

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18421

沿浦湾秋茄种植前后大型底栖动物生态位和功能群变化

张苗苗¹, 王咏雪², 田阔¹, 田嘉琦¹, 孙鹏¹, 水柏年¹

1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316000;

2. 台州市海洋环境监测中心, 浙江 台州 318000

摘要: 基于沿浦湾 2014 年 10 月(秋季)和 2016 年 10 月(秋季)的潮间带大型底栖动物调查资料, 运用生态位宽度、生态位重叠、功能群分类和冗余分析(RDA)等指标与方法, 分析秋茄(*Kandelia candel*)种植前、后大型底栖动物的生态位、功能群变化。研究表明, 秋茄种植后广生态位种和中生态位种物种数占比与种植前相比较均有所增加, 窄生态位种物种数占比减少。种植前生态位重叠值最大的种对为大青弹涂鱼(*Scartelaos gigas*)和细螯虾(*Leptochela gracilis*)(0.94), 种植后则分别为豆形拳蟹(*Pyrhila pisum*)和微黄镰玉螺(*Lunatica gilva*)(0.99)、莖拟沼螺(*Assiminea violacea*)和光滑河篮蛤(*Potamocorbula laevis*)(0.99)。种植后高、中潮带功能群多样性较种植前上升, 而低潮带功能群多样性下降; 种植后浮游生物食者(Pl)、植食者(Ph)和杂食者(Om)的密度较种植前均增加, 而肉食者(Ca)的密度略有减少。秋茄种植前 3 个潮带之间无显著性差异($P>0.05$); 秋茄种植后高潮带与低潮带, 以及中潮带与低潮带均有显著性差异($P<0.05$)。冗余分析(RDA)得出, 对大型底栖动物群落具有较大影响的因子由种植前的铅、镉和石油类变为种植后的锌、镉和砷。总之, 苍南沿浦湾秋茄林种植对大型底栖动物生态位和功能群总体上具有积极的改善作用。

关键词: 秋茄; 大型底栖动物; 生态位; 功能群; 冗余分析; 红树林

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)05-0949-10

沿浦湾潮间带(120°26'E, 27°10'N)位于浙江省苍南县南部, 长期受到滩涂养殖等活动的影响, 滩涂生物多样性和环境逐渐衰退。2016 年春季由苍南县海洋与渔业局组织进行有关生态修复工作, 在沿浦湾潮间带种植红树植物秋茄(*Kandelia candel*), 以期改善滩涂生态环境, 至今已种植约 0.51 km² 秋茄林, 有关研究显示沿浦湾生态环境发生较大改变^[1-2]。唐以杰等^[3]、陈光程等^[4]、陈顺洋等^[5]、胡成业^[6]、郭涛^[7]等研究了红树林对大型底栖动物的影响, 魏德重等^[8]研究了红树林种植对大型底栖动物群落结构及功能群的影响, 黄相等^[9]研究了红树林生境中大型底栖动物优势种的生态位。大型底栖动物功能群是潮间带生

境梯度及环境因子变化的综合反映^[10], 而其物种间生态位的差异则反映了生境异质性和适应能力的不同^[11]。将生态位、功能群和冗余分析(RDA)相结合进行研究, 能更好地揭示人工秋茄大规模种植对滩涂大型底栖动物群落及生态环境的影响。

在沿浦湾秋茄种植前, 覃胡林等^[12]研究了该区域大型底栖动物群落结构及多样性, 而种植后尚无相关研究及报道。本研究通过对比秋茄种植前、后沿浦湾潮间带大型底栖动物生态位和功能群的变化, 旨在探讨秋茄种植以及若干沉积物环境因子对沿浦湾潮间带大型底栖动物群落的影响, 为今后沿浦湾及类似地区开展红树林建设、保护

收稿日期: 2019-01-04; 修订日期: 2019-02-28.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604902); 浙江省重中之重学科(海洋科学)项目和浙江省软科学研究计划项目(2015C25018); 浙江省基础公益研究计划项目(LGN18D060001).

作者简介: 张苗苗(1993-), 女, 从事渔业资源与生态研究. E-mail: nishuoshennmme@163.com

通信作者: 水柏年, 教授, 主要从事海洋生物资源与生态研究. E-mail: shuibonian@163.com

与管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查方法

根据《海洋调查规范》GB/T 12763.6-2007^[13]的要求,结合潮间带的生境特点,分别于 2014 年 10 月和 2016 年 10 月对沿浦潮间带大型底栖动物进行调查。根据瓦扬^[14]和斯蒂芬森原则^[15]及生物自然分布并结合沿浦湾的实际情况,共布设 5 条断面(图 1)。在高、中、低 3 个潮带依次布设 2 个、2 个与 1 个站点。将采得的所有样品洗净装入样品袋,用无水乙醇溶液固定后带回实验室进行种类鉴定、个体计数、称重等操作,并对实验数据进行统计分析。

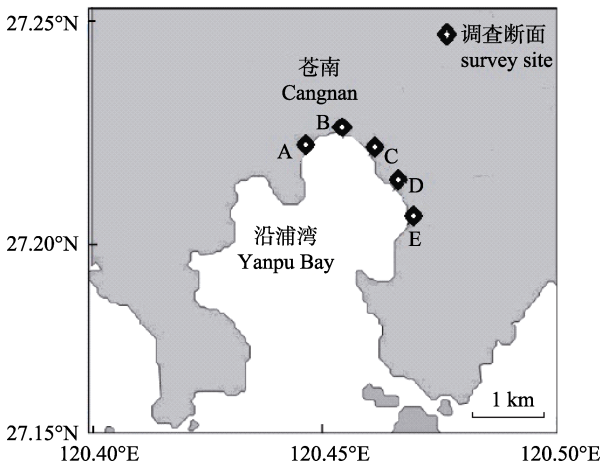


图 1 沿浦湾大型底栖动物调查断面布设示意

Fig. 1 Macrozoobenthos survey sites distribution in Yanpu Bay

1.2 数据处理方法

1.2.1 生态位测定

(1) 生态位宽度使用 Shannon 指数^[16]

$$B_i = -\sum_{j=1}^R p_{ij} \ln p_{ij}$$

式中, B_i 为生态位宽度, $P_{ij}=n_{ij}/N_{i+}$, 表示物种 i 在第 j 个站点中个体数占物种 i 所有个体数的比例, 其中 R 为总站位数, $B_i \in [0, R]$ 。根据大型底栖动物的生态位宽度值的具体情况划分^[17]: $B_i > 2.0$ 为广生态位种, $1.0 < B_i \leq 2.0$ 为中生态位种, $0 < B_i \leq 1.0$ 为窄生态位种, 并将 $B_i = 0$ 单独划分为一组。

(2) 生态位重叠值使用 Pianka 指数^[17]

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^R (P_{ij} \cdot P_{kj})}{\sqrt{\sum_{j=1}^R P_{ij}^2 \cdot \sum_{j=1}^R P_{kj}^2}}$$

式中, Q_{ik} 为重叠值, P_{ij} 和 P_{kj} 分别表示种 i 和种 k 在第 j 个站点中的个体数占该种所有个体数的比例, $Q_{ik} \in [0, 1]$ 。根据 Wathne 等^[18]的评判标准, 将生态位重叠分为 3 个等级: $Q_{ik} \geq 0.6$ 为生态位重叠程度高, $0.3 \leq Q_{ik} < 0.6$ 为生态位重叠程度中, $Q_{ik} < 0.3$ 为生态位重叠程度低。

1.2.2 功能群 借鉴文献^[19-21]将底栖动物功能群分为以下 5 类:

(1) 浮游生物食者(planktophagous group, Pl): 依靠各种过滤器官滤取水体中微小的浮游生物, 在生态系统中属于消费者, 如许多双壳类、甲壳类等;

(2) 植食者(phytophagous group, Ph): 主要以维管束植物和海藻为食物, 在生态系统中属于消费者, 如某些腹足纲、双壳纲和蟹类等;

(3) 肉食者(camivorous group, Ca): 捕食小型动物和动物幼体, 在生态系统中属于消费者, 如某些环节动物、十足类等;

(4) 杂食者(omnivorous group, Om): 依靠皮肤或鳃的表皮, 直接吸收溶解在水中的有机物, 也可取食植物腐叶和小型双壳类、甲壳类, 在生态系统中属于消费者, 如某些腹足纲、双壳纲和蟹类等;

(5) 碎屑食者(detritivorous group, De): 摄食底表的有机碎屑, 吞食沉积物, 在消化道内摄取其中的有机物质, 在生态系统中属于分解者, 如某些线虫、双壳类等。

依据文献^[20-22]对大型底栖动物各个功能群采用香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J')进行功能群多样性分析。

1.2.3 冗余分析 应用冗余分析(RDA)^[23-24]对沉积物质量和大型底栖动物数据进行分析, 以确定影响大型底栖动物分布最显著的环境因子。其特点是可以结合多个环境因子一起分析, 包含的信

息量大, 结果直观明显, 从而更好地反映群落与环境的联系。RDA 排序分析采用 CANOCO4.5 软件完成^[24]。RDA 排序图中第一轴和第二轴解释物种变异的百分比和释物环境变异的百分比如果均大于 40%^[25], 说明排序结果可靠。

2 结果与分析

2.1 生态位宽度

由表 1 知, 秋茄种植前大型底栖动物共 39 种, 生态位宽度值范围为 0.11~3.18。广生态位种有日本大眼蟹(*Macrophthalmus japonicus*)、长足长方蟹(*Metaplax longipes*)和缢蛭(*Sinonovacula con-*

stricta)3 种, 占总物种数的 7.69%; 中生态位种有日本鼓虾(*Alpheus japonicus*)、弹涂鱼(*Periophthalmus modestus*)、弧边招潮蟹(*Uca arcuata*)等 6 种, 占总物种数的 15.38%; 窄生态位种有台湾泥蟹(*Nlyoplax formosensis*)、微黄镰玉螺(*Lunatica gilva*)等 30 种, 占总物种数的 76.92%。秋茄种植后大型底栖动物共 32 种, 生态位宽度值范围为 0.04~3.12。广生态位种有长足长方蟹、日本大眼蟹和尖锥拟蟹守螺(*Cerithidea largillierti*)3 种, 占总物种数的 9.38%; 中生态位种有缢蛭、珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)等 6 种, 占总物种数的 18.75%; 窄生态位种有弹涂鱼、魁蚶(*Scapharca broughtonii*)等 23

表 1 秋茄种植前、后大型底栖动物生态位宽度和功能群划分
Tab. 1 Niche breadth and functional groups of macrozoobenthos before/after *Kandelia candel* planting

序号 code	物种 species	生态位宽度 niche breadth		功能群 functional group
		种植前 before planting	种植后 after planting	
1	弹涂鱼 <i>Periophthalmus modestus</i>	1.62	0.58	Om
2	大弹涂鱼 <i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	1.23	1.01	Om
3	青弹涂鱼 <i>Scartelaos histophorus</i>	1.47	0.35	Om
4	大青弹涂鱼 <i>Scartelaos gigas</i>	0.45	1.18	Om
5	弹涂鱼属 <i>Periophthalmus</i> sp.	0.14	-	Om
6	鬚虾虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i>	0.26	-	Ca
7	日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>	1.85	0.61	Ca
8	鲜明鼓虾 <i>Alpheus digitalis</i>	1.32	0.32	Ca
9	细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>	0.38	-	Pl
10	日本异指虾 <i>Processa japonica</i>	0.12	-	Pl
11	伍氏拟厚蟹 <i>Helicana wuana</i>	0.25	1.13	Ph
12	沈氏厚蟹 <i>Helice sheni</i>	0.17	-	Ph
13	侧足厚蟹 <i>Helice latimera</i>	0.30	-	Ph
14	长足长方蟹 <i>Metaplax longipes</i>	2.74	3.12	Ph
15	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>	3.18	3.11	Ph
16	弧边招潮蟹 <i>Uca arcuata</i>	1.05	1.21	Ph
17	清白招潮蟹 <i>Uca lacteus</i>	0.17	-	Ph
18	红螯螳臂相手蟹 <i>Chiromantes haematocheir</i>	0.50	0.52	Ph
19	宁波泥蟹 <i>Ilyoplax ningpoensis</i>	0.17	-	Ph
20	台湾泥蟹 <i>Nlyoplax formosensis</i>	0.98	-	Ph
21	四齿大额蟹 <i>Metopograpsus quadridentatus</i>	0.12	-	Ph
22	豆形拳蟹 <i>Pyrhila pisum</i>	-	0.29	Om
23	微黄镰玉螺 <i>Lunatica gilva</i>	0.75	0.75	Ca
24	黑田乳玉螺 <i>Polinices mammata</i>	-	0.19	Ca
25	珠带拟蟹守螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	0.35	1.92	Ph
26	尖锥拟蟹守螺 <i>Cerithidea largillierti</i>	0.26	2.26	Ph
27	小翼拟蟹守螺 <i>Cerithidea microptera</i>	-	0.04	Ph

(待续 to be continued)

(续表 1 table 1 continued)

序号 code	物种 species	生态位宽度 niche breadth		功能群 functional group
		种植前 before planting	种植后 after planting	
28	柯氏蟹守螺 <i>Rhinoclavis kochi</i>	0.30	—	Ph
29	纵带滩栖螺 <i>Batillaria zonalis</i>	0.31	0.14	Pl
30	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingi</i>	—	0.04	Pl
31	董拟沼螺 <i>Assiminea violacea</i>	0.17	0.18	Pl
32	绯拟沼螺 <i>Assiminea latericea</i>	0.37	—	Pl
33	半褶织纹螺 <i>Nassarius semiplicatus</i>	—	0.36	Ca
34	江户明樱蛤 <i>Moerella jedomensis</i>	—	0.04	Pl
35	缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>	2.68	1.94	Pl
36	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	0.36	0.13	Pl
37	长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	—	0.29	Om
38	近江巨牡蛎 <i>Crassostrea ariakensis</i>	—	0.21	Om
39	焦河蓝蛤 <i>Potamocorbula ustulata</i>	0.14	—	Pl
40	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.35	0.32	Pl
41	魁蚶 <i>Scapharca broughtonii</i>	0.12	0.41	Pl
42	厚壳贻贝 <i>Mytilus coruscus</i>	—	0.35	Pl
43	纹藤壶 <i>Amphibalanus amphitrite</i>	—	0.79	Pl
44	疣吻沙蚕 <i>Tylorrhynchus heterochaetus</i>	0.24	0.22	Ca
45	长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i>	0.38	—	Ca
46	圆锯齿吻沙蚕 <i>Dentinephtys glabra</i>	0.11	—	Ca
47	日本角吻沙蚕 <i>Goniada japonica</i>	0.20	0.22	Ca
48	真齿沙蚕 <i>Nereis neoneanthes</i>	0.11	—	Ca
49	双鳃内卷齿蚕 <i>Aglaophamus dibranhis</i>	0.14	—	Ca

注: Ca 表示肉食者, Om 表示杂食者, Ph 表示植食者, Pl 表示浮游生物食者。

Note: Ca means the camivorous group; Om means the omnivorous group; Ph means the phytophagous group; Pl means the planktophagous group.

种, 占总物种数的 71.88%。

虽然秋茄种植后总物种数略有减少, 但广生态位种和中生态位种物种数占比有所增加, 窄生态位种物种数占比减少。种植后缢蛏由广生态位种变为中生态位种, 而尖锥拟蟹守螺则由窄生态位种变为广生态位种, 珠带拟蟹守螺由窄生态位种变为中生态位种。

2.2 生态位重叠

由图 2 知, 秋茄种植前, 生态位重叠值在 0~0.94 之间, 39 个物种组成的 780 个种对中, 484 个种对的生态位重叠程度低, 占总种对数的 62.11%; 187 个种对的生态位重叠程度中等, 占总种对数的 24.74%; 109 个种对的生态位重叠程度高, 占总种对数的 13.16%, 其中生态位重叠值最大的种对为大青弹涂鱼(*Scartelaos gigas*)和细螯虾(*Leptochela gracilis*) (0.94)。

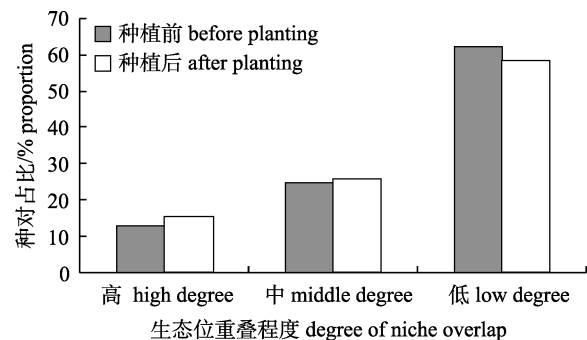


图 2 秋茄种植前后不同生态位重叠程度种对占比
Fig. 2 The proportion of species pairs with different niche overlap degree before/after *Kandelia candel* planting

秋茄种植后, 生态位重叠值在 0~0.99 之间, 32 个物种组成的 582 个种对中, 337 个种对的生态位重叠程度低 ($Q_{ik} < 0.3$), 占总种对数的 58.46%; 145 个种对的生态位重叠程度中等 ($0.3 \leq Q_{ik} < 0.6$), 占总种对数的 25.85%; 100 个种对的生态位重叠

程度高($Q_{ik} \geq 0.6$), 占总种对数的 15.38%。其中生态位重叠值最大的种对分别为豆形拳蟹(*Pyrhila pisum*)和微黄镰玉螺(0.99)、莖拟沼螺(*Assiminea violacea*)和光滑河篮蛤(*Potamocorbula laevis*) (0.99)。值得注意的是, 秋茄种植前尖锥拟蟹守螺和珠带拟蟹守螺的生态位重叠值为 0, 而种植后该种对的生态位重叠值骤增为 0.74。种植后生态位重叠程度高和生态位重叠程度中的种对数占比均增加, 而生态位重叠程度低的种对数占比减少。

2.3 功能群

对秋茄种植前后大型底栖动物功能群进行划分, 列入表 1。秋茄种植前后沿浦湾均含有 4 个功能群, 表明群落均处于第二、三、四级营养级, 第二级营养级为浮游生物食者(Pl)和植食者(Ph), 第三级营养级为杂食者(Om), 第四级营养级为肉食

者(Ca)。由表 2 可知, 种植后的浮游生物食者(Pl)、植食者(Ph)和杂食者(Om)的密度较种植前均增加, 而肉食者(Ca)的密度略有减少, 即第二、第三营养级的物种密度增加, 第四营养级的物种密度减少。

表 2 秋茄种植前、后不同功能群重量密度
Tab. 2 The density of different functional groups before/after *Kandelia candel* planting

功能群 functional group	密度 density	
	种植前 before planting	种植后 after planting
	浮游生物食者 planktophagous group (Pl)	198
植食者 phytophagous group (Ph)	506	1062
肉食者 camivorous group (Ca)	168	130
杂食者 omnivorous group (Om)	120	154

表 3 秋茄种植前、后大型底栖动物各个潮带功能群的物种多样性指数
Tab. 3 The diversity indexes of macrozoobenthos before/after *Kandelia candel* planning in different intertidal zones

潮带 tidal zone	种植前 before planting			种植后 after planting		
	丰富度指数 richness index (D)	均匀度指数 evenness index (J')	多样性指数 diversity index (H')	丰富度指数 richness index (D)	均匀度指数 evenness index (J')	多样性指数 diversity index (H')
高潮带 high tide zone	0.378	0.547	0.758	0.515	0.624	0.864
中潮带 middle tide zone	0.439	0.752	1.042	0.406	0.853	1.182
低潮带 low tide zone	0.470	0.755	1.047	0.451	0.720	0.978

由表 3 可知, 秋茄种植后高潮带功能群的 Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')和香农-威纳多样性指数(H')均上升; 中潮带功能群的 J'和 H'指数上升, 而 D 指数下降; 低潮带功能群的 D、J'和 H'均下降。

由表 4 可知, 秋茄种植前 3 个潮带之间无显著性差异($P > 0.05$); 秋茄种植后高潮带与低潮带, 中潮带与低潮带均有显著性差异($P < 0.05$)。

2.4 功能群与沉积物若干环境因子之间的冗余分析

对秋茄种植前后大型底栖动物功能群与沉积物质量之间进行冗余分析(RDA)表明(表 5), 种植前第一轴和第二轴的特征值分别为 0.407 和 0.137, 其相关系数为 0.919 和 0.754, 解释了物种变异的 65.1%和环境变异的 87.0%, 大于一般要

表 4 秋茄种植前、后不同潮带功能群分类的单因素方差分析

Tab. 4 ANOVA of the functional groups of different intertidal zones before/after *Kandelia candel* planting

潮带 tidal zone	高潮带 high tide zone	中潮带 middle tide zone	低潮带 low tide zone
高潮带 high tide zone		0.275	0.869
中潮带 middle tide zone	0.134		0.343
低潮带 low tide zone	0**	0.002**	

注: 右上方为种植前, 左下方为种植后。数字表示 P 值, *表示差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$)。

Note: Top right means before planting, and bottom left means after planting. Numbers mean P value, * and ** denotes significant difference ($P < 0.05$) and extremely significant difference ($P < 0.01$).

求的 40%, 说明排序结果可靠。种植后第一轴和第二轴的特征值分别为 0.219 和 0.161, 其相关系

数为 0.705 和 0.820, 解释了物种变异的 45.5.0% 和环境变异的 78.9%, 大于一般要求的 40%, 说明排序结果可靠。

种植前(图 3), 铅(0.2416)和第一轴呈最大正相关, 镉(-0.8174)和第一轴呈最大负相关, 即在排序图中铅从左到右逐步增加, 而镉逐步降低; 石油(0.3565)和第二排序轴呈最大正相关, 镉(-0.1854)和第二排序轴呈最大负相关, 即在排序图中石油类由下至上逐步增加, 镉逐步降低。种植后(图 4), 锌(0.5289)和第一轴和呈最大正相关, 砷(-0.1765)和第一轴呈最大负相关, 即在排序图

中锌从左到右逐步增加, 而砷逐步降低; 镉(0.3413)和第二排序轴呈最大正相关, 砷(-0.6530)和第二排序轴呈最大负相关, 即在排序图中镉由下至上逐步增加, 砷逐步降低。因此, 种植前对大型底栖动物影响较大的环境因子是铅、镉、和石油类, 种植后则是锌、镉和砷。

由表 6 可知, 秋茄种植后石油类和铅的含量较种植前减少, 铜的含量较种植前略有减少但依然超过国家一类沉积物质量标准; 镉、锌、汞和砷的含量较种植前略有增加, 铬的含量较种植前增加且超过国家一类沉积物质量标准。

表 5 秋茄种植前、后 RDA 排序结果
Tab. 5 The results of RDA ordination before and after *Kandelia candel* planting

统计特征值 statistical eigenvalue	种植前 before planting				种植后 after planting			
	轴 1 axis 1	轴 2 axis 2	轴 3 axis 3	轴 4 axis 4	轴 1 axis 1	轴 2 axis 2	轴 3 axis 3	轴 4 axis 4
特征根值 eigenvalue	0.407	0.137	0.058	0.023	0.219	0.161	0.091	0.011
物种-环境相关系数 species-environment correlation	0.919	0.754	0.771	0.360	0.705	0.820	0.694	0.286
物种-环境的累计解释 cumulative percentage variance of species-environment relation	65.1	87.0	96.3	100.0	45.5	78.9	97.8	100.0

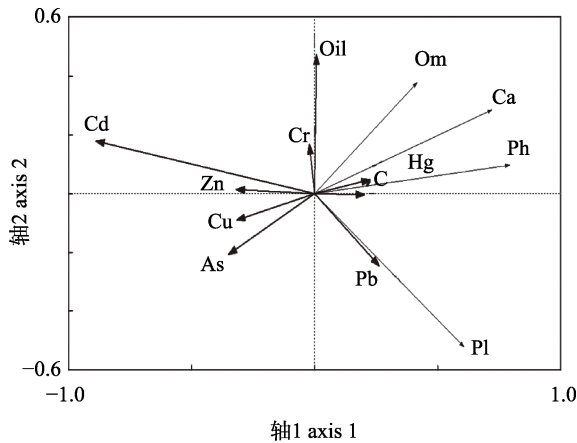


图 3 秋茄种植前大型底栖动物功能群与沉积物质量的 RDA 分析排序图
Ca 表示肉食者, Om 表示杂食者, Ph 表示植食者, Pl 表示浮游生物食者。

Fig. 3 RDA analysis of functional groups and sediment quality before *Kandelia candel* planting
Ca means the camivorous group; Om means the omnivorous group; Ph means the phytophagous group; Pl means the planktophagous group.

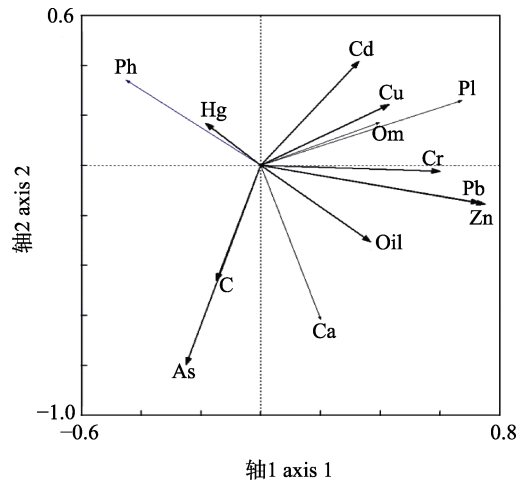


图 4 秋茄种植后大型底栖动物功能群与沉积物质量的 RDA 分析排序图
图中环境因子见表 6, 功能群分组见表 1。

Fig. 4 RDA analysis of functional groups and sediment quality after *Kandelia candel* planting
The environmental factors in the figure are shown in table 6, and the functional groups in the figure are shown in table 1.

表 6 秋茄种植前、后沉积物环境因子含量
Tab. 6 The average content of environmental factors before/after *Kandelia candel* planting

$n=15; \bar{x}\pm SD; \text{mg/kg}$

环境因子 environmental factor	石油类 oil	镉 Cd cadmium	铬 Cr chromium	铜 Cu copper	铅 Pb lead	锌 Zn zinc	汞 Hg mercury	砷 As arsenic
种植前 before planting	24.31±2.80	0.12±0.01	64.06±2.59	40.79±2.01	36.95±1.32	116.73±3.32	0.06±0.002	12.95±0.47
种植后 after planting	5.37±3.21	0.27±0.08	106.47±15.29	37.20±1.22	19.67±8.74	126.07±4.89	0.07±0.01	13.87±0.48

3 讨论

3.1 生态位宽度

秋茄种植前缢蛭为 3 种广生态位种之一, 种植后则变为中生态位种, 长足长方蟹的生态位宽度值由 2.74 上升为 3.12, 这可能是由于秋茄种植后秋茄凋落物及有机碎屑量增加, 给长足长方蟹提供丰富的饵料, 而缢蛭的资源与空间竞争能力较有限, 特别是长足长方蟹也会捕食缢蛭苗等所致。

尖锥拟蟹守螺由种植前的窄生态位种变为种植后的广生态位种, 珠带拟蟹守螺由种植前的窄生态位种变为种植后的中生态位种, 这可能是由于植食性的尖锥拟蟹守螺和珠带拟蟹守螺在人工秋茄林演替的早期占据潮间带成为先锋物种, 随着秋茄林成长和固土作用的增加, 这些物种数量增多或分布的资源位点增加, 致使其生态位宽度变大, 这与魏德重等^[8]的研究结果一致。而且秋茄发达的根系使底质硬度增加, 这种相对稳定的环境适合蟹守螺这类运动迟缓的物种大量繁殖, 这与胡知渊等^[26]的研究结果相似。

秋茄种植后广生态位种和中生态位种物种数占比增加, 窄生态位种物种数占比减少, 这可能是由于秋茄的种植改善了滩涂的生境, 使一些种植前为窄生态位种的物种在种植后数量增多或分布的资源位点增加, 从而使其生态位宽度变大, 这与黄相相等^[9]的研究结果相似。

3.2 生态位重叠

秋茄种植前, 大青弹涂鱼和细螯虾生态位重叠值最大(0.94), 这可能是由于两者具有相近的食性, 相互竞争资源所致。而秋茄种植后, 豆形拳蟹和微黄镰玉螺(0.99)、莖拟沼螺和光滑河篮蛤(0.99)具有极高的生态位重叠值, 这可能是由于豆形拳蟹和微黄镰玉螺均生活在潮间带至浅海的

泥沙质海底, 生活环境具有同质性所致; 而沿浦湾多鸬鹚类水鸟, 莖拟沼螺为此类水鸟的喜食食物^[27], 秋茄林的存在为莖拟沼螺提供了庇护场所, 不易被水鸟捕食, 这使莖拟沼螺分布的资源位点增多, 增大了与其具有相似食性的光滑河篮蛤的竞争排斥作用, 致使两者重叠程度变高。种植后尖锥拟蟹守螺和珠带拟蟹守螺的生态位重叠值骤增, 这可能是这两个物种食性、栖息空间等类似, 存在较强的资源与空间等种间竞争所致。

3.3 功能群

秋茄林的掉落物为植食者(Ph)提供了丰富的食物来源, 且秋茄种植后使潮流流速减慢, 为滤食生活的浮游生物食者(Pl)提供了稳定的栖息环境, 使第二营养级的密度增加。第二营养级密度的增加为位于第三营养级的杂食者(Om)提供了更多的食物来源, 从而使第三营养级的密度增加。第四营养级的密度减少可能是由于肉食者(Ca)的主要组成物种, 如经济价值较高的沙蚕等多毛类因生物量大增引起沿浦湾赶海人集中过度采挖所致。

秋茄种植后大型底栖动物功能群多样性: 高潮带功能群的 Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')和香农-威纳多样性指数(H')均有提高, 中潮带功能群的 Pielou 均匀度指数(J')和香农-威纳多样性指数(H')也均有提高, 这表明秋茄种植有利于功能群多样性提高, 且对周围区域具有辐射作用。低潮带功能群的 Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')和香农-威纳多样性指数(H')均下降, 可能是由于人为采捕导致低潮带杂食者(Om)中的弹涂鱼类和肉食者(Ca)中的沙蚕类的物种数和密度减小, 大型底栖动物群落组成和结构发生变化, 致使低潮带功能群多样性降低。

3.4 功能群与沉积物若干环境因子之间的冗余分析

秋茄种植后石油含量较种植前下降, 且对大型底栖动物群落的影响减小, 可能是由于秋茄林滩涂沉积物中存在的益生性降解菌对石油类中含有的多环芳烃进行了降解, 且秋茄落叶碎屑对多环芳烃具有较强的吸附能力, 这与陆志强等^[28]、赵北北^[29]的研究结论相似; 种植后铅的含量较种植前下降且对大型底栖动物群落的影响减小, 这可能是由于秋茄的根和枝干对于铅的吸附和累积作用所致, 这与郑文教等^[30]的研究结论类似; 种植后砷的含量较种植前上升, 且对大型底栖动物的影响增大, 这可能是由于沿浦湾外源性砷的输入较强, 但红树植物对砷的吸收能力较弱, 且对砷具有一定的排斥作用, 这与王鹏等^[31]的研究结果相似; 种植前后镉对大型底栖动物的影响均较大且沉积物中铬和铜的含量超过国家一类沉积物含量标准, 这可能是由于海流将位于沿浦湾西部约 10 km 处福建福鼎沙埕港的大型工业园区的工业废水不断输送至沿浦湾所致。

4 结论

秋茄的种植使一些大型底栖动物生物量和密度均有增多, 或分布的资源位点增加, 从而使其生态位宽度变大。秋茄林为植食者(Ph)和杂食者(Om)提供了丰富的食物来源, 为浮游生物食者(Pl)提供了稳定的栖息环境, 而经济价值较高的沙蚕等多毛类因生物量增大而被过度采挖。秋茄的种植有利于大型底栖动物功能群多样性的提高, 且对周围区域具有辐射作用。秋茄的种植有利于降解石油类物质, 吸附铅等沉积物中的重金属, 对沿浦湾沉积物环境质量的改善起到积极作用, 但滩涂环境受铬、铜等重金属污染的形势依然严峻。建议今后加强对秋茄林生态系统的监测、保护与管理; 同时, 加强滩涂沉积物、水质环境质量监测, 且以此为依据进一步通过行政、法律等手段切断沿浦湾重金属的污染源头。总之, 秋茄林的建设对海洋生态环境质量改善具有积极的作用, 在加强红树林建设的同时, 开展红树林生态系统的监测、研究、保护与管理具有更重要的意义。

参考文献:

- [1] Tian J Q. Community characteristics of macrobenthos in the intertidal zone along the coast of the Yanpu Bay after *Kandelia candel* planting[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018. [田嘉琦. 秋茄种植后沿浦湾潮间带大型底栖动物群落特征[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.]
- [2] Tian J Q, Wang Y X, Tian K, et al. Study on the characteristics of the macrobenthic community in the intertidal zone along the Yanpu Bay before and after *Kandelia candel* planting[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2018, 37(2): 114-122. [田嘉琦, 王咏雪, 田阔, 等. 秋茄种植前后沿浦湾潮间带大型底栖动物群落特征变化研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 114-122.]
- [3] Tang Y J, Yu S X. Spatial zonation of macrofauna in the Zhanjiang Mangrove Nature Reserve, Guangdong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 1703-1714. [唐以杰, 余世孝. 广东湛江红树林保护区大型底栖动物群落的空间分带[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1703-1714.]
- [4] Chen G C, Yu D, Ye Y, et al. Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 327-336. [陈光程, 余丹, 叶勇, 等. 红树林植被对大型底栖动物群落的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 327-336.]
- [5] Chen S Y, Chen B, Liao J J, et al. Composition and distribution pattern of Littorinid snails in young rehabilitated mangroves[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(2): 460-467. [陈顺洋, 陈彬, 廖建基, 等. 恢复初期红树林树栖滨螺科动物的组成与分布[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 460-467.]
- [6] Hu C Y. Study on ecology of the macrobenthos community in Shupaisha wetland in south branch of the Oujiang Estuary[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2016. [胡成业. 甌江南口沙洲湿地大型底栖动物群落生态学研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2016.]
- [7] Guo T. Ecological and environmental effect on macrofaunal communities in mangrove and salt marshes in Quanzhou Bay[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014. [郭涛. 泉州湾红树林和盐沼湿地大型底栖动物群落生态环境效应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.]
- [8] Wei D Z, Xiang C Y, Bao Y X, et al. Effect of mangrove planting on macrobenthic community structure and functional group[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Science), 2012, 35(2): 195-202. [魏德重, 项长友, 鲍毅新, 等. 红树林种植对大型底栖动物群落结构及功能群的影响[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(2): 195-202.]
- [9] Huang X X, Ren P, Li H H, et al. Niche analysis of dominant

- species of macro benthos in different mangrove habitats on Maoyan Island[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences), 2017, 40(4): 446-452. [黄相相, 任鹏, 李海宏, 等. 茅埭岛红树林生境中大型底栖动物优势种的生态位[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 446-452.]
- [10] Engle V D, Summers J K. Latitudinal gradients in benthic community composition in Western Atlantic estuaries[J]. Journal of Biogeography, 1999, 26(5): 1007-1023.
- [11] Peng S Y. Characteristics of macrobenthic community structure in the Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013. [彭松耀. 黄东海大型底栖动物群落结构特征[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013.]
- [12] Qin H L, Shui B N, Hu C Y, et al. Study on the community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zone along Yanpu Bay[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2015, 34(6): 514-519. [覃胡林, 水柏年, 胡成业, 等. 沿浦湾潮间带大型底栖动物群落结构及多样性研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2015, 34(6): 514-519.]
- [13] Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. The specification for marine part: Ecological survey offshore pollution and biological monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家海洋局第三海洋研究所. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [14] Vaillant L. Nouvelles etude sur les zone littorales[J]. Annales des Sciences Naturelles-Zoologie et Biologie Animale, 1891, 120: 39-50.
- [15] Stephenson T A, Stephenson A. The universal features of zonation between tide-marks on rocky coasts[J]. Journal of Ecology, 1949, 37(2): 289-305.
- [16] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Chicago: University of Illinois Press, 1963.
- [17] Pianka E R. The structure of lizard communities[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 53-74.
- [18] Wathne J A, Haug T, Lydersen C. Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. groenlandica* in the Barents Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 194: 233-239.
- [19] Hu Z Y, Li H H, Bao Y X, et al. Biodiversity comparison of macrobenthic communities at tidal flat of Lingkun Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1498-1507. [胡知渊, 李欢欢, 鲍毅新, 等. 灵昆岛围垦区内外滩涂大型底栖动物生物多样性[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1498-1507.]
- [20] Xin J H. Functional groups of macrozoobenthos in the intertidal flat of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [辛俊宏. 胶州湾潮滩湿地大型底栖动物功能群研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [21] Zhu X J, Lu J J. Functional groups of zoobenthos in the intertidal zone of Jiuduansha, the Yangtze River estuary[J]. Zoological Research, 2003, 24(5): 355-361. [朱晓君, 陆健健. 长江口九段沙潮间带底栖动物的功能群[J]. 动物学研究, 2003, 24(5): 355-361.]
- [22] Yang Y. Reclamation effects on macrobenthos in Dongtan Wetland of Nanhui District in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017. [杨洋. 围垦对南汇东滩湿地大型底栖动物影响的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.]
- [23] ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [24] ter Braak C J F, Prentice I C. A theory of gradient analysis[J]. Advances in Ecological Research, 1988, 18: 271-317.
- [25] Zhao X S, Cui B S, Sun T, et al. The relationship between the spatial distribution of vegetation and soil environmental factors in the tidal creek areas of the Yellow River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1855-1861. [赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 等. 黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1855-1861.]
- [26] Hu Z Y, Bao Y X, Ge B M, et al. Macrobenthic community and niche analysis of creeks during autumn in diked tidal flat[J]. Acta Zoologica Sinica, 2006, 52(4): 800-809. [胡知渊, 鲍毅新, 葛宝明, 等. 围垦滩涂潮沟秋季大型底栖动物群落和生态位分析[J]. 动物学报, 2006, 52(4): 800-809.]
- [27] Chen Z Y. Ecological impacts of the introduced *Spartina alterniflora* invasions in the coastal ecosystems of Chongming Dongtan, the Yangtze River Estuary[D]. Shanghai: Fudan University, 2004. [陈中义. 互花米草入侵国际重要湿地崇明东滩的生态后果[D]. 上海: 复旦大学, 2004.]
- [28] Lu Z Q, Zheng W J, Ma L. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons in sea water by Estuarine mangrove leaf litter[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2008, 47(4): 607-610. [陆志强, 郑文教, 马丽. 两种红树植物落叶碎屑对海水中多环芳烃的吸附作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 607-610.]
- [29] Zhao B B. The research on diesel oil removal by *Kandelia candel* and *Aegiceras corniculatum*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [赵北北. 秋茄(*Kandelia candel*)和桐花(*Aegiceras corniculatum*)对柴油污染修复的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [30] Zheng W J, Zheng F Z, Lian Y W, et al. Accumulation and

dynamics of Cu, Pb, Zn and Mn elements in *Kandelia candel* (L.) druce mangrove community of Jiulong river estuary of Fujian[J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(3): 227-233. [郑文教, 郑逢中, 连玉武, 等. 福建九龙江口秋茄红树林铜铅锌锰元素的累积及动态[J]. 植物学报, 1996, 38(3): 227-233.]

[31] Wang P, Zhao Z Z, Ma R L, et al. Bioaccumulation characteristics of heavy metal in intertidal zone sediments from northern Hainan Island[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(5): 842-846. [王鹏, 赵志忠, 马荣林, 等. 海南岛北部潮间带红树林对重金属的累积特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 842-846.]

Changes in the ecological niche and functional groups of macrozoobenthos before and after the planting of *Kandelia candel* in Yanpu Bay, Zhejiang

ZHANG Miaomiao¹, WANG Yongxue², TIAN Kuo¹, TIAN Jiaqi¹, SUN Peng¹, SHUI Bonian¹

1. College of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;

2. Taizhou Marine Environment Monitoring Center, Taizhou 318000, China

Abstract: Based on data from the macrozoobenthos resource survey along Yanpu Bay in October 2014 (autumn) and October 2016 (autumn), variation in the ecological niche and functional groups following planting of *Kandelia candel* were studied via niche breadth, niche overlap, functional group classification, and redundancy analysis (RDA). The results showed that the proportions of the wild niche and middle niche species increased after planting whereas that of the narrow niche species decreased. The species pair comprising *Scartelaos gigas* and *Cambarellus shufeldtii* (0.94) presented the highest niche overlap before planting, whereas those of *Pyrhila pisum* and *Lunaticus gilva* (0.99), and *Assimineia violacea* and *Potamocorbula laevis* (0.99) were highest after planting. Compared with the diversity index of the functional groups before planting, the diversity index of the functional groups in high and middle tidal zones was increased whereas that in low tidal zones was reduced after planting. Densities of the planktophagous group (Pl), phytophagous group (Ph), and omnivorous group (Om) increased whereas that of the carnivorous group (Ca) decreased slightly compared with the year before planting. There were significant differences ($P < 0.05$) between the high and low tide zones, as well as the middle and low tide zones after planting; however, the relationships between each pair of intertidal zones were not significantly different ($P > 0.05$) before planting. The RDA concluded that the factors with greater effects in macrozoobenthos communities changed from lead, cadmium, and petroleum before planting to zinc, cadmium, and arsenic after planting. In summary, planting *Kandelia candel* along Yanpu Bay had a positive effect on the overall improvement of the ecological niche and functional groups of macrozoobenthos.

Key words: *Kandelia candel*; macrozoobenthos; ecological niche; functional groups; RDA; mangrove

Corresponding author: SHUI Bonian. E-mail: shuibonian@163.com