

doi: 10.6046/zrzyg.2021451

引用格式: 李东,唐诚,邹涛,等. 近海人工鱼礁水下物理状态探测与评估[J]. 自然资源遥感,2022,34(1):27–33. (Li D,Tang C,Zou T,et al. Detection and assessment of the physical state of offshore artificial reefs[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022,34(1):27–33.)

近海人工鱼礁水下物理状态探测与评估

李东^{1,2,3}, 唐诚^{1,2,3}, 邹涛², 侯西勇^{1,2,3}

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所),烟台 264003; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所,烟台 264003; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心,青岛 266071)

摘要: 掌握人工鱼礁水下物理状态是评估鱼礁效益的关键条件。传统调查方法存在效率低、信息不完整等缺陷,无法满足人工鱼礁精准监测的要求。该文利用多波束测深声纳系统获取礁区高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM),结合地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析方法,对礁体分布、礁体高度、投礁空方量及礁区复杂地形特征进行定量分析。在山东近海某人工鱼礁区的实验结果表明,研究区水深范围在 $-9.92 \sim -6.73$ m之间,人工礁石堆砌成堆,礁堆间距离不一,50%的礁体高度在 $1.48 \sim 1.82$ m之间,投礁空方量共计 $5\,458.49\text{ m}^3$;坡度、曲率、粗糙度以及地形起伏度等地形特征变量的高值区均集中在礁石分布区;受自身重力及局地水力影响,鱼礁沉陷深度约为 0.5 m ,礁体周围形成特殊的冲淤地形。本研究可为人工鱼礁水下物理稳定性的监测与评估提供技术与数据支持,具有较强的实践意义。

关键词: 人工鱼礁; 物理稳定性; 多波束声纳; GIS空间分析

中图法分类号: S 953.1; P 748 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0027-07

0 引言

近岸投放人工鱼礁是建设海洋牧场的重要手段,通过合理布设人工鱼礁可以达到生境修复与生物资源养护的目的^[1-2]。鱼礁投放可引起光、声、水体流态等物理环境变化,能够为海洋生物繁殖、生长和栖息提供有利条件,逐渐形成特定的鱼礁生态系统^[3-5]。由于礁体的大量存在,海底地形地貌发生较大改变^[6]。礁区地形、礁体高度、鱼礁位置及分布密度等一系列物理状态参数对于鱼礁的生物诱集效应有着直接或间接的影响,并最终决定人工鱼礁的生态、经济效益^[7-9]。因此,掌握人工鱼礁水下物理状态是其建设进程中的重要一环,也是评估鱼礁效益的关键前提条件。

传统调查手段(如潜水观测、录像)可以获取鱼礁物理稳定性指标,但受探摸范围小、潜水时间短、可见度低等因素限制,作业效率低、调查效果不够理想^[10],人工鱼礁投放后的物理状态无法得到有效判定。粗放式管理体制获取的信息不能达到对鱼礁科

学监测评估的目的,无法满足构建现代海洋牧场的要求。

与可见光和电磁波相比,声波在海水中的衰减更慢、传播距离更远,因此声学遥测成为获取水下信息最常用的方式之一,且在海岸工程等领域已成为不可替代的观测手段^[11-12]。近年来,声纳探测技术在人工鱼礁建设中的应用逐渐增多,例如,利用测深侧扫声纳系统、多波束测深系统、侧扫声纳、双频声学识别声纳等,可以实现礁区水下地形地貌的精确测量,获取水下人工鱼礁空间分布特征^[13-17]。目前将声学遥测技术应用于人工鱼礁水下物理状态的研究方兴未艾,针对礁区地形起伏度、礁体分布格局、礁体覆淤程度等鱼礁物理稳定性指标的精细刻画还有待进一步完善。相比其他声纳设备,多波束测深系统是一种多传感器的复杂组合系统,在清晰快速确定鱼礁宏观位置及微观状态方面优势更为明显。本研究结合多波束声纳探测及地理空间分析技术,获取礁区高精度水深数据,分析礁区特有的地形特征及其成因,以期为人工鱼礁水下物理稳定性的监测与评估提供技术与数据支持,能够为促进人工鱼

收稿日期: 2021-12-24; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 山东省自然科学基金项目“具有复杂地形的人造礁区鱼类生境适宜性评价”(编号: ZR2020QD090)和中国科学院战略性先导科技专项项目“海岸带气候变化风险综合评估与决策支持系统”(编号: XDA19060205)共同资助。

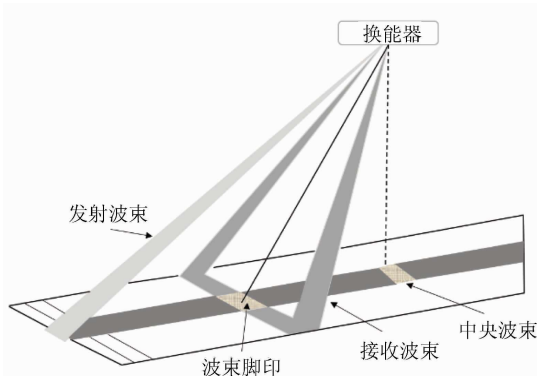
第一作者: 李东(1985-),男,博士,助理研究员,主要从事海岸带资源环境遥感监测研究。Email: dli@yic.ac.cn。

通信作者: 侯西勇(1975-),男,博士,研究员,主要从事海岸带遥感与地理信息系统、海岸带综合管理研究。Email: xyhou@yic.ac.cn。

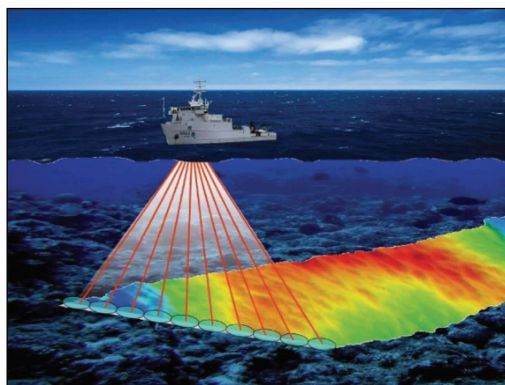
礁合理化建设提供理论依据和实践指导。

1 研究区及其数据获取

本研究选择山东近海某国家级海洋牧场为研究对象,近年来该牧场通过投放混凝土构件礁和山石礁等人工鱼礁已完成大规模投礁型海洋牧场的建设工作。礁区集聚鱼虾蟹贝藻,生态修护和资源养护效果明显。



(a) 多波束声纳工作原理



(b) 多波束声纳扫测示意图

图 1 多波束声纳工作原理及扫测示意图

Fig. 1 Working principle and schematic diagram of multi-beam sonar

数据采集后,采用专业的后处理软件 Caris 对原始水深数据进行预处理,经数据检查、校正和滤波等处理后得到礁区高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,空间分辨率为 20 cm。选取该调查海域一典型区域,利用地理空间分析技术对人工鱼礁的水下物理状态进行评估分析。

2 研究方法

人工鱼礁水下物理状态即礁体在海底的实际状态,宏观方面包括礁体的位置、分布格局、礁区地形特征和投礁空方量等;微观层面包括礁体高度和礁体周边冲淤程度等信息。礁区水深变化、礁体投放位置及分布格局是人工鱼礁水下物理状态的基本参数,是鱼礁科学管理的基础数据;投礁空方量即人工鱼礁投放量,表征了礁体体积,是人工鱼礁投放规模的重要指标,随着时间推移,礁体出现倾覆、损毁等现象,其空方量也随之变化;重力作用及局地水动力对礁体周围微地形发育有显著影响,获取礁体高度变化、鱼礁周边冲淤程度等参数能够在一定程度上从微观层面实现人工鱼礁水下物理状态的精确刻画。本研究利用高精度人工鱼礁区 DEM 数据,基于地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析技术获取人工鱼礁宏观及微观特征参数,

按照交通运输部颁布的《多波束测深系统测量技术要求(JT/T 790—2010)》,利用多波束测深系统(R2Sonic 2024)对研究区进行全覆盖扫测,获取礁区高精度水深数据。多波束测深声纳系统采用发射换能器阵列向海底发射宽扇区覆盖的声波,经接收换能器接收窄波束,通过发射、接收扇区指向的正交性形成对海底地形的照射脚印,一次探测可获取垂面上百个甚至更多的海底水深值,快速准确地确定水下目标的形态特征^[18]。其工作原理如图 1 所示。

达到人工鱼礁水下物理状态定量评估的目的。

2.1 典型水深剖面对比

研究区海域投礁前为较为平坦的泥底质海底,西侧无礁石投放区可基本代表投礁前的海底地形。分别在无礁区与礁石投放区选取典型水深剖面,对比分析投礁前后水深变化特征。此外,利用穿过礁体的水深剖面对礁体周边微地形特征进行定量分析并探讨其成因。

2.2 地形特征变量提取

采用美国国家和大气管理局海岸服务中心研发的 BTM(benthic terrain modeler)插件工具提取礁区坡度、曲率、粗糙度和地形起伏度等地形因子。其中,坡度表示表面从中心像元开始在水平方向和垂直方向上的变化率,坡度值越大说明地势越陡峭;曲率可理解为坡度的坡度,其值为正表明该像元的表面向上凸,反之向下凹,值为 0 说明表面是平的;粗糙度定义为单元曲面面积与投影面积之比,其值反映地形起伏变化或侵蚀程度;地形起伏度指在特定邻域范围内最高点与最低点的高程差。不同的地形因子在一定程度上能够从不同角度表征海底地形的破碎程度和异质特征。

2.3 投礁空方量估算

填挖方分析用于计算填挖三维面与模型图层或地形图层之间的填挖量^[19],可利用工程前后的

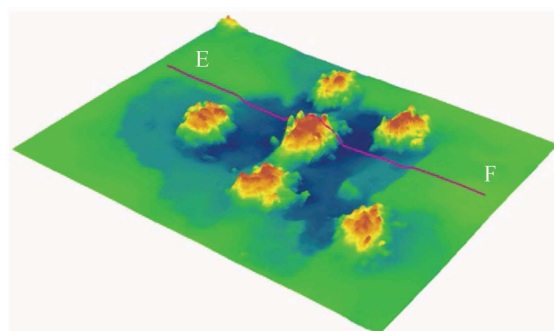
DEM 相减得到。由于研究区缺乏投礁前的 DEM 数据且人工鱼礁投放数年后,礁体周边地形已发生较大变化,为了估算现阶段投礁空方量,本研究将礁体分布区的边界水深作为理论海底底界面,构建不同礁体分布区的理论海底 DEM^[20],对比多波束实测海底 DEM,计算获取空方量。

具体流程如下:①在对礁区高精度多波束地形数据解译的基础上,结合鱼礁的形态及分布特征对海底礁体进行辨识,利用 GIS 矢量化及空间分析工具(掩模裁剪)提取研究区各人工鱼礁矢量斑块及其栅格 DEM 数据;②结合人工鱼礁矢量斑块及其栅格 DEM 数据,利用属性提取及区域统计工具,提取、计算各鱼礁斑块面积、鱼礁高度等信息;③将鱼礁斑块矢量数据转换为栅格数据,高程值为斑块边界的最大水深值,网格大小与栅格 DEM 数据一致,即得到理论海底 DEM;④利用人工鱼礁栅格 DEM 及理论海底 DEM,通过填挖方空间分析工具计算得到人工鱼礁斑块的空方量。

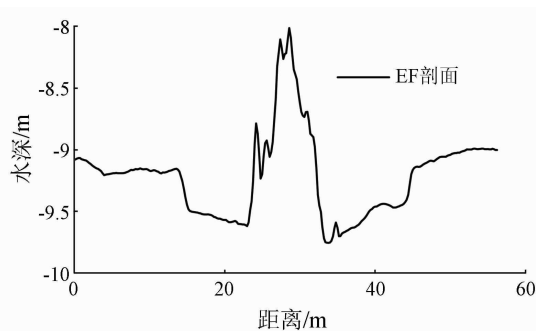
3 结果与分析

3.1 人工鱼礁区地形特征分析

研究区典型试验区面积为 5.13 万 m^2 ,由于礁石的存在,礁石投放区地势起伏较大,地形复杂多变,无礁区地形相对平坦。高精度 DEM 数据如图 2 所示,该区域水深在 $-9.92 \sim -6.73 \text{ m}$,礁石投放规模较大,投礁分布散乱无序。该处人工鱼礁主要成分是花岗岩开山石,石块礁体在海底大多堆砌成堆,礁堆间距离不一,个别礁堆连在一起,少量礁石散布在礁堆周边,且礁体周围出现明显的沉降冲刷现象。



(a) 礁体三维地形



(b) EF 水深剖面

图 4 礁体三维地形及水深剖面

Fig. 4 Three-dimensional topography and water depth profile of the reef

EF 剖面显示,该处鱼礁高度为 1.75 m,鱼礁沉降深度约为 0.5 m。此外,礁体西侧沉降冲刷影响范围约 9 m,而东侧影响范围约 11 m。受人工鱼礁自身重力及局地水动力作用,礁区形成了其特有的不规则“碗状”地形。

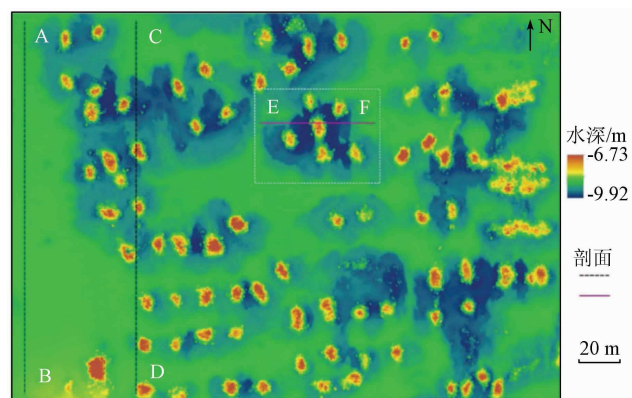


图 2 人工鱼礁试验区 DEM

Fig. 2 DEM data of artificial reefs study area

AB 剖面可近似认为投礁前的水深剖面,与礁区的 CD 水深剖面对比(图 3)发现,人工鱼礁投放后,原本平坦的海底地形(约 9 m 水深)变得起伏多变,CD 剖面水深值介于 $-9.55 \sim -7.83 \text{ m}$ 之间。

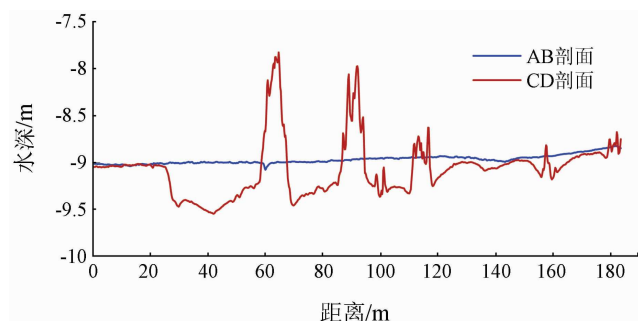


图 3 无礁区和礁区水深剖面对比

Fig. 3 Comparison of depth profile between reef-free and reef area

为进一步了解礁体周围的微地形特征,选取穿过礁堆的 EF 剖面,对其进行定量分析。从三维地形及 EF 水深剖面(图 4)可以看出,人工鱼礁有显著的沉降现象,礁体周围冲刷明显,且冲刷程度不一。

地形特征变量的计算结果(图 5)表明,礁石分布区和无礁区的地形特征变量具有显著的差异性。人工鱼礁分布区的坡度、曲率、粗糙度以及地形起伏度均表现出高值,而平坦的无礁区其坡度、粗糙度和地形起伏度则表现出低值。据此,可将人工鱼礁进

行辨识提取。值得注意的是,坡度及地形起伏度在识别“碗状”地形的边界方面较曲率、粗糙度表现更

为突出。尤其是坡度变量,能够清晰地勾勒出礁体引起的沉降冲刷范围。

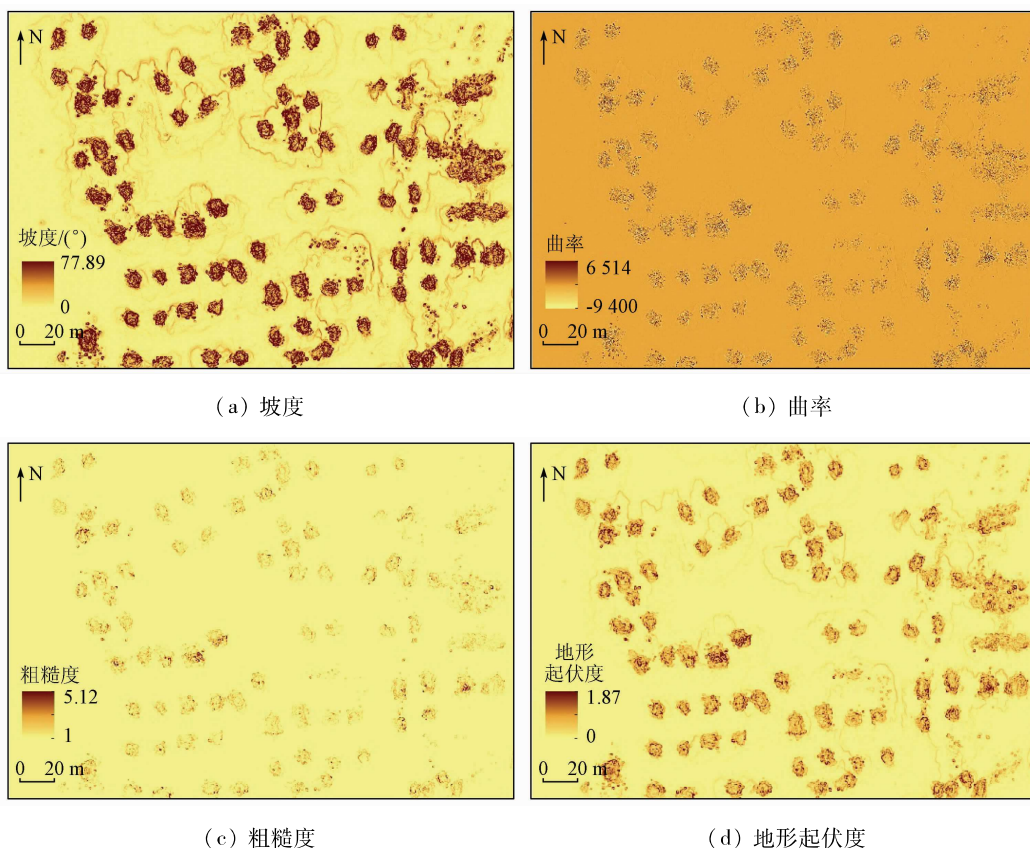


图5 礁区地形特征变量

Fig. 5 Variable terrain features of artificial reef area

以坡度为例对该区地形特征变量进行统计分析。结果显示,该区域坡度范围为 $0^{\circ} \sim 77.89^{\circ}$,坡度分布为明显的单峰正偏态分布特征(图6),约75%的区域其坡度小于 5° ,而坡度大于 30° 的区域仅占6.37%。由此进一步说明投礁前该海域海底较为平坦,鱼礁投放后在海底或堆砌成堆或散乱分布,造成礁石分布区地势起伏多变,坡度高值区多集中在人工鱼礁堆积处。

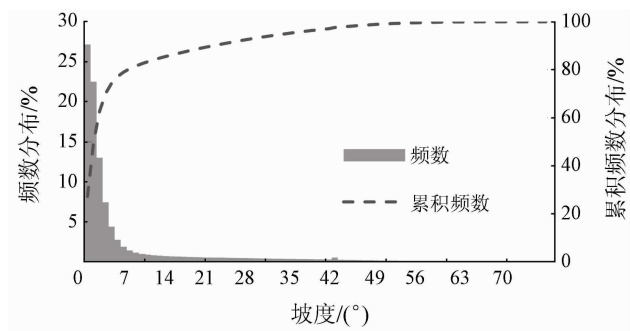


图6 礁区坡度统计

Fig. 6 Slope statistics of artificial reef area

3.2 投礁空方量

利用礁区高精度 DEM 数据,结合礁体实际形态特征,试验区共识别解译出 89 处人工鱼礁斑块(图7),斑块多为不规则形状,其分布并无明显规律。

经统计,试验区礁体斑块面积共计 $7\,537.96\text{ m}^2$,占该区总面积的14.69%,其中,礁体斑块面积最大值为 665.40 m^2 (编号73),面积最小值为 12.48 m^2 (编号71)。

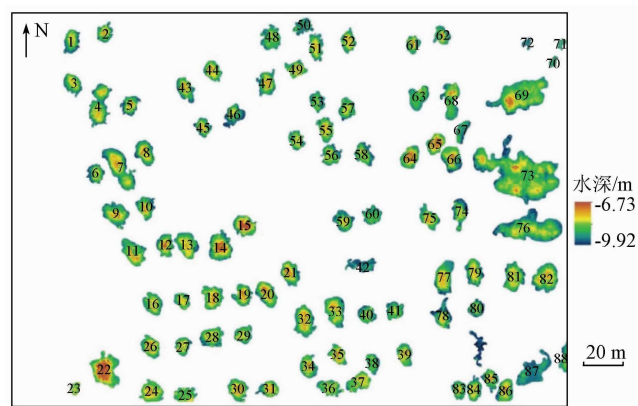


图7 人工鱼礁斑块提取

Fig. 7 Artificial reef patch extraction

尽管该区礁体斑块面积存在较大差别,但山石堆砌构成的礁体高度差异并不十分明显,将礁体斑块中最大水深与最小水深之差定义为礁体高度,其高度分布呈正态分布特征(图8)。礁体斑块中最大水深多分布在斑块边缘,而最小水深多集中在斑块中央位置。各人工鱼礁斑块中最大高度为 2.77 m

(编号 14),最小高度为 0.44 m(编号 71),平均高度为 1.59 m,礁体高度中位数为 1.61 m,标准差为 0.39 m,50%的礁体高度在 1.48 ~1.82 m 之间。

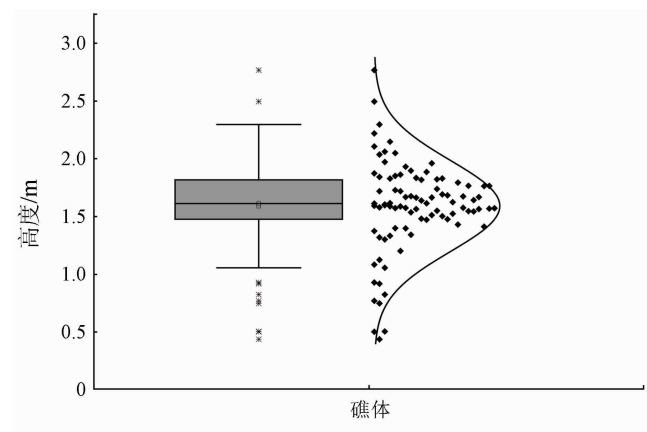


图 8 礁体高度统计
Fig. 8 Artificial reef height statistics

基于该区各人工鱼礁斑块最大水深值构建各斑块理论海底 DEM,结合人工鱼礁实测 DEM,利用填挖方计算方法获取各礁体堆的空方量。部分鱼礁斑块统计信息如表 1 所示。结果显示,该区礁体空方量共计 5 458.49 m³,由于各礁堆的礁体高度差异不大,礁体空方量与礁体斑块面积呈正相关关系,各礁石堆中最大空方量为 522.11 m³,最小空方量为 1.95 m³,分别对应斑块面积最大值(编号 73)与最小值(编号 71)的礁石堆。

表 1 部分鱼礁斑块统计信息
Tab.1 Statistics of some artificial reef patches

编号	斑块面积 /m ²	最大水深 /m	最小水深 /m	平均水深 /m	空方量 /m ³
1	69.2	-9.50	-7.91	-8.82	46.92
2	52.16	-9.46	-7.85	-8.71	39.33
3	65.16	-9.39	-8.02	-8.77	40.16
4	140.76	-9.92	-7.81	-8.75	164.16
...	...	...	...	...	...
44	50.96	-9.49	-7.98	-8.73	38.17
45	72.92	-9.60	-7.78	-8.95	47.44
46	79.84	-9.39	-7.78	-8.73	52.66
...	...	...	...	...	...
88	40.48	-9.34	-8.28	-8.93	16.64
89	42.92	-9.58	-8.75	-9.38	8.33
合计	—	—	—	—	5 458.49

4 讨论

4.1 人工鱼礁区特殊地形成因探讨

作为外来底质,大规模人工鱼礁投放后对海底最直接的影响便是迅速、显著地改变了礁石投放区原始的地形地貌特征。人工鱼礁建设使得原本平坦的海底变得崎岖不平,试验区由投礁前的约 -9 m

水深变为 -9.92 ~ -6.73 m,地形特征变量如坡度、曲率、粗糙度以及地形起伏度等在礁石投放区均呈现为高值。

礁区高精度 DEM 数据显示,该区域特殊的“碗状”地形广泛分布于投礁周边。前人研究表明,除礁石自身结构及重力作用外,海底底质及局地水动力环境是礁体周围出现冲淤特殊地形现象的主要因素^[21]。鱼礁对水流的阻碍作用导致礁体周围压力场发生变化,形成新的流场分布;底床泥沙颗粒在水流作用下被冲刷、搬运形成堆积,严重时导致鱼礁底部掏空,继而发生沉陷甚至被掩埋^[22]。在该人工鱼礁投放区的水动力定点观测资料^[23]中发现,该海域潮流为典型的往复流,潮流主向为 NNE - SSW 向。由于人工鱼礁的大量存在,海底摩擦增加,水流流速大小随深度增加显著降低,底层流速较表层降低约 30%,同时,人工鱼礁的大面积投放,造成底层各分潮的最大流速方向发生变化,这在一定程度上促进了礁区微地形地貌的发育。试验区礁体高度多在 1.5 m 左右,随着海水往复运动,礁体对海流的阻滞作用使礁区流速相对变大,造成该试验区在潮流主向方向即 NS 向的冲刷程度明显大于 EW 方向(图 2)。值得注意的是,试验区水深值大于 9.5 m 的区域多集中在礁石堆之间,可推测,相邻礁体斑块之间形成的“峡道效应”,导致局地流速增大,逐渐形成了特殊的礁区“深槽”。一般而言,人工鱼礁在软底质投放后,需要 6 ~ 7 a 才能达到平衡^[24]。因此,定期对人工鱼礁水下物理状态进行精确监测,才能明晰礁区特殊地形的形成过程。

4.2 人工鱼礁科学监管的启示

截至 2022 年初,全国国家级海洋牧场示范区已达到 153 个,到 2025 年全国累计投放人工鱼礁将超 5 000 万 m³。目前人工鱼礁建设发展基本向好,但其在现代化建设、科学监测方面仍存在较多不足。部分地区出现一哄而上、盲目扩张的现象,不合理的礁石布放可能导致礁体大面积沉陷或礁区出现低氧现象等严重生态环境问题。很多工程“重头轻尾”,后期监测不到位,无法对其生态和经济价值进行科学评估。

人工鱼礁建设是一项投资巨大的复杂工程,为了保证人工鱼礁建设取得预期效果,必须在建设前、中、后各个时段进行全面监测、科学评估。因此,笔者提出以下建议,以期对人工鱼礁的科学监管提供一定参考。

1)人工鱼礁设计方面。研发可塑性强、稳定性好、性价比高的礁体模型,结合投放区水生生物的行为差异性及礁体稳定性,有针对性地设计鱼礁结构、

轮廓高度及空隙结构。

2) 流场效应模拟方面。对鱼礁流场效应进行三维立体数值模拟, 研究开口比、来流速度、迎流角度和礁高间距比等因素对人工鱼礁流场的影响特征和规律。

3) 监测体系建设方面。基于海洋声光综合探测技术对人工鱼礁区资源环境进行自动、长期、实时立体式监测, 建立包含鱼礁物理状态、礁区水文及气象条件的人工鱼礁区域性数据库, 利用人工智能技术开发礁区生态灾害预警预报专家决策系统, 实现人工鱼礁的可视、可测、可控、可预警。

5 结论

利用多波束声纳获取海底人工鱼礁水下物理状态, 效率高、表现直观、信息量大, 可较好地实现对投放礁体位置、分布、礁高、空方量及微地形特征的定量监测与评估。试验区内人工礁石散落分布, 海底地形崎岖不平, 地形特征变量的高值区均出现在礁石投放区域; 礁体高度集中在 1.5 m 左右, 投礁空方量与礁体斑块面积呈正相关关系; 礁区特殊“碗状”地形及“峡道效应”形成的“深槽”区与局地水动力环境密切相关。本研究可为人工鱼礁水下物理稳定性的监测与评估提供技术与数据支持, 具有较强的推广价值。

参考文献 (References):

- [1] Seaman W. Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 580 (1): 143 – 155.
- [2] 杨红生, 许帅, 林承刚, 等. 典型海域生境修复与生物资源养护研究进展与展望 [J]. *海洋与湖泊*, 2020, 51 (4): 809 – 820.
Yang H S, Xu S, Lin C G, et al. Research progress and prospects of restoration and resource conservation in typical sea areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51 (4): 809 – 820.
- [3] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展 [J]. *海洋渔业*, 2006, 28 (3): 257 – 262.
Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef [J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28 (3): 257 – 262.
- [4] Tynyakov J, Rousseau M, Chen M, et al. Artificial reefs as a means of spreading diving pressure in a coral reef environment [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2017, 149: 159 – 164.
- [5] 张立斌, 杨红生. 海洋生境修复和生物资源养护原理与技术研究进展及展望 [J]. *生命科学*, 2012, 24 (9): 1062 – 1069.
Zhang L B, Yang H S. Advances in principles and techniques of marine habitat restoration and biological resource conservation [J]. *Chinese Bulletin of Life Science*, 2012, 24 (9): 1062 – 1069.
- [6] 唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (8): 97 – 103.
Tang Y L, Long X Y, Wang X X, et al. Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (8): 97 – 103.
- [7] Schygulla C, Peine F. Nienhagen reef: Abiotic boundary conditions at a large brackish water artificial reef in the Baltic Sea [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29 (2): 478 – 486.
- [8] 刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 等. 基于 Ecopath 模型的崂山湾人工鱼礁区生态系统结构和功能研究 [J]. *生态学报*, 2019, 39 (11): 3926 – 3936.
Liu H Y, Yang C J, Zhang P D, et al. An Ecopath evaluation of system structure and function for the Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (11): 3926 – 3936.
- [9] Jiang Z, Liang Z, Zhu L, et al. Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 116: 236 – 241.
- [10] 沈蔚, 张守宇, 李勇攀, 等. C3D 测深侧扫声呐系统在人工鱼礁建设中的应用 [J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22 (3): 404 – 409.
Shen W, Zhang S Y, Li Y P, et al. The application of C3D bathymetry side scan sonar system in artificial reef construction [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22 (3): 404 – 409.
- [11] Hou Z, Chen Z, Wang J, et al. Acoustic impedance properties of seafloor sediments off the coast of Southeastern Hainan, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 1 – 7.
- [12] Li D, Tang C, Xia C, et al. Acoustic mapping and classification of benthic habitat using unsupervised learning in artificial reef water [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 185: 11 – 21.
- [13] 刘永虎, 刘敏, 田涛, 等. 侧扫声呐系统在石料人工鱼礁堆体积估算中的应用 [J]. *水产学报*, 2017, 41 (7): 1158 – 1167.
Liu Y H, Liu M, Tian T, et al. The application of side scan sonar system in volume estimation of stone artificial reef [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41 (7): 1158 – 1167.
- [14] 沈天跃, 章守宇, 沈蔚, 等. 现场海域人工鱼礁分布状态聚类分析 [J]. *水产学报*, 2015, 39 (9): 1350 – 1358.
Shen T Y, Zhang S Y, Shen W, et al. Cluster analysis on distribution status of artificial reefs in field sea area [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39 (9): 1350 – 1358.
- [15] 郭栋, 董婧, 付杰, 等. 基于双频识别声呐的东港大鹿岛人工鱼礁调查研究 [J]. *海洋湖泊通报*, 2018 (2): 41 – 48.
Guo D, Dong J, Fu J, et al. Artificial reef and fisheries estimation in Dalu Island based on dual frequency sonar [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018 (2): 41 – 48.
- [16] Yoon H S, Kim D, Na W B. Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2016, 120: 135 – 147.
- [17] 李东, 唐诚, 邹涛, 等. 基于多波束声呐的人工鱼礁区地形特征分析 [J]. *海洋科学*, 2017, 41 (5): 127 – 133.
Li D, Tang C, Zou T, et al. Terrain character analysis of artificial reefs area based on multibeam echo sounder [J]. *Marine Sciences*, 2017, 41 (5): 127 – 133.
- [18] Lurton X. Swath bathymetry using phase difference: Theoretical

- analysis of acoustical measurement precision[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(3): 351–363.
- [19] 徐志敏,林志勇,李雯静,等. 基于填挖方分析的 DEM 精度评价模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(8): 1167–1171.
- Xu Z M, Lin Z Y, Li W J, et al. DEM accuracy evaluation model based on cut fill method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(8): 1167–1171.
- [20] 徐国强,杜 军,田梓文,等. 近海海底不规则堆积体体积高精度量算技术与应用[J]. 海岸工程, 2017, 36(4): 30–36.
- Xu G Q, Du J, Tian Z W, et al. High precision measurement technology for the volume of submarine irregular accumulations in coastal waters and its application[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(4): 30–36.
- [21] Yun D H, Kim Y T. Experimental study on settlement and scour characteristics of artificial reef with different reinforcement type and soil type[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 448–454.
- [22] 王佳美,唐振朝,丁 玲,等. 基于水槽模型试验的人工鱼礁局部冲淤研究[J]. 南方水产科学, 2020, 16(6): 32–38.
- Wang J M, Tang Z Z, Ding L, et al. Study on local scour of artificial reef based on flume test[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(6): 32–38.
- [23] 邹 涛,张立斌,张 华,等. 基于长期定点观测资料的莱州湾人工鱼礁建设区局地水动力特征[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 280–289.
- Zou T, Zhang L B, Zhang H, et al. Hydrodynamic characteristics in the artificial reefing construction area in Laizhou Bay: Based on a continuous long-term observation[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(2): 280–289.
- [24] Ha H K, Maa P Y, Holland C W. Acoustic density measurements of consolidating cohesive sediment beds by means of a non-intrusive “Micro-Chirp” acoustic system[J]. Geo-Marine Letters, 2010, 30(6): 585–593.

Detection and assessment of the physical state of offshore artificial reefs

LI Dong^{1,2,3}, TANG Cheng^{1,2,3}, ZOU Tao², HOU Xiyong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences (Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences), Yantai 264003, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 3. Ocean Mega-Science Center, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Mastering the subaqueous physical state of artificial reefs (ARs) is critical for assessing the benefits of ARs. Tradition survey methods suffer shortcomings such as low efficiency and incomplete information and cannot meet the requirements for the precise monitoring of ARs. This study established a high-precision DEM (digital elevation model) of ARs using a multibeam sonar system. Meanwhile, this study conducted a quantitative analysis of the distribution, height, volume, and complex topographic features of ARs using the GIS (geographic information system) spatial analysis method. The high-precision DEM was tested in an offshore AR area in Shandong Province, obtaining the following results. The AR area has a water depth of $-9.92 \sim -6.73$ m. The ARs in the area are stacked in piles with different distances, with a total reef volume of $5\,458.49\text{ m}^3$. Meanwhile, 50% of the ARs have a height of $1.48 \sim 1.82$ m. The terrain characteristic variables such as slope, curvature, rugosity, and topographic relief intensively show high values in the reef distribution area. Affected by their own gravity and local hydrodynamic force, the ARs have a subsidence depth of about 0.5 m, leading to the formation of the special erosion and silting terrain around the ARs. This study can provide technical and data support for the monitoring and assessing the physical stability of ARs and thus is practically significant.

Keywords: artificial reef (AR); physical stability; multibeam sonar; GIS spatial analysis

(责任编辑: 陈 理)