doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.037

基于DEM-MBD仿真的滩涂贝类振动采收设备设计与试验

李航企[1,2] 张国琛[1,2] 刘法伟[1] 李秀辰[1,3] 王玉瑞[1] 母 刚[1,3]

（1. 大连海洋大学机械与动力工程学院，大连 116023；2. 沈阳农业大学工程学院，沈阳 110866；3. 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心，大连 116023）

摘要： 针对我国滩涂贝类机械化程度低、理论研究匮乏等问题，设计了一种履带式滩涂贝类筛-刷协同振动采收设备，设备采用双层振动筛-多级滚刷协同采收技术完成贝类挖掘、筛分、输送与分级等作业。以四角蛤蜊为研究对象，对双层振动筛与一级人字形双螺旋采收滚刷进行理论分析，推导其主要结构参数与运行参数范围。基于离散元法与多体动力学耦合仿真方法开展滩涂贝类振动采收仿真研究，确定设备关键结构参数：双层振动筛曲柄长度10 mm，一级人字形双螺旋采收滚刷螺旋升角30°。在辽宁省锦州市对样机开展滩涂贝类采收田间试验，以设备曲柄转速、一级人字形双螺旋采收滚刷转速、二级清理滚刷转速为试验因素，以贝类采收效率、破碎率与漏采率为试验指标完成滩涂贝类采收正交试验，求解设备运行参数最佳组合：曲柄转速为870 r/min、一级人字形双螺旋采收滚刷转速为65 r/min、二级清理滚刷转速为110 r/min，贝类采收效率为133.80 kg/h、贝类破碎率为5.25%、贝类漏采率为7.46%。采收后50 mm深滩涂底质剪切强度降低65.13%，稚贝回滩率为92.29%，有利于贝类可持续化养殖。该设备满足滩涂贝类采收生产需求，为我国滩涂贝类机械化采收装备的设计提供了参考。

关键词： 滩涂贝类；机械化采收；离散元法；多体动力学；田间试验

中图分类号： S972.69+1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-1298(2024)S2-0361-10

Design and Testing of Mudflat Shellfish Vibrating Harvester Based on DEM-MBD Simulation

LI Hangqi[1,2] ZHANG Guochen[1,2] LIU Fawei[1] LI Xiuchen[1,3] WANG Yurui[1] MU Gang[1,3]

(1. *College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*

2. *College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*

3. *Liaoning Provincial Marine Fishery Equipment Specialized Technology Innovation Center, Dalian* 116023, *China*)

Abstract: To address the challenges of low mechanization and limited theoretical research in shellfish harvesting on Chinese mudflats, a crawler mudflat shellfish mechanized brush-screen cooperative vibration harvester was designed for harvesting mudflats shellfish. This device integrated a double-deck vibrating screen and multi-stage roller brush system to efficiently excavate, screen, and transport shellfish. The white clam was used as the research object. The theoretical analysis of the double-deck vibrating screen and the first double-spiral harvesting roller brush were conducted and the key structural and operational parameters were then calculated. The mudflat shellfish harvesting single-factor test was conducted by using discrete element method (DEM) and multi-body dynamics (MBD) coupled simulations. The identified key structural parameters included a crank length of 10 mm for the double-deck vibrating screen and a spiral angle of 30° for the first double-spiral harvesting roller brush. The prototype was developed, and mudflat shellfish harvesting orthogonal field tests were conducted in Jinzhou City, Liaoning Province. The tests considered operational parameters such as crank rotation speed, the first double-spiral harvesting roller brush rotation speed, and secondary cleaning roller brush rotation speed. The optimal parameter combination was determined to be a crank rotation speed of 870 r/min, the first double-spiral harvesting roller brush rotation speed of 65 r/min, and secondary cleaning roller brush rotation speed of 110 r/min. Under

收稿日期：2024-07-13 修回日期：2024-09-06

基金项目： 国家重点研发计划项目(2023YFD2400800)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJ232410158048)、辽宁省本科高校基本科研业务费项目(2024JBPTZ002)和辽宁省教育厅项目(LJKFZ20220241)

作者简介： 李航企(1995—)，男，博士生，主要从事滩涂贝类机械化采收研究，E-mail: hangqi_li258@163.com

通信作者： 母刚(1982—)，男，正高级实验师，主要从事现代渔业设施装备研究，E-mail: mugang@dlou.edu.cn

these conditions, the device achieved a clam harvesting efficiency of 133.80 kg/h, a clam breakage rate of 5.25%, and a clam missing rate of 7.46%. Post-harvest, the shear strength of the mudflat at a depth of 50 mm was decreased by 65.13%, and the juvenile clam return rate was 92.29%, supporting the sustainable cultivation of shellfish. This device met the production requirements for mudflat shellfish harvesting and it can serve as a valuable reference for the mechanization of shellfish harvesting in China.

Key words: mudflat shellfish; mechanized harvesting; discrete element method; multi-body dynamics; field tests

0 引言

贝类养殖业是中国渔业的主导产业之一,养殖种类包括:菲律宾蛤仔、四角蛤蜊、文蛤等。2023年贝类养殖产量约为1.65×10^7 t,约占渔业养殖总产量的28.67%[1],为中国渔业养殖经济发展和地方经济做出了巨大贡献。滩涂是贝类的主要栖息地,2023年我国滩涂贝类养殖面积约为5.73×10^5 hm^2[1]。采收作为贝类养殖过程中的重要环节,采收效率直接影响贝类产量。

滩涂埋栖贝类(简称:贝类)传统采收主要依靠人工作业,存在劳动强度大、工作效率低、成本高等缺点,已不适用于滩涂贝类规模化养殖。目前贝类采收装备根据原理可分为水力采收和机械采收两种方式[2]。水力采收主要利用高压水流将底质冲散,然后通过带有耙齿的网具收集贝类,主要分为:水耙式[3]、扶梯式[4-5]、拖曳式[6-9]和抽吸式[10-13]水力采收机。水力采收的效率较高,但存在贝类呛沙死亡、贝类选择性差等问题[14],易造成滩涂地层结构变化以及底质泥沙层非合理性迁移[15],不利于贝类可持续化养殖[16]。机械采收主要分为旋齿采收和振动采收。旋齿采收机是一类由渔船拖曳前进的海底采收设备,主要利用旋齿挖掘埋栖贝类并传送至网具中。根据耙齿布局形式分为单旋齿采收机[17]、双旋齿采收机[18-19]和链齿采收机[20]。旋齿采收具有拖曳阻力小、生产效率高、选择性好等优点,但其结构较为复杂且能耗大。振动采收机利用机械或液压激振使干露的滩涂底质软化[21-22],通过网筛等结构振动促使贝类和泥沙分离并将贝类采集到网具中,具有生产效率高、选择性好、生态影响小等优点,根据其作业环境可分为水下贝类振动采收机[23]和滩涂贝类振动采收机。滩涂贝类振动采收机[22,24]在美国西海岸和加拿大不列颠哥伦比亚省滩涂得到应用,贝类采收成本降低了约70%,大大提高了养殖规模与产量[25-26]。研究表明振动采收与人工采收对环境的影响无显著差异,振动采收影响甚至小于风浪等自然因素[27-28]。目前我国对滩涂贝类机械化采收开展了部分研究,研制了自走式滩涂贝类采捕样机[29-31]和履带式滩涂贝类采捕样机[32],但国内贝类机械采收研究起步较晚,大多处于理论研究与试验阶段[30],贝类机械化采收应用程度低、采收理论研究匮乏、设计手段落后等问题十分突出。滩涂贝类机械化采收技术与装备的缺乏问题已成为制约我国贝类养殖产业健康持续发展的主要因素之一[2]。

针对目前我国滩涂贝类采收装备技术落后问题,本文以滩涂养殖四角蛤蜊(*Mactra quadrangularis*)为研究对象,设计一种履带式滩涂贝类筛-刷协同振动采收机(简称:贝类采收机),对双层振动筛与一级人字形双螺旋采收滚刷等关键部件进行理论分析与计算,基于离散元(Discrete element method, DEM)与多体动力学(Multi-body dynamics, MBD)联合仿真方法开展滩涂贝类采收试验。试制样机并进行滩涂贝类采收田间试验,确定贝类采收机关键结构参数与运行参数组合,以期为滩涂贝类机械化采收装备的推广应用提供参考。

1 贝类采收机结构与工作原理

1.1 主要结构

贝类采收机(图1)主要由履带底盘、一级人字形双螺旋采收滚刷(简称:螺旋滚刷)、双层振动筛(第1层振动筛、第2层振动筛)、二级清理滚刷、限深轮、三级尼龙滚刷、一级输送链、二级输送链、三级输送链、贝类辊式分级装置等组成,通过液压控制系统对装备各机构进行驱动,贝类采收机主要结构参数:车长×车宽×车高为5 100 mm×2 200 mm×2 400 mm、质量4 600 kg、功率72 kW、主轴转速1 000 r/min、作业幅度1 800 mm。

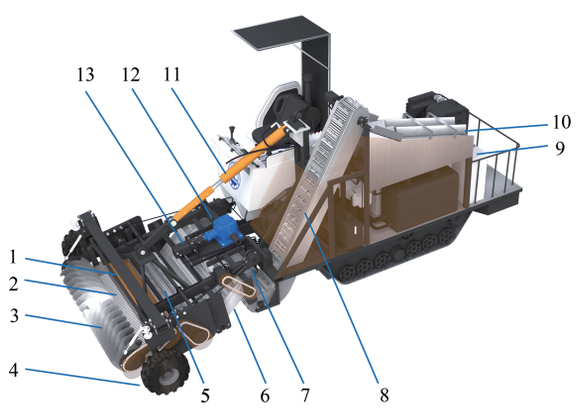


图1 履带式滩涂贝类筛-刷协同振动采收机

Fig. 1 Crawler mudflat shellfish screen-brush cooperative vibration harvester

1. 二级清理滚刷 2. 双层振动筛 3. 一级人字形双螺旋采收滚刷 4. 限深轮 5. 三级尼龙滚刷 6. 一级输送链 7. 二级输送链 8. 三级输送链 9. 贝类收集装置 10. 贝类辊式分级装置 11. 液压缸 12. T形换向器 13. 液压马达

1.2　工作原理

贝类采收机作业时，根据不同种类贝类栖息特性通过液压缸调整第1层振动筛铲尖的挖掘采收深度。双层振动筛根据平面四杆机构原理完成往复运动，第1层振动筛与螺旋滚刷配合，将底质与贝类混合物（简称：泥-贝混合物）铲送、切割、疏散至第1层振动筛上，底质与稚贝被筛落回滩涂表面。二级清理滚刷将未经筛分的底质压碎并将贝类传送至第2层振动筛上，底质与稚贝被完全筛落。安装于第2层振动筛上的三级尼龙滚刷对筛分完成贝类的表面进行清理并辅助扫送至一级输送链上。采收完成的贝类分别被各级输送链输送至贝类辊式分级装置，完成贝类采收分级作业。

2　贝类采收机关键机构设计

双层振动筛与螺旋滚刷是贝类采收机的核心部件，其结构参数与运行参数直接影响贝类的采收效果，双层振动筛与螺旋滚刷高效、平稳运行是提高贝类采收效率和保证贝类采收效果的重要前提。

2.1　双层振动筛设计

双层振动筛主要由第1层振动筛、第2层振动筛、双曲柄摇杆机构等主要部分组成，将其简化成平面四杆机构，如图2所示。振动筛BC通过前后摆杆BE、CD铰接于机架上，曲柄OA做圆周运动驱动连杆AB推动振动筛BC做往复运动。

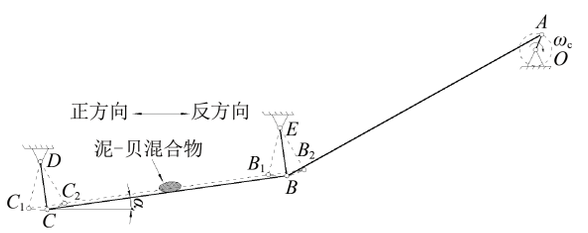


图2　振动筛机构简图

Fig. 2　Sketch of vibrating screen mechanism

泥-贝混合物的运动趋势由其所受合力方向决定，在采收过程中，泥-贝混合物在振动筛面上的运动可分为：向后滑动（向振动筛尾部点B滑动）、向前滑动（向振动筛前端点C滑动）和跳跃状态。以筛面的水平向前为X轴正方向，垂直筛面向上为Y轴正方向。泥-贝混合物向后滑动、向前滑动极限条件下，泥-贝混合物受力情况如图3所示，泥-贝混合物在筛面上有前滑、后滑、抛离趋势时应分别满足下列条件[33]。

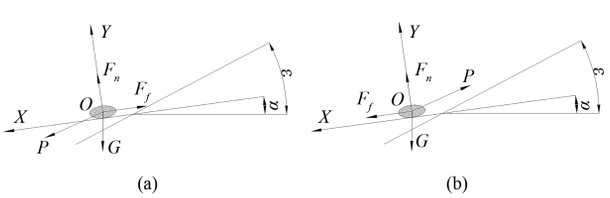


图3　振动筛面上泥-贝混合物运动状态受力分析

Fig. 3　Force analysis of movement state of shellfish and sediments mixtureon vibrating screen

泥-贝混合物具有向前滑动趋势时，惯性力方向沿振动方向向下，加速度为正，如图3a所示，即

$$P\cos(\varepsilon-\alpha)+G\sin\alpha-F_f\geqslant 0 \tag{1}$$

$$G\cos\alpha+P\sin(\varepsilon-\alpha)-F_n=0 \tag{2}$$

$$F_f=\mu_s F_n \tag{3}$$

$$\mu_s=\tan\varphi_s \tag{4}$$

$$P=m\omega_c^2 r\cos(\omega_c t) \tag{5}$$

式中　F_f——泥-贝混合物摩擦力，N

P——泥-贝混合物惯性力，N

F_n——泥-贝混合物支持力，N

G——泥-贝混合物重力，N

m——泥-贝混合物质量，kg

α——筛面倾角，(°)

r——曲柄长度，m

ω_c——曲柄角速度，rad/s

t——时间，s

ε——筛面摆动方向角，即摆动方向与筛面之间的夹角，(°)

μ_s——泥-贝混合物与振动筛静滑动摩擦因数

φ_s——泥-贝混合物与振动筛静滑动摩擦角，(°)

合并式(1)~(5)得到

$$\omega_c^2 r\cos(\omega_c t)\cos(\varepsilon-\alpha+\varphi_s)\geqslant g\sin(\varphi_s-\alpha) \tag{6}$$

在泥-贝混合物具有向后滑动趋势时，惯性力方向沿振动方向向上，加速度为负，如图3b所示，即

$$P\cos(\varepsilon-\alpha)-G\cos\alpha-F_f\geqslant 0 \tag{7}$$

$$P\sin(\varepsilon-\alpha)+F_n=G\cos\alpha \tag{8}$$

合并式(7)、(8)得到

$$\omega_c^2 r\cos(\omega_c t)\cos(\varepsilon-\alpha-\varphi_s)\geqslant g\sin(\varphi_s+\alpha) \tag{9}$$

在泥-贝混合物具有跳跃趋势时，其离开筛面的条件为

$$F_n=P\sin(\varepsilon-\alpha)-G\cos\alpha\geqslant 0 \tag{10}$$

为便于分析说明各项特征参数对泥-贝混合物运动状态的影响，引入运动指数Y来表征泥-贝混合物的运动状态：

泥-贝混合物向前滑动指数Y_f计算公式为

$$Y_f=K\frac{\cos(\varepsilon-\alpha+\varphi_s)}{\sin(\varphi_s-\alpha)} \tag{11}$$

泥-贝混合物向后滑动指数Y_b计算公式为

$$Y_b=\frac{\cos(\varepsilon-\alpha-\varphi_s)}{\sin(\varphi_s+\alpha)} \tag{12}$$

泥-贝混合物跳跃指数Y_j计算公式为

$$Y_j=K\frac{\sin(\varepsilon-\alpha)}{\cos\alpha} \tag{13}$$

其中

$$K=\frac{\omega_c^2 r}{g} \tag{14}$$

式中　K——振动强度

由式(11)~(13)可得，泥-贝混合物在筛面的运动指数与筛面倾角、摆动方向角、曲柄长度、曲柄角速度和

泥-贝混合物与筛面静滑动摩擦角有关，借助斜板法测得泥-贝混合物与振动筛间静滑动平均摩擦角为30°。为提高贝类与底质的筛分效率，泥-贝混合物需在筛面上具有双向运动，增大相互作用时间，同时保证向Y_b>Y_f。双层振动筛其他结构参数：第1层振动筛摆动方向角ε_1为45°、第1层振动筛筛面倾角α_1为11°、第2层振动筛摆动方向角ε_2为40°，第2层振动筛筛面倾角α_2为8°[29-30]，推导求得曲柄长度范围：0.008~0.012 m(8~12 mm)、曲柄角速度范围：81~91 rad/s(转速n_c：770~870 r/min)。

2.2 螺旋滚刷设计

螺旋滚刷主要由多条单排刷毛、钢辊和轴组成，两条螺旋线沿钢辊中心线对称排布，如图4所示。贝类采收机作业时，滩涂底质除了受振动筛施加的力之外，还受螺旋滚刷施加法向作用力F_c以及刷毛与滩涂底质之间的摩擦力F_f。滩涂底质被螺旋滚刷切割为小块泥-贝混合物，沿轴向由滚刷边缘向中间位置聚拢且沿着螺旋滚刷做旋转运动[34]，如图5所示。

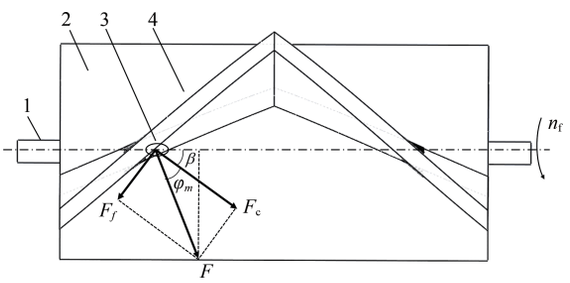


图4 泥-贝混合物受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram for mudflat sediments-shellfish mixtures

1. 轴 2. 钢辊 3. 泥-贝混合物 4. 刷毛

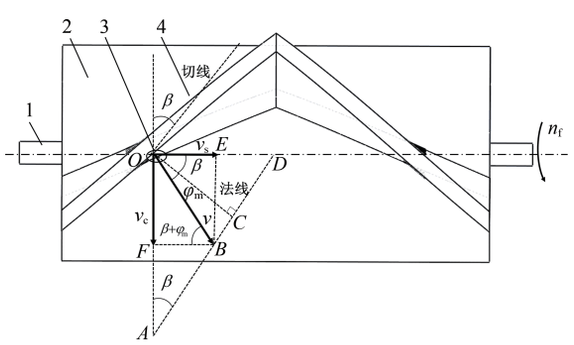


图5 泥-贝混合物速度分析图

Fig. 5 Velocity analysis diagram for mudflat sediments-shellfish mixtures

1. 轴 2. 钢辊 3. 泥-贝混合物 4. 刷毛

由图5可知，螺旋滚刷刷毛顶端泥-贝混合物的圆周速度v_{OA}计算公式为

$$v_{OA}=\frac{2\pi n_f}{60}R \tag{15}$$

泥-贝混合物速度v计算公式为

$$v=v_{OA}\frac{\sin\beta}{\cos\varphi_m} \tag{16}$$

$$\mu_m=\tan\varphi_m \tag{17}$$

泥-贝混合物法向速度v_c和轴向速度v_s计算公式为

$$\begin{cases}v_s=v\cos(\beta+\varphi_m)=\dfrac{2\pi n_f}{60}R\cos^2\beta(1-\varphi_m\tan\beta)\\ v_c=v\sin(\beta+\varphi_m)=\dfrac{2\pi n_f}{60}R\sin\beta(\sin\beta+\varphi_m\cos\beta)\end{cases} \tag{18}$$

其中

$$\begin{cases}\sin\beta=\dfrac{\dfrac{S}{2\pi R}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{S}{2\pi R}\right)^2}}\\ \cos\beta=\dfrac{1}{\sqrt{1+\left(\dfrac{S}{2\pi R}\right)^2}}\\ \tan\beta=\dfrac{S}{2\pi R}\end{cases} \tag{19}$$

根据式(18)推导得出

$$\begin{cases}v_c=\dfrac{Sn_f}{60}\dfrac{\dfrac{S}{2\pi R}+\mu_m}{\left(\dfrac{S}{2\pi R}\right)^2+1}\\ v_s=\dfrac{Sn_f}{60}\dfrac{1-\mu_m\dfrac{S}{2\pi R}}{\left(\dfrac{S}{2\pi R}\right)^2+1}\end{cases} \tag{20}$$

式中 v——滩涂底质速度，mm/s

R——螺旋滚刷半径，mm

n_f——螺旋滚刷转速，r/min

β——螺旋滚刷螺旋升角，(°)

φ_m——滩涂底质-螺旋滚刷刷毛静摩擦角，(°)

μ_m——滩涂底质-螺旋滚刷刷毛静摩擦因数

S——螺旋滚刷切土节距，mm

令$\dfrac{dv_s}{d\beta}=0$，以增加螺旋滚刷收集能力，则

$$\tan(2\beta)=\tan\left(\frac{\pi}{2}-\varphi_m\right) \tag{21}$$

$$\beta_{max}=\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi_m}{2} \tag{22}$$

为满足工作需求，螺旋滚刷刷毛材质选择为不锈钢。通过斜板法试验测得滩涂底质与不锈钢间静摩擦角为20°~40°，由式(22)计算得到螺旋滚刷螺旋升角为25°~35°。根据实践经验与结构尺寸，确定螺旋滚刷其他结构参数：钢辊直径D_f为100 mm、刷毛长度l_f为105 mm、刷毛排数Z_f为5、刷毛厚度δ_f为40 mm，求得螺旋滚刷转速n_f为45~65 r/min。二级清理滚刷结构参数：塑料辊直径D_s为90 mm、刷毛长度l_s为70 mm、刷毛厚度δ_s为20 mm，刷毛排数Z_s为5，同理求得二级清理滚刷转速n_s为70~110 r/min。

3 滩涂贝类采收仿真

离散元法与多体动力学法广泛被应用于农业工程领域仿真[35-37]，借助EDEM软件与ADAMS软件联合仿真的方法对滩涂贝类振动采收过程进行仿真研究。

3.1　滩涂底质离散元模型

本文研究的四角蛤蜊(图6)与滩涂底质均取自辽宁省锦州市龙海馨港四角蛤蜊养殖区(北纬40°50′13″,东经121°33′39″)。借助原位试验与实验室试验测得贝类和滩涂底质的物理参数。借助三维扫描技术获取贝类轮廓模型,基于多球聚合模型(Multi-sphere method, MSM)和Hertz-Mindlin(no slip)接触模型[38-41]对贝类轮廓模型进行填充建模(图6),以物理试验效果为目标,通过仿真试验与实际试验相结合的办法,完成贝类仿真接触参数的标定[42-43]。滩涂底质选用Hertz-Mindlin with JKR接触模型[44]。根据贝类采收作业要求,为避免腐蚀,选定不锈钢为接触材料,物性参数如表1所示,仿真接触参数如表2所示[45]。根据滩涂贝类养殖情况,建立滩涂底质与贝类混合物离散元模型,如图7所示。模型尺寸(长×宽×高)为1 000 mm×250 mm×100 mm,滩涂底质数量为1.4×10^5,贝类数量60,贝类埋栖深度h_s为30~60 mm。

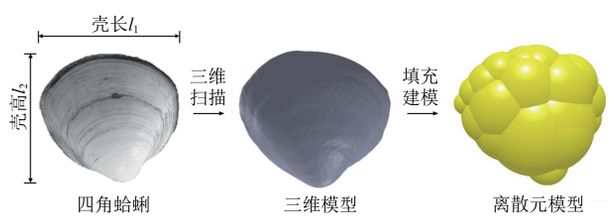


图6　四角蛤蜊离散元建模过程

Fig. 6　Discrete elemental modeling process for white clam

表1　物性参数

Tab. 1　Physical parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/Pa	粒径/mm
贝类	1 580	0.33	5.56×10^7	
不锈钢	7 750	0.31	7.28×10^{10}	
滩涂底质	2 050	0.30	1.68×10^8	5.30

表2　泥-贝混合物仿真接触参数

Tab. 2　Mudflat-shellfish mixture simulation contacting parameters

接触类别	静摩擦因数	滚动摩擦因数	碰撞恢复系数	表面能/(J·m^{-2})
贝类-贝类	1.25	0.33	0.32	
贝类-不锈钢	0.23	0.34	0.38	
贝类-滩涂	0.10	0.30	0.10	
滩涂-滩涂	0.30	0.50	0.30	8.11
滩涂-不锈钢	0.43	0.54	0.01	

3.2　滩涂贝类采收仿真试验

为提高仿真效率,节省仿真时间,减少泥-贝混合物模型总颗粒数量,并将贝类采收机三维模型简化,只保留采收核心机构,振动筛宽度缩减至200 mm。将采收机三维简化模型分别导入ADAMS软件与EDEM软件,设置材料属性并添加连接约束,贝类采收机作业参数:采收深度h_h为70 mm,行进速度v_0为0.15 m/s,进行滩涂贝类采收联合仿真试验,数据保存间隔0.01 s。

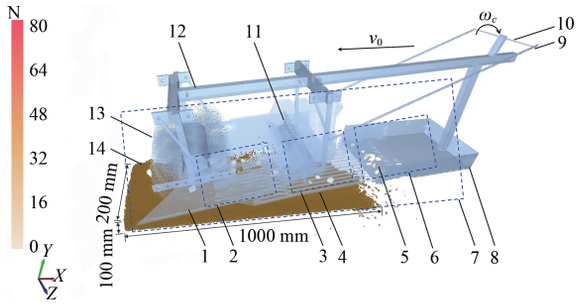


图7　滩涂贝类采收仿真示意图

Fig. 7　Shellfish harvesting DEM-MBD simulation

1. 第1层振动筛　2. Grid bin group 1　3. Grid bin group 2　4. 第2层振动筛　5. 贝类　6. Grid bin group 3　7. Grid bin group 4　8. 贝类收集筐　9. 曲柄　10. 轴　11. 二级清理滚刷　12. 机架　13. 螺旋滚刷　14. 滩涂底质

在EDEM软件分析模块中添加4检测区域(Grid bin group 1:450 mm× 200 mm×100 mm、Grid bin group 2:450 mm× 200 mm× 100 mm、Grid bin group 3:300 mm× 200 mm× 100 mm、Grid bin group 4:2 500 mm× 200 mm × 1 000 mm),如图7所示。Grid Bin Group1、2、3分别用于检测贝类采收机作业时长6.5 s时第1层振动筛、第2层振动筛和收集筐中贝类数量,Grid Bin Group 4用于检测贝类采收过程中整个模型贝类最大受力情况,以贝类受力超过80 N的峰值次数作为贝类破碎个数进行统计分析[46]。贝类破碎率Q_1、漏采率Q_2计算公式为

$$Q_1=\frac{N_1}{N_2}\times100\% \tag{23}$$

$$Q_2=\frac{N_3}{N_2+N_3}\times100\% \tag{24}$$

式中　N_1——贝类破碎数量

N_2——收集筐贝类数量

N_3——滩涂底质剩余贝类数量

贝类采收机关键结构参数会影响贝类采收机的作业效果。根据前文研究结果,以螺旋滚刷螺旋升角、曲柄长度为试验因素,进行滩涂贝类采收仿真单因素试验(其余变量均取中间值),确定贝类采收机关键结构参数,试验方案如表3所示。

表3　贝类采收单因素仿真试验方案

Tab. 3　Single-factor simulation test scheme for shellfish harvesting

水平	因素	
	螺旋滚刷螺旋升角/(°)	曲柄长度/mm
1	25	8
2	30	10
3	35	12

3.3　结果与分析

(1)螺旋滚刷螺旋升角对贝类采收的影响

螺旋滚刷螺旋升角对贝类采收的影响如图8所示。随着螺旋滚刷升角增加,第1层振动筛上贝类数量逐渐降低;贝类采收数量与漏采率均逐渐提高。随着螺旋升角的增大,螺旋滚刷的切向力(向后)增大,螺旋滚刷的

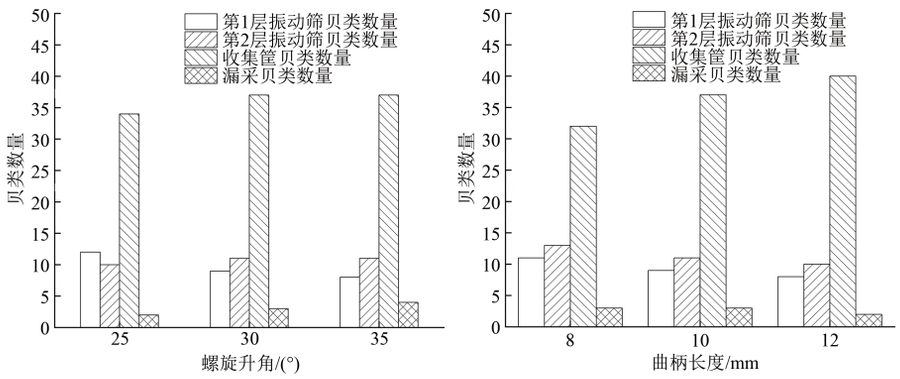
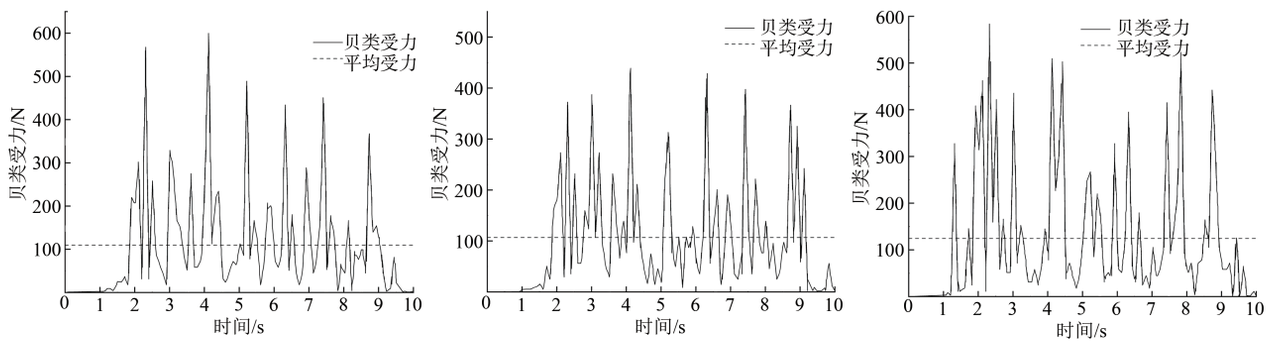


图 8 贝类采收机结构参数对贝类采收效果影响

Fig. 8 Influence of structural parameters of shellfish harvesters on effectiveness of shellfish harvesting

向后输送的作用增强，贝类在第1层振动筛上的停留时间减少，贝类采收效率提高，收集筐中贝类数量增大。

不同螺旋升角对螺旋滚刷整体受力的影响如图9所示。随着螺旋升角增大，螺旋滚刷受力先减小后增加。当螺旋升角为25°、30°、35°时，螺旋滚刷的平均受力分别为109.57、106.79、124.30N。当螺旋升角为30°时，螺旋滚刷在工作时减阻的效果最好，综合考虑螺旋滚刷螺旋升角对贝类采收数量和减阻的影响，螺旋升角选取30°。



(a) 螺旋升角25° (b) 螺旋升角30° (c) 螺旋升角35°

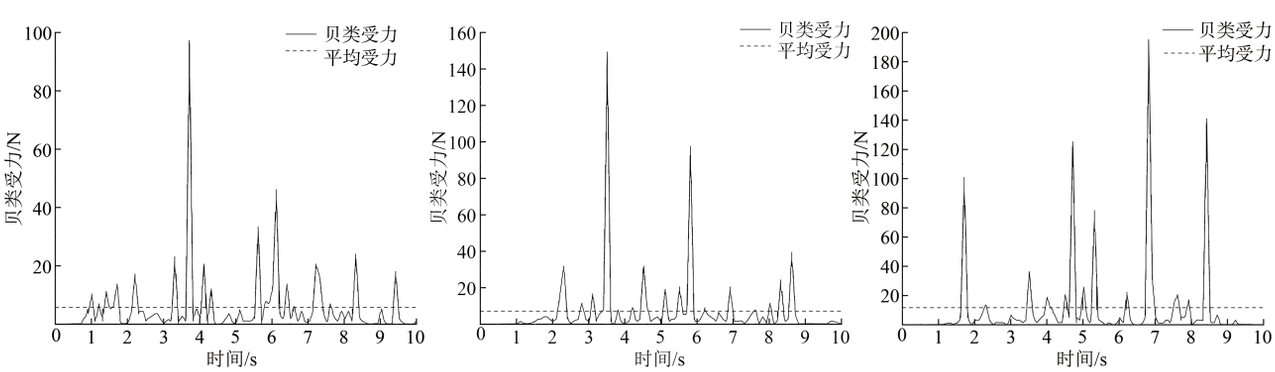
图 9 螺旋升角对螺旋滚刷受力的影响

Fig. 9 Influence of different spiral rising angles on force of the first-stage roller

(2)曲柄长度对贝类采收的影响

曲柄长度对贝类采收的影响如图8所示。随着曲柄长度的增大，贝类采收数量从32枚增加到40枚，逐渐增加；贝类漏采率从5.00%减少至3.33%。分析得出随着曲柄长度的增大，振动筛的振幅越来越大，贝类和泥沙混合物越容易在振动筛上筛分，贝类的采收效率提高，收集筐中贝类的数量变大。

贝类最大受力情况如图10所示，当曲柄长度为8、10、12 mm时，贝类破碎率分别为3.12%、5.41%、10.00%。随着曲柄长度增加，贝类最大受力由5.78 N逐渐增加到11.64 N，综合考虑曲柄长度对贝类采收数量和贝类最大平均受力的影响，确定曲柄长度为10 mm。



(a) 曲柄长度8 mm (b) 曲柄长度10 mm (c) 曲柄长度12 mm

图 10 曲柄长度对贝类最大受力的影响

Fig. 10 Effect of crank length on maximum force on shellfish

4　贝类采收田间试验

4.1　正交试验

试制履带式滩涂贝类筛-刷协振动采收样机(图11),并于2022年9月27日—10月18日在辽宁省锦州市龙海馨港四角蛤蜊养殖基地(北纬40°50′13″,东经121°33′39″)开展滩涂贝类采收田间试验,四角蛤蜊养殖密度约为33枚/m^2(约为420 g/m^2)。以螺旋滚刷转速、曲柄转速与二级清理滚刷转速为试验因素,以贝类采收效率η(单位时间内采收机采收贝类质量)、贝类破碎率和贝类漏采率为指标开展滩涂贝类采收田间正交试验,试验因素与编码如表4所示,计算贝类采收效率,试验重复3次取平均值。滩涂贝类采收正交试验选用选取$L_9(3^4)$正交表,正交试验方案与结果如表5所示,A、B、C分别表示螺旋滚刷转速、曲柄转速、二级清理滚刷转速编码值。贝类采收效率计算公式为

$$\eta = \frac{60 m_s v_0}{L_h} \tag{25}$$

式中　m_s——采收贝类质量,kg

L_h——贝类采收机采收距离,m

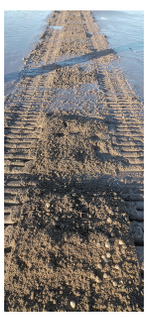
贝类采收效率影响由大到小为:曲柄转速、二级清理滚刷转速、螺旋滚刷转速,各试验因素对贝类采收效率最佳组合为$A_2B_3C_3$;贝类破碎率影响由大到小为:曲柄转速、螺旋滚刷转速、二级清理滚刷转速。曲柄转速与贝类破碎率呈正相关关系,螺旋滚刷转速增加使贝类破碎率先下降后上升,各试验因素对贝类破碎率最佳组合为$A_3B_1C_3$;。贝类漏采率影响由大到小为:曲柄转速、



(a) 贝类采收试验



(b) 贝类输送



(c) 采后滩涂

图 11　滩涂贝类采收田间试验

Fig. 11　Mudflat shellfish harvesting field tests

表 4　正交试验因素编码

Tab. 4　Orthogonal test codes and factors

编码	因素		
	曲柄转速/(r·min^{-1})	螺旋滚刷转速/(r·min^{-1})	二级清理滚刷转速/(r·min^{-1})
−1	820	55	90
0	845	60	100
1	870	65	110

表 5　正交试验方案与结果

Tab. 5　Orthogonal test program and results

序号		因素				贝类采收效率/(kg·min^{-1})	贝类破碎率/%	贝类漏采率/%
		A	B	C	D			
1		−1	−1	−1	−1	1.54	2.63	10.04
2		−1	0	0	0	1.78	3.89	9.06
3		−1	1	1	1	2.24	4.43	7.56
4		0	−1	0	1	1.80	3.48	9.06
5		0	0	1	−1	2.07	3.84	8.64
6		0	1	−1	0	1.94	4.68	7.40
7		1	−1	1	0	1.68	3.86	8.03
8		1	0	−1	1	1.74	4.53	8.34
9		1	1	0	−1	2.14	5.48	7.03
贝类采收效率	K_1	1.787	1.674	1.740	1.951			
	K_2	1.969	1.933	1.944	1.940			
	K_3	1.854	2.143	2.065	1.959			
	R	0.182	0.469	0.325	0.018			
贝类破碎率	K_1	3.998	3.323	4.039	3.979			
	K_2	3.649	4.087	4.284	4.147			
	K_3	4.621	4.859	3.945	4.142			
	R	0.972	1.536	0.339	0.168			
贝类漏采率	K_1	8.887	9.044	8.591	8.569			
	K_2	7.803	8.681	8.387	8.164			
	K_3	8.366	7.331	8.078	8.323			
	R	1.084	1.713	0.513	0.404			

螺旋滚刷转速、二级清理滚刷转速。曲柄转速、二级清理滚刷转速与采收机的贝类漏采率呈负相关关系，曲柄转速越高、二级清理滚刷转速越大漏采率越小，各试验因素对贝类漏采率最佳组合为$A_2B_3C_3$。

正交试验方差分析结果（表6）表明：曲柄转速对贝类采收效率的影响极其显著（$P<0.01$），二级清理滚刷转速对贝类采收效率的影响显著（$0.01\leqslant P<0.05$），螺旋滚刷转速对贝类采收效率不显著（$P>0.05$）。螺旋滚刷转速和曲柄转速对贝类破碎率均为显著影响，且曲柄转速比螺旋滚刷转速更显著。曲柄转速对贝类漏采率的影响显著性大于螺旋滚刷转速对贝类漏采率的影响。

表6 正交试验模型方差分析结果

Tab. 6 ANOVA of orthogonal test model

项目	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
采收效率	A	0.021	2	0.010	0.781	0.561
	B	0.332	2	0.166	12.607	0.007
	C	0.162	2	0.081	6.153	0.024
	误差	0.026	2	0.013		
	总和	0.541	8			
破碎率	A	1.454	2	0.727	26.623	0.036
	B	3.539	2	1.769	64.807	0.015
	C	0.184	2	0.092	3.373	0.229
	误差	0.055	2	0.027		
	总和	5.232	8			
漏采率	A	1.763	2	0.882	7.083	0.048
	B	4.887	2	2.444	19.631	0.032
	C	0.400	2	0.200	1.606	0.384
	误差	0.249	2	0.124		
	总和	7.299	8			

正交试验多元线性回归分析结果（表7）表明：贝类采收效率受螺旋滚刷转速的影响不显著（$P=0.278$），贝类破碎率受二级清理滚刷的影响不显著（$P=0.637$），贝类漏采率受二级清理滚刷的影响不显著（$P=0.264$）。贝类采收效率、贝类破碎率和贝类漏采率回归模型分别为

$$\eta = 0.032A + 0.218B + 0.129C + 1.187 \quad (26)$$

$$Q_1 = 0.486A + 0.768B + 0.047C + 1.488 \quad (27)$$

$$Q_2 = -0.542A - 0.857B - 0.256C + 11.662 \quad (28)$$

通过多元线性回归方程式（26）~（28）可得，当贝类采收效率取最大值时，B和C应取高水平，即曲柄转速取870 r/min，二级清理滚刷转速取110 r/min。当贝类破碎率取最低时，A和B应取低水平，而为降低贝类漏采率，A和B应取高水平，由于贝类破碎率整体比较低，当A和B取高水平时，破碎率仅为5.25%，此时贝类漏采率达最低值7.456%，采收效率达最高值134 kg/h。螺旋滚刷转速、曲柄转速和二级清理滚刷转速的最佳配合为65、870、110 r/min。对比本研究团队上一代自走式贝类采收样机，贝类采收效率提高了117.63%、贝类破碎率降低了2.09%[30]。

4.2 验证试验

滩涂贝类采收验证试验前调整贝类采收机运行参数：螺旋滚刷转速65 r/min、曲柄转速870 r/min、二级清理滚刷转速110 r/min，试验条件、方法与4.1节相同。试验结果如表8所示，贝类采收效率约为2.23 kg/min（约为133.80 kg/h），贝类破碎率为5.25%，贝类漏采率为7.46%，贝类采收机工作效率约为972 m^2/h。

统计对比采收前后滩涂底质中稚贝数量，计算得到稚贝平均回滩率Q_3为92.29%。借助SZB-1.0型十字板剪切仪测量对比采收前后滩涂50 mm深剪切强度，结果表明：采收前后滩涂底质平均剪切强度分别为6.08、2.12 kPa，降低65.13%。机械采收后滩涂底质变软，便于稚贝潜回滩涂底质中，有利于贝类可持续化养殖。

5 结论

（1）设计试制了履带式滩涂贝类筛-刷协同振动采收机，并对双层振动筛和螺旋滚刷等关键部件进行理论分析与计算，基于离散元与多体动力学联合仿真的方法进行滩涂贝类振动采收单因素试验，确定贝类采收机关键结构参数：曲柄长度10 mm和螺旋滚刷螺旋升角30°。

（2）开展了滩涂贝类采收田间正交试验，得到贝类

表7 正交试验回归分析

Tab. 7 Orthogonal test regression analysis

因变量		未标准化系数	标准错误	标准化系数	t	P	共线性统计容差	VIF值
贝类采收效率	（常量）	1.187	0.142		8.385	0		
	A	0.032	0.043	0.144	0.767	0.278	1	1
	B	0.218	0.040	0.812	5.482	0.003	1	1
	C	0.129	0.040	0.481	3.248	0.023	1	1
贝类破碎率	（常量）	1.488	0.333		4.463	0.007		
	A	0.486	0.094	0.520	5.187	0.004	1	1
	B	0.768	0.094	0.822	8.200	0.001	1	1
	C	0.047	0.094	0.050	0.502	0.637	1	1
贝类漏采率	（常量）	11.662	0.559		20.849	<0.001		
	A	−0.542	0.157	−0.491	−3.449	0.018	1	1
	B	−0.857	0.157	−0.777	−5.450	0.003	1	1
	C	−0.256	0.157	−0.232	−1.631	0.264	1	1

表8　滩涂贝类采收验证试验结果

Tab. 8　Results of mudflat shellfish harvesting validation test

序号	贝类采收效率/(kg·min^{-1})	贝类破碎率/%	贝类漏采率/%
1	2.15	5.10	7.08
2	2.24	5.21	7.49
3	2.30	5.44	7.81
平均值	2.23	5.25	7.46

采收机运行参数最佳组合：螺旋滚刷转速为65 r/min、曲柄转速为870 r/min、二级清理滚刷为110 r/min时，贝类采收机采捕性能最好，贝类破碎率为5.25%、贝类漏采率为7.46%，贝类采收机工作效率约为972 m^2/h。

（3）采收后滩涂稚贝回滩率达92.29%，滩涂底质剪切强度降低65.13%，滩涂底质表面变软，有利于贝类可持续化养殖，贝类采收机可实现滩涂贝类机械化生态采收。

参　考　文　献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴2024[M]. 北京：中国农业出版社，2024.

[2] 母刚，段富海，杨津宇，等. 埋栖贝类采捕机研究进展[J]. 大连海洋大学学报，2020，35(1)：19－30.
MU Gang，DUAN Fuhai，YANG Jinyu，et al. Research progress on burying shellfish harvesters：a review[J]. Journal of Dalian Fisheries University，2020，35(1)：19－30.(in Chinese)

[3] GLUDE J B，SPEAR H，WALLACE D. The hydraulic clam rake，a new method of gathering seed clams[C]//Proceedings of the National Shellfisheries Association，1952.

[4] KYTE M A，CHEW K K. A review of the hydraulic escalator shellfish harvester and its known effects in relation to the soft-shell clam，*Mya arenaria*[R]. Seattle：University of Washington，1975.

[5] COEN L D. A review of the potential impacts of mechanical harvesting on subtidal and intertidal shellfish resources[M]. South Carolina：South Carolina Department of Natural Resources，Marine Resources Research，1995：3－7.

[6] MEYER T L，COOPER R A，PECCI K J. The performance and environmental effects of a hydraulic clam dredge[J]. Marine Fisheries Review，1981，43(9)：14－22.

[7] SMOLOWITZ R J. The design of an electrohydraulic dredge for clam surveys[J]. Marine Fish Review，1982，44(4)：1－18.

[8] FAHY E，CARROLL J. Consequences of hydraulic dredging for a razor clam *Ensis siliqua*（L.）Bed in the north-west Irish Sea[C]//Royal Irish Academy，2007.

[9] MORELLO E B，FROGLIA C，ATKINSON R J A，et al. Impacts of hydraulic dredging on a macrobenthic community of the Adriatic Sea，Italy[J]. Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences，2005，62(9)：2076－2087.

[10] HALL S J，BASFORD D J，ROBERTSON M R. The impact of hydraulic dredging for razor clams *Ensis sp.* on an infaunal community[J]. Netherlands Journal of Sea Research，1990，27(1)：119－125.

[11] BEUKEMA J J. Long-term effects of mechanical harvesting of lugworms arenicola marina on the zoobenthic community of a tidal flat in the Wadden sea[J]. Netherlands Journal of Sea Research，1995，33(2)：219－227.

[12] HALL S J，HARDING M J C. Physical disturbance and marine benthic communities：the effects of mechanical harvesting of cockles on non-target benthic infauna[J]. Journal of Applied Ecology，1997，34：497－517.

[13] ROBINSON R F，RICHARDSON C A. The direct and indirect effects of suction dredging on a razor clam（*Ensis arcuatus*）population[J]. Ices Journal of Marine Science，1998，55(5)：970－977.

[14] STOKESBURY K D E，BAKER E P，HARRIS B P，et al. Environmental impacts related to mechanical harvest of cultured shellfish[M]. Wiley-Blackwell，2011.

[15] 杨洪生. 现代渔业科技创新发展现状与展望[M]. 北京：科学出版社，2022.

[16] 中华人民共和国农业部. 农业部关于禁止使用双船单片多囊拖网等十三种渔具的通告[EB/OL].（2013-11-19）[2024-05-25]. http://www.yyj.moa.gov.cn/tzgg/201404/t20140402_6300665.htm.

[17] BADINO G，BONA F，MAFFIOTTI A，et al. Impact of mechanical clam harvesting on a benthic habitat：evaluation by means of sediment profile imaging[J]. Aquatic Conservation：Marine and Freshwater Ecosystems，2004，14(Supp.1)：S59－S67.

[18] HAVEN D S，LOESCH J G，WHITCOMB J P. An investigation into commercial aspects of the hard clam fishery and development of commercial gear for the harvest of molluscs[R]. Virginia：Virginia Institute of Marine Sciences，1973.

[19] HAVEN D S，WHITCOMB J P，DAVIS Q C. A Mechanical escalator harvester for live oysters and shell[J]. Marine Fisheries Review，1979，42(12)：17－20.

[20] 母刚. 蛤仔力学特性测试与采捕机械关键问题研究[D]. 大连：大连理工大学，2019.

[21] RAMBALDI E，BIANCHINI M L，PRIORE G，et al. Preliminary appraisal of an innovative hydraulic dredge with vibrating and sorting bottom on clam beds（*Chamelea gallina*）[J]. Hydrobiologia，2001，465(1)：169－173.

[22] Evaluation and development of advanced farm management and harvesting tools for economically efficient and environmentally sustainable production of Manila clams[EB/OL].（2014-04-01）[2024-05-22]. https://www.pacshell.org/%5C%5C//pdf/SKManila.pdf.

[23] MASCILONGO G，COSTA C，CHATZIEVANGELOU D，et al. Innovative vibrating hydraulic dredge for striped venus（*Chamelea gallina*）fishing[J]. AgriEngineering，2022，4(1)：1－16.

[24] HOYSETH K. Archived—does mechanical clam harvesting in BC pose any environmental risk?[EB/OL].（2017-05-05）[2024-05-

23]. https://www.dfo-mpo.gc.ca/aquaculture/rp-pr/acrdp-pcrda/projects-projets/P-08-03-005-eng.html.

[25] SAUREL C, FERREIRA J G, CHENEY D, et al. Ecosystem goods and services from Manila clam culture in Puget Sound: a modelling analysis[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2014, 5(3): 255 - 270.

[26] SUHRBIER A, CHENEY D, CORDELL J, et al. Innovative farming methods for production and harvest of Manila clams in Washington State, USA[J]. World Aquaculture, 2017,49:49 - 57.

[27] STIRLING D. Mechanized clam harvesting for coastal British Columbia environmental implications[D]. Victoria: University of Victoria, 2011.

[28] LANDRY T. The ecological effects of clam harvesting by mechanical means in St Mary's Bay, Nova Scotia[EB/OL]. (2017-05-05)[2024-05-24]. https://www.dfo-mpo.gc.ca/aquaculture/rp-pr/acrdp-pcrda/projects-projets/G-12-01-001-eng.html.

[29] LI Hangqi, MU Gang, ZHANG Hanbing, et al. Design and testing of a mechanized brush-screen cooperative vibration harvester for mudflat-buried shellfish based on the discrete element method[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10:1 - 14.

[30] 李航企. 滩涂埋栖贝类振动采捕动力学与装备研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.

[31] 陆建,周宇,申诚,等. 自走式滩涂贝类采捕机研究设计与试验[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 85 - 90.
LU Jian, ZHOU Yu, SHEN Cheng, et al. Design and experiment of self-propelled shellfish harvester[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(5): 85 - 90.(in Chinese)

[32] 孟祥河,李明智,于功志,等. 履带式滩涂贝类采收机设计与试验[J]. 渔业现代化, 2023, 50(4): 30 - 40.
MENG Xianghe, LI Mingzhi, YU Gongzhi, et al. Design and experiment of crawler type beach shellfish harvester[J]. Fishery Modernization, 2023, 50(4): 30 - 40.(in Chinese)

[33] 闻梆春,刘树英. 现代振动筛分技术及设备设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

[34] 张汝鹏. 卧式螺旋滚扫型清雪车结构与性能优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

[35] 袁军,于建群. 基于DEM-MBD耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 17 - 24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiber based on DEM-MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mechaniery, 2020, 51(Supp.1): 17 - 24.(in Chinese)

[36] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 基于DEM-MBD耦合的链勺式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91 - 104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and testing of chain-spoon type precision seeding device or ginseng based in DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mechaniery, 2022, 53(3): 91 - 104.(in Chinese)

[37] 侯加林,方立志,张海阔,等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 65 - 75, 163.
HOU Jialin, FANG Lizhi, ZHANG Haikuo, et al. Design and experiment of multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 65 - 75, 163.(in Chinese)

[38] PASHA M, HARE C, GHADIRI M, et al. Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater[J]. Powder Technology, 2016, 296: 29 - 36.

[39] COETZEE C. Calibration of the discrete element method: strategies for spherical and non-spherical particles[J]. Powder Technology, 2020, 364: 851 - 878.

[40] ZHAO Zhan, WU Yafang , YIN Jianjun, et al. Monitoring method of rice seeds mass in vibrating tray for vacuum-panel precision seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 114: 25 - 31.

[41] ZHANG Shun, TEKESTE M Z, LI Yong, et al. Scaled-up rice grain modelling for DEM calibration and the validation of hopper flow[J]. Biosystems Engineering, 2020, 194: 196 - 212.

[42] LI Hangqi, ZHANG Guochen, LI Xiuchen, et al. Calibration of the discrete element method parameters in living juvenile Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) and seeding verification[J]. AgriEngineering, 2021, 3(4): 894 - 906.

[43] LOU Yuzhong, ZHANG Guochen, LI Xiuchen, et al. Experiment and calibration of contact parameters of *Mactra veneriformis* based on DEM[J/OL]. Computational Particle Mechanics, 2024. https://doi.org/10.1007/s40571-024-00801-3.

[44] 张智泓,赵亮亮,赖庆辉,等. 基于DEM-MBD耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 10 - 20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 10 - 20.(in Chinese)

[45] 刘法伟. 滩涂埋栖贝类振动采捕装备改进及性能试验研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.

[46] 刘文博,张寒冰,李秀辰,等. 面向机械化播苗的菲律宾蛤仔幼苗生物力学特性分析[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 455 - 461.