

刘建根, 钱 军, 李洪武, 等. 海南省大洲岛珊瑚礁海域浮游动物群落特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 211–216.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.03.058

# 海南省大洲岛珊瑚礁海域浮游动物群落特征

刘建根<sup>1</sup>, 钱 军<sup>1</sup>, 李洪武<sup>1,2</sup>, 胡 兵<sup>1</sup>, 崔 敏<sup>3</sup>, 林道明<sup>3</sup>, 吴天国<sup>3</sup>

(1. 海南大学海洋学院, 海南海口 570228; 2. 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南海口 570228;

3. 海南省万宁市大洲岛国家级海洋生态自然保护区管理处, 海南万宁 571500)

**摘要:** 分别于 2013 年 3 月(春季)、6 月(夏季)、9 月(秋季)、12 月(冬季)对海南省大洲岛珊瑚礁海域浮游动物进行周年季节性调查。结果显示, 共鉴定浮游动物 11 个大类 47 种, 浮游动物生态类群以亚热带外海种和亚热带近海种居多, 少数为热带高温高盐种, 无节幼体为全年优势种; 虽然浮游动物种类数以原生动物的种类和丰度并未对水质产生明显影响; 季节间的种类和丰度均不存在明显差异, 表明季节的更替并未对浮游动物的种类和丰度产生较大影响; 研究区前港、湾内、后港的种类和丰度均不存在明显差异, 风向季节性转移引起的人为活动规律变化、研究区珊瑚覆盖率的高低对各研究区浮游动物的种类和丰度均不存在明显影响。多样性指数与化学需氧量(COD)、活性磷(DIP)含量、无机氮(DIN)含量表现出显著或极显著负相关性, 均匀度指数与 DIP 含量表现出显著负相关性; 各季节浮游动物生态现状相似系数较高的均为相邻站点, 调控环境因子可在一定程度上调控一定区域内浮游动物的种类和分布。

**关键词:** 浮游动物; 珊瑚礁; 大洲岛; 群落特征; 生态系统; 环境因子; 季节性

**中图分类号:** Q179.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)03-0211-05

珊瑚礁是热带海洋中的特色生态系统, 具有较高的生物多样性和生产力。珊瑚礁面积在海洋中不足 0.25%, 但它们能为超过 25% 的已知海洋鱼类提供食物和繁殖场所<sup>[1]</sup>。珊瑚礁的生长非常缓慢(1~2 cm/年), 大部分生长于透明度高、贫营养的海域中<sup>[2]</sup>。浮游动物是珊瑚礁生态系统中, 特别是珊瑚和鱼类的重要食物和营养来源。珊瑚虫不能从共生虫黄藻的光合作用中获得氮、磷等营养物质, 必须通过捕食浮游动物来补充营养, 因此浮游动物在珊瑚礁生态系统的物质循环和能量流动中具有重要作用<sup>[3-4]</sup>。

大洲岛位于海南省万宁市的东南部。大洲岛及周围海域奇特的环境构成了完整、平衡的海岛珊瑚礁生态系统, 具有较高的保护价值<sup>[5]</sup>。大洲岛沙滩两侧海域均出现珊瑚, 其中以岛屿中部凹陷区域(湾内)和后港区(大洲岛东岸近海域)珊瑚分布相对较多, 前港区(大洲岛西岸近海域)分布相对较少, 造礁石珊瑚平均覆盖率为 27.17%<sup>[6-8]</sup>。目前, 对大洲岛的资源调查仅限于吴钟解等于 2008—2009 年进行的初步综合调查<sup>[6]</sup>, 之后未见该岛海洋生物资源状况的报道。随着开

发大洲岛呼声的日益高涨<sup>[9]</sup>, 在大洲岛珊瑚礁海域进行浮游动物群落动态研究, 继而探讨珊瑚礁生态系统环境的生态变化日益显得重要, 可为进一步研究和保护大洲岛珊瑚礁生态系统提供一定的基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集与分析

调查站点 1#、2#、3#位于前港, 4#位于湾内, 5#、6#、7#位于后港, 具体分布见图 1。样品采集和室内处理均参照 GB 12763—1991《海洋调查规范》<sup>[10]</sup>, 分别于 2013 年 3 月(春季)、6 月(夏季)、9 月(秋季)、12 月(冬季)进行。采用 25 号浮游生物网(孔径 64 μm)采样, 每个调查站自底层至表层垂直拖曳 1 网。浮游动物样品采集后, 采用 5% 福尔马林溶液固定。浮游动物种类的鉴定和计数使用尼康 YS-100 型显微镜, 浮游动物物种名主要参照《海洋浮游生物学》<sup>[11]</sup>。

对无机氮(DIN)含量、活性磷(DIP)含量、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)含量 4 项水质指标进行调查。水样的采集、保存、分析均按 GB 12763—1991《海洋调查规范》和 GB 17378—1998《海洋监测规范》<sup>[12]</sup>中有关规定进行。

### 1.2 多样性指数分析

Shannon-Weaver 多样性指数  $H'$ <sup>[13]</sup>的计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

Margalef 丰富度指数  $d'$ <sup>[13]</sup>的计算公式:

$$d' = \frac{S-1}{\log_2 N} \quad (2)$$

Pielous 均匀度指数  $J'$ <sup>[13]</sup>的计算公式:

$$J' = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中:  $H'$  为多样性指数;  $S$  为种类数, 个;  $P_i = n_i/N$ ,

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家海洋局大洲岛整治修复及保护任务(编号: HZ2012-274); 国家自然科学基金(编号: D0609); 海南大学研究生创新实践项目; 国家级大学生创新创业训练计划(编号: 201510589010); 海南省自然科学基金(编号: 2015-4173); 海南省高等学校科学研究重点项目(编号: Hnky2016ZD-4); 海南省研究生创新科研课题(编号: Hys2015-19); 海南大学研究生创新中心建设项目。

作者简介: 刘建根(1993—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事海洋资源保护和利用研究。E-mail: 1129590412@qq.com。

通信作者: 李洪武, 博士, 硕士生导师, 主要从事海洋资源保护和利用研究。E-mail: 13700419733@163.com。

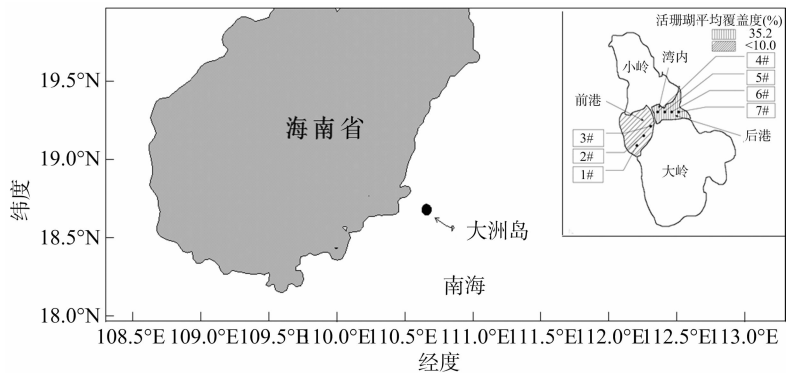


图1 大洲岛方位及采样站位置

$n_i$  为第  $i$  个物种的个体数 (个),  $N$  为全部物种的个体数 (个)。

优势种的确定是由优势度<sup>[14]</sup>决定的, 计算公式:  
$$Y = P_i \times f_i。$$

式中:  $f_i$  为第  $i$  种物种在各个站位出现的频率;  $P_i$  为第  $i$  种物种占各个站位物种总数的比例, 以  $Y > 0.02$  作为优势种。

1.3 聚类分析

对各个站位浮游动物群落结构指数、生态环境因子进行各个季节的聚类分析<sup>[15]</sup>, 能较为全面地反映浮游动物的生态现状, 度量标准区间采用 Pearson 相关性, 系统聚类方法采用最短距离法。聚类分析采用 SPSS 19.0 统计软件。

2 结果与分析

2.1 浮游动物种类组成和分布

4 个季节在海南省万宁市大洲岛海域共采集到浮游动物 11 个大类 47 种, 其中原生动物 19 种, 占种类组成的 40.4%; 桡足类 9 种, 占 19.1%; 轮虫 3 种, 占 6.4%; 枝角类 1 种, 占 2.1%; 介形类 1 种, 占 2.1%; 被囊类 4 种, 占 8.5%; 管水母类 1 种, 占 2.1%; 水螅水母类 1 种, 占 2.1%; 毛颚类 3 种, 占 6.4%; 软体动物 1 种, 占 2.1%; 浮游幼体 4 种, 占 8.5%。从 4 次采样来看, 浮游动物以原生动物占优势, 占种类总数的 40% 左右。

根据大洲岛 1 年中的温度变化, 将 4 次采样时间 3、6、9、12 月分别定义为春季、夏季、秋季、冬季。不同季节浮游动物种类组成并不相同, 总体种类数变化规律为春季 = 夏季 (19 种) < 秋季 = 冬季 (23 种)。不同区域 1 年的浮游动物种类数也不相同, 前港种类变化范围为 12 ~ 22 种; 湾内浮游动物种类少且变化较为平稳, 变化范围为 5 ~ 8 种; 后港变化范围为 18 ~ 23 种。考虑到样本的时空分异性与相关性, 对浮游动物种类数进行季节和空间的方差分析<sup>[16]</sup>。结果表明, 季节间不存在显著差异性 ( $P > 0.05$ ), 研究区前港、湾内、后港间不存在显著差异性 ( $P > 0.05$ )。

2.2 浮游动物优势种

通过 4 个季节的调查, 共采到 11 种优势种 (类), 其中原生动物 8 种、浮游幼体 1 类、软体动物 1 种、桡足类 1 种 (表 1); 春季 1 种、夏季 4 种、秋季 6 种、冬季 5 种。4 个季节均为优势种 (类) 的有 1 类, 为无节幼体 (*Nauplius*); 2 个季节均为优势种的有 2 种, 为根状拟铃虫 (*Tintinnopsis radix*) 和奥氏类铃虫 (*Codonellopsis ostensfeldi*)。春、夏、秋 3 个季节的第 1 优

势种 (类) 均为无节幼体 (*Nauplius*), 优势度分别为 0.890、0.529、0.293, 分别占浮游动物总丰度的 89.03%、52.90%、34.17%, 且该优势种 (类) 在春、夏季各个站点的出现频率为 100%。春季无节幼体优势度是全年优势度最高值, 占总丰度比例接近 90.00%。夏季次优势种是厦门网纹虫 (*Favella amoyensis*), 它与第 1 优势种 (类) 无节幼体 (*Nauplius*) 共占夏季浮游动物总丰度的 76.65%, 其他优势度较低。秋季次优势种为根状拟铃虫 (*Tintinnopsis radix*) 和东方拟铃虫 (*Tintinnopsis orientalis*)。冬季第 1 优势种是奥氏类铃虫 (*Codonellopsis ostensfeldi*), 其优势度为 0.169, 占总丰度的 23.64%, 它与次优势种钟形网纹虫 (*Favella campanula* [Schmidt] Kofoid & Campbell) 共占总丰度的 44.52% (表 1)。

表 1 大洲岛浮游动物优势种

季节	优势种 (类)	平均丰度 (ind/L)	占总丰度比例 (%)	优势度
春季	无节幼体 ( <i>Nauplius</i> )	194.0	89.03	0.890
夏季	中华哲水蚤 ( <i>Calanus sinicus</i> )	1.8	3.33	0.028
	无节幼体 ( <i>Nauplius</i> )	29.0	52.90	0.529
	锥笔帽螺 ( <i>Creseis virgula</i> var. <i>conica</i> )	2.5	4.58	0.039
	厦门网纹虫 ( <i>Favella amoyensis</i> )	13.0	23.75	0.136
秋季	根状拟铃虫 ( <i>Tintinnopsis radix</i> )	12.3	8.94	0.076
	无节幼体 ( <i>Nauplius</i> )	47.2	34.17	0.293
	诺氏麻铃虫 ( <i>Leprotintinnus nordguisti</i> )	4.8	3.48	0.024
	东方拟铃虫 ( <i>Tintinnopsis orientalis</i> )	13.3	9.68	0.069
	奥氏类铃虫 ( <i>Codonellopsis ostensfeldi</i> )	5.1	3.72	0.021
	布氏拟铃虫 ( <i>Tintinnopsis butschlii</i> )	7.5	5.46	0.039
冬季	大弹跳虫 ( <i>Halteria grandinella</i> )	37.1	13.31	0.095
	根状拟铃虫 ( <i>Tintinnopsis radix</i> )	45.3	16.25	0.116
	奥氏类铃虫 ( <i>Codonellopsis ostensfeldi</i> )	65.9	23.64	0.169
	钟形网纹虫 ( <i>Favella campanula</i> )	58.2	20.88	0.149
	无节幼体 ( <i>Nauplius</i> )	29.1	10.44	0.089

2.3 丰度及多样性指数

从空间区域的变化来看, 大洲岛前港浮游动物的丰度范围为 21.07 ~ 370.01 ind/L, 湾内丰度范围为 5.12 ~ 163.20 ind/L, 后港丰度范围为 52.53 ~ 376.70 ind/L。从季节变化来看, 大洲岛春、夏、秋、冬季的浮游动物丰度范围分别为 62.40 ~ 376.70、21.07 ~ 163.20、16.80 ~ 191.07、5.12 ~ 370.01 ind/L (图 2)。对浮游动物丰度进行季节间和空间方差分析, 结果表明, 前港、湾内、后港均不存在明显差异, 季节

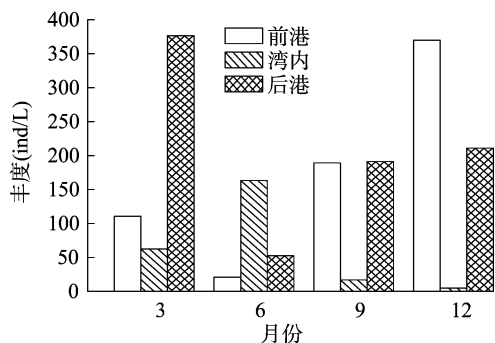


图2 大洲岛各研究区各季节浮游动物的丰度

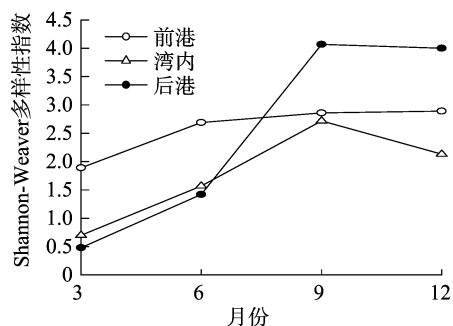


图3 大洲岛浮游动物多样性指数

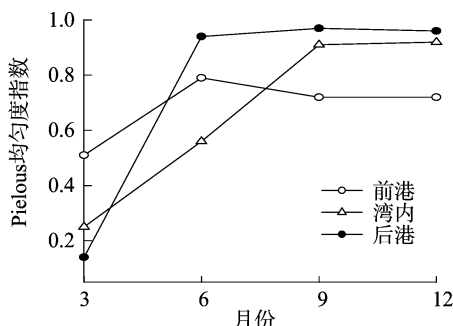


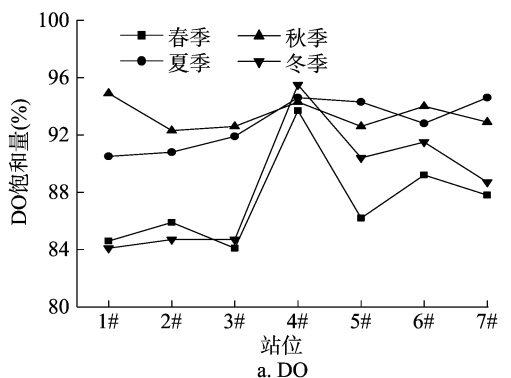
图4 大洲岛浮游动物均匀度指数

间也不存在明显差异。

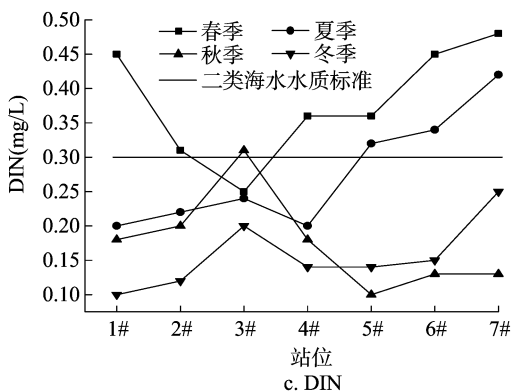
大洲岛近岸珊瑚礁海域浮游动物群落的 Shannon - Weaver 多样性指数范围为 0.48 ~ 4.07, Pielous 均匀度指数范围为 0.14 ~ 0.99; 平均 Shannon - Weaver 指数为 2.29, 平均 Pielous 指数为 0.70; Shannon - Weaver 指数和 Pielous 指数全年表现出较大差异性, 但后港春季的 Shannon - Weaver 指数和 Pielous 指数均为全年最低值, 后港秋季的 Shannon - Weaver 指数和 Pielous 指数均为全年最高值; Shannon - Weaver 指数和 Pielous 指数从春季到冬季呈曲折缓慢波动上升的趋势 (图 3、图 4)。

#### 2.4 水环境因子分布状况

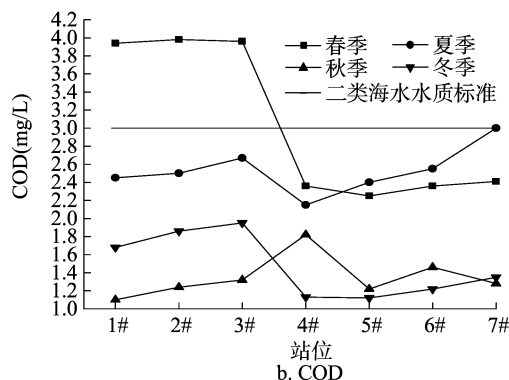
前港 DO 饱和度为 84.07% ~ 94.94%, 平均饱和度为 88.42%; 湾内 DO 饱和度为 93.70% ~ 95.52%, 平均饱和度为 94.53%; 后港 DO 饱和度为 86.21% ~ 94.58%, 平均饱和度为 91.24% (图 5-a)。虽然前港 DO 饱和度低于湾内和后港, 但全年无缺氧现象, 因此大洲岛海域 DO 极利于珊瑚的生长和繁殖。



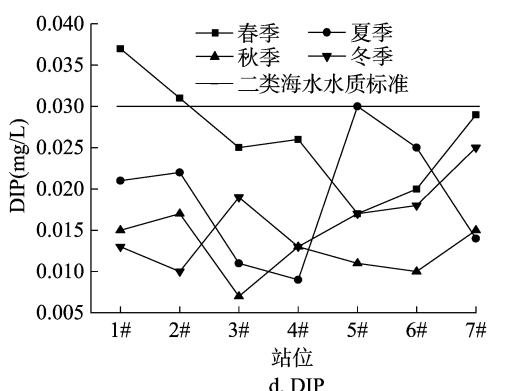
a. DO



c. DIN



b. COD



d. DIP

图5 2013年 COD、DIP、DIN、DO 的季节变化

参照史海燕对涠洲岛珊瑚礁海域生态环境的监测与评价<sup>[17]</sup>, 以 GB 3097—1997《海水水质标准》中的二类水质作为标准<sup>[18]</sup>, 对调查所得水质结果进行单因子指数法处理<sup>[19]</sup>。以单因子标准指数 1.0 作为该因子是否对环境产生污染的基本分界线, <0.5 为海水未受该因子沾污; 介于 0.5 ~ 1.0 之间为海水受到该因子沾污, 但未超出标准; >1.0 表明超出标

准,海水已受到该因子污染。前港春季海水受到了 COD、DIP、DIN 因子的污染,湾内春季海水受到了 DIN 因子的污染,后港春、夏季海水受到了 DIN 因子的污染。根据评价标准,COD、DIP、DIN 分别有 85.7%、89.3%、64.3% 的监测指数小于 1,COD、DIP、DIN 监测指数大于 1 中有 58.8% 属于 DIN,可见 DIN 为主要污染物。大洲岛全年海域监测指数大部分符合二类海水水质标准,水质良好、稳定(图 5)。

2.5 浮游动物群落与环境因子的相关性

对浮游动物的丰度、多样性指数、均匀度指数与环境因子进行相关性分析发现,大洲岛珊瑚礁海域浮游动物群落与环境因子多为两两负相关( $r < 0$ ),少数指标为两两正相关( $r > 0$ )。多样性指数与 DIP 表现出显著负相关性,与 COD、DIN 均表现出极显著负相关性;均匀度指数与 DIP 表现出显著负相关性(表 2)。

2.6 浮游动物群落结构及环境因子聚类分析

由图 6-a 可知,春季 5#和 6#站位最为相似,相似系数为 0.856。5#和 6#为后港相邻站点,营养盐结构相似,参照 GB3097—1997《海水水质标准》,COD、DIP 均未超过国家二类海水水质标准,2个站点的 DIN 均超过国家二类海水水质

表 2 浮游动物群落与环境因子的相关性

类别	COD	DIP	DIN	DO
丰度	-0.186	-0.072	0.030	-0.038
多样性指数	-0.502 **	-0.428 *	-0.717 **	-0.150
丰富度指数	-0.176	-0.072	-0.334	0.081
均匀度指数	-0.154	-0.419 *	-0.301	-0.070

注:“\*”“\*\*”分别表示在 0.05、0.01 水平下显著相关(双尾检验)。

标准。5#和 6#站位无节幼体为优势种,多样性指数均低于 1。夏季 1#和 2#站位浮游动物的生态现状最为相似,相似系数为 0.824;1#和 2#站位为前港相邻站点,COD、DIP、DIN 指标数值基本吻合,此区域无节幼体和哲水蚤属为优势种(图 6-b)。秋季 1#和 6#站位最为相似,但相似系数较低,不超过 0.4,群落多样性指数相似;1#和 6#站位优势种均为根状拟铃虫,水质环境因子均达到了国家一类海水水质标准(图 6-c)。冬季 5#和 6#站位最为相似,相似系数达到了 0.984,此区域优势种为奥氏类铃虫和侠盗虫属(图 6-d)。各季节浮游动物生态现状相似系数较高的均为相邻站点。

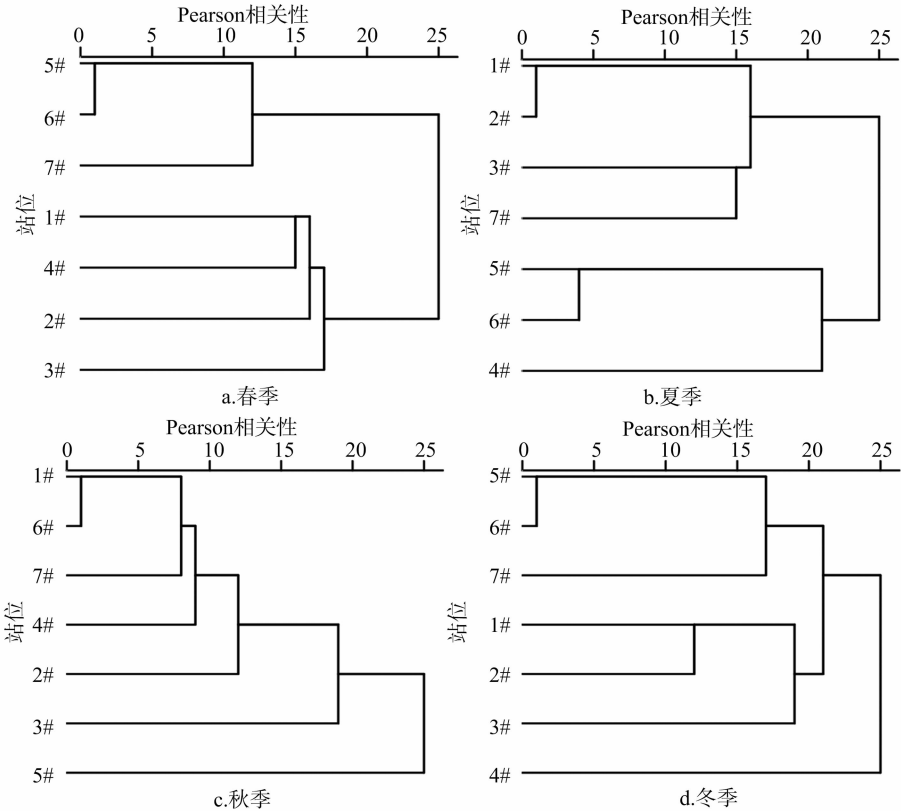


图6 四季浮游动物群落结构及环境因子聚类

3 结论与讨论

大洲岛珊瑚礁海域的 4 次调查共鉴定浮游动物 47 种、11 个大类,浮游动物种类以原生动物占优势,这与 2008—2009 年浮游动物调查种类数<sup>[6]</sup> 相差不大。本次调查中,浮游动物生态类群以亚热带外海种和亚热带近海种居多<sup>[20]</sup>,少数为热带高温高盐种,如肥胖箭虫等<sup>[21]</sup>。珊瑚礁生态系统以生物多样性丰富而著称,复杂多样的生境栖息着种类繁多的礁栖无

脊椎动物和脊椎动物。底栖性浮游动物白天栖息于珊瑚礁基底表面或沉积物中,而夜晚移动到水柱中,包括糠虾类、钩虾类、涟虫类、介形类、等足类、猛水蚤类、剑水蚤类、端足类、多毛类等,它们是珊瑚礁浮游动物重要的来源之一。由于调查多在白天进行,因此底栖类的浮游动物很少见,这也是本调查中浮游动物种类较少的原因。

海洋生物的幼虫为珊瑚礁浮游动物群落的重要组成部分,但 2013 年度调查仅发现了无节幼体、桡足幼体、枝角类幼

体、心形海胆幼体 4 种,且无节幼体为全年主要优势种,春季占总丰度比例接近 90%。珊瑚对浮游动物的摄取已有学者报道,但对浮游动物种类没有明显的定论。无节幼体是低等甲壳类孵化后最初的幼体,不仅是珊瑚礁鱼类的开口饵料,且易被珊瑚捕食<sup>[22]</sup>,数量丰富的无节幼体有利于珊瑚礁生物群落的生长和繁殖。水体中自由生活的原生动物通常是鱼、虾、贝类直接或间接的天然饵料,但水体大量出现原生动物取食藻类,会造成水体缺氧,往往是水质不良的标志<sup>[23]</sup>。虽然大洲岛珊瑚礁海域调查到原生动物 19 种,占种类组成的 40.4%,优势种有 8 种,但总体丰度较低,最高丰度仅为 200 ind/L。原生动物仅在冬季为第 1 优势种,结合同时期水质调查,冬季水质为国家二类海水水质以上,富营养化指数为贫营养级,水质良好,且大洲岛原生动物并不属于多污性物种、 $\alpha$ -中污性物种、 $\beta$ -中污性物种、寡污性物种<sup>[24]</sup>。原生动物种类和丰度并未对水质产生影响,而是作为珊瑚礁生态系统中丰度的天然饵料。

多样性指数和均匀度指数是研究生物群落特征的重要指数。通常情况下,种类越丰富、种类数量分布越均匀,则多样性指数越高,也就预示着生物群落受外界干扰越少或生物群落较为稳定<sup>[25]</sup>。湾内和后港浮游动物的多样性指数较高,前港多样性指数较低。与本研究同步进行的珊瑚礁生态调查结果显示,湾内和后港活体的造礁石珊瑚种数、覆盖率、补充量均较高。浮游动物作为世界性分布的生物,由于其个体小、结构简单、生活世代短、群落结构对水环境变化反应灵敏等特点,被广泛应用于水质监测。浮游动物种类增多、均匀度高通常表明水体污染程度较小、水质较好;反之,浮游动物种类减少、均匀度低则表明水体污染程度较大、水质较差<sup>[26]</sup>。春季浮游动物平均多样性指数约为 1,平均均匀度指数低于 0.3,结合水质富营养化指数(E)评价结果中度富营养级,水质较差。春分前由于渔民大量捕捉带鱼,出海频繁,海水受到一定程度的污染。夏、秋、冬季平均多样性指数大于 1.8,平均均匀度指数大于 0.7,水质富营养化指数(E)为贫营养级,水体营养化程度较低,水质较好。

由于大洲岛风向转向的自然原因,每过半年风向会迅速改变。春夏两季刮西南风,前港风浪大而猛烈,后港风浪小而平缓,湾内、后港人为活动频繁;秋冬两季大洲岛刮东北风,前港风浪小而平缓,湾内、后港风浪大而猛烈,前港人为活动频繁。大洲岛独特的自然环境为研究人为因素对珊瑚礁生态系统环境的影响提供了得天独厚的自然条件。对浮游动物种类和丰度进行季节间和空间方差分析,结果表明,季节间种类和丰度均不存在显著差异性( $P > 0.05$ )。大洲岛地处热带,靠近亚热带,全年水温基本保持在 20~26℃,四季不分明,季节的更替并未对浮游动物的种类和丰度产生较大影响。研究区前港、湾内、后港种类和丰度均不存在显著差异性( $P > 0.05$ )。后港、湾内珊瑚覆盖率明显高于前港珊瑚覆盖率,虽然中间有沙带阻隔,但大洲岛潮差最大可达 2.5 m。在每天的最大潮时,沙带中间的海水能没过沙带,前港、湾内、后港能进行一定量水体交换,尤其遇到台风季节时,前港、湾内水域在部分沙带区域可连成一体。风向季节性转移引起的人为活动规律的变化以及研究区珊瑚覆盖率的高低,对大洲岛各研究区浮游动物种类和丰度均不存在显著性影响。通过相

关性分析,多样性指数与 COD、DIP、DIN 均表现出显著负相关性,均匀度指数与 DIP 表现出显著负相关性。在该海域,DIP 可调控浮游动物的均匀度,浮游植物的生长与繁殖依赖于水域中营养盐的含量,各种浮游植物对营养物质有一定的浓度范围要求,过量将影响其生长繁殖<sup>[27]</sup>。营养盐浓度越高,水体富营养化程度越高,赤潮藻类会爆发性增长,浮游动物作为次级消费者,以丰富的浮游植物作为饵料,浮游动物丰度也会短时间增高,产生几种优势种,抢占生态位,多样性指数和均匀度指数均会降低,对海洋生态平衡和水产资源危害很大。在大洲岛珊瑚礁海域,环境因子对浮游动物的种类和分布起着至关重要的作用。通过聚类分析发现,各季节浮游动物生态现状相似系数较高的均为相邻站点,因此,在大洲岛海域,调控环境因子可在一定程度上调控一定区域浮游动物的种类和分布。如何定量调控一定区域浮游动物的生态现状,有待于进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 张才学,孙省利,谢伟良,等. 徐闻珊瑚礁区浮游植物的季节变化[J]. 海洋与湖沼,2009,40(2):159-165.
- [2] 尹健强,黄晖,黄良民,等. 雷州半岛灯楼角珊瑚礁海区的浮游植物[J]. 海洋通报,2006,25(2):8-14.
- [3] 尹健强,黄良民,李开枝,等. 南沙群岛珊瑚礁浮游动物多样性与群落结构[J]. 生物多样性,2011,19(6):685-695.
- [4] 尹健强,黄晖,黄良民,等. 雷州半岛灯楼角珊瑚礁海区夏季的浮游动物[J]. 海洋与湖沼,2008,39(2):131-138.
- [5] 侯小健,邓韶勇. 大洲岛自然保护区规划通过国家评审[N]. 海南日报,2012-12-13(3).
- [6] 吴钟解,李成攀,陈敏,等. 大洲岛国家级自然保护区海洋资源调查及其管理保护机制探讨[J]. 海洋开发与管理,2012(7):97-100.
- [7] 吉煜. 南海明珠——大洲岛[J]. 中国地名,2005(6):15-16.
- [8] 吴天国. 浅谈万宁大洲岛保护区管理对策[J]. 热带林业,2008,36(1):7-8.
- [9] 南国. 海南斥资千万元规划大洲岛[N]. 中国海洋报,2012-02-20(2).
- [10] 国家海洋环境监测中心. 海水水质标准:GB12763—1991[S]. 北京:中国标准出版社,1991.
- [11] 李洪武,宋培学. 海洋浮游生物学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2012.
- [12] 国家海洋环境监测中心. 海洋调查规范:GB17378—1998[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [13] 孙军,刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报,2004,26(1):62-75.
- [14] 孙军,东艳,徐俊,等. 1999 年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落[J]. 生态学报,2004,24(9):2003-2016.
- [15] 唐东明. 聚类分析及其应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
- [16] 张玲. 单因素及双因素方差分析及检验的原理及统计应用[J]. 数学学习与研究,2010(7):92-94.
- [17] 史海燕. 广西北海涠洲岛珊瑚礁海域生态环境监测与评价[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
- [18] 国家海洋环境监测中心. 海洋调查规范:GB 3097—1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.

岳林,邢巧,吴晓晨,等. 甘蔗渣基生物质炭对溶液中 Cd(II) 的吸附解吸作用[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 216-220.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.03.059

# 甘蔗渣基生物质炭对溶液中 Cd(II) 的吸附解吸作用

岳林<sup>1</sup>, 邢巧<sup>2,3</sup>, 吴晓晨<sup>3</sup>, 葛成军<sup>1</sup>, 俞花美<sup>1</sup>, 符博敏<sup>1</sup>, 李昉泽<sup>1</sup>

(1. 海南大学环境与植物保护学院/海口市环境毒理学重点实验室, 海南海口 570228;

2. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004; 3. 海南省环境科学研究院, 海南海口 571126)

**摘要:**以典型南方农业废弃物甘蔗渣为前驱物, 于 350、450、550 ℃ 限氧条件下制备 3 种生物质炭, 分别标记为 BC350、BC450、BC550, 研究其对溶液中 Cd(II) 的吸附解吸特性, 并探讨了 pH 值对吸附过程的影响。结果表明: 伪二级动力学模型能较好地描述生物质炭对 Cd(II) 的吸附动力学过程, 其理论平衡吸附量 ( $q_e$ ) 大小顺序为 BC550 > BC450 > BC350; 生物质炭对 Cd(II) 的吸附过程可采用 Freundlich 模型 (平均  $R^2$  为 0.997 9) 和 Langmuir 模型 (平均  $R^2$  为 0.997 8) 进行拟合, Langmuir 模型可更好地描述 Cd(II) 在 3 种生物质炭上的解吸过程 (平均  $R^2$  为 0.924 0); 生物质炭对 Cd(II) 的吸附与解吸过程是不可逆的, 存在着明显的迟滞效应 ( $HI$  为 1.347 ~ 1.944), 并表现为负滞后效应; 生物质炭对 Cd(II) 的吸附量随溶液初始 pH 值的增大呈现先增加后减少的趋势, pH 值为 6 时吸附量最大。因此, 甘蔗渣基生物质炭能够强烈吸持溶液中的 Cd(II) 且具明显的解吸迟滞效应, 可作为外源 Cd(II) 去除的良好环境功能材料。

**关键词:** 甘蔗渣; 生物质炭; 吸附; 解吸; Cd(II)

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)03-0216-05

随着电镀、冶金、印染、有色金属生产等工业活动的兴起, 重金属污染形势严峻。重金属可通过食物链在动物、人体内累积, 危害人类健康<sup>[1-2]</sup>。人们对重金属污染尤其是镉污染的担忧日益增加, 如著名八大公害事件之一——由 Cd 引起的骨痛病、广州“镉米”事件和广西龙江河突发镉污染事件等, 其危害程度取决于其存在化学形态和浓度。目前, 水体和土壤中重金属去除方法主要包括吸附法、化学沉淀法、絮凝法、电解法、离子交换法、膜分离法、生物修复法等<sup>[3-5]</sup>。吸附法作为修复环境中重金属污染的一种经济有效的方法, 受到广泛关注; 而吸附法中新型廉价环保吸附材料的开发是目前国内外学者的研究热点。

生物质炭 (biochar, 简称 BC) 是在缺氧条件下将生物质裂解炭化产生的一类多孔结构和高比表面积的难溶物质。生物质炭因其具有特殊的理化性质, 在环境污染修复领域具有良好的应用潜力<sup>[6-7]</sup>。相关研究表明, 以玉米秸秆、树皮及木材为前驱物制备的生物质炭能较好地吸附  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$  和  $\text{As}^{3+}$ <sup>[8]</sup>, 而竹炭对水溶液中的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  等具有良好的吸附效果<sup>[9]</sup>。此外有研究报道, 以动物粪便为前驱物制备的生物质炭能够有效固定铜、镉、镍和铅离子<sup>[10]</sup>。生物质炭除了对水体中的重金属具有良好的吸附固定效果, 对土壤中的重金属同样具有良好的修复效应<sup>[11]</sup>。Méndez 等研究发现水稻秸秆生物质炭能将老化土中铅离子和铜离子的浓度明显降低<sup>[9]</sup>。Beesley 等的研究结果证实硬木基生物质炭可较好地固定环境中的 Cu(II)、Cd(II)、Zn(II) 和 As(II)<sup>[12]</sup>。

本研究利用限氧控温炭化法以甘蔗渣为原材料, 分别于 350、450、550 ℃ 热解温度下制备 3 种生物质炭, 以 Cd(II) 为重金属代表, 采用批量平衡吸附方法, 研究生物质炭对溶液中 Cd(II) 的吸附去除性能, 并探讨其吸附机理, 以期对重金属污染废水修复提供一定的理论依据。

收稿日期: 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 21467008、21367011); 海南省自然科学基金 (编号: 413123)。

作者简介: 岳林 (1992—), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态学。E-mail: 282626679@163.com。

通信作者: 俞花美, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染物环境行为。E-mail: yuhuamei3007@163.com。

[19] 孙优善, 孙鹤鲲, 王学昌, 等. 胶州湾近岸海域水质状况调查与评价[J]. 海洋湖沼通报, 2007(4): 93-97.

[20] 徐佳奕, 徐兆礼. 三沙湾浮游动物生态类群演替特征[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1413-1424.

[21] 陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究种类组成、群落结构、水系指示种[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1): 59-63.

[22] 王尔栋, 王钟, 陈国华, 等. 珊瑚对型轮虫和丰年虫无节幼体的捕食机制初探[J]. 水产养殖, 2014, 35(1): 1-4.

[23] 范晓鹏, 沈温芬. 池塘原生动物的多样性研究[C]//中国原生动

物学会第十一次学术讨论会论文摘要汇编. 武汉: 中国原生动物学会, 2001.

[24] 方艳红, 王崇, 王文君, 等. 大渡河河口春秋季节原生动物的群落结构[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(4): 29-34.

[25] 柯志新, 黄良民, 谭桦辉, 等. 三亚珊瑚礁分布海区浮游生物的群落结构[J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 696-701.

[26] 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 春、秋季太湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(2): 31-37.

[27] 崔毅, 陈碧鹃, 马绍赛. 乳山湾浮游植物与环境因子的相关关系研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 935-938.