

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2020.03.008

# 福建闽江口潮间带大型底栖动物 次级生产力时空特征

周细平<sup>1,2</sup>, 吴培芳<sup>1</sup>, 李贞<sup>1</sup>, 吴茜<sup>1</sup>, 陈逸欣<sup>1</sup>,  
刘康格<sup>1</sup>, 刘东艳<sup>3</sup>, 王玉珏<sup>4</sup>, 王跃启<sup>4</sup>

(1. 厦门大学嘉庚学院 环境科学与工程学院, 福建 漳州 363105; 2. 厦门大学嘉庚学院 河口生态安全与环境健康  
福建省高校重点实验室, 福建 漳州 363105; 3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;  
4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘 要:** 为研究福建省闽江口潮间带大型底栖动物次级生产力的时空变化, 于 2014 年 11 月—2015 年 8 月对闽江口大型底栖动物进行了 4 个季度的调查研究。在获得 3 条断面大型底栖动物物种数、密度和生物量的基础上, 利用 Brey 经验公式计算年平均次级生产力 ( $P$ )。研究结果显示: 闽江口 4 个季度共获得大型底栖动物 63 种, 其中优势类群为多毛类。闽江口潮间带大型底栖动物年均次级生产力为  $6.13 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (AFDW, 去灰分干重, ash-free dry weight)。在季节分布上, 次级生产力最高值出现在夏季, 为  $11.04 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 最低值出现在冬季, 为  $2.25 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 在空间分布上, 次级生产力最高值出现在 P03 断面, 为  $10.23 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 最低值出现在 P01 断面, 为  $2.54 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。大型底栖动物年均 P/B 值 ( $B$ =Biomass, 生物量) 为  $2.31 \text{ a}^{-1}$ , 最高值出现在春季, 为  $3.17 \text{ a}^{-1}$ , 最低值出现在夏季, 为  $1.74 \text{ a}^{-1}$ ; 且 P02 断面的 P/B 值高于其他 2 条断面。Pearson 相关分析结果表明, 次级生产力与温度呈显著正相关, P/B 值与盐度呈显著正相关但与 pH 呈显著负相关。因此, 环境因子在一定程度上影响着该区域大型底栖动物的次级生产力。闽江口大型底栖动物群落组成中以个体小、生活史短、繁殖快的小型甲壳类螺赢蜚 (*Corophium* sp.) 为主, 使该潮间带区域的 P/B 值高于其他临近潮间带区域的调查结果。

**关键词:** 闽江口; 大型底栖动物; 次级生产力; P/B 值; 时空变化

中图分类号: P735; Q958.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2020)03-0342-09

## Temporal-spatial characteristics of secondary production of macrofauna in Minjiang Estuary

ZHOU Xiping<sup>1,2</sup>, WU Peifang<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, WU Xi<sup>1</sup>, CHEN Yixin<sup>1</sup>, LIU Kangge<sup>1</sup>,  
LIU Dongyan<sup>3</sup>, WANG Yujue<sup>4</sup>, WANG Yueqi<sup>4</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou 363105, China;  
2. Key Laboratory of Estuarine Ecological Security and Environmental Health, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou  
363105, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;  
4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Abstract:** To explore the temporal-spatial variation of macrofauna secondary production in Minjiang River Estuary, Fujian, four surveys were carried out from November 2014 to August 2015. Based on the Brey experience formula (1990), the annual average biomass ( $B$ ) and the annual average individual weight ( $W$ ) were used to assess annual productivity ( $P$ ). This study identified 63 macrofauna species, in which polychaetes were the dominant species. The mean  $P$  was  $6.13 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  with the highest value of  $11.04 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  in summer and the lowest value of  $2.25 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  in winter. According to spatial distribution, the highest  $P$  was  $10.23 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  in section P03 and the lowest value was  $2.54 \text{ g}$

收稿日期: 2019-06-28; 修订日期: 2019-11-28

基金项目: 科技部基础性工作专项 (2014FY210600); 国家自然科学基金 (41606119); 福建省自然科学基金 (2017J05068); 2016 年度福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目 (闽教科 [2017] 52 号)

作者简介: 周细平 (1981-), 博士, 副教授, 主要从事海洋生物和海洋底栖生态研究。电子邮箱: zoeyzhou@xujc.com

<http://hytb.nmdis.org.cn>

(AFDW)·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> in section P01. The average P/B ratio was 2.31 a<sup>-1</sup> with the highest value of 3.17 a<sup>-1</sup> in spring and the lowest value of 1.74 a<sup>-1</sup> in summer. Meanwhile, the P/B ratio in section P03 was clearly higher than other two sections. Pearson correlation analysis observed a significant positive correlation between P and temperature, P/B ratio and salinity and a significant negative correlation between P/B ratio and pH. Moreover, environmental factors modestly affected P of macrofauna. The short life history and fast reproduction of the dominant species *Corophium* sp. in Minjiang Estuary may explain the higher P/B ratio than other adjacent intertidal zone.

**Keywords** : Minjiang Estuary; macrofauna; secondary production; P/B ratio; temporal-spatial variation

河口湿地是地球上单位面积生产力最高的生态系统之一，这一重要的自然生态系统提供了淡水和海洋相互交汇的、界限清楚的物理空间。因地处陆海过渡带，人类生产开发活动频繁，海陆理化因子交替作用下物质交换过程复杂多变，河口湿地一直以来备受关注。闽江是福建省最大独流入海（东海）河流，流域面积 60 992 km<sup>2</sup>，全长 562 km（蒋奕雄，2017），外动力条件复杂，具有强大的闽江径流作用，海岸地貌和地质类型多样（刘苍宇等，2001）。多年来，由于工业迅速发展，人口增加，城市化水平不断提高以及不合理的资源开发和利用，闽江口生态安全和环境健康受到严重威胁，其流域水环境综合整治已经成为福建省环境保护工作的重中之重。

海洋底栖生物（marine benthos）是生活史的全部或大部分时间生活于海洋沉积物以及海水中物体（包括生物体和非生物体）底内、底表的生物，根据其通过筛网的大小，可以分为大型底栖动物（macrofauna）、小型底栖动物（meiofauna）和微型底栖动物（microfauna）（蔡立哲，2015）。大型底栖动物是河口湿地生态系统的重要组成部分，它们主要通过摄食、掘穴和建管等扰动活动直接或间接地影响生态系统（钟海霞等，2018）。由于活动能力较弱且受环境变化影响显著，底栖生物群落组成结构及其动态变化通常对环境状况和变化具有重要的指示作用，在污染监测和环境质量评价中被加以利用，可作为良好的环境指示物种（Taft et al, 2005）。除此之外，大型底栖动物在河口地区的营养盐循环和水质净化中起着重要作用（Harris, 1999；Peterson et al, 1999），影响沉积物地球化学过程（Aller et al, 2001；Meysman et al, 2006；Middeburg et al, 2009），初级和次级生产力（Snelgrove, 1998），甚至地貌学（Murray et al, 2002）。

鉴于闽江河口区的重要生态地位和近年来环境

条件的变化，开展闽江口大型底栖动物的研究具有重要的现实意义。陈品健（1989）对闽江口以北沿岸潮间带底栖生态学进行了研究，首先指出闽江口以北 4 种软相潮间带由于开发程度较高，底栖动物生物量相对偏低，尤其经济种生物量较低。此后关于闽江潮间带区域大型底栖动物的研究也有少数报道，主要涉及潮下带海域研究（李荣冠等，1997）、底栖动物部分类群（陈寅山等，1997）及群落生态（蓝虹等，2007），但有关闽江口大型底栖动物次级生产力的研究仍未见报道。研究大型底栖动物次级生产力对不同海区渔业养殖容量估算、海洋生态系统功能研究具有重要指导意义，可为湿地生态系统的监测和评价提供基本数据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 区域概况

闽江口位于福建省北部，是福建省第一大江的入海口，地理坐标为 119°06′—119°41′ E，25°51′—26°10′ N，属于典型的海洋性亚热带季风气候，其气候基本特征是温暖湿润、雨量充沛，全年冬短夏长，年平均气温为 24℃~29℃，最冷月为 1~2 月，最热月为 7~8 月。闽江东西长 74.2 km，南北宽 53 km，径流、潮流都有一定势力，含沙量较小，因此闽江口属于河口湾与三角洲两大类型之间的过渡型河口。

### 1.2 采样方法及样品处理

于 2014 年 11 月（秋季）、2015 年 2 月（冬季）、5 月（春季）和 8 月（夏季）对闽江口大型底栖动物进行 4 个季度的调查研究。在河口区潮间带设置 3 条具有代表性的断面（P01 断面、P02 断面和 P03 断面，图 1），每条断面分高、中、低潮 3 个站位，每个站位有 3 个定量平行样及 1 个定性样品。其中 P01 断面临近琅岐岛，取样站位于当地开明寺向海一侧较短窄的滩涂，高、中、低潮区之

间仅距离 5~6 m, 但潮区之间底质差异明显, 其中高潮区底质较细, 采样点附近有采砂后堆积如山的海沙。P02 断面和 P03 断面位于闽江入海口外缘, 其中 P02 断面底质偏砂质, P03 断面底质较为细腻, 2 条采样断面滩涂平坦且宽广, 高潮区已有互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel) 入侵, 各个潮区之间距离较远。采样时用 25 cm × 25 cm × 30 cm 样框和铲子采集泥样, 然后用 0.5 mm 孔径的筛网清洗泥样, 将截留在筛网的生物和部分残留物用 95% 酒精固定带回实验室。实验室内进行进一步清洗、过筛、分选、鉴定和称重, 将结果记录在鉴定表中。

2014 年 11 月另外采集沉积物样品进行有机碳、总氮和底质粒径的测定。底质粒径根据 2007 年出版的《海洋调查规范 第 8 部分: 海洋地质地球物理调查-沉积物粒度分析》(GB/T 12763.8—2007) 划分为砾石 (>2000 μm)、砂 (63~2000 μm)、粉砂 (4~63 μm) 和黏土 (<4 μm)。同时, 每个季度现场同步测量海水的 pH 值、盐度、水温等环境因子。

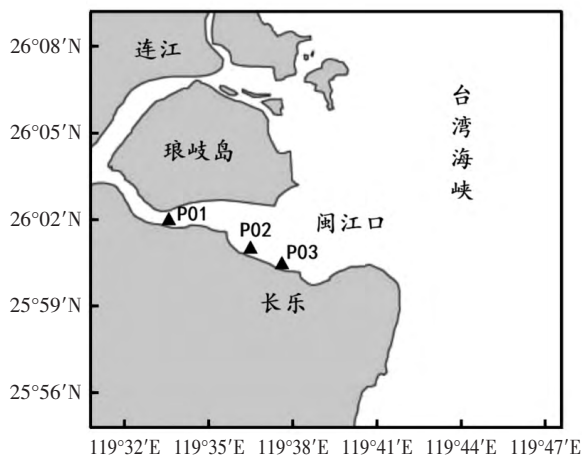


图 1 闽江口采样点分布

### 1.3 数据处理

本文大型底栖动物的次级生产力分别采用 Brey (1990) 两种经验模型进行计算比较。

计算方法一, 根据 Brey (1990) 的经验公式计算大型底栖动物的次级生产力:

$$\lg P = -0.4 + 1.007 \lg B - 0.27 \lg W \quad (1)$$

为便于计算, 于子山等 (2001) 将上述公式转换为:

$$\lg P = 0.27 \times \lg A + 0.737 \times \lg B - 0.4 \quad (2)$$

计算方法二, 采用 Brey (1990) (有分类群) 经验公式进行计算:

$$\lg P = a + b1 \times \lg B + b2 \times \lg W \quad (3)$$

由于  $W = B/A$ , 为便于计算, 可以将上述公式转换为如下形式:

$$P = A^x \times B^y / 10^z \quad (4)$$

式中,  $P$  为年均大型底栖动物次级生产力 ( $g(\text{AFDW}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $A$  为大型底栖动物年均丰度 ( $\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $B$  为大型底栖动物年均去灰干重生物量 ( $g(\text{AFDW}) \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $W$  为大型底栖动物个体年均去灰干重 ( $g(\text{AFDW})$ )。式 (3) 中不同类群的  $a$ 、 $b1$  和  $b2$  均不同, 不同类群的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值见表 1。生物量湿重转换为干重的比例采用 5:1, 干重转换为去灰干重 (AFDW, ash-free dry weight) 的比例采用 10:9 (茉莉等, 2000; Crips, 1984)。大型底栖动物年次级生产力为 4 个季度的平均值, 分类群计算  $P$  时采用式 (4) 先分别计算各类群年平均次级生产力, 最后将所有类群的平均次级生产力相加, 即得到整个群落年平均次级生产力。

表 1 Brey 公式中不同类群的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值

系数	软体动物	多毛类	甲壳类	棘皮动物和其他类群
$x$	0.283	0.116	0.361	0.274
$y$	0.747	0.906	0.661	0.733
$z$	0.591	0.018	0.614	0.473

大型底栖动物群落参数的时空差异显著性分析采用 SPSS 22 中的 Two-way ANOVA, 其中  $P > 0.05$  表示差异不显著;  $0.01 < P < 0.05$  表示差异显著;  $P < 0.01$  表示差异极显著; 大型底栖动物群落参数与环境因子的关系采用 SPSS 22 中的 Pearson 相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 大型底栖动物优势种、丰度和生物量

福建闽江口 2014—2015 年 4 个季度调查共获得大型底栖动物 63 种, 其中优势类群为多毛类, 有 25 种, 占种数的 40%; 甲壳类 19 种, 占种数的 30%; 软体类 13 种, 占种数的 21%; 其他种类 6 种, 占种数的 9% (图 2)。根据物种的出现率和出现频次, 秋季、冬季和夏季大型底栖动物丰度的主要优势种分别是螺赢蜚、奇异稚齿虫



(*Paraprionospio pinnata*) 和淡水泥蟹 (*Ilyoplax tansuiensis*)；春季大型底栖动物丰度的优势种比较复杂,有螺赢蜚、沙钩虾 (*Byblis* sp.) 和光滑河篮蛤 (*Potamocorbula laevis*) 等。

闽江口大型底栖动物年平均丰度  $A = (1\,745.75 \pm 1\,240.18) \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其最高值出现在 P03 中潮站

位,为  $4\,412.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最低值出现在 P01 低潮站位,为  $218.75 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 年平均去灰干重生物量  $B = (2.65 \pm 1.76) \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其最高值出现在 P03 中潮站位,为  $6.31 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最低值出现在 P01 低潮站位,为  $0.87 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2}$ 。各站位各季度的平均丰度和生物量去灰分干重详见图3。

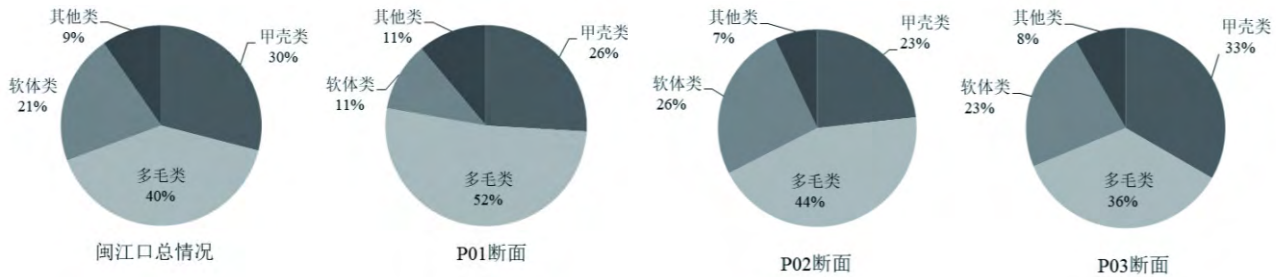


图2 闽江口大型底栖动物物种组成

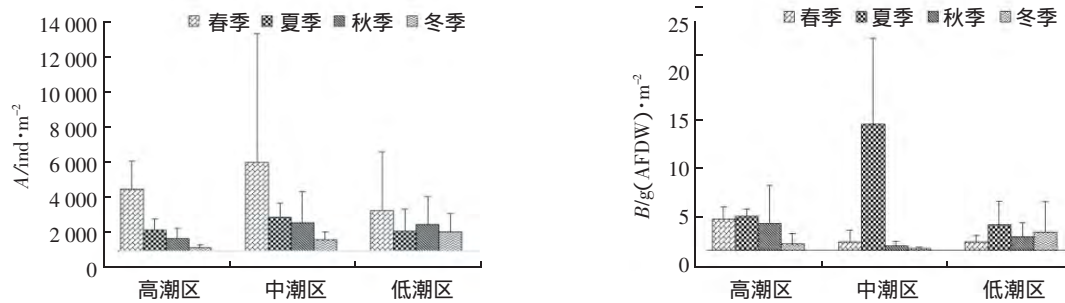


图3 大型底栖动物丰度和生物量的时空分布

## 2.2 大型底栖动物次级生产力和 P/B 值的时空分布

采用 Brey (1990) 经验公式进行计算,闽江口潮间带大型底栖动物年平均次级生产力  $P = (6.13 \pm 4.12) \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 具体空间分布和季节变化如图4所示。在空间分布方面,  $P$  的年平均值由高到低为 P03 断面 > P02 断面 > P01 断面, 其中 P03 断面和中潮区的夏季  $P$  在同比中居于最高; 季节变化规律从断面来看整体是春、夏高于秋、冬, 其中 P02 断面最明显, 但从潮位来看则各不相同, 高潮区和中潮区也是春、夏高于秋、冬, 但低潮区则夏季最高, 春季最低。

闽江口潮间带大型底栖动物年平均 P/B 值为  $(2.31 \pm 0.38) \text{ a}^{-1}$ , 具体空间分布和季节变化如图5所示。3 条断面的 P/B 值最高均出现在春季, 最低出现在夏季断面; 在垂直方向上, 3 个潮区的 P/B 值最高值也都出现在春季, 但最低值仅中潮区和低潮区出现在夏季, 高潮区则秋冬差异不明显。

双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 表明 (表2), 闽江口大型底栖动物生物量和次级生产力在季节与潮带间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 丰度和 P/B 值在不同季度、不同断面和不同断潮带之间均差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.3 不同类群对大型底栖动物次级生产力的贡献

采用 Brey (1990) 经验公式进行计算, 闽江口潮间带大型底栖动物年平均次级生产力  $P = 5.30 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , P/B 值为  $2.07 \text{ a}^{-1}$ 。其中软体动物和甲壳动物对大型底栖动物次级生产力的贡献较为突出, 分别为  $2.15 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $2.86 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。具体各类群对次级生产力的贡献如图6所示。空间分布方面, 甲壳动物在 P01 和 P02 断面大型底栖动物次级力贡献方面最突出, P03 断面次级生产力贡献则主要来自软体动物。从潮位来看, 高潮区和中潮区大型底栖动物次级生产力最大贡献来自甲壳动物, 但低潮区则是软体动物贡献最大。

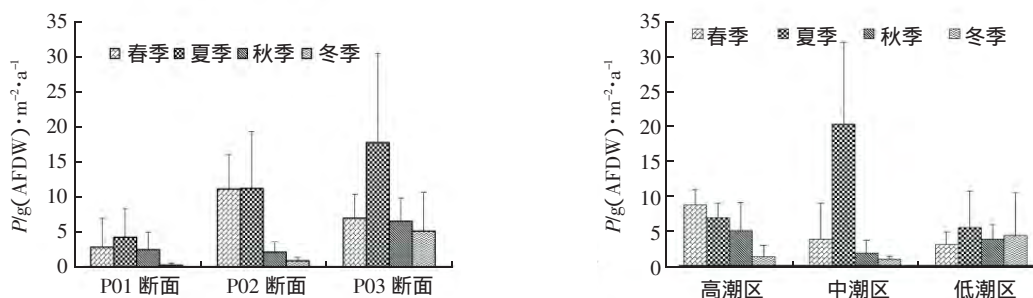


图4 大型底栖动物平均次级生产力的空间分布与季节变化

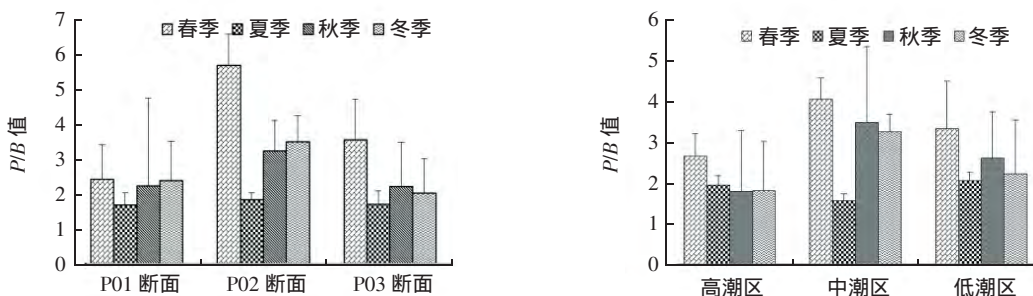


图5 大型底栖动物 P/B 值的空间分布与季节变化

表2 闽江口潮间带大型底栖动物群落参数的单变量双因素方差分析

参数	季度×断面		季度×潮带		断面×潮带	
	F	P	F	P	F	P
丰度	0.731	0.629	0.239	0.959	0.731	0.629
生物量	0.593	0.733	3.388	<b>0.015*</b>	0.599	0.728
次级生产力	0.593	0.733	3.153	<b>0.020*</b>	0.600	0.728
P/B 值	0.450	0.838	0.855	0.541	0.449	0.839

注：\*  $P < 0.05$  差异显著。

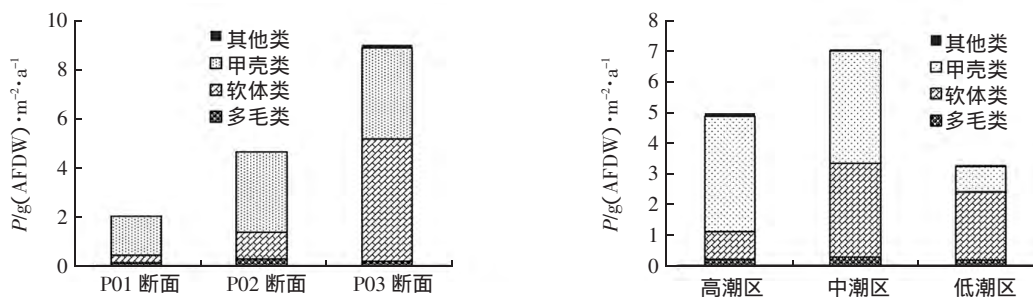


图6 大型底栖动物各类群平均次级生产力分布

### 2.4 环境因子对大型底栖动物的影响

根据闽江口潮间带底质环境因子分析可知 (表3)：闽江口沉积物秋季中值粒径在 17.7~245.0  $\mu\text{m}$  之间，粒径差异较大，平均中值粒径为 127.9  $\mu\text{m}$ ，沉积物颗粒较粗。除 P01 和 P03 断面的高潮区沉积物以粗砂 (4~63  $\mu\text{m}$ ) 为主外，其他站位皆以砂 (> 63  $\mu\text{m}$ ) 为主，所有站位都没有发现砾石 (> 2 000  $\mu\text{m}$ )。秋季沉积物总碳与总氮检测结

果显示 P01 断面略高于 P03 断面。4 个季度测得海水 pH 的分布从 P01 到 P03 断面逐渐升高，而温度和盐度都在 P02 断面呈现最低值。

将密度、生物量、次级生产力和 P/B 值与环境因子进行 Pearson 相关性分析，结果表明，次级生产力与温度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；P/B 值与盐度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，但与 pH 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。其余参数之间无显著相关性。

表 3 闽江口各断面环境因子

环境因子	P01			P02			P03		
	高	中	低	高	中	低	高	中	低
黏土(0~4 μm)/%	5.98	3.25	2.00	0.00	0.39	1.23	9.00	3.41	2.04
粉砂(4~63 μm)/%	70.88	38.48	26.54	0.90	5.29	12.48	80.39	44.54	23.52
砂(63~2 000 μm)/%	23.14	58.27	71.46	99.10	94.32	86.29	10.61	52.05	74.44
砾石(> 2 000 μm)/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
中值粒径( $d_{50}$ )/μm	26.3	189.7	124.3	245.0	139.6	165.0	17.7	72.2	171.0
总氮(TN)/%		0.09			-			0.08	
总碳(TOC)/%		0.89			-			0.88	
温度/℃		20.53			20.28			20.78	
盐度		22.28			19.81			20.10	
pH		7.55			7.73			7.78	

表 4 次级生产力等与环境因子的 Pearson 相关分析

环境因子	密度	生物量	次级生产力	P/B 值
TOC	-0.335	0.760	0.706	-0.452
TN	-0.441	0.656	0.580	-0.263
细粉	-0.026	0.208	-0.396	-0.243
粗粉	-0.019	0.207	0.442	-0.283
砂砾	0.200	-0.207	0.438	0.280
$d_{50}$	-0.197	-0.349	0.576	0.133
温度	0.338	0.585	<b>0.662*</b>	-0.481
盐度	0.248	-0.535	-0.450	<b>0.679*</b>
pH	-0.097	0.577	0.577	<b>-0.659*</b>

注：\*  $P < 0.05$  差异显著。

### 3 讨论

#### 3.1 影响大型底栖动物次级生产力的因素分析

大型底栖动物次级生产力分布差异既与底栖群落的组成有关，也与随机的空间变异性有关 (Lorena et al, 2019)。各个因子对大型底栖动物不同类群的作用并不完全一致 (王银东等, 2005)。在空间上也受多种因素的影响，包括海域、水深、潮带、生境、站点设置等。本研究涉及 3 条断面，大型底栖次级生产力分布由高到低为：P03 断面 > P02 断面 > P01 断面。该分布规律与 3 条断面的环境因子和受扰动程度有关。研究结果表明闽江口大型底栖动物次级生产力与温度呈显著正相关；P/B 值与盐度呈显著正相关，但与 pH 呈显著负相关。同时 P01 断面滩涂窄小且受到周边寺庙排污和沙场的严重干扰，因此物种多样性和次级生产力均处于较低水平。在本次调查区域内，闽江口大型底栖

动物年平均次级生产力整体上的趋势是由中潮带向高潮带、低潮带递减，这与魏德重 (2011) 对温州天河不同潮间带大型底栖动物次级生产力的研究结果一致。中潮区相比高潮区和低潮区，其受到的水文和人为等扰动程度较为适中，有利于大型底栖动物维持较高次级生产力水平，本次调查在中潮区夏季发现了大量的软体动物中国绿螂，可证实这一观点。

本研究中闽江口大型底栖动物次级生产力在季节与潮带间差异显著，其季节变化规律整体上表现为夏季 ( $11.04 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 春季 ( $5.37 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 秋季 ( $3.84 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 冬季 ( $2.25 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。印证了季节变迁是影响潮间带大型底栖动物次级生产力的另一个重要因素 (方平福等, 2013)。闽江口大型底栖动物次级生产力夏季最高，冬季最低，因为夏季时温度较高且太阳辐射较强，藻类等其他植物光合作用旺盛，有利于大多数底栖动物的活动和觅食。这与胶州湾 (张崇良等, 2011) 和茅埏岛 (任鹏等, 2016) 大型底栖动物次级生产力的季节变化相同。

最后，大型底栖动物次级生产力的计算方法也对结果造成影响。本文采用两种 Brey (1990) 经验公式评估了闽江口潮间带大型底栖动物次级生产力水平，分别得出年平均次级生产力为  $6.13 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (不分类群计算) 和  $5.30 \text{ g (AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (分类群计算)，P/B 值计算结果分别为  $2.31 \text{ a}^{-1}$  (不分类群计算) 和  $2.07 \text{ a}^{-1}$  (分类群计算)，分类群计算出的次级生产力和 P/B 值结果更低。本研究结果与贾胜华等 (2017) 提出



的“不同方法估算同一海域次级生产力结果不同，同一估算方法估算不同生境不同群落次级生产力结果偏差也不同”观点一致。在闽江口，大型底栖动物的丰度优势种主要有甲壳动物中的螺赢蜚和淡水泥蟹 (*Ilyoplax tansuiensis*)，数量可观且个体较小，进行大型底栖动物次级生产力计算时若无分类群，会在一定程度上高估该分类群的次级生产力水平，进而提高次级生产力的整体水平，而两种计算方法中生物量不变的情况下，会使得 P/B 值也偏高。

### 3.2 优势类群对 P/B 值的影响

P/B 值是生产力与生物量的比值，是种群最大可生产量的指示值，指示生物量轮回的次数，其值大小与生物的生命周期密切相关 (Tumbiolo et al, 1994)。其规律性可总结为：繁殖快、生活史短的物种 P/B 值较高，反之较低。一般多年一代的种类年 P/B 系数峰值主要在  $0\sim 1\text{ a}^{-1}$  变动；两年一代的种类，P/B 系数峰值在  $2\sim 3\text{ a}^{-1}$  变动；一年一代的种类 P/B 系数峰值出现在  $4\sim 5\text{ a}^{-1}$ ；一年两代的种类，P/B 系数峰值位于  $5\sim 6\text{ a}^{-1}$ ；而一年多代的种类，P/B 系数分布较分散，但主要在  $3\sim 13\text{ a}^{-1}$  均匀分布 (Waters, 1997)。闽江口大型底栖动物的年均 P/B 值为  $2.31\text{ a}^{-1}$ ，推测其平均世代更替速度大约为两年一代。该区域的 P/B 值与福建省其他潮间带研究结果相比较。P/B 值越高，大型底栖动物周转速率越快，一定程度上表征生态系统的恢复力越强 (周福芳等, 2012)。因此，闽江河口区滩涂生态系统属于恢复能力较高的光滩生境。

闽江滩涂湿地大型底栖动物丰度的主要优势种群是螺赢蜚和淡水泥蟹，两种优势种群均为个体小、以沉积物为食的埋栖性小型甲壳动物，喜欢栖

息于较细颗粒沉积物为主的软泥底质，生活史短、繁殖快、适应其环境经常处于剧烈的扰动变化之中，P/B 值较高，与 Rhoads 等 (1970) 的调查分析一致。在自然群落结构中，P/B 值也反映了一个生态群落内物种的新陈代谢的高低 (吴辰等, 2013)。因此在闽江口大型底栖动物群落组成中以螺赢蜚这种个体小、生活史短、繁殖快的底栖动物为主，有利于增强该区域生态系统的物质循环速度。这表明了优势种群不仅对 P/B 值有较大的影响，而且在一定程度上决定了区域的生态系统的恢复能力。

### 3.3 与邻近潮间带湿地的比较

为了解闽江河口区大型底栖动物次级生产力水平，本文将研究结果与福建省内其他临近的潮间带区域研究结果进行对比 (表 5)。通过比较 5 个潮间带区域的研究发现，闽江口大型底栖动物的密度低于同安湾和漳江口，这两个潮间带区域前者为人工种植红树林区，后者分布天然的红树植物种类，但两片红树林区均因为有机污染的原因出现大量小个体的寡毛类沼蚓，例如漳江口密度最占优势的寡毛类平均栖息密度达  $2\ 633.8\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ ，占总栖息密度的 79.16% (吴辰等, 2013)；可见生境类型和环境因子中的碳氮水平将通过影响机会种的繁殖而影响平均密度水平。闽江口大型底栖动物的生物量和次级生产力低于同安湾 (Zhou et al, 2010) 和罗源湾 (杜永芬等, 2012)，而高于海坛海峡 (吕小梅等, 2008) 和漳江口，其中海坛海峡为光滩生境，其大型底栖动物密度、生物量和次级生产力在 5 个潮间带区域均处最低水平，而漳江口潮间带区域的次级生产力低于闽江口，但两者差异不是很大。

表 5 中国沿海潮间带大型底栖动物次级生产力比较

河口区	密度 /ind·m <sup>-2</sup>	生物量 /g(AFDW)·m <sup>-2</sup>	次级生产力 /g(AFDW)·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	P/B 值 /a <sup>-1</sup>	调查时间	生境类型
闽江口 (本文)	1 745.8	2.65	6.13	2.31	2014—2015	光滩+盐沼
同安湾 (Zhou et al, 2010)	3 600.4	12.26	13.24	1.17	2004—2005	红树林+光滩
漳江口 (吴辰等, 2013)	3 327.0	0.79	4.77	1.22	2010	红树林+盐沼
罗源湾 (杜永芬等, 2012)	1 216	2.95	18.58	0.97	2009	光滩+盐沼
海坛海峡 (吕小梅等, 2008)	571.5	2.19	3.72	1.74	2005—2006	光滩
湛江高桥 (蔡立哲等, 2012)	2 475.4	13.37	11.77	1.27	2010	红树林+盐沼
深圳湾 (周福芳等, 2012)	3 906.6	15.02	74.70	0.90	2010	光滩*
深圳湾 (金亮等, 2007)	2 580.0	3.57	54.55	2.95	2005	红树林+光滩

注：\* 表示该研究涉及红树林、鱼塘和光滩三种生境，但仅引用光滩数据。

在 P/B 值方面，闽江口的 P/B 值最高，为  $2.31 \text{ a}^{-1}$ ，表明闽江口潮间带大型底栖动物物种的平均世代更替速度大约每年 2.31 代。而其他 4 个潮间带区域的 P/B 值在  $1\sim 2 \text{ a}^{-1}$  之间，代表其物种更替速度较闽江口慢，往往出现的是相对较大的个体。

## 4 结论

大型底栖动物次级生产是海洋生态系统物质循环和能量流动的重要组成部分，其在河口地区的营养盐循环和水质净化中也起着重要作用。量化大型底栖动物次级生产力是研究底栖生物生态过程的重要途径，为此对河口湿地大型底栖生物群落进行动态跟踪调查研究很有必要。本研究基于闽江口 4 个季度的野外调查，研究结果表明该河口区共获得大型底栖动物 63 种，其中，优势类群为多毛类，有 25 种，其次是甲壳类 19 种，再者软体动物 13 种，其他类动物种类最少，为 6 种。本文采用两种 Brey (1990) 经验公式评估了闽江口潮间带大型底栖动物次级生产力水平，分别得出年平均次级生产力为  $6.13 \text{ g(AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $5.30 \text{ g(AFDW)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (分类群计算)，P/B 值计算结果分别为  $2.31 \text{ a}^{-1}$  和  $2.07 \text{ a}^{-1}$  (分类群计算)。分类群计算出的次级生产力和 P/B 值结果更低。Pearson 相关分析结果表明，次级生产力与温度呈显著正相关，P/B 值与盐度呈显著正相关但与 pH 呈显著负相关。环境因子在一定程度上影响着该区域底栖动物的次级生产力。而闽江口群落组成中以螺赢蜚这种个体小、生活史短、繁殖快的底栖动物为主，使该潮间带区域的 P/B 值高于临近潮间带区域的其他调查结果。

## 参 考 文 献

- 蔡立哲, 2015. 深圳湾底栖动物生态学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1-2.
- 蔡立哲, 许鹏, 傅素晶, 等, 2012. 湛江高桥红树林和盐沼湿地的大型底栖动物次级生产力[J]. 应用生态学报, 23(4): 965-971.
- 陈品健, 1989. 福建闽江口以北沿岸潮间带生态学研究五——生物量及其分布[J]. 集美大学学报(自然科学版), 9(2): 16-25.
- 陈寅山, 饶小珍, 许友勤, 等, 1997. 闽江口梅花港潮间带贝类动物群落生态研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 12(2): 96-99.
- 杜永芬, 高抒, 于子山, 2012. 福建罗源湾潮间带大型底栖动物的次级生产力[J]. 应用生态学报, 23(7): 1904-1912.
- 方平福, 章书声, 鲍毅新, 等, 2013. 温州天河潮间带大型底栖动物的次级生产力[J]. 生态学杂志, 32(1): 106-113.
- 贾胜华, 寿鹿, 廖一波, 等, 2017. 海洋大型底栖动物群落次级生产力估算模型研究进展及应用评价[J]. 海洋通报, 36(4): 370-378.
- 蓝虹, 郑崇荣, 周时强, 等, 2006. 闽江口以南近海底栖生物群落生态研究[J]. 海洋环境科学, 25(S1): 52-56.
- 李荣冠, 江锦祥, 吴启泉, 等, 1997. 闽江口及邻近水域大型底栖生物生态研究[J]. 海洋学报(中文版), 19(5): 116-123.
- 吕小梅, 方少华, 张跃平, 等, 2008. 福建海坛海峡潮间带大型底栖动物群落结构及次级生产力[J]. 动物学报, 54(3): 428-435.
- 金亮, 蔡立哲, 周细平, 等, 2007. 深圳湾北岸泥滩大型底栖动物次级生产力研究[J]. 台湾海峡, (3): 415-421.
- 蒋奕雄, 2017. 闽江流域表层沉积物硫化物及重金属生物毒性研究[J]. 渔业研究, 39(3): 202-208.
- 莱莉 C M, 帕森斯 T R, 著. 张志南, 周红, 译, 2000. 生物海洋学导论 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 153-192.
- 刘苍宇, 贾海林, 陈祥锋, 2001. 闽江河口沉积结构与沉积作用 [J]. 海洋与湖沼, 32(2): 177-184.
- 任鹏, 李海宏, 鲍毅新, 等, 2016. 茅垵岛大型底栖动物次级生产力时空变化[J]. 生态学杂志, 35(1): 174-182.
- 王银东, 熊邦喜, 陈才保, 等, 2005. 环境因子对底栖动物生命活动的影响[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 24(3): 253-257.
- 魏德重, 2011. 温州天河不同潮间带大型底栖动物次级生产力的研究 [D]. 金华: 浙江师范大学, 1-65.
- 吴辰, 蔡立哲, 陈昕韡, 等, 2013. 福建漳江口红树林和盐沼湿地大型底栖动物次级生产力研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 52(2): 259-266.
- 于子山, 张志南, 韩洁, 2001. 渤海大型底栖动物次级生产力的初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 31(6): 867-871.
- 张崇良, 徐宾铨, 任一平, 等, 2011. 胶州湾潮间带大型底栖动物次级生产力的时空变化[J]. 生态学报, 31(17): 5071-5080.
- 周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等, 2012. 深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究[J]. 生态学报, 32(20): 6511-6519.
- 钟海霞, 曲方圆, 隋吉星, 等, 2018. 山东南部近海春季大型底栖动物丰度、生物量及群落结构研究[J]. 海洋通报, 37(1): 88-98.
- ALLER R C, ALLER J Y, KEMP P F, 2001. Effect of particle and solute transport on rates and extent of remineralization in bioturbated sediments[M]. In: ALLER J Y, WOODIN S A, ALLER R C(Eds), Organism-Sediment Interactions, University of South Carolina Press, Columbia, 315-333.
- BISSOLI L B, BERNARDINO A F, 2018. Benthic macrofaunal structure and secondary production in tropical estuaries on the Eastern [J]. Marine Ecoregion of Brazil. Peerj, 6(3).
- BREY T, 1990. Estimating productivity of macrobenthic invertebrates from biomass and mean individual weight[J]. Meeresforsch, 32: 329-343.
- CRIPPS D J, 1984. Energy flow measurements. In: Methods for the study of marine benthos[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 284-366.
- HARRIS G P, 1999. Comparison of the biogeochemistry of lakes and estuaries: ecosystem processes, functional groups, hysteresis effects



- and interactions between macro- and microbiology[J]. *Marine and Freshwater Research*, 50: 791–811.
- MEYSMAN F J R, MIDDELBURG J J, HEIP C H R, 2006. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 21(12): 688–695.
- MIDDELBURG J J, LEVIN L A, 2009. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry[J]. *Biogeosciences*, 6(7): 1273–1293.
- MURRAY A S, OLLEY J M, 2002. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review[J]. *Geochronometria*, 21: 1–16.
- PETERSON B J, HECK J K, 1999. The potential for suspension feeding bivalves to increase seagrass productivity[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 240(1): 37–52.
- RHOADS D C, YOUNG D K, 1970. The influence of deposit feeding organisms on sediment stability and community trophic structure[J]. *Journal of Marine Research*, 28: 150–178.
- SNELGROVE P V R, 1998. The biodiversity of macrofaunal organisms in marine sediments[J]. *Biodiversity and Conservation*, 7(9): 1123–1132.
- TAFT O W, HAIG S M, 2005. The value of agricultural wetlands as invertebrate resources for wintering shorebirds [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environmental*, 110: 249–256.
- TUMBIOLO M L, Downing J A, 1994. An empirical model for the prediction of secondary productivity in marine benthic invertebrates [J]. *Marine Ecology Progress*, 114(1): 165–174.
- WATERS T F, 1997. Secondary production in inland waters[J]. *Advances in Ecological Research*, 10: 91–164.
- ZHOU X P, CAI L Z, 2010. Secondary production of macrobenthos in Tong'an Bay mangrove area, China [J]. *Journal of Ocean University of China*, 9(2): 151–156.

(本文编辑: 袁泽轶)