

马鞍列岛人工鱼礁区海域底质特征及其承载力

罗含思, 沈敏, 林军*, 吴星辰, 刘洪生

(上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘要: 人工鱼礁是海洋牧场建设的重要组成部分, 科学的选址是人工鱼礁区建设的必要环节。通过对浙江嵊泗马鞍列岛人工鱼礁区备选海域附近采集的底质柱状样品的分析, 测得了每个站点底质柱样的粒度、含水率、天然密度等物理性质, 以及贯入强度、抗剪强度等力学性质。用谢帕德和福克沉积物分类法分析粒度结果, 发现所研究海域的底质由砂、粉砂、黏土构成, 粉砂含量最高, 主要以砂质粉砂为主。不同区域的底质因其粒度组分、孔隙率、天然密度等不同, 其含水率不同, 造成底质的承载力也不同。对底质物理性质与力学性质间的相关性分析表明, 底质的含水率与贯入强度、抗剪破坏强度均存在较强的线性负相关, 相关系数分别为-0.67和-0.64, 可作为人工鱼礁投放底质适宜性评估的重要依据。通过建立底泥含水率与粒度间的回归方程可为大面积的底质承载力研究提供科学依据, 并大幅降低调查的工程量。

关键词: 人工鱼礁区; 粒度; 含水率; 贯入强度; 抗剪强度; 底质承载力; 马鞍列岛

中图分类号: P 736; S 931.4

文献标志码: A

海洋牧场作为一种新型的海洋生物资源养护和开发方式^[1], 得到了许多海洋学家的认可。海洋牧场是指为增加海洋渔业资源而采用增殖放流和移殖放流的方法将人工培育或经人工驯化的生物种苗放流入海, 以海洋内的天然饵料为食物, 并营造适于鱼类生存的生态环境, 如投放人工鱼礁等^[2]。其中投放人工鱼礁是建设海洋牧场的主要内容, 主要起到修复和改善近海水域生态环境和养护海洋渔业资源等作用。人工鱼礁在不同底质下的状态会有所不同, 过重的鱼礁会在淤泥质底质中下陷过深, 过轻的鱼礁则会受海流或波浪冲击发生翻滚, 或者在砂质等底质中因强流冲刷而倾覆, 从而失去本身的生态作用并造成经济损失。因此, 探究底质对人工鱼礁的承载力, 可对鱼礁的设计和投礁的选址提供重要依据。本研究通过对嵊泗马鞍列岛人工鱼礁区备选海域附近的底质进行柱状采样, 测定不同区域底质的粒度、天然密度、

孔隙率和含水率等物理性质以及贯入强度、抗剪强度等力学性质, 并分析它们之间的相关性, 探究该海域底质承载力的分布特征, 为马鞍列岛海洋牧场人工鱼礁区的礁体设计和礁区选址提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

选定马鞍列岛海域附近9个人工鱼礁投放预选区为调查站点(图1, S1~S9), 使用大型柱状采泥器获得9个柱状泥样, 因不同区域底质沉积厚度不同, 各站点所得到的底质柱状样长度也不同(图2)。柱样最长为533 cm, 最短70 cm, 参照《GB12763.11-2007海洋调查规范第11部分: 海洋工程地质调查》^[3], 按20 cm间距截取各站点的柱状样品, 每个站点柱样海底表层以下1 m内都统一截为5段, 余下柱样每隔0.5~1.0 m截取两段(分别为20 cm)直到最底层, 最后截得9个站点的

收稿日期: 2018-05-09 修回日期: 2018-05-29

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303047); 嵊泗县海洋与渔业局委托马鞍列岛海洋牧场本底调查项目

通信作者: 林军, E-mail: jlin@shou.edu.cn

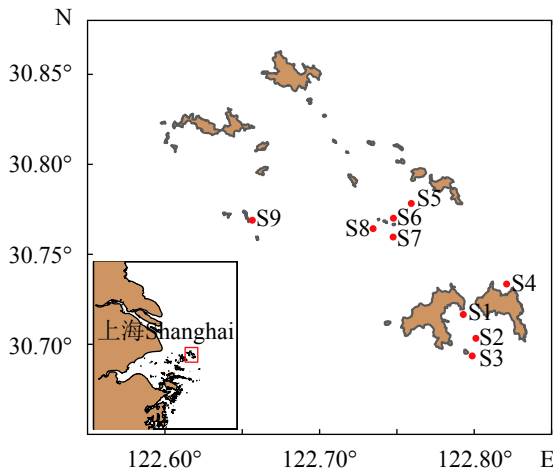


图 1 底质柱状采样站点图

Fig. 1 Sediment column sampling site map

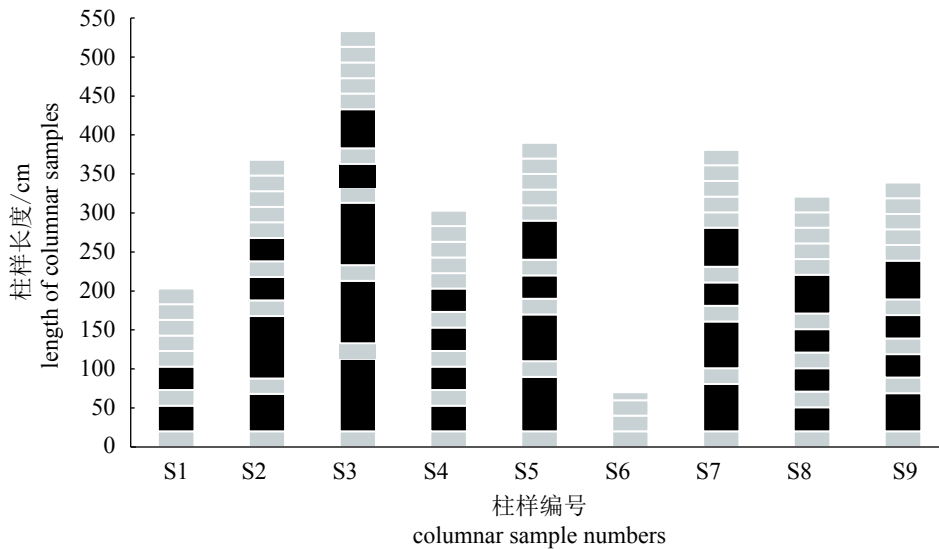


图 2 柱状样品处理示意图

柱内灰色黑色表示不同柱样长度

Fig. 2 Schematic diagram of columnar sampling

Gray black inside the column indicates different column lengths

入阻力值，取其最大值。用式(1)计算贯入强度。

$$P_a = \frac{P}{A} \times 10 \quad (1)$$

式中， P_a 为贯入强度，单位为kPa； P 为贯入仪读数，单位为N； A 为贯入探头面积，单位为 cm^2 。

1.3 抗剪强度实验

用削土刀轻轻抹平每截待测泥样表面，依据软硬程度估值选用不同大小的十字板头与不同强度的转动弹簧，并与电动十字板剪切仪连接；将十字板对准泥样中心，轻轻压入泥样直

底质表层1 m以内柱样44个，1 m以外余下的柱样31个，共计75个20 cm长的待测柱样(图2灰色部分)，并在每截柱样两端加盖密封盖，然后蜡封并用胶带缠裹保存待测；自上而下编号和标记，按原始上下直立的状态装入专用样品箱，每截待测柱样参照规范《GB 12763.8-2007海洋调查规范第8部分：海洋地质地球物理调查》^[4]分别做贯入强度实验、十字板抗剪强度实验，并测定含水率、原状土密度和粒度等参数。

1.2 贯入强度实验

选择半径为0.8 cm、面积为 2.01 cm^2 的贯入探头，与量程10 N的推拉力计接组为贯入仪；将贯入探头对准每截测样的中心，慢慢压入直至探头深入泥样；每贯入2 cm底泥深度记录一个贯

至十字板头底面与泥样接触，将指针拨至零点，以每分钟1圈的速度匀速旋转十字板，录像记录泥样变形时的刻度值与泥样剪损时的刻度值，继而取样测定底泥样品的粒度、含水率和天然密度等物理性质；用式(2)算出扭矩，再用式(3)算出抗剪强度。

$$M = \mu \cdot \theta \quad (2)$$

$$C_u = \frac{2}{\pi D^2 \left(\frac{D}{3} + H\right)} M \quad (3)$$

式中， μ 为弹簧的标定系数，单位为 $\text{N}/(\circ)$ ； θ 为指

针转动的度数($^{\circ}$); M 为扭矩,单位为N; D 为板头宽度,单位为m; H 为板头高度,单位为m; C_u 为抗剪强度,单位为Pa。

1.4 含水率测定

取每截柱状泥样15~30 g,放入称量盒,盖好盒盖,用测量精度为0.01 g的天平称量;揭开盒盖,将试样连盒放入烘箱,在温度100~105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重;烘干后的试样,放入干燥器内冷却至室温,盖好盒盖,称重。含水率计算公式:

$$\omega = \left(\frac{m_w}{m_d} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中, ω 为含水率,单位%; m_w 为湿(原状)土质量,单位为g; m_d 为干土质量,单位为g。

1.5 天然密度测定

采用环刀法测定每截20 cm的柱样的天然密度,规定被取样品的厚度大于环刀高度0.3~0.5 cm。环刀涂薄层凡士林,放在柱样上,其圆心对准柱样中心;将环刀垂直下压,边压边用钢丝锯削去外围杂质直至所测泥样伸出环刀上边界为止,削平环刀两端余泥,并将环刀外壁擦净,用测量精度为0.01g的天平称重;用式(5)算出天然密度:

$$\rho = \frac{m_w}{V} \quad (5)$$

式中, ρ 为原状土密度,单位为 g/cm^3 ; m_w 为原状土质量,单位为g; V 为环刀容积,单位为 cm^3 。

1.6 粒度测定

粒度采用马尔文M2000激光粒度仪测定:取原状土样品数克置入玻璃杯中,加纯净水、0.5 mol/L的六偏磷酸钠($[\text{NaPO}_3]_6$)5 mL;浸泡样品24 h,并每隔8 h轻轻搅拌1次,使样品充分分散;将浸泡样品全部倒入激光样品槽中,超声振动并高速离心,使样品再次充分分散;测定各粒级的颗粒数百分比;测定过程中,要求结果的误差小于3%、遮光度小于30%。

2 结果

2.1 底质物理性质

对9个站点共计75个样品进行实验分析,测得各物理和力学性质参数,(表1)所列为每个站点的1 m深度以内样品($n=44$)的实验参数。分别

对粒度分布、含水率与天然密度、孔隙率进行分析,得出该海域底质以粉砂为主。

粒度分布 通过激光粒度仪测得75段柱状沉积物粒度结果,结合沉积物分类法中的福克(Fork)法与谢帕德(Shepard)法对沉积物类型进行分析^[5-10]。

根据对采样点样品粒度测量结果的分析,全部样品中值粒径(粒径分布曲线上小于该粒径的土粒质量占土的总质量的50%对应的粒径)最大值出现在砂和粉砂占比均较高的S6站点,为49.78 μm ,中值粒径最小值出现在砂含量占比最小的S1站点,为19.47 μm 。将实验样品的粒径分布按照谢帕德三角形法进行分类,即砂(2.000 0~0.062 5 mm)、粉砂(0.062 5~0.003 9 mm)和黏土($< 0.003 9$ mm)占样品百分比进行分类^[10]。大部分样品集中在粉砂占比较大的一角,说明粉砂含量最高。而从三者之间的百分比组成可以细分为粉砂、砂质粉砂和黏土质粉砂三类,其中砂质粉砂类沉积物占比最多。砂占比的最大值在S5站点底层,达到43%,最小为S1站点表层,为6.68%;粉砂在S5站点3 m深柱状样中达到最大,占到78.28%;最小值也在此站点的底层,为47.9%;黏土占比最大值在S9站点表层,达到18.28%,最小值在S5站点的2 m深处,为7.66%(图3)。三角中央区域的“砂—粉砂—黏土”是三端元(基于沉积物粒度组成的砂—粉砂—黏土三元分类法)含量均高于20%而低于60%的混合类沉积物,在本次采集的样品中并没有体现。

谢帕德三角分类法是纯粹的描述性分类法,3个组分完全等价,可以作沉积物的客观描述,它没有考虑沉积物的运动特性,也不具有动力学意义^[9]。福克三角形分类法采用Udden-Wentworth粒度划分标准^[11],将沉积物分为10类,其砂、粉砂和黏土组分的粒径判定范围与谢帕德分类法一致,但三个角的端元组分并不等价,第一级为平行于砂端元的平行线,即为砂/泥比线,其比值可以反映介质动力学性质;第二级为通过砂端元的放射线,即粉砂/黏土比线,其比值和含量可以反映介质的浑浊度^[9]。

所测站点样品在福克法分类中绝大多数属于砂质粉砂类沉积物,砂/泥比值绝大部分为10%~50%,而粉砂/黏土比值皆大于2:1,表明

表 1 马鞍山列岛人工鱼礁区底质沉积物物理与力学性质参数

Tab. 1 Sediment parameters of physical-mechanical properties in the artificial reef areas of Ma'an Archipelago

站点(样品数) sites(number of samples)	砂含量/% sand content	粉砂含量/% silt content	黏土含量/% clay content	中值粒径/ μm median grain size	含水率/% water content	容重/(g/cm^3) bulk density	天然密度/(g/cm^3) natural density	孔隙率 porosity	贯入强度/kPa penetration strength	抗剪变形强度/kPa shear strength of deformation	抗剪破坏强度/kPa shear strength of failure
S1(5)	14.71 \pm 5.68	67.23 \pm 4.85	17.34 \pm 1.56	21.42 \pm 2.96	40.41 \pm 1.67	1.72 \pm 0.03	1.69 \pm 0.04	0.67 \pm 0.04	35.96 \pm 5.36	4.81 \pm 1.34	24.43 \pm 8.21
S2(5)	22.61 \pm 1.77	62.56 \pm 1.37	14.46 \pm 0.97	26.75 \pm 1.32	42.93 \pm 2.32	1.70 \pm 0.07	1.66 \pm 0.07	0.69 \pm 0.02	24.17 \pm 7.91	6.25 \pm 3.94	26.02 \pm 5.8
S3(5)	20.37 \pm 4.48	64.27 \pm 3.85	14.12 \pm 0.89	28.01 \pm 1.67	39.83 \pm 2.98	1.73 \pm 0.07	1.74 \pm 0.04	0.68 \pm 0.05	26.21 \pm 8.44	3.47 \pm 1.24	24.32 \pm 8.14
S4(5)	24.09 \pm 0.81	60.71 \pm 0.65	14.95 \pm 0.69	27.65 \pm 1.28	42.24 \pm 2.4	1.69 \pm 0.05	1.65 \pm 0.02	0.68 \pm 0.03	22.23 \pm 8.20	6.00 \pm 5.78	18.24 \pm 16.03
S5(5)	22.81 \pm 1.59	62.21 \pm 1.35	14.06 \pm 0.46	28.93 \pm 1.02	40.27 \pm 1.69	1.93 \pm 0.05	1.73 \pm 0.04	0.69 \pm 0.02	18.53 \pm 2.72	9.60 \pm 5.58	19.20 \pm 7.39
S6(4)	25.01 \pm 11.17	62.93 \pm 10.00	12.06 \pm 1.34	33.88 \pm 10.35	26.97 \pm 0.86	2.37 \pm 0.04	2.00 \pm 0.06	0.52 \pm 0.03			
S7(5)	20.87 \pm 4.10	65.02 \pm 3.26	15.26 \pm 1.12	28.43 \pm 2.35	36.21 \pm 2.04	2.16 \pm 0.07	1.91 \pm 0.06	0.66 \pm 0.03	37.30 \pm 12.58	1.73 \pm 4.36	32.96 \pm 7.32
S8(5)	16.63 \pm 2.41	68.14 \pm 2.13	15.58 \pm 0.71	24.60 \pm 1.12	35.16 \pm 1.39	1.83 \pm 0.03	1.71 \pm 0.07	0.59 \pm 0.03	35.61 \pm 3.75	5.79 \pm 1.47	47.47 \pm 8.95
S9(5)	14.16 \pm 1.41	69.89 \pm 1.84	16.67 \pm 1.00	23.52 \pm 1.04	37.08 \pm 1.15	1.83 \pm 0.11	1.71 \pm 0.09	0.61 \pm 0.04	30.64 \pm 8.22	3.82 \pm 2.39	36.43 \pm 7.34

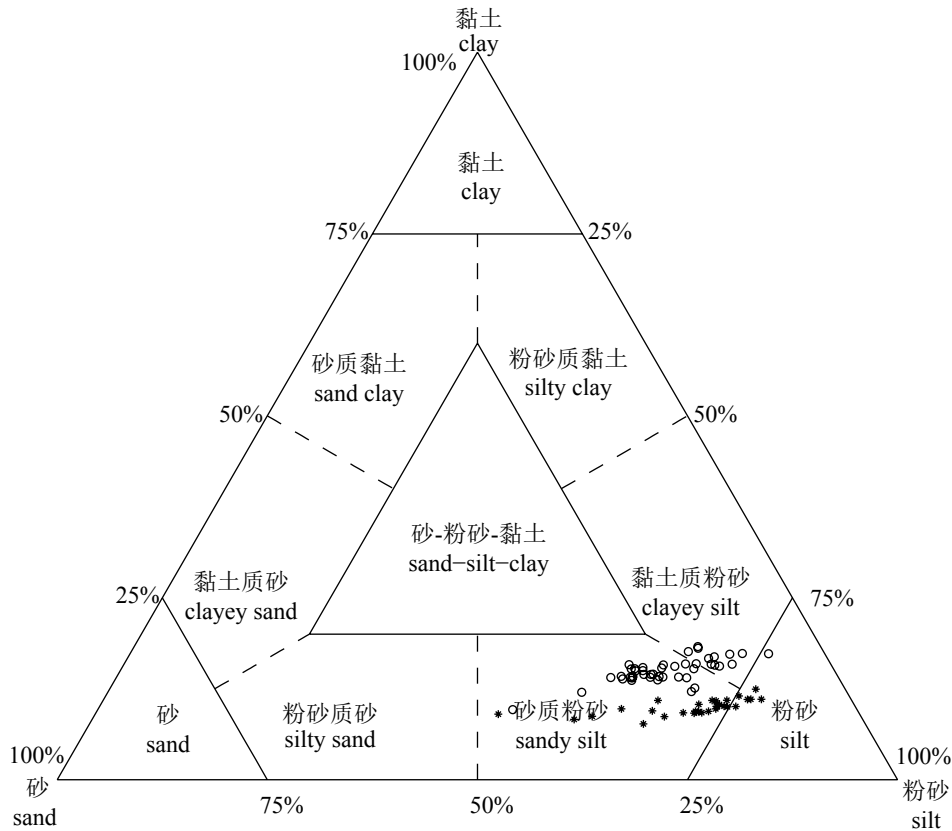


图 3 谢帕德法分类

○.表层1 m内柱样, *.表层1 m以下柱样, 下同

Fig. 3 Classification of Shepard's method

○. sample of the surface 1 m, *. sample of beneath 1 m, the same below

在鱼礁区沉积物中, 砂质粉砂占比最多, 分布也最广(图4)。砂质粉砂占比多则表明为弱水动力机制, 粉砂/黏土比值反映了水体扰动度较大^[12]。几乎所有表层测样均位于泥线(砂:泥=1:9)以上, 说明马鞍列岛岛礁附近以粉砂质递变悬浮组分为主, 夹杂极少量的黏土质均匀悬浮组分。根据每个站点的砂、粉砂和黏土三类粒度从表层到底层的占比组成, 均反映了黏土组分随深度增加而减少, 粉砂所占比重逐渐增加的沉积特性。

含水率与天然密度 含水率反映沉积物的含水量, 与底质沉积物矿物类型、粒径组成和沉积厚度等相关。表层1 m以内柱状样品的含水率均值为38.2%, 各站点含水率除S6站点相对较低外, 变化幅度在7个百分点以内, 表明在人工鱼礁区域沉积厚度为1 m的范围内, 底质含水率较为一致, 结合沉积物以砂质粉砂类为主, 且黏土组分由表层随深度增加逐渐减少, 符合

沉积特性, 与近岸底质沉积物百分之几十的典型含水率相近^[13]。样品天然密度为1.62~2.07 g/cm³, 平均密度为1.75 g/cm³, 除S6站点密度相对较高外, 其他站点均比较接近, 随深度增加, 密度逐渐增大, 由于垂向的尺度范围较小, 增加的幅度也较小。与近海沉积物的平均密度2.0 g/cm³^[14]相比略低, 基本符合近岸沉积物密度特性。

孔隙率 孔隙率与沉积物的矿物类型、粒径组成等相关, 不同海洋环境底质的孔隙率也不相同。本次采样各站点底质沉积物的孔隙率范围为0.49~0.76, 均值为0.65。该海域具有以粉砂占比最多的特点, 所以也表征了以粉砂占比为主的底质孔隙率的范围。

2.2 底质的力学性质

贯入强度 研究人工鱼礁区底质承载力, 就必须对底质沉积物进行力学分析, 贯入强度实验可以分析底质对人工鱼礁的承载受力情况。由表1可知, 研究区域各站点的贯入强度

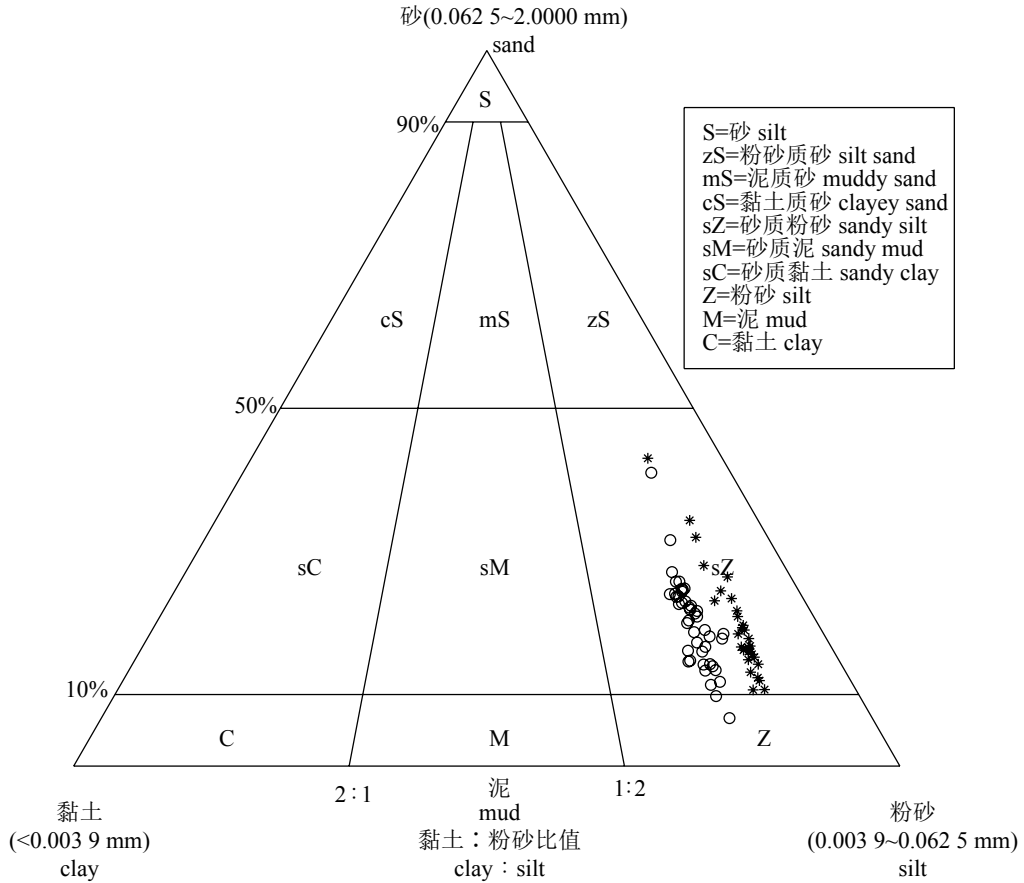


图 4 福克法分类

Fig. 4 Classification of Folk's method

范围为9.20~45.91 kPa, 均值达到27.66 kPa, 其中变化最大的站点为S7站点, 由表层到1 m深度的贯入强度差异达到29 kPa。以S7站点为例, 各站

点贯入强度和抗剪破坏均在表层较小, 随深度增加而线性增加(图5)。表明在底部部分礁体沉降以后, 礁体将得到下层底质更强的承载力支撑。

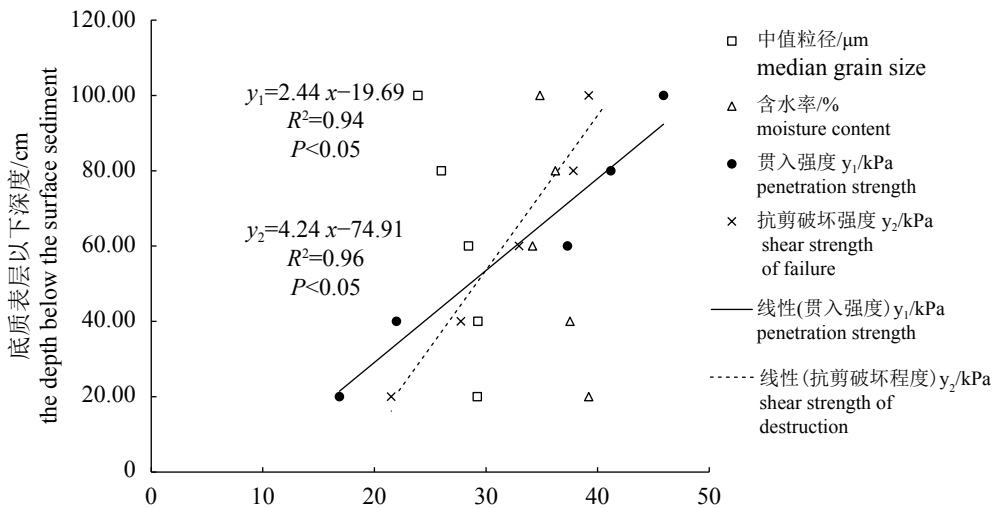


图 5 表层以下1 m底质的中值粒径、含水率和贯入强度、抗剪破坏强度随深度的变化

Fig. 5 changes of median grain size, moisture content, penetration strength and shear strength of failure with depth of 1 meter below the sea bottom surface

抗剪变形强度与抗剪破坏强度 各站点的抗剪变形强度范围为1.73~16.80 kPa, 均值为5.92 kPa, 抗剪变形强度值随深度增加也呈上升的趋势(表1)。而抗剪破坏强度为6.48~52.11 kPa, 平均值为28.11 kPa, 与抗剪变形强度相似, 随深度增加而增大。总体分析, 底质沉积物抗剪破坏强度值相比较而言均大于抗剪变形强度, 由变形到破坏所受到的压强具有一定的缓冲区间, 说明底质沉积物具有一定的承载重物的能力。人工鱼礁下陷过程中, 与抗剪破坏强度的相关度大于抗剪变形强度。

贯入强度与抗剪强度大小都受颗粒间黏聚力、摩擦力等因素的影响, 具体包括沉积物密度、粒径分布及颗粒形状等。通常在含水率一定且较低的情况下, 黏土成分占比越多, 贯入强度与抗剪强度越大^[15]。

各项物理—力学性质相关性分析 海洋牧场建设中, 人工鱼礁投至海底若下陷过深(超过1 m)会造成礁体失效与经济损失, 现结合所测得底质表层1 m以内40个柱样(不含底质厚度小于1 m的S6站点)的粒度、含水率、天然密度、孔隙率等物理参数与贯入强度、抗剪强度等力学参

数做相关性分析。

由图6可知岛礁附近底泥表层1 m内的天然物理量(含水率、孔隙比)与底泥力学性质(抗剪破坏强度、贯入强度)均呈线性相关($P < 0.05$)。天然密度与力学参数呈弱线性正相关($P > 0.05$), 说明岛礁附近底泥的天然密度对其强度的影响不明显。岛礁附近底泥的含水率、孔隙比与强度均呈线性负相关, 表明岛礁附近底泥的力学性质随含水率、孔隙比的增大而降低。海底底泥一般由液体、固体和少量气体构成, 即底泥颗粒和夹在泥土颗粒空隙间的水与气体。孔隙比即为夹在泥土颗粒间的水和空气与泥土颗粒的体积比, 它是评价底泥强度的指标, 通常孔隙比越大, 颗粒间的体积就越大, 土质就越疏松, 反之越密实^[12]。孔隙比在工程地质中通常用来评价土的密度和允许承载力^[16]。马鞍列岛岛礁附近的底泥长期处于海底, 其底泥的空隙几乎被海水填满, 因此含水率、孔隙比对底泥的强度影响较大, 其中含水率与底泥贯入强度相关性最强, 关系式为 $y = -207.30x + 109.26$, $R^2 = 0.46$, 与抗剪破坏强度的线性关系为 $y = -249.26x + 126.22$, $R^2 = 0.43$ 。

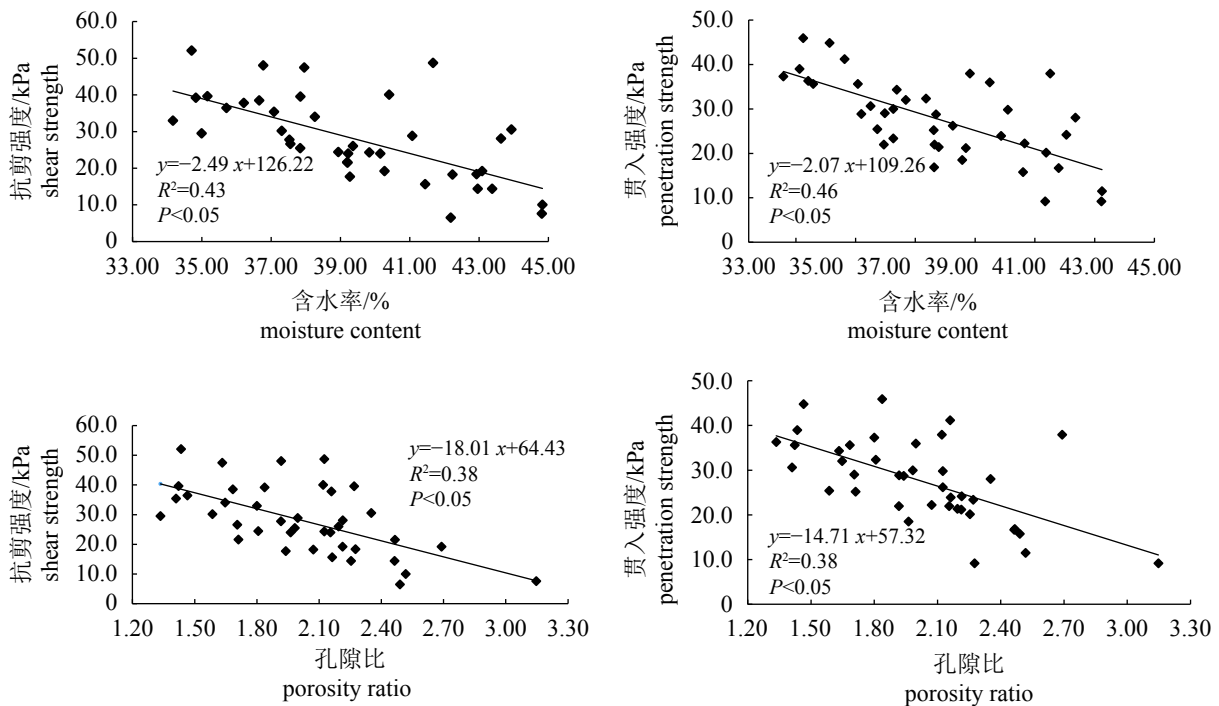


图 6 表层以下1 m底泥物理性质(含水率、孔隙比)与力学性质(抗剪强度、贯入强度)的关系(n=40)

Fig. 6 Relationship between physical property (moisture content, porosity ratio) and mechanical property (shear strength, penetration strength) of sediments 1 m below the sea bottom surface

底质的强度(贯入强度、抗剪强度)决定着底质承载力的大小^[16]。图7为底质表层1 m以内40个柱样的粒度参数(中值粒径、砂含量、粉砂含量、黏土含量)与底泥强度(贯入强度、抗剪强度)的关系,可知粒度参数(中值粒径、砂含量、

粉砂含量、黏土含量)与底质强度(贯入强度、抗剪强度)均为线性相关,其中,砂含量、含水率与贯入强度、抗剪强度呈线性负相关,表明底泥的砂含量增大,含水率增加,底质强度降低。粉砂、黏土的含量与贯入强度、抗剪强度

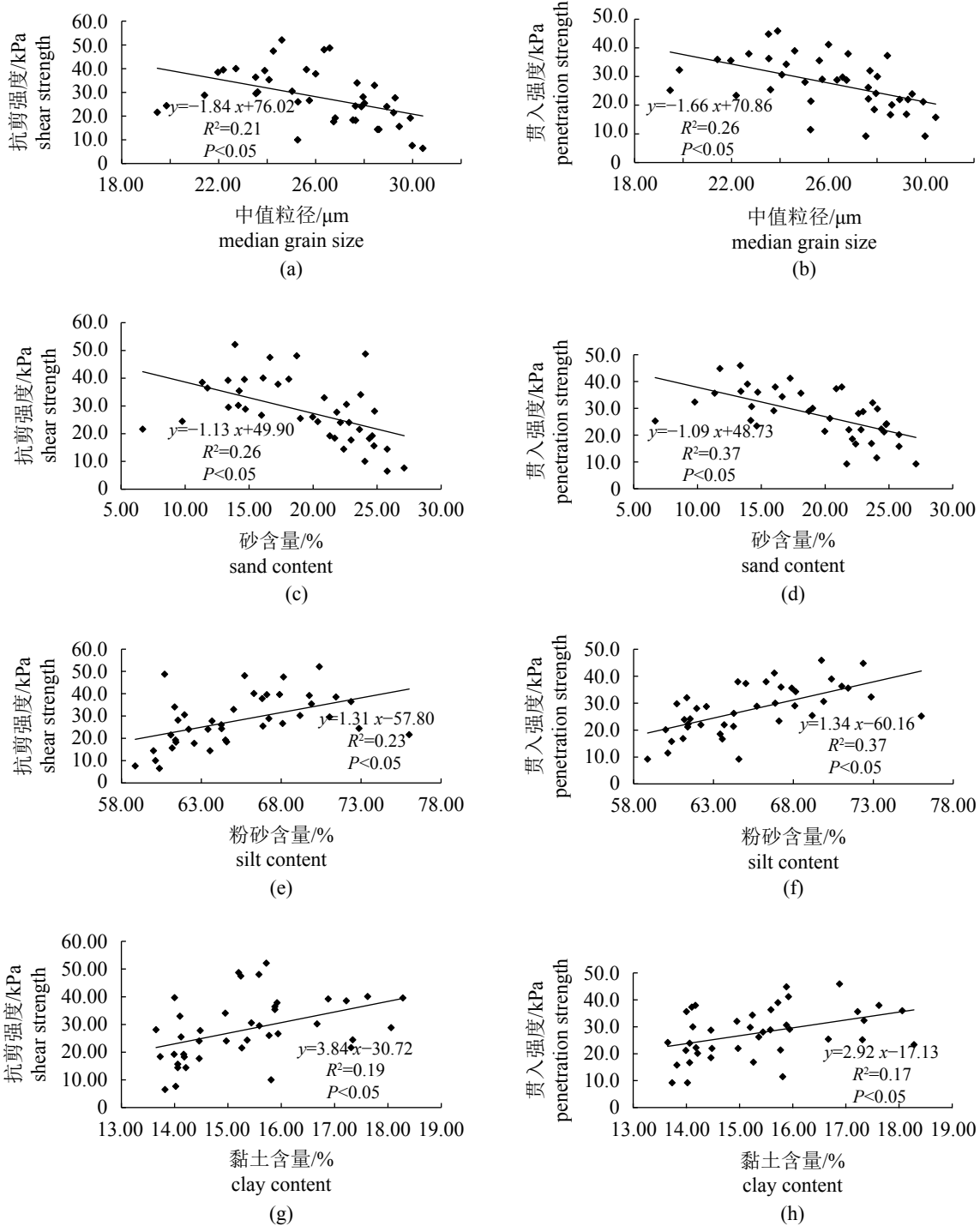


图7 表层以下1 m底泥粒度参数与力学性质的关系

Fig. 7 Relationship between sediment particle size parameters (median grain size, percentage of sand, silt, clay) and mechanical property (shear strength, penetration strength) 1 m below the sea bottom surface

呈线性正相关,表明粉砂、黏土含量的增多会使底质强度增大。因黏土含量占比较小,因此它与底质强度的相关性也最小(图7-g,图7-h)。

结合表2和图6、图7可知,含水率与孔隙率、孔隙比呈正相关,相关性较强,孔隙比决定含水率的大小,即孔隙比越高,底泥含水率越大。含水率又和砂、粉砂含量分别呈线性正相关和线性负相关,且相关性较强,因黏土占比较小,所以以下主要讨论含水率、砂含量、粉砂含量与底质力学性质的关系。

砂含量与贯入强度、抗剪破坏强度呈线性负相关,相关性较强,且砂含量与贯入强度的相关性($R=-0.61$)大于砂含量与抗剪破坏强度的相关性($R=-0.51$),这说明砂的颗粒间因单粒结构存在摩擦力^[17-20],但缺乏黏性,不能支撑底质自身的抗剪性,人工鱼礁沉底后,砂含量较多的底质易被礁体轻易破坏剪切,从而发生一定程度的下陷。砂为推移质,在较浅海域也会因强烈的波浪作用使得沙丘移动而覆盖礁体,因此在底质砂含量多的浅水海域,推移质组分超过一定阈值后则不适宜投放人工鱼礁。砂颗粒间的空隙则依次由粉砂、黏土、水来填补,随着深度的增加含水率减小,且砂、粉砂、黏土的含量百分比变化较小,因此底泥越往下才变得越来越密实。就岛礁附近的表层1 m内的底泥分析,粉砂含量、黏土含量与贯入强度、抗剪强度呈线性正相关($R>0.4$),由于粉砂、黏土存在由颗粒间的内摩阻力以及由胶结物和束缚水膜的分子引力所造成的黏聚力^[20],黏聚力越大底质强度越大,鱼礁至底后会受黏性作用而稳固。

含水率与贯入强度、抗剪破坏强度呈较强线性负相关。若含水率大过液限或达饱和含水率,底质黏性将会丧失,呈紊流状,从而致使底质失去承载力导致鱼礁下陷过深。因此,在马鞍列岛岛礁附近,底质含水率和砂含量越小,粉砂含量相对越高的区域,越适宜作为投礁区域。抗剪变形强度与各物理和力学性质参数均无明显相关性(表2)。

2.3 多元回归方程的建立和底质承载力的计算

岛礁附近底质的多元线性回归模型建立

由图6可知,含水率(x)与贯入强度(y)存在较强线性负相关,关系式:

$$y=-2.07x+109.26, R=-0.67, n=40, P<0.05 \quad (6)$$

含水率(x)与抗剪破坏强度(y)存在较强线性负相关,关系式:

$$y=-2.49x+126.22, R=-0.64, n=40, P<0.05 \quad (7)$$

两个线性关系式可用于评估该区域的底质强度,但在人工鱼礁建设过程中对底质的采样调查不仅花费时间、消耗财力与人力,尤其是采集柱状底泥的工程量巨大,加之海况的多变性会给海上作业添加更多难度,若能在某些易测易控和其他难测难控的要素间建立一种近似的函数表达式,则可较方便地了解难测难控要素的变化情况。利用回归分析法建立能够反映岛礁附近底质特征数学关系^[13,21]。由表2数据分析可得,影响岛礁附近底质承载力的最主要的物理因素是含水率和粒度,其多元线性回归模型:

$$y=0.0070x_1+0.0015x_2+0.0104x_3 \quad (8)$$

$$R^2=0.4550, n=40, P<0.05$$

式中, x_1 表示砂含量, x_2 表示粉砂含量, x_3 表示黏土含量, y 表示含水率。像这样通过对底质沉积物样品的粒度分析便可得相应底质的含水率的方式,能大幅度减轻底质调查的工程量,将式(8)的含水率(y)代入式(6)和式(7)中,求得抗剪强度和贯入强度两个因素,可为人工鱼礁建设提供科学依据。

底质承载力的计算与礁体设计 马鞍列岛泥地生境的底泥以粉砂和砂质粉砂为主,这也是长江口近海的最典型底泥构成。粉砂底质具有较好的承载力,通过礁体优化设计使礁体重量—触底面积之间的数量关系达到最优匹配时,可以最大限度减少礁体的下陷,且有限的下陷使礁体具有良好的抗滑移性。近海水深小于30 m的海域,在进行人工鱼礁选址时,要充分开展底质的调查,要避开砂为主的海底,选择承载力优良、含粉砂质比例高的底质;要选择表层浮泥薄,终年水体透明度较高的马鞍列岛东部海域,这些海域的年均自然沉积量较低,且具有相对较高的初级生产力。黏聚力通常代表底质颗粒相互黏结在一起的强度大小,一般可以用黏粒含量的多少(颗粒直径 <0.075 mm的粉砂粒径)来表征^[22],由粒度分布知岛礁附近的底质以粉砂(颗粒直径为0.062 5~0.003 9 mm)占比为主,说明粉砂质海域的底质承载力主要靠粉砂与黏土的黏聚力作用。因此对于马鞍列岛岛礁附近这种黏粒(颗粒直径 <0.075 mm)成分较高的

表 2 样品各项物理—力学性质的相关性

Tab. 2 Correlations of mechanics-physiocs properties of sediment samples

相关系数	砂含量/% sand content	粉砂含量/% silt content	黏土含量/% clay content	中值粒径/ μm median grain size	含水率/% water content	容重/(g/cm^3) bulk density	天然密度/(g/cm^3) natural density	孔隙率 porosity	贯入强度/kPa penetration strength	抗剪变形强度/kPa shear strength of deformation	抗剪破坏强度/kPa shear strength of failure
砂含量/% sand content	1.00	-0.98*	0.77*	0.89*	0.62*	-0.14	-0.07	0.66*	-0.61*	0.11	-0.51*
粉砂含量/% silt content		1.00	0.63*	-0.82*	-0.65*	0.14	0.05	-0.72*	0.61*	-0.12	0.48*
黏土含量/% clay content			1.00	-0.87*	-0.32*	0.10	0.12	-0.28	0.41*	-0.06	0.43*
中值粒径/ μm median grain size				1.00	0.34*	0.12	0.14	0.49*	-0.51*	0.03	-0.46*
含水率/% water content					1.00	-0.61*	-0.51*	0.79*	-0.67*	0.10	-0.64*
容重/(g/cm^3) bulk density						1.00	0.84*	-0.11	0.23	0.02	0.25
天然密度/(g/cm^3) natural density							1.00	0.12	0.25	-0.16	0.24
孔隙率 porosity								1.00	-0.60*	-0.01	-0.58*
贯入强度/kPa penetrating strength									1.00	0.08	0.70*
抗剪变形强度/kPa shear strength of deformation										1.00	0.27
抗剪破坏强度/kPa shear strength of failure											1.00

Notes: * $P < 0.05$, $n = 40$

粉砂质底质, 确定含水率与粒度之间的关系才是择优承载力的关键。

为减缓礁体沉降, 礁体设计时要考虑礁体总重和底质承载力之间的平衡。为防止礁体投放后在短期内沉降, 考虑礁体增设底板来增加承重, 以满足底质的承载要求, 并保留较大冗余量。按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)^[23]中的公式计算:

$$f_a = M_b r b + M_d r_m d + M_c c_k \quad (9)$$

式中, f_a 为由土和抗剪强度确定的地基承载力特征值; M_b 、 M_d 、 M_c 为承载力系数; b 为基础底面宽度; d 为基础埋置深度; r 、 r_m 为基础以下土的容重和基础底面以上土的加权平均容重; c_k 为短边宽度的深度范围内土的黏聚力标准值, 底泥的黏聚力越大其抗剪强度越大^[15, 22]。

在人工鱼礁的形状、尺寸、比重等尚不明确的前提下, 人工鱼礁基础承载力的计算可暂不考虑人工鱼礁礁体宽度 b 和埋置深度 d 因素, 底泥净承载能力计算可将公式(9)简化为公式: $f_c = M_c c_k$, 即不考虑礁体的底面结构宽度的影响, 也不考虑礁体下陷产生的阻力。记 $f_b = M_b r b + M_c c_k$, 即考虑礁体的底面结构宽度, 而不考虑礁体下陷产生的阻力。由以上分析和结果可知 $f_c < f_b < f_a$, 因此, 需要在礁体设计时要求满足 f_c , 可为设计要求保留冗余, 即表征底泥承载力最小值的 f_c 就可以满足对特定重量和底面积礁体的支撑。

9个站点中S4和S5站点的贯入强度和抗剪破坏强度平均值最小, 取整约18 kPa, 表明垂向的最低承载力约为1.83 t/m²(表1)。以嵊泗马鞍列岛人工鱼礁区拟投放的十字型鱼礁为例, 其单层礁和双层礁底面板全覆盖型号的底面积分别为12 m²和16 m², 据此则单层礁和双层礁重量最大可达21.96 t和29.28 t。为安全起见, 在礁体设计时需要使礁体重量小于上述重量。此外, 设置礁体底板本身会增加礁体重量, 可以在底板上开孔, 改善礁体下底质通气条件的同时, 使自重和底面积之间达到最优化。鉴于礁体重量大, 礁体投放后将挤压周边和下层的底质, 一定程度上将改变底质的天然属性, 且底质本身的自然承载力随着深度的增加而增强, 后续将对上述礁体投放对底质性质的改变等开展深入研究。

3 结论

嵊泗马鞍列岛人工鱼礁备选区附近的底质沉积物由砂、粉砂、黏土构成, 粉砂含量占比最大, 其次为砂含量, 主要以粉砂质递变悬浮组分为主, 底质类型多为砂质粉砂。

建立关键物理性质参数底质含水率与粒径之间组成的多元线性回归方程 $y = 0.0070x_1 + 0.0015x_2 + 0.0104x_3$, 可为该区域的人工鱼礁区初步选址提供科学参考, 且能大大减轻粉砂质海域底质本底调查的工作量。

贯入强度和抗剪强度标志着底质的强度, 底质的强度决定着底质承载力, 底质强度越大越能承受住人工鱼礁的重量, 底质黏性越大, 人工鱼礁触底后越稳固。马鞍列岛岛礁附近底质的砂含量越多、含水率越高的区域, 贯入强度与抗剪强度越低, 底质的承载力就越弱; 粉砂含量越高, 含水率越低的底质, 抗剪强度和贯入强度越大。含水率与贯入强度存在较强线性负相关: $y = -2.07x + 109.26, R = -0.67$; 含水率与抗剪强度存在较强线性负相关: $y = -2.49x + 126.22, R = -0.64$ 。通过所建立的线性关系可直接由含水率求得岛礁附近底质的贯入强度和抗剪强度, 为粉砂质海域大范围的人工鱼礁选址提供依据。

综上所述, 在开展人工鱼礁区选址本底调查的工作时, 首先可利用大型抓斗采泥器或箱式采泥器大范围高密度采集表层20 cm左右的底质样品, 20 cm一般是人工鱼礁工程要求的允许沉降的深度。测定大量表层底质样品的粒径组成以及部分样品的含水率, 建立本区域底质含水率与粒径的数学关系式, 参考底质贯入强度和抗剪破坏强度与含水率的数学关系式, 可初步选定备选礁区, 并大大降低后期的工作量; 在备选礁区中重点采集底质柱状样, 测定不同深度底质的粒径组成、含水率和贯入强度、抗剪强度, 综合分析确认底质的物理和力学性质, 作为科学选址的依据。

参考文献:

[1] 范江涛, 陈丕茂, 冯雪, 等. 人工鱼礁水动力学研究进展[J]. 广东农业科学, 2013(2): 185-188.

Fan J T, Chen P M, Feng X, et al. Advancement to the study on hydrodynamics of artificial reef[J]. Guangdong

- Agricultural Science*, 2013(2): 185-188(in Chinese).
- [2] 陈永茂, 李晓娟, 傅恩波. 中国未来的渔业模式-建设海洋牧场[J]. *资源开发与市场*, 2000, 16(2): 78-79.
Chen Y M, Li X J, Fu E B. The future pattern of fishery in China-constructing oceanic ranch[J]. *Resource Development and Market*, 2000, 16(2): 78-79(in Chinese).
- [3] GB/T 12763.11-2007海洋调查规范第11部分: 海洋工程地质调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 12763.11-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 11: Marine engineering geological investigation[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008(in Chinese).
- [4] GB/T 12763.8-2007海洋调查规范第8部分: 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 12763.8-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 8: Marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008(in Chinese).
- [5] GB/T 13909-1992海洋调查规范海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 71.
GB/T 13909-1992 Specification for oceanographic survey-Marine geology and geophysics investigation[S]. Beijing: Standard Press of China, 1992(in Chinese).
- [6] 何起祥, 李绍全, 刘健. 海洋碎屑沉积物的分类[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(1): 115-121.
He Q X, Li S Q, Liu J. Classification of marine clastic sediments[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 115-121(in Chinese).
- [7] 王中波, 杨守业, 张志珣. 两种碎屑沉积物分类方法的比较[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(3): 36-40.
Wang Z B, Yang S Y, Zhang Z X. Comparison between two classifications of clastic sediments[J]. *Marine Geology Letters*, 2007, 23(3): 36-40(in Chinese).
- [8] 王中波, 何起祥, 杨守业, 等. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 1-8.
Wang Z B, He Q X, Yang S Y, *et al.* Comparison and application of Shepard's and Folk's Classifications to the subsurface mapping in the south yellow sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(1): 1-8(in Chinese).
- [9] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. *Journal of sedimentary Petrology*, 1954, 24(3): 151-158.
- [10] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [11] Wentworth C K. A scale of grade and class terms of clastic sediments[J]. *The Journal of Geodesy*, 1922, 30(5): 377-392.
- [12] 刘飞. 粘性土的孔隙比与压缩系数之间关系的探讨[C]. 吉林省土木建筑学会2010年学术年会论文集. 吉林省土木建筑学会, 2010.
Liu F. To explore the relationship between cohesive soil void ratio and compression coefficient[C]. *Jilin Civil Engineering and Architectural Society*, 2010(in Chinese).
- [13] 朱超祁, 周蕾, 张红, 等. 南海北陆架坡表面沉积物的物理力学性质初探[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1566-1573.
Zhu C Q, Zhou L, Zhang H, *et al.* Preliminary study of physical and mechanical properties of surface sediment in northern south china sea[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(6): 1566-1573(in Chinese).
- [14] 马仲民. 地基承载力特征值修正公式中基底土重度取值之我见[J]. *黑龙江科技信息*, 2009(15): 268.
Ma Z M. My opinion on the heavy value of base soil in the modified formula of the characteristic value of foundation bearing capacity[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2009(15): 268(in Chinese).
- [15] 张金贵. 土的抗剪强度指标与主要因素[J]. *黑龙江水利*, 2008(4): 42-43.
Zhang J G. Shear strength index and main factors of soil[J]. *Heilongjiang Water Resources*, 2008(4): 42-43(in Chinese).
- [16] 中国大百科全书出版社编辑部编. 中国大百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985: 652.
Newsroom of Encyclopedia of China Publishing House. *Encyclopedia of China*[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1985: 652(in Chinese).
- [17] 徐建军, 王桂尧. 碎石土在公路建设中的应用[J]. *湖南交通科技*, 2006, 32(4): 33-36.
Xu J J, Wang G Y. Application of gravelly soil in highway construction[J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2006, 32(4): 33-36(in Chinese).
- [18] 张清. 土力学的关键问题探讨[J]. *煤炭技术*, 2010,

- 29(2): 211-214.
Zhang Q. Discussion on key issues of soil mechanics[J]. Coal Technology, 2010, 29(2): 211-214(in Chinese).
- [19] 李广信. 清华大学土木工程系列教材-高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 121.
Li G X. Tsinghua University Civil Engineering Textbooks-Higher Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 121(in Chinese).
- [20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 47-59.
Xu J H. Mathematical Methods in Contemporary Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 47-59(in Chinese).
- [21] 廖秋林, 曾钱帮, 刘彤, 等. 基于ANSYS平台复杂地质体FLAC3D模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010-1013.
Liao Q L, Zeng Q B, Liu T, *et al.* Automatic model generation of complex geologic body with FLAC3D based on ANSYS platform[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 1010-1013(in Chinese).
- [22] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 192.
Gao D Z. Soil Mechanics and Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 192(in Chinese).
- [23] GB50007-2011建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2011(in Chinese).

Sediment characteristics and bearing capacity in an artificial reef area of Ma'an Archipelago

LUO Hansi, SHEN Min, LIN Jun*, WU Xingchen, LIU Hongsheng

(College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Artificial reef is an important part of marine ranching, and the scientific site selection is a necessary step of artificial reef area construction. By columnar sampling in the alternative region of Ma'an Archipelago waters in Shengsi, Zhejiang Province, physical properties including particle size, moisture content, natural density, and mechanical properties of penetration strength and shear strength were analyzed. The results showed that the sediments were mainly composed of sand, silty sand and clay, and the main component is sandy silt. The bottom sediments of different regions are different because of their various particle sizes, porosity, natural density, etc., so the bearing capacity of sediments also is different. Correlation analysis between the physical properties and mechanical properties showed that the moisture content of sediment and penetration strength, shear strength of failure are very strong in linear negative correlation, and the correlation coefficients are -0.67 and -0.64 , respectively. These correlations could be used as an important reference for artificial reef sites suitability assessment. After the regression equation between sediment moisture content and particle size was established, it can provide a scientific basis for the analysis and research of sediment bearing capacity on a larger scale, also can reduce the cost of the investigation of sediment properties greatly.

Key words: artificial reefs; particle sizes; moisture content; penetration strength; shear strength; sediment bearing capacity; Ma'an Archipelago

Corresponding author: LIN Jun. E-mail: jlin@shou.edu.cn

Funding projects: Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303047); Marine Ranching Background Research Project, Funded by the Marine and Fishery Bureau of Shengsi County