

滨海旅游区防溺水海洋环境智能监测 与预警系统设计

翟万林^{1,2}, 朱建华¹, 薛有华³, 孙兆琦⁴, 李鋆沪⁵,
杨安安¹, 黄骁麒^{1,2}, 王贺^{1,2}, 闫龙浩¹, 田震^{1,2}

(1. 国家海洋技术中心 天津 300112; 2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室 天津 300112;
3. 海南省航天技术创新中心 文昌 571300; 4. 武汉深岚数字科技有限公司 武汉 430205;
5. 广东海启星海洋科技有限公司 广州 511447)

摘要: 滨海沙滩海域是海洋溺水事故发生的主要区域, 为了有效减少此类事故的发生, 文章提出了一种高效智能防溺水系统的设计与实现方法。该系统以海南省三亚市皇后湾为研究区, 利用现场观测的高精度海洋基础地理信息数据、基于智慧立杆影像的深度学习算法、实时海洋环境监测数据及水动力环境数值模拟, 实现了对研究区海洋环境的实时监测与分析, 并构建了风险评估模型。根据风险评估结果设计了电子围栏, 为游客推送实时的海洋环境风险预警信息, 以保障游客安全, 并为相关部门提供了决策支持。研究不仅有助于提升滨海旅游区的安全管理水平, 也为未来智慧海洋建设提供了重要的参考案例。

关键词: 海洋环境监测; 离岸流; 风险评估; 智能预警

中图分类号: X84; TP399; P716

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2025)10-0131-06

Design of an Intelligent Monitoring and Early Warning System for Marine Environment to Prevent Drowning in Coastal Tourist Areas

ZHAI Wanlin^{1,2}, ZHU Jianhua¹, XUE Youhua³, SUN Zhaoqi⁴, LI Junhu⁵, YANG An'an¹,
HUANG Xiaoqi^{1,2}, WANG He^{1,2}, YAN Longhao¹, TIAN Zhen^{1,2}

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Key Laboratory of Ocean Observation Technology, MNR, Tianjin 300112, China; 3. Hainan Aerospace Technology Innovation Center, Wenchang 571300, China;
4. Wuhan Shenlan Digital Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China;
5. Guangdong Sea Star Ocean Sci. and Tech.Co., Ltd., Guangzhou 511447, China)

Abstract: Coastal areas are regions where drowning incidents frequently occur. To effectively reduce the occurrence of such accidents, this paper proposes the design and implementation method of an efficient and intelligent drowning prevention system. With Queen's Bay in Sanya, Hainan Province as the research area, the

收稿日期: 2025-03-23; 修订日期: 2025-08-24

基金项目: 海南省科技厅科技专项(ATIC-2023010003); 海南省重点研发项目(ZDYF2023GXJS023)。

作者简介: 翟万林, 高级工程师, 硕士, 研究方向为海洋遥感与测绘技术

通信作者: 朱建华, 正高级工程师, 研究方向为海洋遥感技术

system integrates high-precision marine geographic information data from field observations, deep learning algorithms based on smart pole-mounted camera imagery, real-time marine environmental monitoring data, and hydrodynamic numerical simulations. This comprehensive approach enables real-time monitoring and analysis of the marine environment in the research area. An electronic fence was designed based on the risk evaluation results developed from the collected data. The system provides real-time marine environmental risk alerts and information push services to tourists, thereby enhancing personal safety. Moreover, this system can offer decision-making support to relevant authorities. This research not only contributes to improving the safety management level of coastal tourist areas but also serves as an important reference case for future smart ocean construction.

Keywords: Marine environment monitoring, Rip currents, Risk assessment, Intelligent early-warning

0 引言

滨海沙滩海域是海洋溺水事故发生的主要区域,对人民生命和财产造成巨大的损失。据统计,滨海旅游沙滩海域溺亡事件有80%~90%与裂流有关,在全球范围内裂流每年导致数百人溺水死亡,是一种危害极大的海洋环境灾害,已成为滨海游客的主要危险来源,严重威胁到滨海游客的生命安全^[1]。裂流,又称离岸流,是在海浪和浅滩的作用下,形成的一股从海岸向外海快速流动的狭窄海流^[2]。离岸流的范围较窄,持续时间短,但是由于其流速快,而且离岸流往往藏在波涛汹涌的海浪之中,其产生的位置往往随波高、波浪周期、海底地形以及海岸线形状而发生变化,再加上人们对离岸流的认识不足,因此其危害较大^[3]。

为了预防滨海沙滩旅游区溺水事故的发生,多个国家建立了海洋监测与预报系统。美国国家气象局(National Weather Service)已构建了离岸流风险识别的业务化预报系统(<https://www.weather.gov/safety/ripcurrent-forecasts>),同时利用视频、图片、故事等形式对滨海沙滩安全进行科普宣传,以加深人们对滨海旅游区风险区的认识。韩国气象局早在2011年就启动了观测和预报滨海沙滩离岸流的研究项目,主要目标是确定离岸流产生的原因和机制,并对离岸流进行预测,以保护海滩游客人身安全,减少离岸流造成的损害^[4]。哥斯达黎加为防止滨海沙滩旅游区溺水事故的发生,要求沿海县配备救生员,并对海洋溺水事故进行专业的救援和

预防,为海滩安全预防工作提供了保障^[5]。澳大利亚滨海沙滩资源丰富,溺水风险也较大,仅在2024年夏季就有55人溺亡^[1]。为此,澳大利亚水上安全委员会发布了《水上安全策略2030》(*Australian Water Safety Strategy 2030*),通过提高人们的认识、建立溺水风险预警系统、增加救援设施、加强救生培训等策略,使溺亡人数减半^[6]。另外,英国、日本、新加坡等滨海旅游资源较丰富的国家,也制定了相应的策略,以减少滨海沙滩旅游区溺水事故的发生^[7]。

我国海上旅游资源丰富,但是海洋灾害频发。《2023年中国海洋灾害公报》显示,2014—2023年,海洋灾害年平均直接经济损失高达58亿元,年平均死亡及失踪人数为28人。据历史数据统计,80%以上的海滩溺水事故是由离岸流引起的。为减少滨海沙滩旅游事故的发生,2016—2017年,由自然资源部海洋减灾中心牵头,开展了我国首次滨海旅游区离岸流灾害风险排查,通过研究分析与离岸流灾害密切相关的海滩和水深地形、潮汐、风速和风向、波浪条件、海底地貌、季节变化、水温、盐度等要素^[1-2],发现了大量存在浅滩沙坝和离岸流现象的海滩,并完成了相关警示标识的设置^[8]。但是根据实地和网络调查,公众对离岸流的认知仍然不足,由于警示标识仅覆盖部分区域,大多数滨海游客甚至未曾见过离岸流警示标识^[1],缺乏必要的安全防范意识,从而增加了遇险的风险。

1 系统设计

1.1 研究区选择

本文拟选择三亚市海棠区林旺镇后海皇后湾(18°27'N, 109°28'E)为研究区。皇后湾是一片半圆形海湾, 位于三亚市海棠区林旺镇后海村, 其西南侧为铁炉港。本区域是三亚著名的冲浪胜地, 水深较浅, 湾口处最大水深约为 12.4 m。受热带海洋性季风气候影响, 该区域终年高温, 平均年降水量为 1 255 mm。潮汐为不规则日潮型, 以日潮为主。同时, 该区域也是离岸流高发区域^[1,8]。据报道, 2023 年 1 月 7 日海南省三亚市海棠区后海村附近海域发生因离岸流引发的溺水事件, 共有 4 人遇难。虽然事发海域附近设立了告示牌, 但是大部分游客仍然缺乏安全意识和自我保护能力。

基于上述情况, 本文通过利用海洋环境地理信息调查、实时监测、遥感、深度学习、数值模拟等技术手段, 对滨海旅游沙滩区域海洋环境的海水状态、天气、潮汐、海流等重要参数进行实时监测和分析, 建立一个高效智能的防溺水海洋环境监测和预警系统, 增强人们在亲海活动中的安全意识, 减少溺水事故的发生, 同时也为相关部门提供数据支持, 以便更好地管理和保护海洋环境。

1.2 系统总体设计

防溺水海洋环境监测和预警系统总体设计主要包括以下 4 个模块。

(1) 海洋环境背景数据获取模块: 包括研究区多年的高分辨率卫星影像、潮汐资料、波浪资料、岸滩水深地形数据集等地理信息数据的获取。

(2) 海洋环境综合监测模块: 部署海洋环境综合监测浮标, 对海洋水文和气象参数进行监测; 部署验潮站对研究区的潮汐进行长期连续观测; 部署智慧立杆等固定监测设备对游客进入中高风险区域情况进行监测分析。

(3) 基于风险评估的电子围栏设计模块: 利用海洋环境背景数据、海洋环境综合监测数据等, 结合深度学习、海洋环境数值模拟等方法, 分析研究区离岸流形成的机理及分布情况, 并根据分析结果, 构建风险评估模型, 划分风险区。根据风险区

构建电子围栏, 并按一定周期和业务需求对风险区和电子围栏进行调整。

(4) 信息联通与智能预警模块: 信息联通基于海洋环境地理信息数据、海洋环境综合监测数据、深度学习识别实时摄像头离岸流、电子围栏设计等相关成果, 遵循定制化软件系统开发方法, 采用分层架构展开研究、设计与实施, 依托多渠道完成信息采集与下发, 从而构建具备智能预警功能的系统, 以支撑防溺水相关业务运行及体系化建设。

2 功能设计

2.1 海洋环境数据获取功能

海洋环境数据包括海洋环境地理信息数据和实时综合监测数据。海洋环境地理信息数据主要包括以下 3 种类型。

(1) 高分辨率光学遥感影像数据: 以高分辨率光学遥感影像数据为基础, 借助深度学习方法统计分析海洋环境变化的时空分布规律, 对研究区威胁游客游泳安全的海上流场信息进行提取, 对离岸流形成的机理进行详细分析, 以便更好地了解其随时间和空间的变化趋势^[9]。这不仅能帮助预测潜在的风险区域, 还为制定相应的管理措施提供了科学依据。

(2) 海洋遥感与模式模型数据: 海洋遥感数据如卫星高度计数据(包括 Jason 系列、Sentinel-3、HY-2 系列、SWOT 等)^[10], 模式模型数据如 ERA5、ECMWF、FES2022、Hamtide 等^[11-12], 选择涵盖研究区附近超过 20 年的有效波高、波周期、风速、潮汐等数据, 对研究区的波浪、风、潮汐等数据进行统计分析, 可作为研究区离岸流研究的基础背景数据。

(3) 岸滩和水深地形数据: 使用 GNSS RTK 测量系统、单波束和多波束水深测量系统、无人机测量系统等, 为研究区提供精确的高分辨率岸滩和地下水地形数据。这些数据是构建研究区三维可视化和水动力数值模型的基础, 有助于更直观地展示离岸流等灾害现象的形成及分布情况。

上述海洋环境数据可以作为研究海洋环境背景的重要资源, 可以确定研究区内易发生离岸流的区

域, 既为后续智慧立杆、海洋环境综合监测浮标等设备的架设提供数据支撑, 也为研究区风险预警范围划分提供模型数据, 还为系统综合显示大屏展示功能提供基础地理信息数据。

2.2 海洋环境综合监测功能

海洋环境实时综合监测包括海洋环境监测浮标、验潮站、智慧立杆等(图1、表1)。

部署海洋环境监测浮标, 对研究区的气象要素、海水温度和盐度、海流、波浪等海洋环境参数进行监测^[13], 海洋环境监测数据频次不少于每30 min一次; 部署验潮站对研究区的潮汐进行长期连续观测, 监测频次不少于每10 min一次; 部署智慧立杆等固定监测设备, 实时获取易发生离岸流区域的影像, 对游客进入中高风险区域情况进行监测分析^[9,14]。

通过对海洋环境进行历史调查、本底调查与实时监测, 形成长期、连续的现场观测数据集, 为海洋环境智能分析预警系统提供数据支持。



图1 研究区设备位置

Fig.1 Equipment locations of the research area

表1 海洋环境实时综合监测主要设备的技术参数

Table 1 Technical parameters of main equipment for marine environment monitoring buoy

设备名称	主要功能	主要技术指标
验潮仪	水位测量	测量精度: ± 5 mm 测量周期: 1 min
海洋环境 监测浮标	气象、水文 要素测量	风速测量精度: $\pm 5\%$ (10 m/s) 风向测量精度: $\pm 3^\circ$ (10 m/s) 气温测量精度: $\pm 1.3^\circ\text{C}$ @20°C 波高测量准确度: $(0.1+5\% H)$ m 波浪周期测量精确度: ± 0.25 s (4 Hz) 波向测量准确度: $\pm 5^\circ$ 表层流速测量精度: 0.3 cm/s 或读数的 $\pm 1.5\%$ 表层流向测量准确度: $\pm 5^\circ$
智慧立杆	实时监控	像素: 200 万 含红外相机, 智能变焦

2.3 研究区风险评估和电子围栏设计功能

利用现场监测数据、基础海洋地理信息数据、遥感影像等, 根据测量的水动力环境、潮汐、波浪、水下地形地貌等, 依据时间、地貌发育情况和波浪破碎等相关信息, 对不同区域、不同时间发生的离岸流进行风险评估, 将最终生成的分析结果向智能分析管理平台输出划分风险区, 并按一定周期和业务需求对风险区进行调整^[1,15]。

由于离岸流出现的时间和空间范围有限, 但造成的游客人身安全隐忧较大。因此, 本系统的研究重点之一就是使用海洋环境数据模拟和影像信息, 利用深度学习方法对智慧立杆采集的影像进行离岸流识别^[9,14], 同时使用水动力环境数值模拟的方法, 对海洋环境进行实时模拟与预测^[15-17]。图2展示了有效波高为0.8 m时, 研究区的海流状况。以此为基础, 提取研究区离岸流发生概率较高的时间和空间范围, 从而为系统预警和风险评估提供数据支持。

根据海洋环境实时监测情况、数值模拟和智慧立杆获取的实时影像深度学习分析结果进行风险等级评价, 具体评价指标如表2所示, 表中高风险的各个指标为“或”的关系, 低风险各个指标为“且”的关系。同时根据风险等级评价结果设计电

子围栏, 为电子手环、智慧立杆等设备和管理部门的对接提供位置信息。

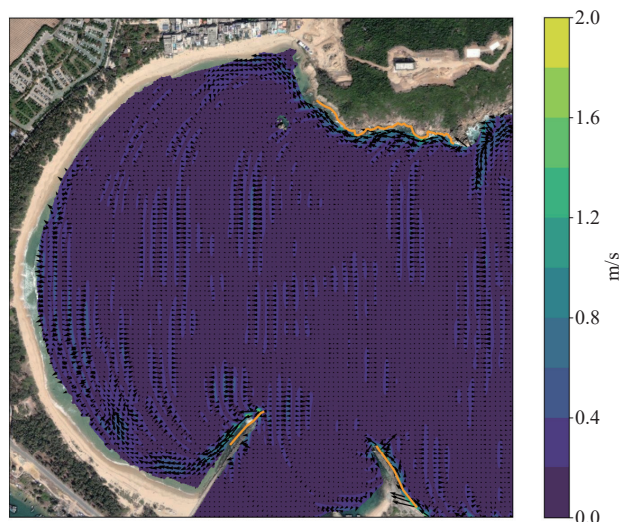


图 2 入射波高为 0.8 m 时的海流分布情况

Fig.2 Distribution of ocean currents at an incident wave height of 0.8 meters

表 2 研究区风险等级评价指标

Table 2 Risk level evaluation indicators for the study area

风险级别	时间	浪高	流速	水深
高风险	23: 00 ~ 次日 6: 00	> 1.5 m	> 0.5 m/s	> 2 m
中风险	6: 00 ~ 23: 00	> 0.5 m 且 ≤ 1.5 m	> 0.3 m/s 且 ≤ 0.5 m/s	> 0.5 m 且 ≤ 2 m
低风险	6: 00 ~ 23: 00	≤ 0.5 m	≤ 0.3 m/s	≤ 0.5 m

2.4 信息联通和智能预警功能

信息联通功能实现海洋环境背景、海洋环境综合监测成果数据和信息的联通, 按定制化软件系统开发思路进行分层次的研究、设计和实现, 最终通过多个渠道进行信息的获取和下发, 设计贯彻智能化建设思路, 最终赋予该系统智能预警能力^[18], 支持实现防溺水系统相关业务和体系建设。

智能预警包含软件和硬件, 软件主要为地图服务引擎、移动端小程序, 为游客提供信息推送服务;

硬件包括防溺水智能警戒浮标、智能定位手环^[19]、海滩信息显示大屏。信息联通系统软件使用多层次架构设计, 运行在 Linux 系统的应用服务器上, 开通 4A、CAS、WebSocket 等端口满足系统正常运行和服务连接, 开通外网口访问系统页面。在 VSCode 开发环境下, 采用 JavaScript 编程语言, 基于自研二三维一体化地图引擎进行应用开发, 叠加各类数据和服务形成该系统。

通过综合信息联通模块的主要数据, 根据风险评估和电子围栏设计实时跟踪结果, 可以将风险区划分结果通过系统显示大屏、海滩信息显示大屏、智能预警浮标、智能定位手环、手机 App 等多种方式发送到游客端和旅游区管理人员。一旦有人员进入预警高风险区, 及时提醒相关人员远离, 同时将信息发送至旅游区管理人员, 以便及时开展遇险人员救援工作, 减少溺水事故的发生。

3 结论

本文提出了一套高效智能防溺水海洋环境监测和预警系统, 以三亚市皇后湾为例, 对海洋环境风险较大的滨海沙滩海域进行深入分析, 通过对该区域海洋环境背景数据获取、综合监测、风险评估及电子围栏设计、信息联通与智能预警等多方面的集成应用, 实现对海洋环境中威胁游泳者安全的因素的实时监测与预警。特别是针对离岸流这一主要危险源, 系统采用深度学习方法进行识别, 并结合实时海洋环境参数和数值模拟手段预测其发生的概率和位置, 使用系统的智能预警功能, 快速响应并提醒游客及管理人员潜在的风险, 从而降低溺水事故发生的可能性。

综上所述, 本系统不仅为保护游客生命安全做出了重要贡献, 也为智慧海洋的建设和管理提供了宝贵的经验和技術支撑。未来的研究将进一步优化系统的性能, 提升其准确性和响应速度。同时, 还将探索如何将该系统的应用范围从当前区域扩展到更广阔的滨海及海洋环境, 以进一步保障滨海旅游区的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 朱道恒. 海南岛海滩裂流的特征及风险评价研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023.
ZHU Daoheng. Research on the characteristics and risk evaluation of beach rip currents on Hainan Island, China[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023.
- [2] SHEPARD F P, INMAN D L. Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1950, 31(2): 196-212.
- [3] 王彦, 邹志利. 海岸裂流的研究进展及其展望[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 170-176.
WANG Yan, ZOU Zhili. Progress and prospect of rip currents[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(5): 170-176.
- [4] SONG D S, BAE H K. Observation and forecasting of rip current generation in Haeundae Beach, Korea plan and experiment [EB/OL]. [2025-02-23]. https://www.researchgate.net/publication/286949488_Observation_and_Forecasting_of_Rip_Current_Generation_in_Haeundae_Beach_Korea_Plan_and_Experiment.
- [5] SEGURA L E, AROZARENA I, KOON W, et al. Coastal drowning in Costa Rica: incident analysis and comparisons between Costa Rican nationals and foreigners[J]. Natural Hazards, 2022, 110, 1083-1095.
- [6] Australian Water Safety Council. Australian water safety strategy 2030[Z]. 2021.
- [7] TIMOTHY M S, PAUL R, GERD M, et al. Rip current hazards on large-tidal beaches in the United Kingdom[EB/OL]. [2025-02-23]. https://www.researchgate.net/publication/235651719_Rip_Current_Hazards_on_Large-Tidal_Beaches_in_the_United_Kingdom.
- [8] 张尧, 刘旭楠, 董肇伟, 等. 我国典型滨海旅游区裂流灾害评估调查及风险管理动态[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(7): 16-25.
ZHANG Yao, LIU Xunan, DONG Zhaowei, et al. Technical assessment and public warning of the rip current for China's typical coastal tourism[J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(7): 16-25.
- [9] ZHU Daoheng, QI Rui, HU Pengpeng, et al. YOLO-Rip: a modified lightweight network for rip currents detection[J]. Frontiers of Marine Science, 2022, 9: 930478.
- [10] International Altimetry Team. Altimetry for the future: building on 25 years of progress[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(2): 319-363.
- [11] HERSEBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146: 1999-2049.
- [12] LYARD F H, ALLAIN D J, CANCET M, et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance[J]. Ocean Science, 2021, 17: 615-649.
- [13] 李博, 叶颖, 王斌, 等. 海洋环境综合监测信息系统的设计与实现[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(4): 44-49.
LI Bo, YE Ying, WANG Bin, et al. Design and implementation of a complex ocean observation information system[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(4): 44-49.
- [14] 甄好, 王连明. 一种基于多摄像头的大场景远程实时监控系統[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2021, 53(4): 62-67.
ZHEN Hao, WANG Lianming. Large-scale remote real-time monitoring system based on multi-camera[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 53(4): 62-67.
- [15] 张娟, 周水华, 蔡梦楠, 等. 深圳西涌滨海旅游区海滩裂流风险评估及特征分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(1): 61-66.
ZHANG Juan, ZHOU Shuihua, QI Mengnan, et al. Risk investigation and characteristic analysis of the rip current in Xichong coastal tourism area of Shenzhen[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(1): 61-66.
- [16] 孟凡昌, 李本霞. 裂流的研究综述[J]. 海洋预报, 2017, 34(1): 82-89.
MENG Fanchang, LI Benxia. Review on the study of the rip current[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(1): 82-89.
- [17] 杨怀玮, 原野, 高义, 等. 裂流危险性的数值预报方法及其在三亚大东海浴场的应用[J]. 海洋预报, 2022, 39(2): 59-69.
YANG Huaiwei, YUAN Ye, GAO Yi, et al. A numerical forecasting method of the hazard of rip current and its application in Dadonghai beach, Sanya[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(2): 59-69.
- [18] 杨军平, 于晓丰, 武斌, 等. 基于北斗卫星导航系统的海洋环境监测系统[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(8): 77-80.
YANG Junping, YU Xiaofeng, WU Bin, et al. Marine environment monitoring system based on Beidou Satellite Navigation System[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(8): 77-80.
- [19] 周覃洁, 魏芳波. 基于防溺水智能手环的心率监测设计[J]. 无线互联科技, 2022, 19: 46-48.
ZHOU Qianjie, WEI Fangbo. Design of the heart rate monitoring based on anti-drowning smart bracelet[J]. Wireless Internet Technology, 2022, 19: 46-48.