

# 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落变化

张宇 袁林 薛俊增\*

上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海海洋大学港航生态安全中心 上海 201306

**摘要:** 洋山港是世界第一大集装箱港, 自 2002 年开始至 2017 年共完成四期工程建设, 期间港口建设中形成了 8 000 余米的码头人工岸线, 受港区一至四期工程的顺序建设、岛礁连接、围海造地和港口运营的远洋船舶停靠等影响, 港口海域生态环境也逐步出现相应变化, 导致包括潮间带大型底栖无脊椎动物在内的海洋生物群落均受到相应影响。本研究于 2021 和 2022 年(第四期工程建设后)在洋山港港区二号码头与港区海域大洋山码头人工潮间带采集了大型底栖无脊椎动物, 并对其群落结构与特征进行分析, 同时与 2009 和 2010 年(第四期工程建设初)的历史调查资料对比, 分析了第四期工程建设以来洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物的群落变化。结果显示, 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物种类数量由第四期工程建设前的 17 种增加至第四期工程建设后的 28 种, 其中软体动物由 8 种增加至 15 种, 节肢动物由 7 种增加至 9 种, 腔肠动物增加至 3 种, 环节动物增加至 1 种; 跨海区入侵种东方小藤壶(*Chthamalus challengeri*)消失, 而纹藤壶(*Amphibalanus amphitrite*)重新出现并成为优势种; 洋山港人工码头潮间带大型底栖无脊椎动物群落密度最高值由第四期工程建设初的(6 333.30 ± 1 495.49) ind/m<sup>2</sup>增加至(6 517.33 ± 119.67) ind/m<sup>2</sup>, 生物量最高值由第四期工程建设初的(1 977.04 ± 281.87) g/m<sup>2</sup>增加至(3 724.69 ± 940.94) g/m<sup>2</sup>; 洋山港人工码头潮间带群落生物多样性指数有所上升而大洋山人工码头下降显著。与洋山港第四期工程建设初相比, 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落种类组成已经发生变化, 群落生物多样性指数与丰度-生物量曲线(ABC 曲线)分析结果均表明, 目前洋山港海域生态环境处于中等污染水平。受港区运营影响, 码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落仍受到中等程度的干扰, 群落结构不稳定。

**关键词:** 洋山港; 人工潮间带; 码头; 大型底栖无脊椎动物

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2024) 01-037-12

## Changes of Macroinvertebrate Community in Artificial Intertidal Zone of Yangshan Port

ZHANG Yu YUAN Lin XUE Jun-Zeng\*

Center for Research on the Ecological Security of Port and Shipping, College of Marine Ecology and Environment,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**基金项目** 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFC2302800), 上海港口及近海生态环境科技服务平台项目 (No. 19DZ2292500);

\* 通讯作者, E-mail: jzxue@shou.edu.cn;

**第一作者介绍** 张宇, 男, 硕士研究生; 研究方向: 海洋生态学研究; E-mail: zy01041998@163.com.

收稿日期: 2023-05-22, 修回日期: 2023-09-11 DOI: 10.13859/j.cjz.202423099

**Abstract: [Objectives]** Yangshan Port is the world's largest container port. The construction of Yangshan Port began in 2002 and the fourth phase of construction completed in 2017. More than 8 000 m of wharf artificial shoreline were formed, due to the sequential construction of the first to fourth phases of the wharf, the connection of islands and reefs, the reclamation of land, and the docking of ocean-going ships operated by the port. At the mean time, the ecological environment of the port sea area has gradually changed accordingly, resulting in marine biological communities including intertidal macroinvertebrates. This paper compared the ecological characteristics and changes of macrobenthic invertebrates in the artificial intertidal zone of Yangshan Port in the early (2009 - 2010) and post (2021 - 2022) stages of phase IV construction, to provide basic data for evaluating the impact of human activities, such as the operation of Yangshan Port on the macrobenthic invertebrate community in the intertidal zone of the wharf, and the protection of marine biodiversity and the construction of green ports. **[Methods]** Intertidal macrobenthos was collected at Yangshan Port Artificial Wharf and Dayangshan Artificial Wharf in December 2021, March, July, and September 2022 (Fig. 2), according to the standard protocol for marine studies (GB 12763.6-2008). The temperature, dissolved oxygen, pH, and salinity of the seawater were measured on-site according to the standard protocol for marine studies (GB 17378.4-2007). Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ), Margalef diversity index ( $H'$ ), Simpson richness index ( $D$ ), and Pielou evenness index ( $E$ ) were used to measure the biodiversity of the macrobenthic invertebrate community. Primer 5.0 was used to calculate the biodiversity index of the macrobenthic invertebrate community in the intertidal zone of Yangshan Port and draw the abundance/biomass comparison curve (ABC curve). Canoco 5.0 was used to analyze the relationship between macrobenthic invertebrates and environmental factors. **[Results]** The results showed that the species of macroinvertebrates in the artificial intertidal zone of Yangshan Port increased from 17 species at the early stage of the phase IV construction of the port to 28 species (Table 1), among which mollusks increased from 8 to 15 species, arthropods increased from 7 to 9 species, intestinal animals increased to 3 species, and annelids decreased to 1 species. The invasive *Chthamalus challenger* disappeared, and *Amphibalanus amphitrite* reappeared as the dominant species. The highest abundance of the artificial intertidal community increased from  $6\,333.30 \pm 1\,495.49$  ind/m<sup>2</sup> to  $6\,517.33 \pm 119.67$  ind/m<sup>2</sup>, and the highest biomass increased from  $1\,977.04 \pm 281.87$  g/m<sup>2</sup> to  $3\,724.69 \pm 940.94$  g/m<sup>2</sup> (Fig. 4). According to the analysis of the biodiversity of macrobenthic invertebrate communities (Fig. 5), the annual average values of Shannon-Wiener index in the Yangshan Port Artificial Wharf and Dayangshan Artificial Wharf were 1.556 and 1.456, respectively. The biodiversity of the Yangshan Port Artificial Wharf was higher than at the early stage of phase IV construction, and the biodiversity of the Dayangshan Artificial Wharf decreased significantly. According to the ABC curve analysis (Fig. 6), the community structure of macrobenthic invertebrates in the artificial intertidal zone of Yangshan Port Artificial Wharf was unstable and disturbed to a certain extent. The results of the correlation analysis between the density of the macroinvertebrate community in the artificial intertidal zone of Yangshan Port and the main environmental factors (Table 2) showed that temperature, salinity, and total suspended matter concentration were the main environmental factors affecting macroinvertebrates (Fig. 7). **[Conclusion]** Compared with the early stage of the phase IV construction, the species composition of the macrobenthic invertebrate community in the artificial intertidal zone of the Yangshan Port has changed. The community biodiversity index and ABC curve analysis results showed that the ecological environment of the Yangshan

Port was at a medium pollution level. The macrobenthic invertebrate community in the artificial intertidal zone of the wharf is still in an unstable state and faces the risk of human activities. Therefore, it is still necessary to regularly monitor the macrobenthic invertebrate community in the Yangshan Port.

**Key words:** Yangshan Port; Artificial intertidal zone; Wharf; Macrobenthic invertebrate

洋山深水港作为世界第一大集装箱港,是中国首个在海岛建设的港口,位于长江口南、杭州湾西部的崎岖列岛,海域面积约 80 km<sup>2</sup>(任越等 2018)。由于其地理位置的特殊性,港区海域受冲淡水、季风与周边海流的影响显著,水体中携带悬浮泥沙含量大且不易沉降,使得水环境呈现独特的特征(阎新兴等 2003)。2002 年洋山港一期工程开工建设,至 2017 年已完成四期自动化码头建设(图 1),原先各自然岛礁的连接建设形成了 8 000 余米的码头人工岸线;围垦填海、封堵汉道、建桥建港等工程改变了该海域水动力环境(窦明等 2018),港口运营等人为活动逐渐影响港内海域生态环境。

潮间带地处陆地与海洋的交界地带,是环境因子复杂且敏感脆弱的生态区域(纪莹璐等 2021)。栖息于此的大型底栖无脊椎动物由于移动性差、生活周期长及生活环境相对固定(沈国英等 1990),更易受到环境因子变化的影响(Marques et al. 2003)因此通过研究潮间带大型底栖无脊椎动物群落结构的变化能够分析影响潮间带生物群落变化的因素与附近海域生态系统动态变化的规律(王金宝等 2018)。

洋山港开港运营近 20 年,其中第四期工程自 2010 年 1 月开始,至 2017 年 12 月完成四期全自动化码头建设,工程建设时间跨度最大(叶碧晴 2021)。研究人员曾在洋山港第四期工程建设初期对洋山港港区海域展开潮间带生态调查(王宝强 2011, 庄骅等 2014),但目前缺乏对港区码头人工潮间带生物群落与环境变化的持续性与对比性动态分析研究。此外由于洋山港第四期工程开建至今对码头的开发改造及四期全自动化码头的投入使用(丁益华等 2021),均可能对周边潮间带环境造成一定影响,鉴于

此,本研究以洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落为研究对象,在 2021 和 2022 年采样(记为建设后),并结合历史调查数据(王宝强 2011, 庄骅等 2014)(记为建设初),分析了洋山港第四期工程建设以来大型底栖无脊椎动物的群落结构特征及变化规律,为探究洋山港港区运营等人类活动对码头潮间带大型底栖无脊椎动物群落的影响、海港海洋生物多样性保护和绿色港口建设提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站位和样品采集

根据《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2008)潮间带生物调查部分,在洋山港人工码头即洋山港二号码头桩柱(30°38'18" N, 122°03'10" E)与大洋山人工码头即大洋-圣姑货运码头(30°34'36" N, 122°04'21" E)附近选取垂直于海面的桩柱壁及码头岩礁(图 2),分别于冬季(2021 年 12 月)、春季(2022 年 3 月)、夏季(2022 年 7 月)、秋季(2022 年 9 月)进行硬相底质潮间带大型底栖无脊椎动物采集。选择当月大潮日,分别在港区码头桩柱及码头近岸礁石的高、中、低潮区各设 3 个采样点,取样框规格为 0.25 m × 0.25 m,单个取样面积为 0.062 5 m<sup>2</sup>,对大型底栖无脊椎动物进行定量采集;对于活动敏捷的动物,如海蟑螂(*Ligia exotica*)等,则将样方框放置 3~5 min 后用软毛刷迅速将其扫入装有少许海水的桶中。现场使用 5%福尔马林溶液固定标本后带回实验室,之后进行挑选、种类鉴定、个体计数,使用最大量程 420 g,精度为 1 mg 的 MS403TS/02 型 Mettler Toledo 电子天平称重,并对所获数据进行统计分析。

根据《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)

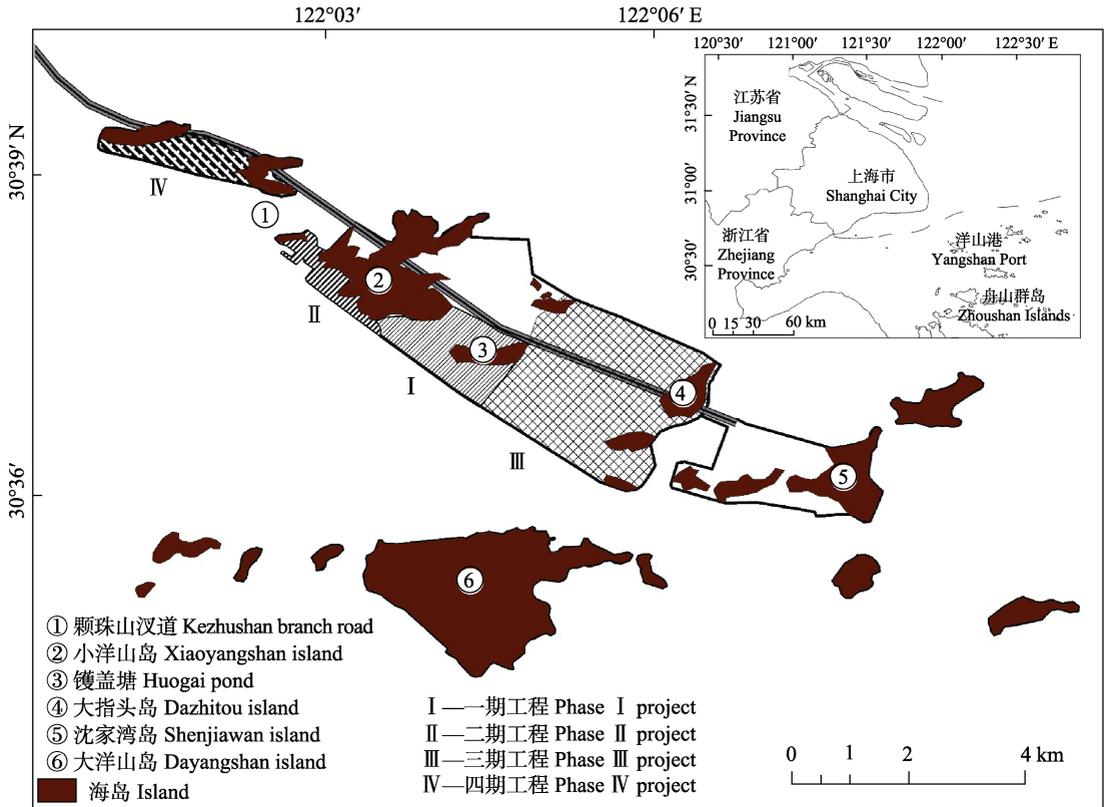


图 1 洋山深水港各阶段工程建设图

Fig. 1 Construction map of each stage of Yangshan Deepwater Port

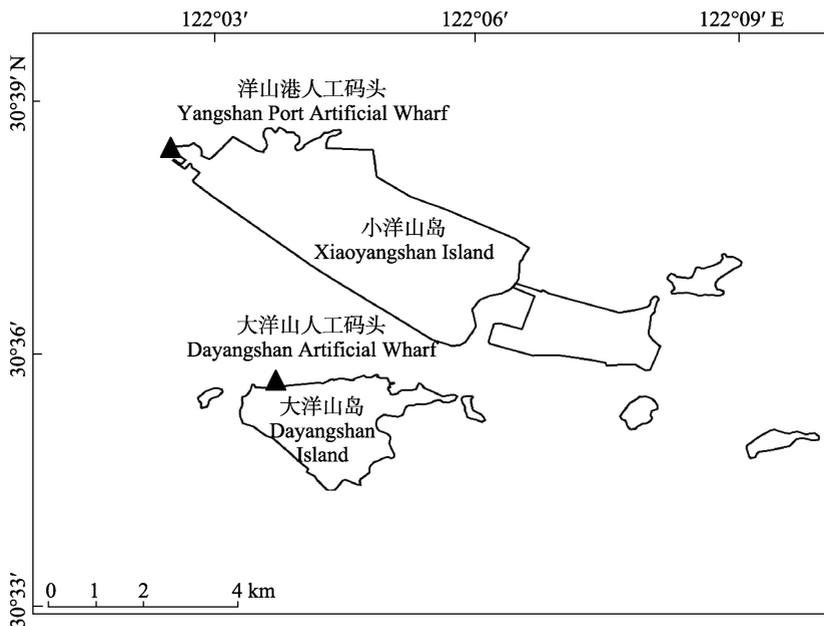


图 2 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物采样位置示意图

Fig. 2 The sampling location of macrobenthos in intertidal zone of Yangshan Port

海水分析部分现场采集海水, 利用 YSI85-25 便携式水质分析仪 (美国维赛多参数水质测量仪) 现场测定海水水温、溶解氧、pH 与盐度, 带回实验室检测计算悬浮物浓度。

## 1.2 数据处理和分析

运用 Arcgis 10.3 绘制洋山港各阶段工程建设示意图与采样位置示意图; 运用 Origin 2022 绘制潮间带大型底栖无脊椎动物群落的密度、生物量数据图; 运用 SPSS 20.0 软件计算潮间带大型底栖无脊椎动物群落生物多样性指数, 并对获得的数据进行方差分析 (ANOVA)。

Shannon-Wiener 多样性指数  $H = -\sum_{i=1}^s (p_i) (\ln p_i)$ , Margalef 多样性指数  $H' = \frac{(S-1)}{\ln N}$ ,

Simpson 丰富度指数  $D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2$ , Pielou 均匀

度指数  $E = \frac{H}{\ln S}$ , 优势度  $Y = \left( \frac{n_i}{N} \right) f_i$ , 式中  $S$  为种类总数,  $p_i$  为第  $i$  种的密度与总密度之比,  $N$  为所有种的密度之和,  $n_i$  为物种  $i$  的个体数量,  $f_i$  为第  $i$  种出现的样方数量与总样方数量的比值。

运用 Primer 5.0 计算洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落生物多样性指数并绘制丰度/生物量曲线 (abundance/biomass comparison curve, ABC 曲线)。当生物量曲线始终高于丰度曲线,  $W$  值大于 0, 表明群落稳定性较高; 一旦群落受到污染或扰动, 则丰度与生物量曲线发生交叉或重叠,  $W$  值小于 0, 表明群落稳定性下降 (田胜艳等 2006)。

运用 Canoco 5.0 对潮间带大型底栖动物数据与环境数据进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。分析前先进行降趋对应分析 (descending correspondence analysis, DCA), 其中排序的过程是将物种排列在低维度空间, 排序轴就能够反映一定的生态梯度, 从而解释物种的分布与环境因子间的关系 (许金石 2019), 当 DCA 分析结果中排序轴梯度最大

小于 3 时, 表明符合线性分布, 适合采用冗余分析 (RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 种类组成与优势种

2021 和 2022 年共鉴定大型底栖无脊椎动物 28 种 (表 1), 其中, 软体动物 15 种, 占总种类数的 53.6%; 节肢动物 9 种, 占总种类数的 32.1%; 腔肠动物 3 种, 占总种类数的 10.7%; 环节动物 1 种。优势种为齿纹蜃螺 (*Nerita yoldii*)、粗糙拟滨螺 (*Littoraria scabra*)、疣荔枝螺 (*Thais clavigera*)、近江牡蛎 (*Magallana rivularis*)、海蟑螂 (*L. exotica*)、网纹纹藤壶 (*Amphibalanus reticulatus*)、纹藤壶 (*A. amphitrite*) 和泥管藤壶 (*Fistulobalanus kondakovi*)。与洋山港第四期工程建设初期相比 (王宝强 2011, 庄骅等 2014), 齿纹蜃螺、疣荔枝螺、近江牡蛎、和海蟑螂等仍是洋山港海域潮间带的主要种类。

不同季节洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物种类数量存在差异, 其中, 秋季出现种类最多, 为 25 种; 其次为夏季和春季, 分别为 17 种和 15 种; 冬季出现种类最少, 仅为 11 种。

### 2.2 密度与生物量

洋山港海域码头人工潮间带不同季节的大型底栖无脊椎动物群落密度与生物量 (图 3) 存在差异 ( $P < 0.05$ ): 密度的最高值出现在夏季大洋山人工码头断面的中潮区, 为  $(3\ 274.67 \pm 536.50)$  ind/m<sup>2</sup>, 洋山港人工码头断面的春季高潮区密度最低, 仅为  $(346.67 \pm 24.44)$  ind/m<sup>2</sup>; 洋山港人工码头断面秋季中潮区的生物量最高, 为  $(2\ 165.81 \pm 431.83)$  g/m<sup>2</sup>, 大洋山人工码头断面春季高潮区的生物量最低, 仅为  $(44.05 \pm 10.67)$  g/m<sup>2</sup>。总之, 洋山港海域码头潮间带大型底栖无脊椎动物群落密度与生物量总体呈现夏、秋季节大于冬、春季节, 在垂直空间分布上呈现中潮区最高、低潮区居中、高潮区最低的趋势。

表 1 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物季节分布与变化

Table 1 Constitution and change of macrobenthos in the artificial intertidal zones of Yangshan Port

种名 Species	数量级 Order of magnitude	季节 Season				变化趋势 Change
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	
腔肠动物门 Intestinal						
中胚花筒螅 <i>Tubularia mcsmbryanthemum</i>	+				√*	—
异杯珊瑚 <i>Heterocyathus japonicus</i>	+			√		↑
桂山厚丛柳珊瑚 <i>Hicksonella guishanensis</i>	+			√		↑
环节动物门 Annelid						
双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	+	√				↑
独齿围沙蚕 <i>P. cultrifera</i>						↓
杂色伪沙蚕 <i>Pseudonereis variegata</i>						↓
软体动物门 Molluse						
短滨螺 <i>Littorina brevicula</i>	++	√	√	√	√	—
粗糙拟滨螺 <i>L. scabra</i>	+++	√	√	√	√	—
齿纹蜃螺 <i>Nerita yoldi</i>	+++	√	√	√	√	—
小结节滨螺 <i>Nodilittorina exigua</i>	+	√	√	√	√	—
疣荔枝螺 <i>Thais clavigera</i>	++	√	√	√		—
日本菊花螺 <i>Siphonaria japonica</i>	+	√	√	√	√	↑
丽核螺 <i>Mitrella bella</i>	+			√		—
甲虫螺 <i>Cantharus cecillei</i>	+			√*		↑
嫁蛾 <i>Cellana toreuma</i>	+	√	√	√	√	—
史氏背尖贝 <i>Nipponacmea schrenckii</i>	+	√*	√*			—
僧帽牡蛎 <i>Saccostrea cucullata</i>	++		√	√		—
近江牡蛎 <i>Magallana ariakensis</i>	+++	√	√	√	√	—
双纹须蚶 <i>Mesocibota bistrigata</i>	+			√*		↑
青蚶 <i>Barbatia virescens</i>	+			√*		↑
朝鲜鳞带石鳖 <i>Lepidozona coreanica</i>	+			√		↑
凸壳肌蛤 <i>Arcuatula senhousia</i>						↓
节肢动物门 Arthropod						
海蟑螂 <i>Ligia exotica</i>	++	√*	√	√		—
特异大权蟹 <i>Macromedaeus distinguendus</i>						↓
浙小长眼寄居蟹 <i>Paguristes zhejiangensis</i>	+		√*	√*		—
四齿大额蟹 <i>Metopograpsus quadridentatus</i>	++		√	√		—
弧边管招潮 <i>Tubuca arcuata</i>	+			√*		↑
纹藤壶 <i>Amphibalanus amphitrite</i>	+++	√	√	√	√	↑
网纹纹藤壶 <i>A. reticulatus</i>	+++		√	√		—
东方小藤壶 <i>Chthamalus challengerii</i>						↓
日本笠藤壶 <i>Tetraclita japonica</i>	+	√	√*	√*	√	—
白脊管藤壶 <i>Fistulobalanus albicostatus</i>	+	√*		√*		—
泥管藤壶 <i>F. kondakovi</i>	+++	√	√	√	√	—

+ 表示该种数量占比小于 1%; ++ 表示该种数量占比介于 1%~10%; +++ 表示该种数量占比大于 10%; √\* 表示该物种仅在定性样品中出现; √ 表示该物种在相应季节内定性与定量均有出现; — 表示该种在第四期工程建设初期与现在均出现; ↓ 表示该种未在本次调查中采集到; ↑ 表示该种仅在本次调查中出现。变化趋势部分中洋山港第四期工程建设初期出现的物种数据来源为参考文献 (薛俊增等 2011, 王宝强 2014, 庄骅等 2014)。

+ indicates that the proportion of this species is less than 1%; ++ indicates that the proportion of this species is between 1% and 10%; +++ indicates that the proportion of this species is more than 10%; √\* indicates that the species only appears in qualitative samples; √ indicates that the species appears qualitatively and quantitatively in the corresponding season; — means that this species appeared in the early stage of the Yangshan Port phase IV construction and now; ↓ indicates that the species was not collected in this survey; ↑ indicates that this species only appears in this survey. The source of species data in the early stage of the Yangshan Port phase IV construction is the reference (Xue J Z et al. 2011, Wang B Q et al. 2014, Zhuang H et al. 2014).

与第四期工程建设初期相比 (王宝强 2011, 庄骅等 2014), 洋山港海域码头人工潮

间带大型底栖无脊椎动物群落密度与生物量呈现上升趋势 (图 4): 洋山港人工码头断面的密

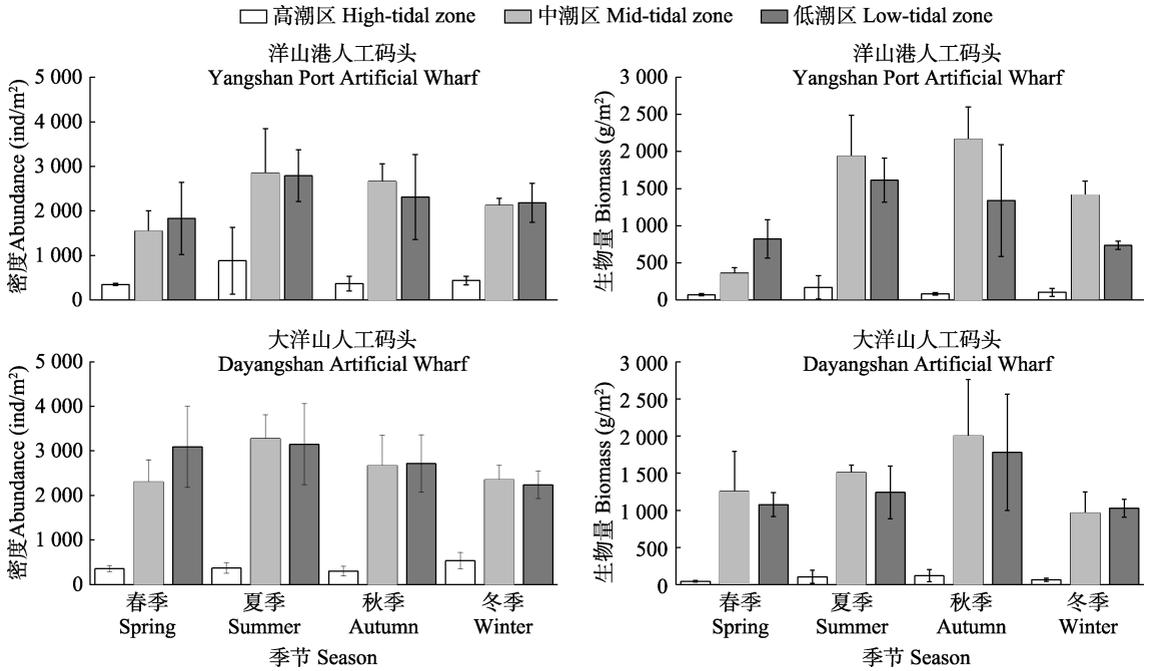


图 3 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物密度和生物量的分布

Fig. 3 Abundance and biomass composition of macrobenthos in the artificial intertidal zones of Yangshan Port

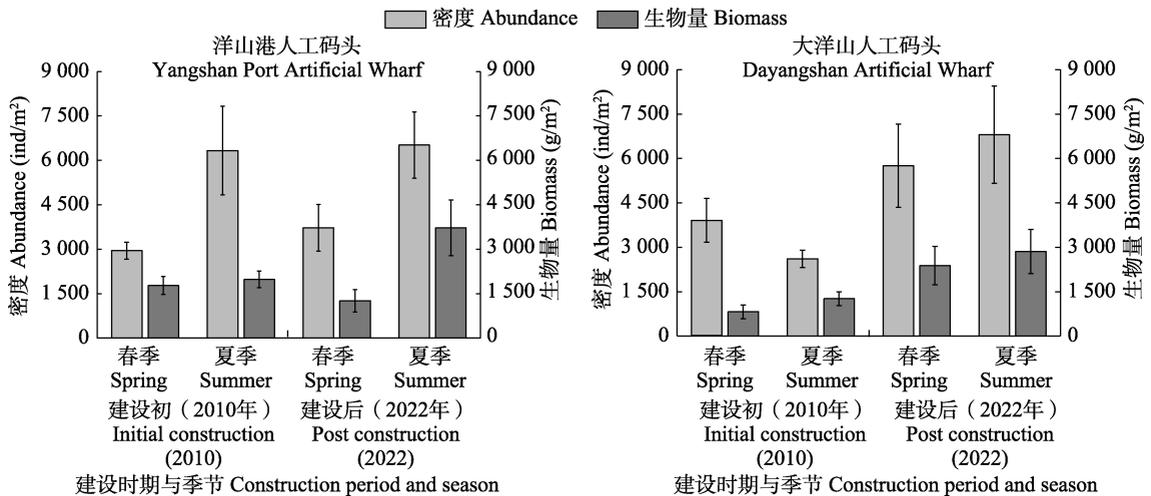


图 4 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物密度与生物量变化

Fig. 4 Changes of abundance and biomass composition of macrobenthos in the artificial intertidal zones of Yangshan Port

工程建设初期数据来源为参考文献 (薛俊增等 2011, 王宝强 2014, 庄骅等 2014)。

The source of data in the early stage of the Yangshan Port phase IV construction is the reference (Xue J Z et al. 2011, Wang B Q et al. 2014, Zhuang H et al. 2014).

度最高值由  $(6\ 333.30 \pm 1495.49)$  ind/m<sup>2</sup> 升至  $(6\ 517.33 \pm 119.67)$  ind/m<sup>2</sup>, 生物量由  $(1\ 977.04 \pm 281.87)$  g/m<sup>2</sup> 升至  $(3\ 724.69 \pm 940.94)$  g/m<sup>2</sup>; 大洋山人工码头断面的密度由  $(3\ 904.00 \pm 740.46)$  ind/m<sup>2</sup> 升至  $(6\ 800.00 \pm 1\ 640.82)$  ind/m<sup>2</sup>, 生物量由  $(1\ 258.54 \pm 227.61)$  g/m<sup>2</sup> 升至  $(2\ 857.07 \pm 745.39)$  g/m<sup>2</sup>。

### 2.3 群落生物多样性

洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落生物多样性的周年季节变化和洋山港第四期工程建设的不同时期均存在一定差异

(图 5): Shannon-Wiener 指数在洋山港人工码头与大洋山人工码头断面的年均值分别为 1.556 和 1.456, 最高值均出现在夏季, 其中大洋山人工码头的最高值由四期工程建设初期的 2.953 降至 1.689; 大洋山人工码头断面的 Margalef 指数由 3.981 降至 2.316, 洋山港人工码头断面则由 0.930 升至 1.688; Simpson 丰富度指数和 Pielou 物种均匀度指数的季节变化与第四期工程不同建设时期的变化幅度均较小, 均介于 0 ~ 1 之间。总体而言, 洋山港人工码头断面潮间带大型底栖无脊椎动物群落生物多

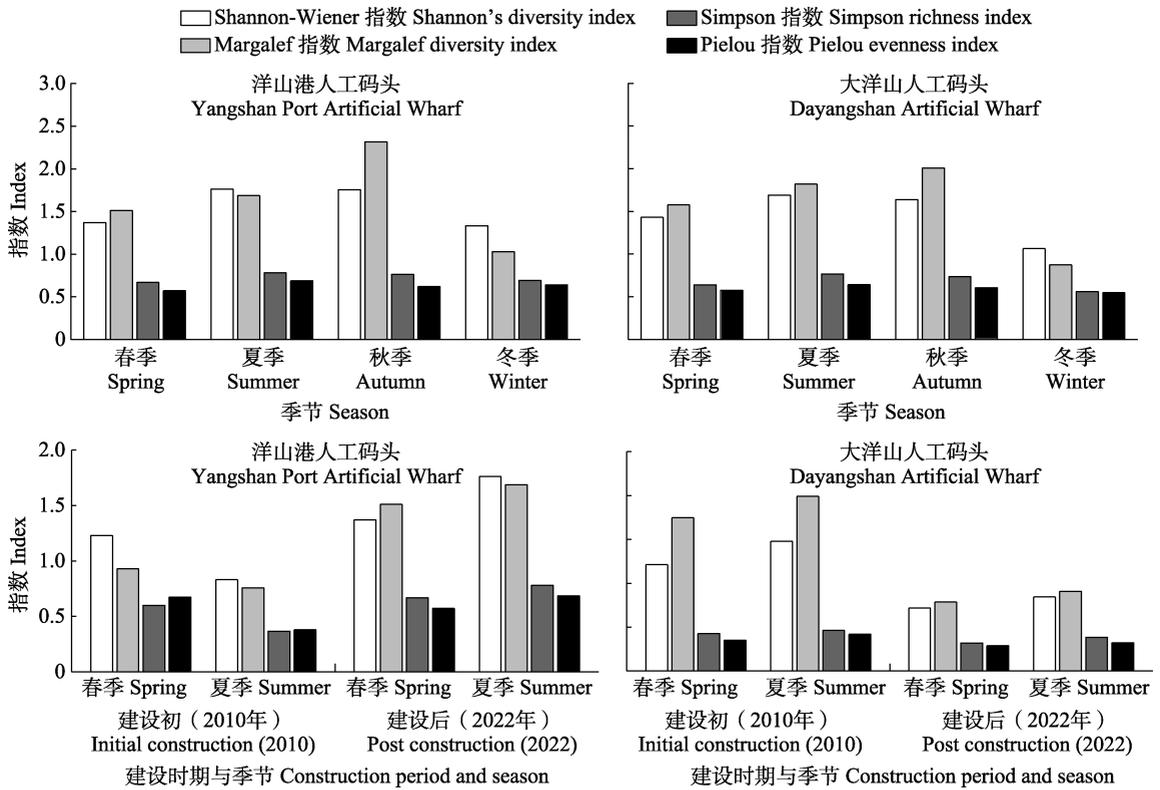


图 5 洋山港码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落多样性变化

Fig. 5 Diversity changes of macrobenthos in the artificial intertidal zones of Yangshan Port

上图是洋山港第四期工程建设后(2021 和 2022 年)群落生物多样性的季节变化; 下图为洋山港第四期工程不同建设时期群落生物多样性变化, 工程建设初期数据来源为参考文献(薛俊增等 2011, 王宝强 2014, 庄骅等 2014)。

The above figures showed the seasonal changes of community biodiversity after the construction of the IV phase of Yangshan Port (2021 and 2022), and the below figures showed the changes of community biodiversity in different construction periods of the IV phase of Yangshan Port. The source of data in the early stage of the Yangshan Port phase IV construction is the reference (Xue J Z et al. 2011, Wang B Q et al. 2014, Zhuang H et al. 2014).

样性与第四期工程建设初期相比有所上升, 而大洋山人工码头断面群落生物多样性下降显著。

## 2.4 丰度/生物量 (ABC) 曲线

根据 2021 和 2022 年洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落的 ABC 曲线分析结果 (图 6), 洋山港人工码头断面与大洋山人工码头断面四个季节的 ABC 曲线均出现相互交叉与重叠,  $W$  值均为负, 表明洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落结构均不稳定, 受到一定程度的扰动。

## 2.5 相关性分析

将 2021 和 2022 年洋山港海域码头人工潮

间带大型底栖无脊椎动物的群落密度与洋山港码头海域主要环境因子温度、盐度、pH、溶解氧浓度、总悬浮颗粒物、浮游植物生物量及浮游动物生物量 (表 2) 进行相关性分析。冗余分析 (RDA) 结果表明 (图 7): 主成分轴 1 和轴 2 分别解释了 36.32% 和 13.40% 的物种-环境关系变异, 温度、盐度和总悬浮物浓度是影响大型底栖无脊椎动物的主要环境因子, 其中粗糙拟滨螺、齿纹蜆螺、纹藤壶与温度、盐度呈正相关, 与溶解氧、悬浮物和浮游生物的生物量呈负相关; 短滨螺 (*L. brevicula*)、疣荔枝螺与溶解氧、悬浮物和浮游生物的生物量呈正相关, 与温度、盐度呈负相关。

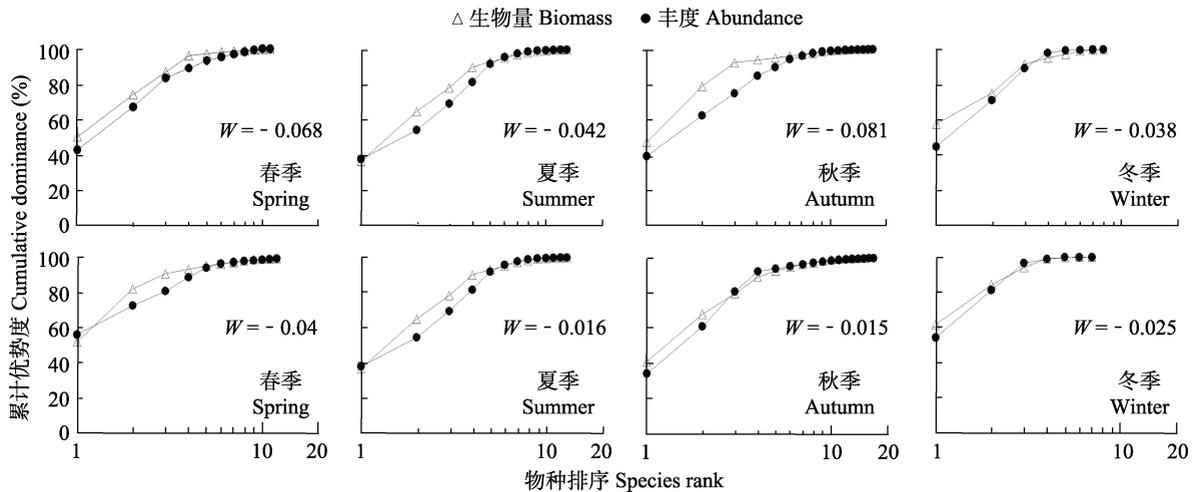


图 6 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物丰度/生物量曲线

Fig. 6 The abundance/biomass comparison curves of macrobenthos in the artificial intertidal zones of Yangshan Port

上图. 洋山港码头, 下图. 大洋山码头。Above figures are Yangshan Port Artificial Wharf, below figures are Dayangshan Artificial Wharf.

表 2 洋山港码头海域主要环境因子

Table 2 The main environmental factors of Yangshan Port

月份 Month	温度 Temperature (°C)	pH	盐度 Salinity (%)	溶解氧 Dissolved oxygen (mg/L)	悬浮物 Total suspension (mg/L)	浮游植物生物量 Phytoplankton (mg/L)	浮游动物生物量 Zooplankton (mg/m <sup>3</sup> )
3 月 March	14.58 ± 0.04	8.46 ± 0.03	17.95 ± 0.03	8.23 ± 0.03	169.84 ± 2.59	27.31 ± 0.76	4.92 ± 0.29
7 月 July	25.96 ± 0.11	8.45 ± 0.02	19.89 ± 0.04	7.01 ± 0.03	70.68 ± 1.77	13.69 ± 1.56	2.19 ± 0.26
9 月 September	21.28 ± 0.09	8.11 ± 0.06	16.93 ± 0.06	7.57 ± 0.05	112.14 ± 2.98	7.45 ± 0.44	1.67 ± 0.36
12 月 December	8.86 ± 0.08	8.23 ± 0.04	20.03 ± 0.05	8.44 ± 0.05	108.26 ± 2.46	2.65 ± 0.32	3.58 ± 0.41

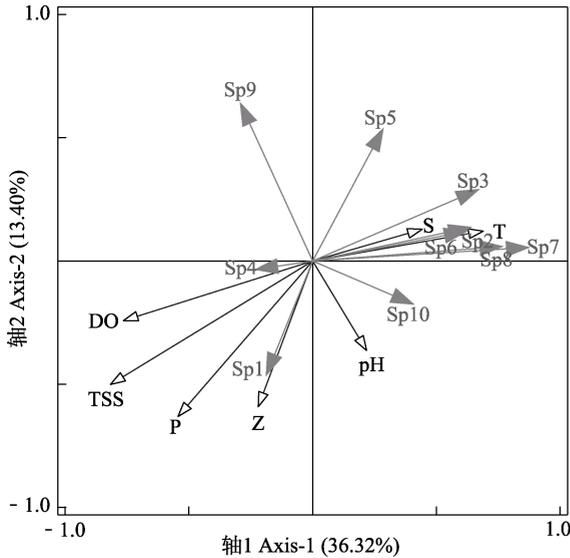


图7 洋山港海域码头人工潮间带不同优势种与主要环境因子的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) results of the relationship between different dominant species and main environmental factors in the intertidal zone of Yangshan Port

Sp1. 短滨螺; Sp2. 粗糙拟滨螺; Sp3. 齿纹蚤螺; Sp4. 疣荔枝螺; Sp5. 近江牡蛎; Sp6. 海蟑螂; Sp7. 纹藤壶; Sp8. 白脊管藤壶; Sp9. 泥管藤壶; Sp10. 网纹纹藤壶; DO. 溶解氧; P. 浮游植物生物量; S. 盐度; T. 温度; TSS. 悬浮物; Z. 浮游动物生物量  
 Sp1. *Littorina brevicula*; Sp2. *L. scabra*; Sp3. *Nerita yoldi*; Sp4. *Thais claviger*; Sp5. *Mesocibota ariakensis*; Sp6. *Ligia exotica*; Sp7. *Amphibalanus amphitrite*; Sp8. *Fistulobalanus albicostatus*; Sp9. *F. kondakovi*; Sp10. *A. reticulatus*; DO. Dissolved oxygen; P. Phytoplankton; S. Salinity; T. Temperature; TSS. Total suspension; Z. Zooplankton

### 3 讨论

#### 3.1 种类组成与变化

种类组成是群落结构最基本的特征，能反映群落与生态环境的关系（纪莹璐等 2022）。本次采集到的潮间带大型底栖无脊椎动物群落的种类组成与周边海港潮间带存在一定相似性，以节肢动物与软体动物为主，其中疣荔枝螺、近江牡蛎、白脊管藤壶（*F. albicostatus*）等舟山海域代表种类在芦潮港（王晓波等

2011）、长涂港（朱四喜等 2014）和象山港（刘颖等 2021）均有所分布。然而本次调查所获的 28 种大型底栖无脊椎动物在种类数量上远少于洋山港周边的圣姑礁自然潮间带的 44 种（王宝强 2011）、舟山海域嵛山岛岩相自然潮间带的 38 种（杨颖等 2022）以及浙江苍南海域无居民海岛的岩相潮间带的 58 种（刘瀚仁等 2021）。这一方面与样品采集的区域和范围有关，另一方面与天然海岛受人类活动影响小，潮间带栖息地未遭到破坏有关。

通过调查大型底栖无脊椎动物群落种类的变化可进一步分析影响群落变化的因素与变化趋势（纪莹璐等 2022）。与洋山港第四期工程建设初期（王宝强 2011，庄骅等 2014）相比，洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物种类存在一定变化：常出现在盐度较低、水质清澈海域的白脊管藤壶曾在洋山港海域的中、高潮区大量分布（杨万喜等 1998），本次调查中数量显著减少；被证实为舟山海域的跨海区入侵种的东方小藤壶（*C. challengeri*）曾在洋山港第四期工程建设初期通过船底附着、压舱水排放等途径出现在洋山港港区并在舟山海域定殖扩散（薛俊增等 2011，刘艳等 2014），但本次研究中并未采集到；纹藤壶常在泥沙环境稳定的海域中出现（薛俊增等 1998），开港前曾在洋山港海域出现（杨万喜等 1996），但第四期工程建设初期（王宝强 2011）近乎消失，本次调查又重新成为优势种。根据相关性分析，上述种类的变化与洋山港海域的海水温度、盐度、溶解氧等水环境因子的变化存在一定关系，因此有必要对洋山港海域潮间带大型底栖动物群落与水环境进行长期性监测与分析。

#### 3.2 港口码头运营对群落结构的影响

洋山港港区码头扩建与航运的持续发展影响了该海域的生态环境，对附近海域潮间带大型底栖无脊椎动物的密度、生物量、生物多样性与群落结构稳定性均产生影响。与洋山港第四期工程建设初期（王宝强 2011，庄骅等 2014）相比，洋山港海域码头人工潮间带大型

底栖无脊椎动物群落密度与生物量有所上升。此外, 本次调查的群落平均密度 ( $5\,464.44\text{ ind/m}^2$ ) 和平均生物量 ( $2\,753.54\text{ g/m}^2$ ) 远高于长涂港附近的  $1\,186\text{ ind/m}^2$  和  $842.68\text{ g/m}^2$  (朱四喜等 2014) 及日照岚山港的  $443\text{ ind/m}^2$  和  $15.51\text{ g/m}^2$  (纪莹璐等 2020)。这是因为洋山港港区运营近 20 年, 生物量占比较大的牡蛎、藤壶大量集中在港区码头桩柱的中、低潮区, 未受到大面积的人为采集与破坏, 因此得以繁殖发育。

与洋山港海域附近的自然潮间带相比, 洋山港人工码头潮间带的 Shannon-Wiener 多样性指数低于洋山港海域圣姑礁自然潮间带 (2.342) (王宝强 2011) 和长江口北支自然潮间带 (2.692) (赵开彬等 2014)。根据 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H$ ) 评价海域水质环境受污染程度的标准:  $H < 1$  时, 重度污染;  $1 \leq H \leq 2$  时, 中度污染;  $2 < H \leq 3$  时, 轻度污染;  $H > 3$  时, 清洁 (蔡立哲 2006), 洋山港人工码头海域自第四期工程建设以来始终属于中等污染海域, 大洋山人工码头海域由第四期工程建设初期的轻度污染海域变为现在的中度污染海域, 说明第四期工程建设完成后大洋山码头断面生态环境质量下降更为显著。由于洋山港四期全自动化码头的使用, 洋山港人工码头 (洋山港二号码头) 潮间带大型底栖无脊椎动物群落的生存环境相对稳定, 使得该断面群落生物多样性有所上升; 大洋山人工码头近年重新修缮建设, 海岸带重新改造, 交通船与渔船班次增多且采样断面附近采集牡蛎、贝类的人数不断增多, 使得该断面生物多样性进一步下降。总体而言, 洋山港第四期工程建设以来, 码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物的群落结构发生了一定的变化。这可能与洋山港修建航道、水下炸礁等工程的建设, 深水泊位与大吨位船舶数量的不断增加, 以及港区运量的持续提升有关。

综上所述, 洋山港海域码头人工潮间带大型底栖无脊椎动物群落仍处于不稳定状态, 因

此仍然需要对洋山港港区定期展开底栖生物群落监测。

## 参 考 文 献

- Marques J C, Nielsen S N, Pardal M A, et al. 2003. Impact of eutrophication and river management within a framework of ecosystem theories. *Ecological Modelling*, 166(1/2): 147–168.
- 蔡立哲. 2006. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展. 厦门大学学报: 自然科学版, 45(增刊 2): 83–89.
- 丁益华, 王曜, 秦涛, 等. 2021. 洋山港四期自动化码头任务调度系统优化. 港口科技, 182(4): 16–21.
- 窦明, 左军成, 陈美香, 等. 2018. 大洋山围垦工程对邻近海域环境的影响. *海洋环境科学*, 37(3): 409–417, 447.
- 纪莹璐, 宿凯, 张海舟, 等. 2022. 2015—2020 年乳山近岸海域春夏季大型底栖动物群落结构及变化. *安徽大学学报: 自然科学版*, 46(1): 100–108.
- 纪莹璐, 王尽文, 张亮, 等. 2020. 日照岚山港邻近海域大型底栖动物群落结构及季节变化. *生态科学*, 39(5): 151–160.
- 纪莹璐, 张亮, 宿凯, 等. 2021. 青岛董家口春季大型底栖动物群落结构及其与环境因子关系. *海洋湖沼通报*, 43(5): 99–108.
- 刘瀚仁, 廖一波, 寿鹿, 等. 2021. 浙江苍南无居民海岛岩相潮间带生物群落多样性研究. *海洋学研究*, 39(2): 68–79.
- 刘艳, 吴惠仙, 薛俊增. 2014. 舟山海域东方小藤壶的入侵与影响分析. *水产学报*, 38(7): 1047–1055.
- 刘颖, 李进京, 陈晨, 等. 2021. 浙江象山港岛屿春夏季潮间带大型底栖生物的群落结构特征. *海洋与湖沼*, 52(3): 685–696.
- 任越, 郭伟其, 高郭平, 等. 2018. 上海洋山国际深水港建设对洋山海域波浪分布特征的影响研究. *海洋湖沼通报*, (4): 1–12.
- 沈国英, 施并章. 1990. 海洋生态学. 厦门: 厦门大学出版社, 91–96.
- 田胜艳, 于子山, 刘晓收, 等. 2006. 丰度/生物量比较曲线法监测大型底栖动物群落受污染扰动的研究. *海洋通报*, 25(1): 92–96.
- 王宝强. 2011. 洋山深水港海域附着生物生态学研究. 上海: 上海海洋大学硕士学位论文.
- 王金宝, 李新正, 王洪法, 等. 2018. 山东长岛潮间带大型底栖动物生态特征研究. *海洋科学*, 42(10): 41–52.
- 王晓波, 魏永杰, 龙绍桥. 2011. 上海芦潮港海域污损生物的分布

特征及生态特点. 海洋学研究, 29(3): 136–144.

许金石. 2019. 秦岭北坡生境梯度上植物群落构建研究. 西安: 西北大学硕士学位论文.

薛俊增, 蔡如星. 1998. 舟山虾塘纹藤壶种群结构研究. 海洋湖沼通报, (2): 30–33.

薛俊增, 王宝强, 压骅, 等. 2011. 洋山港码头污损生物的群落结构和多样性研究. 科技导报, 29(3): 66–70.

阎新兴, 刘国亭. 2003. 上海洋山港水域沉积特征研究. 水道港口, 24(4): 174–179.

杨万喜, 陈永寿. 1996. 嵎泗列岛潮间带群落生态学研究 I. 岩相潮间带底栖生物群落组成及季节变化. 应用生态学报, 7(3): 305–309.

杨万喜, 陈永寿. 1998. 嵎泗列岛潮间带群落生态学研究 II. 岩相潮间带底栖动物的群落结构. 应用生态学报, 9(1): 75–78.

杨颖, 陈思思, 周红宏, 等. 2022. 长江口潮间带底栖生物生态及变化趋势. 生态学报, 42(4): 1606–1618.

叶碧晴. 2021. 洋山港开通对长三角城市出口的影响研究. 南京: 南京大学硕士学位论文.

赵开彬, 刘婧, 吴惠仙, 等. 2014. 长江口北支大型底栖动物群落周年变化特征. 生物学杂志, 31(3): 1–6.

朱四喜, 王凤友, 杨秀琴, 等. 2014. 浙江大、小长涂岛潮间带大型底栖动物的群落结构研究. 生态科学, 33(1): 51–55.

庄骅, 蒋建飞, 吴惠仙. 2014. 洋山港建设对小洋山岛潮间带大型底栖动物的影响. 海洋湖沼通报, (1): 155–160.

(上接第 36 页)



图 1 水雉 (孙晓明 2011 年摄于沈阳)

Fig. 1 Pheasant-tailed Jacana (Photos by SUN Xiao-Ming in Shenyang, 2011)



图 2 水雉 (余炼 2021 年摄于锦州)

Fig. 2 Pheasant-tailed Jacana (Photos by YU Lian in Jinzhou, 2021)

马瑞瑶<sup>①</sup> 陶征然<sup>②</sup> 孙晓明<sup>③</sup> 余炼<sup>④</sup> 万冬梅<sup>①</sup> 张雷<sup>①\*</sup>

① 辽宁大学生命科学学院 沈阳 110036; ② 辽宁省林业调查规划设计院 沈阳 110122;  
 ③ 沈阳猛禽救助中心 沈阳 110065; ④ 锦州市野生动物及湿地保护协会 锦州 121000