Egmond海滩沙带侦测效果(修改自Hage等,2018)
Fig. 8 Result of sand strip detection along Egmond beach, The Netherlands (Modified from Hage et al., 2018)

4 应用场景

4.1 海滩管理

海滩作为滨海旅游业主要的载体,对其施行有效管理,对于促进沿海经济发展意义非凡(Liu等,2023)。随着视频监测在全球范围内广泛部署,众多科学家和海岸管理者将其应用于旅游管理、空间规划、海滩安全等领域,成效显著。

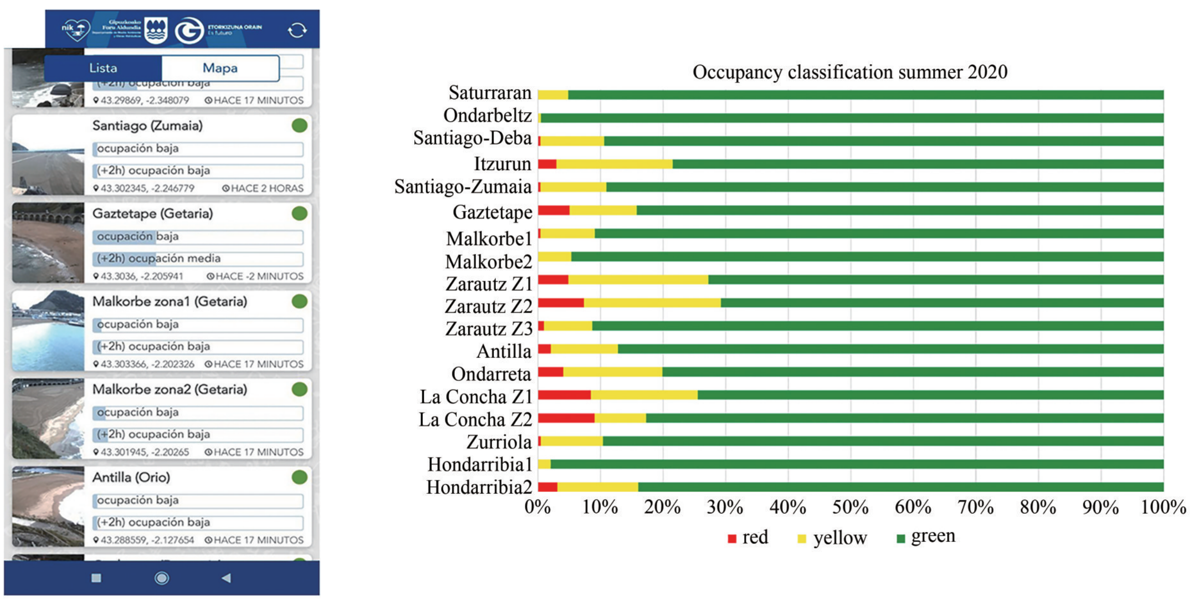
4.1.1 旅游海滩管理规划

海滩旅游管理的关键在于评估“海滩承载力”(Beach carrying capacity),即一定时空范围的海滩,在满足最低游览体验感和环保标准条件下,所能容纳的游客数量阈值(Manning和Lawson,2002)。通过现场统计、航空摄影测量等手段,可获取某一时刻或时间段内海滩游客的数量和分布情况,但所得数据时间序列一般不连续(Pereira等,2003)。视频监测系统在辅助旅游海滩进行空间和服务规划,提升“海滩承载力”方面优势明显。Jiméne等(2007)提出了视频监测衍生的海岸状态指标——BUD(Beach-User Density),用于反映海滩游客的时空分布,进而协助管理者进行相应服务的规划和调整,在西班牙14个海滩得到成功应用(Epelde等,2021)(图9)。Guillén等(2008)使用西班牙巴塞罗那市两个休闲海滩,连续4年的视频影像数据集,量化了不同时间尺度的海滩用户分布情况,并结合温度、风速等环境因素建立了拟合模型。Balouin等(2014)使用2012年法国Lido of Sète海滩视频影像数据集,分析了游客的出勤率和行为倾向,并评估了海滩管理水平对游客出勤率的影响。视频监测研究证实了海滩游客出勤率与某些属性关系密切,如特定的时间、季节和天气状况。

4.1.2 海滩安全管理

安全问题一直是海滩管理和规划的侧重点。海滩溺水事件在世界各地频繁发生,亟需建立有效的海滩安全管理体系(Koon等,2023;陆旭 等,2021)。视频监测依托实时观测能力,在提升海滩安全管理水平方面发挥出独特效用。Sembiring等(2014)结合cBathy算法和基于近岸过程的XBeach数值模型,开发了用于裂流模拟和预测的COSMOS

模式，并成功应用于荷兰北部的Egmond aan Zee海滩。Silva-Cavalcanti 等（2018）借助 Argus 系统检测裂流并量化游客的行为模式，探索了视频监测辅助部署红色预警旗（Red warning flags）的策略。在安全管理体系构建上，Jiménez 等（2007）运用视频监测识别英国南部 Teignmouth 海滩的灾害性近岸流，制作了海滩风险预警图，并在此基础上，结合上述BUD给出了一个海滩安全管理的通用参考框架（Generic Frame of Reference）。特别地，为保障海滩游客健康安全，需对以COVID-19为代表的公共健康危机制定管理措施。这对海滩游客行为模式测评及灾害预警的实时性提出了更高的要求，而将视频监测与机器学习技术结合是一种有效、有潜力的解决方案（Domingo，2021；Kane等，2021）。



(a) 视频监测的旅游海滩管理软件（画面为海滩实时视频影像）

(a) Tourism beach management software based on video monitoring (the screen is real-time video image of the beach)

(b) 根据游客时空分布显示相应的颜色符号和文本信息

(b) Display corresponding color symbols and text information according to the spatial and temporal distribution of tourists

图9　视频监测海滩管理应用示例(修改自Epelde等,2021)

Fig. 9　Application example of video monitoring beach management (Modified from Epelde et al., 2021)

综上可见，视频监测对提升海滩规划、安全性和服务水平具有重要的实践价值。在当前快速发展的计算机视觉、深度学习技术加持下，对于海滩游客时空分布的检测精度已达到较高水平；但针对游客行为倾向预测及近岸灾害预警模型的研究相对滞后，有待进一步的探索和提升。

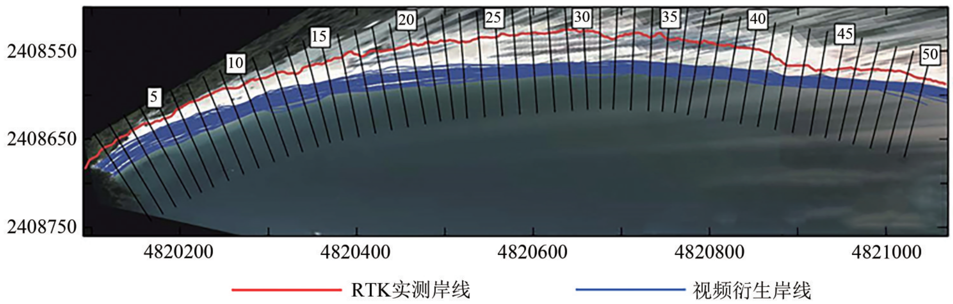
4.2　海岸防护工程建设

海岸防护工程主要用于抵御风暴潮淹没、波浪侵蚀和水流淘刷以保护岸滩和城镇，一般有硬式和软式之分。然而在提供保护作用的同时，防护工程的建设会对近岸动力地貌特征产生深刻影响，有时甚至加剧海滩的侵蚀和破坏（黎奕宏 等，2019）。视频监测能够连续记录施工前后海滩演变情况，在世界各地不同类型的海岸防护工程建设评估领域得到广泛应用。

时间序列视频影像数据集可用于解析海滩对硬式工程建设的响应，如Turner等（2004）基于Argus系统，评估了人工礁建设对澳大利亚黄金海岸（Gold Coast）动力地貌特征的影响。Rihouey等（2009）通过解析岸线变化模式，评估了防波堤建设后法国利翁湾Valras海滩的侵蚀后恢复情况。进一步地，视频监测可为防护工程建设规划提供技术支撑，如Balouin等（2016）观测了地中海Lido of Sète海滩近岸潜堤试验性建设过程中，近岸沙坝迁移及岸线旋进式扩张直至稳定的演变过程，为

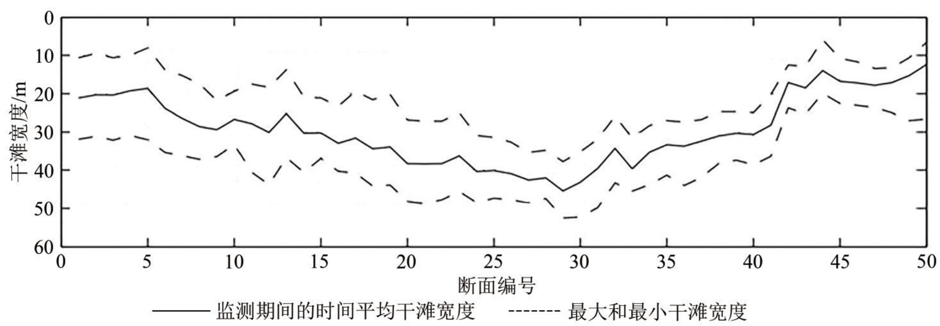
该地域海岸防护管理规划提供借鉴。需要特别指出，视频测量数据尚无法满足工程设计对水深、波浪等关键参数的高精度要求，在实际应用时一般与传统测量仪器配合使用，还需进一步优化和拓展。

海滩养护（Beach nourishment）通过将补给泥沙吹填在海滩上，达到拓宽干滩或缓解侵蚀的目的，是海岸软式防护工程的典型代表（蔡锋和刘根，2019；郑金海和张弛，2022）。视频监测在海滩养护工程领域表现出良好的适配性。如荷兰研究人员提出海岸状态指标——MICL（Momentary intertidal shorelines），用于指导海滩养护工作（Kroon等，2007；Caljouw，2000）。长时视频影像还可监测养护后海滩演变情况，解析其驱动因素，进而评估养护效果。如Harley等（2014）提取了意大利San Michele-Sassi Neri砾石养护海滩15个月的衍生海岸线，观察到明显的岸线旋转现象，并推测风暴事件是其主要驱动力（图10）；Cao等（2020）观测了日照港海滩养护前波浪漫滩、施工期间的岸线变化以及填沙后短期形态剧烈演变等不同阶段的动力地貌过程，为后续养护工程实施提供了重要参考。



（a）岸线演变监测

（a）Monitoring of shoreline evolution



（b）干滩宽度变化

（b）Dry beach width variation

图10　意大利San Michele-Sassi Neri砾石海滩养护工程视频检测（修改自Harley等，2014）

Fig. 10　Video monitoring of the San Michele-Sassi Neri grawel beach nourishment project，Italy（Modified from Harley et al.，2014）

长期以来，囿于连续观测数据的缺乏，针对海岸防护工程建设期间及建成后海滩剧烈演变的监测研究明显不足。因此，建议在施工之前部署视频监测系统以获取连续视频影像数据集，对因地制宜地选择防护构筑物类型、指导海滩养护补沙的位置和频次、评估海岸工程建设效果等大有裨益。

4.3　风暴潮灾害观测

风暴潮（Storm surge）是由于剧烈的大气扰动（台风、温带气旋等），导致海水异常升降，使受其影响的海区潮位大大超出平常的自然现象。在全球气候变化的背景下，风暴潮灾害在世界各地频繁发生，已成为控制海滩演化的主要动力因素之一（戚洪帅 等，2009）。

风暴极端环境对海滩监测仪器的安全性和可靠性提出了更高的要求。视频监测系统具有全天候观测能力，是用于记录海滩风暴潮过程的有效工具。Aagaard等（2005）通过耦合视频监测系统和原位观测阵列，较系统地研究了荷兰Egmond海滩在大型风暴期间的潮间带地貌响应和泥沙输移情况，发现潮汐的调制作用使得海滩剖面维持在

"准平衡"状态。Chi等（2021）探索了风暴期间日照港养护海滩的越浪（Wave overtopping）现象，利用视频影像衍生的Timestack数据，量化了越浪事件的持续时间、频次和水量，发现其时空变化主要受潮汐和波高的控制。Rodríguez-Padilla等（2022）则将cBathy算法应用于法国La Petite Chambre d'Amour海滩，以反演风暴期间高频变化的近岸水深，为风暴驱动的近岸形态变化研究提供了新的见解。需要特别指出，依托长时序观测能力，视频监测系统针对连续风暴的监测尤为显著：Ruiz de Alegria-Arzaburu和Masselink（2010）利用英国Slapton Sands砾石海滩连续3年的视频影像数据集，评估了27次风暴对该海滩的影响，解析了海滩对不同风暴类型形态响应模式；Vousdoukas等（2012）通过高频视频影像提取冲流带宽度、近岸沙坝形态、波浪爬高等动力地貌信息，结合实测水动力参数，分析了葡萄牙Faro海滩对24天内连续6次风暴事件的响应和后续恢复过程。

西北太平洋是全球发生热带气旋最多的区域之一，平均每年登陆中国的台风约12次之多（戚洪帅 等，2010）。海滩既是抵御风暴动力过程的最前沿，又是风暴灾害的主要承灾体，其面临的挑战尤为严峻（蔡锋 等，2008）。视频监测技术的引入，对深化中国海滩风暴效应研究颇具现实意义，且已初见成效（Guo等，2020）。期待未来有更好的发展。

5 结 语

岸基视频监测是陆基遥感技术应用于海岸带资源环境监测领域的创新性、典范性代表，为海滩科学研究、海滩监测与管理提供了技术支撑。随着中国沿海地区城市化进程加快，海岸带资源环境开发与保护的矛盾日益突出。推广岸基视频监测技术对中国的海岸带监测与保护具有较高的现实意义和实践价值。得益于人工智能、5G、大数据、云计算等新兴技术的突破，以及海岸带资源环境监测需求的不断提升，岸基视频监测技术将迎来更大的发展机遇：

（1）视频监测系统软硬件升级。在迅猛发展的网络安防、智能物联技术支持下，岸基视频监测系统的摄像机、传感器、存储及网络传输等硬件设备不断升级；随着新兴云技术的发展，将开发基于云平台的智能化后处理软件，进一步提升对海岸视频影像的解译效率和能力。

（2）视频监测算法改进和拓展。拓展高效率、高精度地理坐标转换模型，开发强适应性、强稳健性的参数校准算法；引入立体成像技术，重建海岸过程的三维结构；视频监测提供丰富的数据库，满足机器学习对大数据的需求，因此，考虑更积极地引进人工智能算法、模式识别等技术。

（3）多观测手段耦合、多模态数据融合。视频监测技术可与卫星遥感、无人机、X波段雷达等多种观测手段耦合，更全面地获取海滩动力地貌环境数据；集成原位监测、多光谱、Lidar点云等多源观测数据进行综合分析，将有助于更全面地解译海滩过程；大力发展耦合视频监测与数值模拟技术，进一步形成数据同化，发展专用于海滩过程模拟的海洋数值模式。

（4）海岸带应用场景进一步开拓。岸基视频监测技术已在海岸带多个研究领域和场景发挥作用，无法一一列举，本文仅梳理了几个典型应用场景。随着该技术在全球范围内的推广，还有望在生态环境监测、海洋动物保护、海岛动态变化监测等方面发挥新的功效；应推进海岸视频监测站建设，形成区域性海岸监测网络，服务于中国海岸带研究、开发及保护。

参考文献（References）

Aagaard T, Davidson-Arnott R, Greenwood B and Nielsen J. 2004. Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. Geomorphology, 60(1/2): 205-224 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2003.08.002]

Aagaard T and Holm J. 1989. Digitization of wave run-up using video records. Journal of Coastal Research, 5(3): 547-551

Aagaard T, Kroon A, Andersen S, Møller Sørensen R, Quartel S and Vinther N. 2005. Intertidal beach change during storm conditions; Egmond, The Netherlands. Marine Geology, 218(1/4): 65-80 [DOI: 10.1016/j.margeo.2005.04.001]

Aarninkhof S G J, Janssen P C and Plant N G. 1997. Quantitative estimations of bar dynamics from video images//Coastal Dynamics' 97. Reston: ASCE: 365-374

Aarninkhof S G J, Ruessink B G and Roelvink J A. 2005. Nearshore subtidal bathymetry from time-exposure video images. Journal of Geophysical Research: Oceans, 110(C6): C06011 [DOI: 10.1029/2004JC002791]

Aarninkhof S G J, Turner I L, Dronkers T D T, Caljouw M and Nipius L. 2003. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. Coastal Engineering, 49(4): 275-289 [DOI: 10.1016/S0378-3839(03)00064-4]

Abessolo G O, Almar R, Angnuureng D B, Bonou F, Sohou Z, Camara I, Diouf A, Alory G, Onguéné R, Mama A C, Cissé C O T, Sy B A, Sakho I, Djakouré S, Yao S, Tano A R, Bergsma E W J and Dada O A. 2023. African coastal camera network efforts at monitoring ocean, climate, and human impacts. Scientific Reports, 13(1): 1514 [DOI: 10.1038/s41598-023-28815-6]

Almar R, Blenkinsopp C, Almeida L P, Bergsma E W J, Catalan P A, Cienfuegos R and Viet N T. 2019. Intertidal beach profile estimation from reflected wave measurements. Coastal Engineering, 151: 58-63 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.05.001]

Almar R, Blenkinsopp C, Almeida L P, Cienfuegos R and Catalán P A. 2017. Wave runup video motion detection using the Radon Transform. Coastal Engineering, 130: 46-51 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.09.015]

Almar R, Coco G, Bryan K R, Huntley D A, Short A D and Senechal N. 2008. Video observations of beach cusp morphodynamics. Marine Geology, 254(3/4): 216-223 [DOI: 10.1016/j.margeo.2008.05.008]

Almar R, Larnier S, Castelle B, Scott T and Floc'h F. 2016. On the use of the Radon transform to estimate longshore currents from video imagery. Coastal Engineering, 114: 301-308 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.04.016]

Almar R, Michallet H, Cienfuegos R, Bonneton P, Tissier M and Ruessink G. 2014. On the use of the Radon Transform in studying nearshore wave dynamics. Coastal Engineering, 92: 24-30 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.06.008]

Andriolo U. 2019. Nearshore wave transformation domains from video imagery. Journal of Marine Science and Engineering, 7(6): 186 [DOI: 10.3390/jmse7060186]

Andriolo U, Almeida L P and Almar R. 2018. Coupling terrestrial LiDAR and video imagery to perform 3D intertidal beach topography. Coastal Engineering, 140: 232-239 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2018.07.009]

Atkinson A L, Power H E, Moura T, Hammond T, Callaghan D P and Baldock T E. 2017. Assessment of runup predictions by empirical models on non-truncated beaches on the south-east Australian coast. Coastal Engineering, 119: 15-31 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.10.001]

Balouin Y, Longueville F and Colombet Y. 2016. Video assessment of nearshore and beach evolution following the deployment of a submerged geotextile wave breaker. Journal of Coastal Research, 75(sp1): 617-621 [DOI: 10.2112/SI75-124.1]

Balouin Y, Rey-Valette H and Picand P A. 2014. Automatic assessment and analysis of beach attendance using video images at the Lido of Sète beach, France. Ocean and Coastal Management, 102: 114-122 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.09.006]

Bevacqua A, Yu D L and Zhang Y J. 2018. Coastal vulnerability: evolving concepts in understanding vulnerable people and places. Environmental Science and Policy, 82: 19-29 [DOI: 10.1016/j.envsci.2018.01.006]

Borra S, Nair T M B, Jospeh S, Kumar S V V A, Sridevi T, Harikumar R, Srinivas K, Yatin G, Gireesh B, Venkateswararao K, Venkateswarlu C, Anjaneyulu A and Prasad K V S R. 2022. Identifying rip channels along RK beach, Visakhapatnam using video and satellite imagery analysis. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 50(8): 1585-1602 [DOI: 10.1007/s12524-022-01539-2]

Bouvier C, Balouin Y, Castelle B and Holman R. 2019. Modelling camera viewing angle deviation to improve nearshore video monitoring. Coastal Engineering, 147: 99-106 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.02.009]

Bujak D, Ilic S, Miličević H and Carević D. 2023. Wave runup prediction and alongshore variability on a pocket gravel beach under fetch-limited wave conditions. Journal of Marine Science and Engineering, 11(3): 614 [DOI: 10.3390/jmse11030614]

Cai F, Cao C, Qi H S, Su X Z, Lei G, Liu J H, Zhao S H, Liu G and Zhu K. 2022. Rapid migration of mainland China's coastal erosion vulnerability due to anthropogenic changes. Journal of Environmental Management, 319: 115632 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115632]

Cai F, Cao H M, Su X Z and Xia D X. 2007. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China. Journal of Coastal Research, 23(1): 236-246 [DOI: 10.2112/04-0197.1]

Cai F and Liu G. 2019. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview. Journal of Applied Oceanography, 38(4): 452-463 (蔡锋, 刘根. 2019. 我国海滩养护修复的发展与技术创新. 应用海洋学学报, 38(4): 452-463) [DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2019.04.001]

Cai F, Su X Z, Liu J H, Li B and Lei G. 2008. Coastal erosion problems and preventive countermeasures in China in the context of global climate change. Advances in Natural Sciences, 18(10): 1093-1103 (蔡锋, 苏贤泽, 刘建辉, 李兵, 雷刚. 2008. 全球气候变化背景下我国海岸侵蚀问题及防范对策. 自然科学进展, 18(10): 1093-1103) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2008.10.002]

Cai F, Su X Z, Liu J H, Li B and Lei G. 2009. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. Progress in Natural Science, 19(4): 415-426 [DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.05.034]

Cai F, Yin H, Qi H S, Zheng J X, Jiang Y W, Cao Z B and He Y Y. 2023. Using video imagery to reconstruct the 3D intertidal terrain along a beach with multiple cusps. Acta Oceanologica Sinica, 42(7): 1-9 [DOI: 10.1007/s13131-023-2174-x]

Caljouw M. 2000. Video-based monitoring of the Egmond beach- and shoreface nourishments: evaluation of the 1999 nourishments with the help of the Argus video system.

Cao Z B, Zhang C, Chi S H, Zhuang L and Zheng J H. 2020. Video-based monitoring of an artificial beach nourishment project. Journal of Coastal Research, 95(sp1): 1037-1041 [DOI: 10.2112/SI95-202.1]

Chi S H, Zhang C, Sui T T, Cao Z B, Zheng J H and Fan J S. 2021. Field observation of wave overtopping at sea dike using shore-based video images. Journal of Hydrodynamics, 33(4): 657-672 [DOI: 10.1007/s42241-021-0073-1]

Chickadel C C, Holman R A and Freilich M H. 2003. An optical technique for the measurement of longshore currents. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C11): 3364 [DOI: 10.1029/2003JC001774]

Coco G, Huntley D A and O'Hare T J. 2000. Investigation of a self-organization model for beach cusp formation and development. Journal of Geophysical Research: Oceans, 105(C9): 21991-22002 [DOI: 10.1029/2000JC900095]

Daly C, Baba W, Bergsma E, Thoumyre G, Almar R and Garlan T. 2022. The new era of regional coastal bathymetry from space: a showcase for West Africa using optical Sentinel-2 imagery. Remote Sensing of Environment, 278: 113084 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113084]

Davidson M, Huntley D, Holman R and George K. 1997. The evaluation of large scale (km) intertidal beach morphology on a macrotidal beach using video images//Coastal Dynamics '97. Reston: ASCE: 385-394

de Silva A, Mori I, Dusek G, Davis J and Pang A. 2021. Automated rip current detection with region based convolutional neural networks. Coastal Engineering, 166: 103859 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2021.103859]

Delgado-Fernandez I, Davidson-Arnott R and Ollerhead J. 2009. Application of a remote sensing technique to the study of coastal dunes. Journal of Coastal Research, 255: 1160-1167 [DOI: 10.2112/09-1182.1]

Dérian P and Almar R. 2017. Wavelet-based optical flow estimation of instant surface currents from shore-based and UAV videos. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(10): 5790-5797 [DOI: 10.1109/tgrs.2017.2714202]

Domingo M C. 2021. Deep learning and internet of things for beach monitoring: an experimental study of beach attendance prediction at Castelldefels Beach. Applied Sciences, 11(22): 10735 [DOI: 10.3390/app112210735]

Epelde I, Liria P, de Santiago I, Garnier R, Uriarte A, Picón A, Galdrán A, Arteche J A, Lago A, Corera Z, Puga I, Andueza J L and Lopez G. 2021. Beach carrying capacity management under Covid-19 era on the Basque Coast by means of automated coastal videometry. Ocean and Coastal Management, 208: 105588 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105588]

Feng Y J and Han Z. 2012. Cellular automata approach to extract shoreline from remote sensing imageries and its application. Journal of Image and Graphics, 17(3): 441-446 (冯永玖, 韩震. 2012. 海岸线遥感信息提取的元胞自动机方法及其应用. 中国图象图形学报, 17(3): 441-446) [DOI: 10.11834/jig.20120320]

Gallop S L, Bryan K R and Coco G. 2009. Video observations of rip currents on an embayed beach. Journal of Coastal Research, (56): 49-53

Gawehn M, de Vries S and Aarninkhof S. 2021. A self-adaptive method for mapping coastal bathymetry on-the-fly from wave field video. Remote Sensing, 13(23): 4742 [DOI: 10.3390/rs13234742]

Guedes R M C, Calliari L J, Holland K T, Plant N G, Pereira P S and Alves F N A. 2011. Short-term sandbar variability based on video imagery: comparison between *Time-Average* and *Time-Variance* techniques. Marine Geology, 289(1/4): 122-134 [DOI: 10.1016/j.margeo.2011.09.015]

Guest T B and Hay A E. 2019. Timescales of beach cusp evolution on a steep, megatidal, mixed sand-gravel beach. Marine Geology, 416: 105984 [DOI: 10.1016/j.margeo.2019.105984]

Guillén J, García-Olivares A, Ojeda E, Osorio A and González R. 2008. Long-term quantification of beach users using video monitoring. Journal of Coastal Research, 24(6): 1612-1619 [DOI: 10.2112/07-0886.1]

Guo J L, Shi L Q, Pan S Q, Ye Q H, Cheng W F, Chang Y and Chen S L. 2020. Monitoring and evaluation of sand nourishments on an embayed beach exposed to frequent storms in eastern China. Ocean and Coastal Management, 195: 105284 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105284]

Hage P, Ruessink G, van Aartrijk Z and Donker J. 2020. Using video monitoring to test a fetch-based Aeolian sand transport model. Journal of Marine Science and Engineering, 8(2): 110 [DOI: 10.3390/jmse8020110]

Hage P M, Ruessink B G and Donker J J A. 2018b. Determining sand strip characteristics using Argus video monitoring. Aeolian Research, 33: 1-11 [DOI: 10.1016/j.aeolia.2018.03.007]

Harley M D, Andriolo U, Armaroli C and Ciavola P. 2014. Shoreline rotation and response to nourishment of a gravel embayed beach using a low-cost video monitoring technique: San Michele-Sassi Neri, Central Italy. Journal of Coastal Conservation, 18(5): 551-565 [DOI: 10.1007/s11852-013-0292-x]

He Y Y, Liu J H, Cai F, Li B L, Wang L H and Ning Q Q. 2018. Progress of research on Aeolian sediment transport influenced by tide. Journal of Desert Research, 38(3): 455-463 (何岩雨, 刘建辉, 蔡锋, 李柏良, 王立辉, 宁清钱. 2018. 潮汐作用下的风沙运动过程研究进展. 中国沙漠, 38(3): 455-463) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2017.00024]

Holland K T and Holman R A. 1993. The statistical distribution of swash maxima on natural beaches. Journal of Geophysical Research: Oceans, 98(C6): 10271-10278 [DOI: 10.1029/93JC00035]

Holland K T, Holman R A, Lippmann T C, Stanley J and Plant N. 1997. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 22(1): 81-92 [DOI: 10.1109/48.557542]

Holland K T, Puleo J A and Kooney T N. 2001. Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry. Coastal Engineering, 44(2): 65-77 [DOI: 10.1016/S0378-3839(01)00022-9]

Holman R A. 1981. Infragravity energy in the surf zone. Journal of Geophysical Research: Oceans, 86(C7): 6442-6450 [DOI: 10.1029/JC086iC07p06442]

Holman R A and Guza R T. 1984. Measuring run-up on a natural beach. Coastal Engineering, 8(2): 129-140 [DOI: 10.1016/0378-3839(84)90008-5]

Holman R A, Plant N and Holland T. 2013. cBathy: a robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(5): 2595-2609 [DOI: 10.1002/jgrc.20199]

Holman R A and Stanley J. 2007. The history and technical capabilities of Argus. Coastal Engineering, 54(6/7): 477-491 [DOI: 10.

1016/j.coastaleng.2007.01.003]

Jackson D W T and Short A D. 2020. Sandy Beach Morphodynamics. Amsterdam: Elsevier [DOI: 10.1016/C2018-0-02420-2]

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Jiménez J A, Osorio A, Marino-Tapia I, Davidson M, Medina R, Kroon A, Archetti R, Ciavola P and Aarnikhof S G J. 2007. Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators. Coastal Engineering, 54(6/7): 507-521 [DOI: 10.1016/j. coastaleng.2007.01.012]

Kane B, Zajchowski C A B, Allen T R, McLeod G and Allen N H. 2021. Is it safer at the beach? Spatial and temporal analyses of beachgoer behaviors during the COVID-19 pandemic. Ocean and Coastal Management, 205: 105533 [DOI: 10.1016/j. ocecoaman. 2021.105533]

Kennedy A B, Dalrymple R A, Kirby J T and Chen Q. 2000. Determination of inverse depths using direct boussinesq modeling. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 126(4): 206-214 [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:4(206)]

Kim J and Kim J. 2020. Estimation of water surface flow velocity in coastal video imagery by visual tracking with deep learning. Journal of Coastal Research, 95(sp1): 522-526 [DOI: 10.2112/SI95-101.1]

Kingston K S, Ruessink B G, van Enckevort I M J and Davidson M A. 2000. Artificial neural network correction of remotely sensed sandbar location. Marine Geology, 169(1/2): 137-160 [DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00056-6]

Koon W, Brander R W, Dusek G, Castelle B and Lawes J C. 2023. Relationships between the tide and fatal drowning at surf beaches in New South Wales, Australia: implications for coastal safety management and practice. Ocean and Coastal Management, 238: 106584 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106584]

Kroon A, Davidson M A, Aarninkhof S G J, Archetti R, Armaroli C, Gonzalez M, Medri S, Osorio A, Aagaard T, Holman R A and Spanhoff R. 2007. Application of remote sensing video systems to coastline management problems. Coastal Engineering, 54(6/7): 493-505 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2007.01.004]

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 (in Chinese), 20(5): 1216-1229 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20166168]

Li Y H, Lei G, Cai F, Qi H S and Zhu J. 2019. Study on the influence of hard revetment, harbor engineering and artificial island on the adjacent beach in China. Journal of Applied Oceanography, 38(1): 118-125 (黎奕宏, 雷刚, 蔡锋, 戚洪帅, 朱君. 2019. 我国硬式护岸、渔港工程和人工岛等3类典型海岸工程对相邻海滩的影响研究. 应用海洋学学报, 38(1): 118-125) [DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2019.01.013]

Lippmann T C and Holman R A. 1989. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. Journal of Geophysical Research: Oceans, 94(C1): 995-1011 [DOI: 10.1029/JC094iC01p00995]

Lippmann T C and Holman R A. 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. Journal of Geophysical Research: Oceans, 95(C7): 11575-11590 [DOI: 10.1029/JC095iC07p11575]

Liu H J and Shi L Q. 2016. Nearshore real-time in-situ video monitoring technique——the ARGUS system. The Ocean Engineering, 34(2): 80-87 (刘海江, 时连强. 2016. 海岸带实时实地视频观测ARGUS技术. 海洋工程, 34(2): 80-87) [DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2016.02.011]

Liu S S, Cai F, Qi H S, Liu J H, Yang W and Liu G. 2023. Economic contribution of beach resources and their sustainable development in China. Ocean and Coastal Management, 239: 106598 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106598]

Lu X, Zhang C, Shi J, Li F M and Zhang Y. 2021. Tourists accident database and accident characteristics of beach tourism in China. Ocean Development and Management, 38(6): 3-11 (陆旭, 张弛, 时健, 李方明, 张尧. 2021. 我国海滩游客安全事故数据库和事故特征分析. 海洋开发与管理, 38(6): 3-11) [DOI: 10.20016/j.cnki.hykfygl.2021.06.001]

MacMahan J H, Thornton E B and Reniers A J H M. 2006. Rip current review. Coastal Engineering, 53(2/3): 191-208 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.10.009]

Manning R E and Lawson S R. 2002. Carrying capacity as "informed judgment": the values of science and the science of values. Environmental Management, 30(2): 157-168 [DOI: 10.1007/s00267-002-2772-x]

Mason D C, Davenport I J, Robinson G J, Flather R A and McCartney B S. 1995. Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'Water-Line' Method. Geophysical Research Letters, 22(23): 3187-3190 [DOI: 10.1029/95GL03168]

Masselink G, Austin M, Scott T, Poate T and Russell P. 2014. Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach. Geomorphology, 226: 76-93 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.025]

McCann M P, Anderson D L, Sherwood C R, Bruder B, Bak A S and Brodie K L. 2022. CoastalImageLib: an open- source Python package for creating common coastal image products. SoftwareX, 20: 101215 [DOI: 10.1016/j.softx.2022.101215]

McGranahan G, Balk D and Anderson B. 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. Environment and Urbanization, 19(1): 17-37 [DOI: 10.1177/0956247807076960]

Misra S K, Kennedy A B and Kirby J T. 2003. An approach to determining nearshore bathymetry using remotely sensed ocean surface dynamics. Coastal Engineering, 47(3): 265-293 [DOI: 10.1016/S0378-3839(02)00118-7]

Mucerino L, Carpi L, Schiaffino C F, Pranzini E, Sessa E and Ferrari M. 2021. Rip current hazard assessment on a sandy beach in Liguria, NW Mediterranean. Natural Hazards, 105(1): 137-156 [DOI:

10.1007/s11069-020-04299-9]

Nieto M A, Garau B, Balle S, Simarro G, Zarruk G A, Ortiz A, Tintoré J, Álvarez-Ellacuría A, Gómez-Pujol L and Orfila A. 2010. An open source, low cost video-based coastal monitoring system. Earth Surface Processes and Landforms, 35(14): 1712-1719 [DOI: 10.1002/esp.2025]

Osorio A F, Medina R and Gonzalez M. 2012. An algorithm for the measurement of shoreline and intertidal beach profiles using video imagery: PSDM. Computers and Geosciences, 46: 196-207 [DOI: 10.1016/j.cageo.2011.12.008]

Pacheco A, Horta J, Loureiro C and Ferreira Ó. 2015. Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: a tool for coastal monitoring in shallow waters. Remote Sensing of Environment, 159: 102-116 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.004]

Palmsten M L and Brodie K L. 2022. The coastal imaging research network (CIRN). Remote Sensing, 14(3): 453 [DOI: 10.3390/rs14030453]

Pearre N S and Puleo J A. 2009. Quantifying seasonal shoreline variability at Rehoboth beach, Delaware, using automated imaging techniques. Journal of Coastal Research, 254: 900-914 [DOI: 10.2112/08-1029.1]

Pereira L C C, Jiménez J A, Medeiros C and da Costa R M. 2003. The influence of the environmental status of Casa Caiada and Rio Doce beaches (NE-Brazil) on beaches users. Ocean and Coastal Management, 46(11/12): 1011-1030 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2004.01.002]

Perkovic D, Lippmann T C and Frasier S J. 2009. Longshore surface currents measured by Doppler radar and video PIV techniques. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(8): 2787-2800 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2016556]

Pitman S, Gallop S L, Haigh I D, Mahmoodi S, Masselink G and Ranasinghe R. 2016. Synthetic imagery for the automated detection of rip currents. Journal of Coastal Research, 75(sp1): 912-916 [DOI: 10.2112/SI75-183.1]

Plant N G and Holman R A. 1997. Intertidal beach profile estimation using video images. Marine Geology, 140(1/2): 1-24 [DOI: 10.1016/S0025-3227(97)00019-4]

Qi H S, Cai F, Lei G and Cao H M. 2009. Characterization of storm response on beaches in South China. Advances in Natural Science, 19(9): 975-985 (戚洪帅, 蔡锋, 雷刚, 曹惠美. 2009. 华南海滩风暴响应特征研究. 自然科学进展, 19(9): 975-985) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2009.09.011]

Qi H S, Cai F, Ren J Y and Zheng L Y. 2010. Some perspectives on storm beach effect research and further prospects in China. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 29(4): 578-588 (戚洪帅, 蔡锋, 任建业, 郑连远. 2010. 海滩风暴效应若干问题思考与我国研究前景. 台湾海峡, 29(4): 578-588) [DOI: 10.3969/J.ISSN.1000-8160.2010.04.020]

Quartel S, Addink E A and Ruessink B G. 2006. Object-oriented extraction of beach morphology from video images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8(4): 256-269 [DOI: 10.1016/j.jag.2006.01.002]

Ramesh M, Nair L S, Anoop T R and Prakash T N. 2022. Nearshore wave analysis from coastal video monitoring techniques at high energy micro tidal beach under sunlight dominance conditions: a case study from Valiathura beach in southwest coast of India. Regional Studies in Marine Science, 51: 102205 [DOI: 10.1016/j.rsma.2022.102205]

Rampal N, Shand T, Wooler A and Rautenbach C. 2022. Interpretable deep learning applied to rip current detection and localization. Remote Sensing, 14(23): 6048 [DOI: 10.3390/rs14236048]

Ranasinghe R, Symonds G, Black K and Holman R. 2004. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study. Coastal Engineering, 51(7): 629-655 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.018]

Rihouey D, Dugor J, Dailloux D and Morichon D. 2009. Application of remote sensing video systems to coastal defence monitoring. Journal of Coastal Research, (56): 1582-1586

Rodriguez-Padilla I, Castelle B, Marieu V and Morichon D. 2020. A simple and efficient image stabilization method for coastal monitoring video systems. Remote Sensing, 12(1): 70 [DOI: 10.3390/rs12010070]

Rodríguez-Padilla I, Castelle B, Marieu V and Morichon D. 2022. Video-based nearshore bathymetric inversion on a geologically constrained mesotidal beach during storm events. Remote Sensing, 14(16): 3850 [DOI: 10.3390/rs14163850]

Román-Rivera M A and Ellis J T. 2019. A synthetic review of remote sensing applications to detect nearshore bars. Marine Geology, 408: 144-153 [DOI: 10.1016/j.margeo.2018.12.003]

Ruiz de Alegria-Arzaburu A and Masselink G. 2010. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K. Marine Geology, 278(1/4): 77-99 [DOI: 10.1016/j.margeo.2010.09.004]

Scardino G, Scicchitano G, Chirivì M, Costa P J M, Luparelli A and Mastronuzzi G. 2022. Convolutional neural network and optical flow for the assessment of wave and tide parameters from video analysis (LEUCOTEA): an innovative tool for coastal monitoring. Remote Sensing, 14(13): 2994 [DOI: 10.3390/rs14132994]

Selvaraju R R, Cogswell M, Das A, Vedantam R, Parikh D and Batra D. 2017. Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice: IEEE: 618-626 [DOI: 10.1109/ICCV.2017.74]

Sembiring L, van Dongeren A, Winter G, van Ormondt M, Briere C and Roelvink D. 2014. Nearshore bathymetry from video and the application to rip current predictions for the Dutch Coast. Journal of Coastal Research, 70(sp1): 354-359 [DOI: 10.2112/SI70-060.1]

Shi L Q, Guo J L, Liu H J and Ye Q H. 2019. Application progress and prospect of Argus system in beach research in China. Advances in Earth Science, 34(5): 552-560 (时连强, 郭俊丽, 刘海江, 叶清华. 2019. Argus系统在我国海滩研究中的应用进展与展望. 地球科学进展, 34(5): 552-560) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2019.05.0552]

Silva-Cavalcanti J S, Costa M F and Pereira P S. 2018. Rip currents signaling and users behaviour at an overcrowded urban beach. Ocean and Coastal Management, 155: 90-97 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.01.031]

Simarro G, Bryan K R, Guedes R M C, Sancho A, Guillen J and Coco G. 2015. On the use of variance images for runup and shoreline detection. Coastal Engineering, 99: 136-147 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.03.002]

Simarro G and Calvete D. 2022. UBathy (v2.0): a software to obtain the bathymetry from video imagery. Remote Sensing, 14(23): 6139 [DOI: 10.3390/rs14236139]

Simarro G, Calvete D, Luque P, Orfila A and Ribas F. 2019. UBathy: a new approach for bathymetric inversion from video imagery. Remote Sensing, 11(23): 2722 [DOI: 10.3390/rs11232722]

Simarro G, Calvete D and Souto P. 2021. UCalib: cameras autocalibration on coastal video monitoring systems. Remote Sensing, 13 (14): 2795 [DOI: 10.3390/rs13142795]

Simarro G, Calvete D, Souto P and Guillén J. 2020. Camera calibration for coastal monitoring using available snapshot images. Remote Sensing, 12(11): 1840 [DOI: 10.3390/rs12111840]

Simarro G, Ribas F, Álvarez A, Guillén J, Chic Ò and Orfila A. 2017. ULISES: an open source code for extrinsic calibrations and planview generations in coastal video monitoring systems. Journal of Coastal Research, 33(5): 1217-1227 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00022.1]

Small C and Nicholls R J. 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. Journal of Coastal Research, 19(3): 584-599

Soloy A, Turki I, Lecoq N, Gutiérrez Barceló Á D, Costa S, Laignel B, Bazin B, Soufflet Y, Le Louargant L and Maquaire O. 2021. A fully automated method for monitoring the intertidal topography using Video Monitoring Systems. Coastal Engineering, 167: 103894 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2021.103894]

Splinter K D, Harley M D and Turner I L. 2018. Remote sensing is changing our view of the coast: insights from 40 years of monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. Remote Sensing, 10(11): 1744 [DOI: 10.3390/rs10111744]

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of china. GB/T 20257.1-2017 Cartographic symbols for national fundamental scale maps--Part 1:Specifications for cartographic symbols 1:500 1:1000 &1:2000 topographic maps. Beijing: Standards Press of china

Stockdon H F and Holman R A. 2000. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. Journal of Geophysical Research: Oceans, 105(C9): 22015-22033 [DOI: 10.1029/1999JC000124]

Stockdon H F, Holman R A, Howd P A and Sallenger Jr A H. 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coastal Engineering, 53(7): 573-588 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.12.005]

Stockdon H F, Sallenger A H, List J H and Holman R A. 2002. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data. Journal of Coastal Research, 18(3): 502-513

Taborda R and Silva A. 2012. COSMOS: a lightweight coastal video monitoring system. Computers and Geosciences, 49: 248-255 [DOI: 10.1016/j.cageo.2012.07.013]

Tuijnman J T, Donker J J A, Schwarz C S and Ruessink G. 2020. Consequences of a storm surge for Aeolian sand transport on a low-gradient beach. Journal of Marine Science and Engineering, 8(8): 584 [DOI: 10.3390/jmse8080584]

Turner I L, Aarninkhof S G J, Dronkers T D T and McGrath J. 2004. CZM applications of Argus coastal imaging at the Gold Coast, Australia. Journal of Coastal Research, 20(3): 739-752 [DOI: 10.2112/1551-5036(2004)20[739:CAOACI]2.0.CO;2]

Uunk L, Wijnberg K M and Morelissen R. 2010. Automated mapping of the intertidal beach bathymetry from video images. Coastal Engineering, 57(4): 461-469 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.12.002]

Van Koningsveld M, Davidson M, Huntley D, Medina R, Aarninkhof S, Jiménez J A, Ridgewell J and de Kruif A. 2007. A critical review of the CoastView project: recent and future developments in coastal management video systems. Coastal Engineering, 54(6/7): 567-576 [DOI: 10.1016/j.coastaleng.2007.01.006]

Vousdoukas M I. 2012. Erosion/accretion patterns and multiple beach cusp systems on a meso-tidal, steeply-sloping beach. Geomorphology, 141-142: 34-46 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.12.003]

Vousdoukas M I, Almeida L P M and Ferreira Ó. 2012. Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach. Earth Surface Processes and Landforms, 37(6): 583-593 [DOI: 10.1002/esp.2264]

Vousdoukas M I, Ferreira P M, Almeida L P, Dodet G, Psaros F, Andriolo U, Taborda R, Silva A N, Ruano A and Ferreira Ó M. 2011. Performance of intertidal topography video monitoring of a meso-tidal reflective beach in South Portugal. Ocean Dynamics, 61(10): 1521-1540 [DOI: 10.1007/s10236-011-0440-5]

Wilson G W, Özkan-Haller H T, Holman R A, Haller M C, Honegger D A and Chickadel C C. 2014. Surf zone bathymetry and circulation predictions via data assimilation of remote sensing observations. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(3): 1993-2016 [DOI: 10.1002/2013JC009213]

Yin H, Qi H S, Cai F, Zhang C, Liu G, Zhao S H, Song J C and Zhao G R. 2022. Sandy coastline fine extraction and correction method based on high resolution image. Haiyang Xuebao, 44(4): 143-152 (尹航, 戚洪帅, 蔡锋, 张弛, 刘根, 赵绍华, 宋嘉诚, 赵国润. 2022. 高分影像砂质海岸线精细提取及校正方法. 海洋学报, 44(4): 143-152) [DOI: 10.12284/hyxb2022084]

Yu J T and Chen Z S. 2009. Study progress of sandy coastal erosion. Tropical Geography, 29(2): 112-118 (于吉涛, 陈子燊. 2009. 砂质海岸侵蚀研究进展. 热带地理, 29(2): 112-118) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-5221.2009.02.002]

Zhang C, Bu X T, Liu J H, Li Y, Sui T T and Chen D K. 2022. Review of mathematical models for coupled morphological evolution of beach-dune system considering subaqueous and Aeolian sediment transport processes. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 50(3): 81-90 (张弛, 卜鑫涛, 刘建辉, 李元, 隋倜倜, 陈大可. 2022. 考虑水沙和风沙过程的海滩-沙丘系统耦合演变数学模型研究综述. 河海大学学报(自然科学版), 50(3): 81-90) [DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.011]

Zhang J X, Liu F and Wang J. 2021. Review of the light-weighted and small UAV system for aerial photography and remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 25(3): 708-724 (张继贤, 刘飞, 王坚. 2021. 轻小型无人机测绘遥感系统研究进展. 遥感学报, 25(3): 708-724) [DOI: 10.11834/jrs.20210052]

Zhang S P and Zhang C T. 2006. An introduction to nearshore video imaging observations. Ocean Technology, 25(1): 11-19 (张锁平, 张春田 . 2006. 近海视频测量与应用 . 海洋技术, 25(1): 11-19) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2006.01.003]

Zhang Z Y. 1999. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra: IEEE: 666-673 [DOI: 10.1109/ICCV.1999.791289]

Zheng J H and Zhang C. 2022. Fundamental theory and key techniques of beach nourishment morphodynamics: an overview of recent research advances. Oceanologia et Limnologia Sinica, 53(4): 791-796 (郑金海, 张弛 . 2022. 海滩养护动力地貌基础理论与关键技术研究述评 . 海洋与湖沼, 53(4): 791-796) [DOI: 10.11693/hyhz20220100006]

Zuo Q H. 2008. Advances and applications of ocean wave measurement technology. The Ocean Engineering, 26(2): 124-139 (左其华 . 2008. 现场波浪观测技术发展和应用 . 海洋工程, 26(2): 124-139) [DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2008.02.016]

Advances and prospects of the a shore−based video monitoring technology on beach research

QI Hongshuai[1], YIN Hang[1,2], CAI Feng[1,2], ZHANG Chi[3], LIU Gen[1], CAO Zhubin[3]

1.Laboratory of Ocean and Coast Geology, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China;
2.College of Ocean and Earth sciences, Xiamen University, Xiamen 361104, China;
3.College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: The coastal zone, which is positioned at the dynamic interface of between land and sea, stands out as one of the most vibrant and crucial natural regions on Earth. Subject to the interactive forces of land, sea, and atmosphere, it's the geomorphic and ecological systems of the coastal zone are exceptionally delicatefragile. Beaches, which are characterized by the unique scenic attributes and susceptibility to coastal landform changes, act as the frontline defense against ocean hydrodynamics forces and serve as guardians of the coastal ecological environment. Simultaneously, they play a pivotal role in fostering green coastal economies. Strengthening the monitoring and research of beaches has become an imperative requirement for achieving harmonious coexistence between humans and nature. Traditionally, beach monitoring has predominantly relied on labor-intensive field measurements, resulting in time-consuming efforts and limited spatiotemporal resolution in data sampling. The current bottleneck in beach research lies in the challenge of acquiring multidimensional, high-quality, and long-duration datasets. Shore-based video monitoring, which is an optical remote sensing technology designed for coastal process observation and quantitative data extraction, provides a new and effective solution for continuous beach monitoring. This technology, born which was developed in the United States in the 1980 s with Argus as its paradigmatic representative, has proliferated globally over the past four decades. At present, It it is now universally acknowledged as a potent tool in the field of nearshore observation. While theAlthough research on shore-based video monitoring technology started relatively late in China, it has developed rapidly. In particular, the joint efforts of the Institute of Third Institute of Oceanography of China, Hohai University, and Xiamen University led to the independent development of the Coastal Shore-based Video Imagery Monitoring SystemCOSVIMS. The progress of shoreShore-based video monitoring technology has witnessed achieved significant progressstrides. Algorithmic advancements related to sandy coastlines, intertidal zone topography, nearshore wave propagation & and dissipation processes, nearshore currents, and bathymetry extraction have played a crucial roles in enhancing the capabilities of this technology. These algorithms not only ensure accuracy but also enable a more comprehensive understanding of coastal dynamics. The applicability of video monitoring technology spans covers various scenarios, including beach management, coastal engineering construction and assessment, storm surge process observation, and aeolian sand transport process monitoring. Looking ahead, the future Future trends of shore-based video monitoring technology are promising, especiallyparticularly in the context of the accelerating coastal urbanization in China. The contradictions Contradictions between the development and protection of coastal zone resources and the environment are becoming increasingly pronounced. The widespread adoption of shore-based video monitoring technology holds exhibits high practical significance and value for the research and protecting protection the of coastal zones along China. Breakthroughs in emerging technologies, such as artificial intelligence, 5G, big data, and Cloudcloud, coupled with the growing demand for coastal zone resource and environmental monitoring, are paving the way for greater development opportunities for shore-based video monitoring technology. In conclusion, the evolution of shore-based video monitoring technology signifies a transformative era in coastal research and management. As technology continues to advance, it opens new frontiers for understanding and preserving the delicate balance between coastal development and environmental conservation are opened. The journey development from direct measurements to advanced remote sensing exemplifies the evolution toward more efficient and sustainable coastal research methodologies.

Key words: video image, beach monitoring, Argus, beach nourishment, rip currents, storm surge, aeolian transport

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFC3106104); National Natural Science Foundation of China (No. 41930538, 42106165); Open Fund Project of East China Coastal Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources (No. ORSECCZ2022203)