

DOI: 10.5846/stxb202103060610

陈国贵, 王文卿, 谷宣, 洪伟, 林宇枫, 王瑁. 漳江口红树植物群落周转对大型底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4310-4317.

Chen G G, Wang W Q, Gu X, Hong W, Lin Y F, Wang M. Effects of mangrove community turnover on different macrobenthic assemblages in Zhangjiang Estuary, Fujian. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4310-4317.

漳江口红树植物群落周转对大型底栖动物群落结构的影响

陈国贵^{1,2}, 王文卿^{1,2}, 谷宣^{1,2}, 洪伟^{1,2}, 林宇枫^{1,2}, 王瑁^{1,2,*}

1 厦门大学环境与生态学院 厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门 361102

2 台湾海峡海洋生态系统国家野外观测研究站, 厦门 361102

摘要: 在城市化的背景下, 探明不同大型底栖动物群落对植物群落变化的响应, 对红树林生态系统的健康评价和退化生态系统的修复具有重要意义。以福建漳江口红树林国家级自然保护区为研究对象, 揭示红树植物群落周转对不同大型底栖动物群落结构(蟹类和软体动物)的影响, 并分析其与环境参数的关联性。结果表明: 在 1.6 km 的地理尺度上, 漳江口红树林湿地的环境变化较大, 表现出 7.19 个环境梯度。在此地理尺度的环境梯度上, 红树植物群落由 5 种红树植物组成, 其平均周转率为 76%; 软体动物群落由 12 种软体动物以模块化和非随机的方式聚集, 其平均周转率为 83%, 并随红树植物群落周转出现显著非线性增加, 盐度和老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*) 周转是其主要影响因素; 蟹类群落则由 20 种蟹类以更高的模块化和非随机的方式分散, 平均周转率为 89%, 并随红树植物群落周转而呈线性增加, 主要受 pH 和白骨壤(*Avicennia marina*) 周转的影响。研究揭示了大型底栖动物与植物群落和环境之间的关系, 为城市化背景下红树林生态系统的保护和恢复提供基础资料。

关键词: 群落构建; 大型底栖动物群落; 植物群落; 红树林; 漳江口

Effects of mangrove community turnover on different macrobenthic assemblages in Zhangjiang Estuary, Fujian

CHEN Guogui^{1,2}, WANG Wenqing^{1,2}, GU Xuan^{1,2}, HONG Wei^{1,2}, LIN Yufeng^{1,2}, WANG Mao^{1,2,*}

1 Key Laboratory of the Coastal and Wetland Ecosystems (Xiamen University) Ministry of Education, College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

2 National Field Observation and Research Station of Marine Ecosystem in the Taiwan Strait, China, Xiamen 361102, China

Abstract: Under the urbanization, exploring the responses of different macrobenthic communities to mangrove community changes is of great significance for assessment of mangrove ecosystems health and restoration of degraded ecosystems. This study was performed in the Fujian Zhangjiang National Mangrove Nature Reserve to uncover the effects of mangrove community turnover on different macrobenthic communities (crabs and mollusks) and detect its correlation with environmental factors. The results showed that the environment of the Zhangjiang Estuary mangrove wetland had a great change, showing 7.19 environmental gradients on the 1.6 km geographic scale. On the environmental gradient of this geographic scale, the mangrove community was composed of 5 mangrove species, with an average turnover rate of 76%; The mollusk community consisted of 12 species of mollusks, gathering in a modular and non-random, with an average turnover rate of 83%, and had a significant nonlinear increase with the mangrove turnover, mainly affected by salinity and turnover of *Acanthus ilicifolius*; The crab community consisted of 20 species of crabs segregated in a more modular and non-random manner, with an average turnover rate of 89%, and linearly increased with the turnover of the mangrove plant community, mainly affected by pH value of sediments and turnover of *Avicennia marina*. This study investigated the relationship between

基金项目: 科技基础资源调查专项(2017FY100701); 厦门大学研究生田野调查基金(2020FG022); 国家重点研发计划(2016YFC0502904)

收稿日期: 2021-03-06; 修订日期: 2021-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangmao@xmu.edu.cn

macrozoobenthic communities and vegetation and their habitat conditions, which provided basic data for the conservation and restoration of mangroves in the context of urbanization.

Key Words: community assembly; macrobenthic community; plant community; mangroves; the Zhangjiang Estuary

目前,地上与地下的关系已经成为生态学领域的研究热点^[1]。底栖动物是湿地生态系统中重要的消费者和分解者,对生态系统物质循环和能量流动的维持及湿地生态系统结构和功能的稳定都具有重要作用^[2-4]。底栖动物群落受到植物群落组成和沉积物理化性质的影响^[3,5-6],同时底栖动物群落也通过反馈作用影响植物群落^[7-8]。因此,底栖动物是湿地生态系统物质循环和能量流动的中心环节,也是湿地生态系统演化的重要驱动因子。

红树林湿地素有“地球之肾”的美称^[9],并以高生产力、高归还率和高生物多样性著称^[9],是存储“蓝碳”的宝库^[10]。红树林植被通常会促进潮间带生境的异质性进而影响林下底栖动物的分布和生存^[5-6]。不同红树林植被类型和林型对大型底栖动物群落密度、生物量以及功能多样性具有显著影响^[5-6]。另外,由于红树林植被变化引起的生境变化也将导致大型底栖群落的变化^[3,6]。受城市化和人类活动的影响,红树林湿地严重退化,表现为湿地面积严重萎缩、植物群落退化、功能明显变化^[9,11-12],但是目前对红树林湿地生态系统的地下结构和功能变化趋势并不清楚。因此,对红树林湿地生态系统变化过程中不同大型底栖动物群落的研究具有重要的生态学意义。

本研究以福建漳江口国家级红树林自然保护区中主要的红树林大型底栖动物群落为研究对象,旨在探究红树林湿地生态系统中植物群落周转(即,物种替换和丰度变化)对大型底栖动物群落周转的影响。研究结果不仅能够提供红树林湿地底栖动物群落特征的基础资料,还能揭示城市化背景下红树林湿地生态系统地下过程的变化趋势,为红树林生态系统健康评价和退化红树林湿地的生态修复提供科学依据。

1 研究区域概况

福建漳江口国家级红树林自然保护区位于福建省南部的云霄县境内,地处东经 117°24′—117°30′,北纬 23°53′—23°56′,总面积 2360 hm²,是国家级红树林湿地保护区的自然地理分布北界。保护区属亚热带海洋季风气候,年均气温 21.3 °C,年均降雨量 1714.5 mm,年均蒸散发量 1718.4 mm。红树植物的优势种有秋茄(*Kandelia obovata*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)和老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)等。近几十年来,在城市化和人类活动等因素的影响下,漳江口红树林湿地不断退化,如水质恶化、生境破碎化、植物群落结构变化等问题层出不穷。

2 研究方法

2.1 样地设置

2017年12月—2018年1月及2018年6月—10月,本研究在福建漳江口国家级红树林自然保护区设置了6条断面(图1)。每条断面设置高潮带、低潮带和中潮带3个采样点,每个采样点设置3个10 m×10 m的植物样方进行植物群落调查,记录树种和植株数等指标。每个植物样方设置三个重复,并对沉积物水质的理化参数进行原位测定,包括盐度、pH、溶解氧、氧化还原电位、电导率和温度。每个植物样方采集3—4个底泥样品进行大型底栖动物调查,样方规格为25 cm×25 cm,深度为30 cm。泥样用0.5 mm筛网淘洗,挑选出软体动物和蟹类样本固定在5%福尔马林溶液中,带回实验室分类鉴定。所收集软体动物样品的处理按照《海洋调查规范第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)进行。

2.2 数据分析

用基于蒙特卡洛的零模型模拟分别分析软体动物和蟹类的共存格局(非随机/随机)^[13-14]。采用R软件v4.0.2版本“EcoSimR”包随机模拟运行50000次,计算群落的C-score指标^[14]。采用置换检验判断观测值和模拟

值之间的显著差异 ($P < 0.05$)。如果 C -score 的观测值比模拟值大,说明群落为非随机分散结构;如果 C -score 的观测值比模拟值小,说明群落为非随机聚集结构;如果 C -score 的观测值等于模拟值,说明群落为随机结构^[13-14]。另外,基于 Spearman 相关性,使用“igraph”包对软体动物共存网络结构进行模块化分析^[15]。模块化程度越高,表示群落结构越复杂,抵抗干扰的能力越强。

采用 R 软件 v4.0.2 版本“Biodiversity”和“geosphere”包分别计算软体动物、蟹类和红树植物群落的 Bray-Curtis 不相似性,环境的欧式距离 (Euclidean distance) 以及采样点的地理距离^[16],以探测群落周转、环境变化程度和地理尺度。群落的不相似性越高表示群落周转程度越高。欧式距离越大表示环境异质性和变化程度越大。采用广义加性模型 (Generalized additive models, GAM) 分析底栖动物群落与植物群落、环境距离和地理距离的关系,以探究植物群落周转、环境过程和空间过程对底栖动物群落周转的影响。用 Spearman 相关系数进行 Mantel 检验进一步量化各个因子 (环境、植被和空间) 对底栖动物群落周转的影响。

3 结果与分析

3.1 蟹类、软体动物、植物群落的周转和环境变化程度

本研究采样点间的最小地理距离为 8.5 m,最大距离为 1628 m,平均地理距离为 669.3 m (图 2)。漳江口

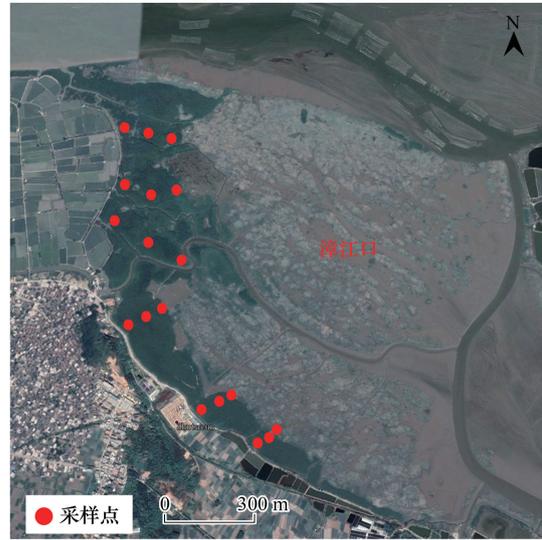


图 1 福建漳江口红树林采样点分布图

Fig.1 Sampling sites in Zhangjiang estuary, Fujian province

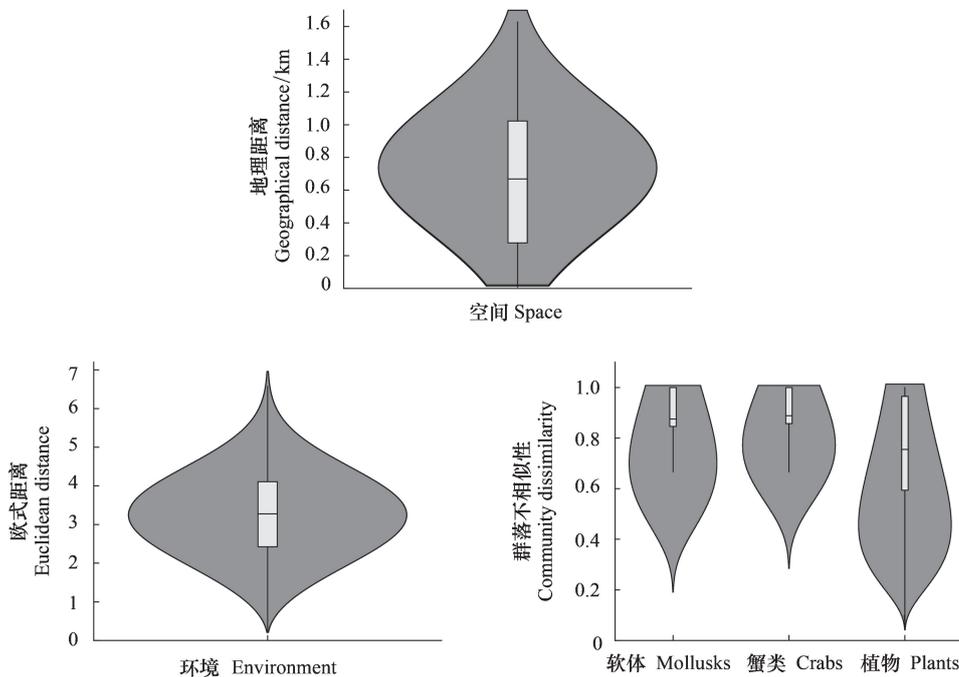


图 2 漳江口采样地理距离、环境距离和生物群落不相似性

Fig.2 Geographical distance of sampling, environmental distance and dissimilarity of biological community in Zhangjiang Estuary

红树林湿地的环境距离最小值为 0.24,最大值为 7.19,平均值为 3.28(图 2)。表明,在 1.6 km 的地理尺度上,漳江口红树林湿地的环境变化较大,出现 7.19 个环境梯度。本研究共采集 20 种蟹类、12 种软体动物并记录了 5 种红树植物。其中,蟹类群落的平均不相似性为 0.89,软体动物群落的不相似性为 0.83,植物群落的不相似性为 0.76(图 2)。说明漳江口蟹类、软体动物和红树植物群落的周转率较高。漳江口红树林湿地是研究群落随环境梯度变化的理想生态系统。

3.2 蟹类、软体动物的共存格局

漳江口软体动物群落的实测 *C*-score 值小于零模型的模拟值(置换检验 $P=0.043$),表现为非随机聚集群落格局。蟹类群落的实测 *C*-score 值大于零模型的模拟值(置换检验 $P=0.038$),表现为非随机分散群落格局。软体动物和蟹类的共存网络都很复杂,但蟹类的网络模块化程度比软体群落高(5:3;图 3)。说明软体动物群落和蟹类群落可能受到不同生态过程地驱动。

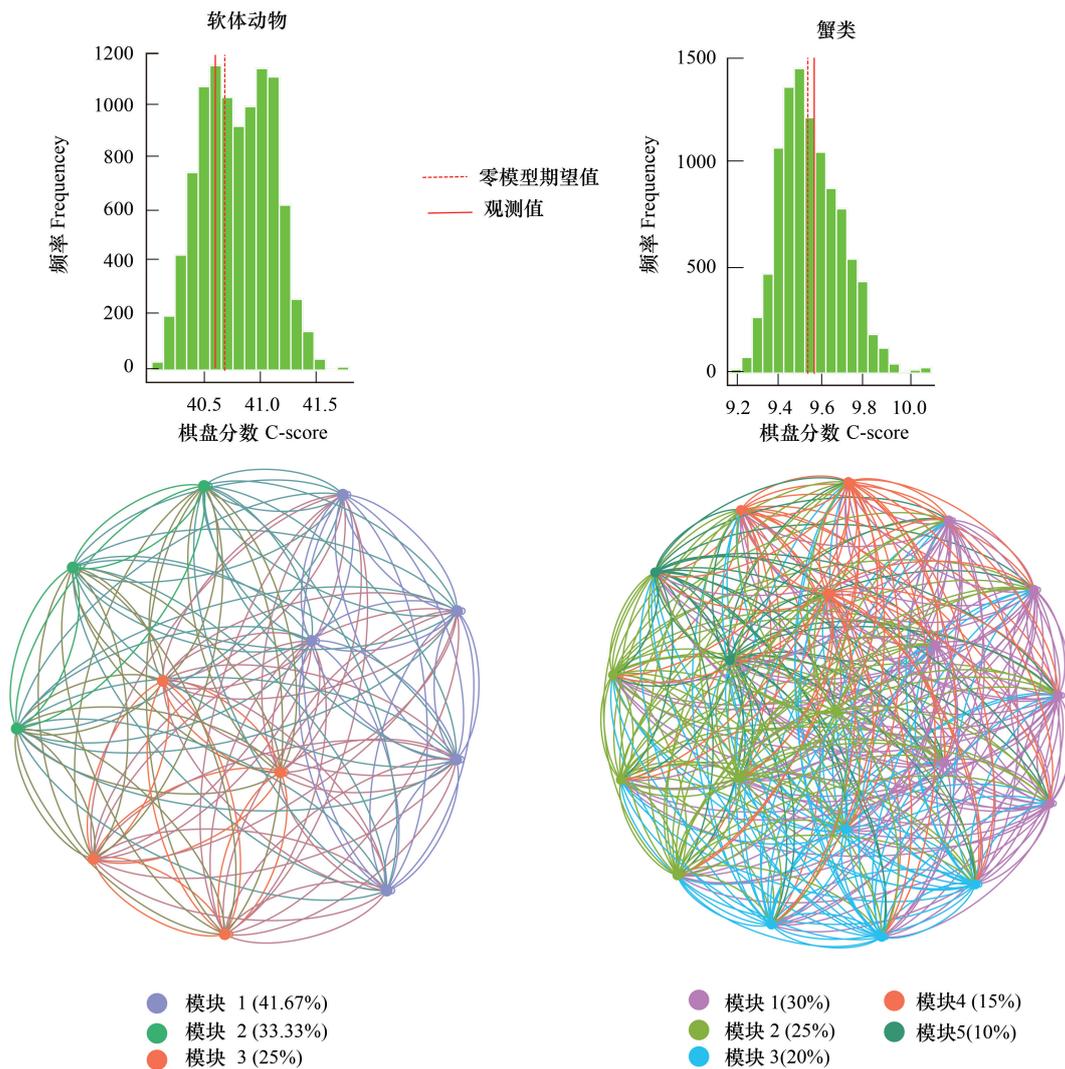


图 3 蟹类和软体动物群落的物种共存格局

Fig.3 Co-occurrence pattern of crabs and mollusks

3.3 蟹类和软体动物群落与植被、环境和空间因子的关系

广义加性模型结果显示,环境距离、地理距离和植物群落不相似性及其两两交互作用均与蟹类和软体动物群落不相似性存在显著的正相关关系($P<0.05$;图 4)。单因素效应分析显示,环境距离对软体动物群落的影响效应为线性效应(自由度等于 1;图 4)。地理距离和植物群落不相似性对软体动物群落的影响则呈非线性

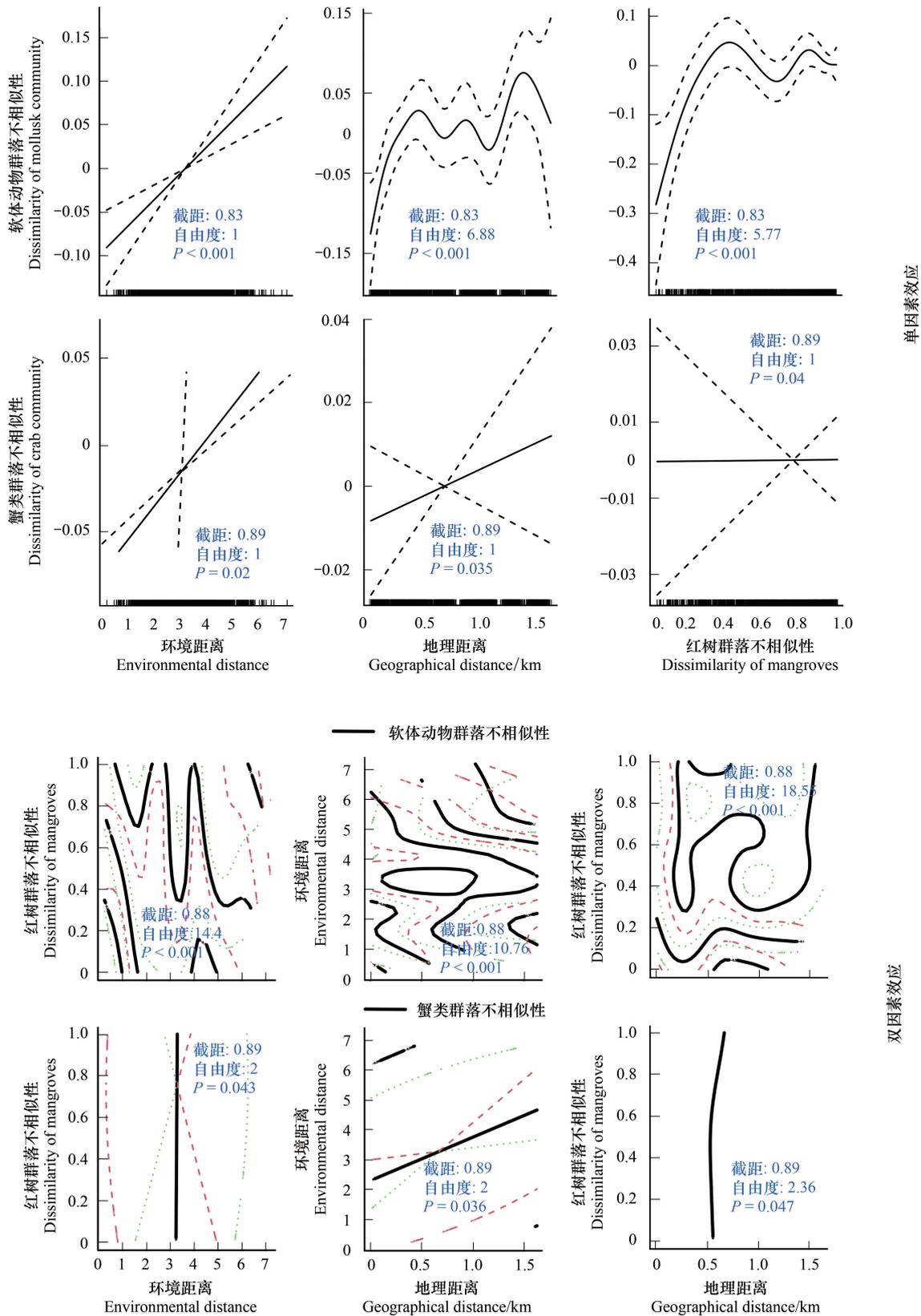


Fig.4 Based on Generalized additive models, the correlations between the dissimilarity of macrobenthic communities and environmental distance/geographical distance/dissimilarity of mangrove community/their interactions

变化($P < 0.05$; 图 4)。其中,秋茄、白骨壤和老鼠簕种群周转是红树林大型底栖动物群落的驱动因子($P < 0.05$; 图 5)。这些结果表明红树植物群落周转促进底栖软体动物和蟹类群落的周转。有研究表明,底栖动物种类分布与红树植物种类关系密切^[3],例如在泰国红树林中,拟沼螺种群密度与红树植物群落密度呈显著正相关,相手蟹的分布与红树植物群落类型关系明显^[21];在广东湛江红树林不同的植物群落(白骨壤+桐花树群落、桐花树群落和木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)+桐花树群落)中,大型底栖动物群落的物种数、种群密度、丰富度指数和多样性指数均存在显著差异^[7];在福建九龙江口,秋茄和桐花树恢复推动了大型底栖动物群落发育和演替^[22-23];红树林植被恢复初期改变底栖滨螺科动物群落结构^[24]。因此,植物群落是影响底栖动物群落结构的重要因素^[6-7,25]。植物群落为底栖动物提供充足的食物来源,满足其生长发育需求,还能为底栖动物提供安全、适宜的栖息生境,由此形成对底栖动物自下而上的调控机制^[6,26]。有研究发现,高植被密度导致低地下动物群落多样性,而中等和低植被密度促进林下动物多样性^[27]。在漳江口红树林中,桐花树、秋茄、白骨壤和老鼠簕为优势树种。桐花树的种群密度非常高(618 株/100 m²),不利于大型底栖动物活动;而种群密度相对较低的秋茄(36 株/100 m²)、白骨壤(54 株/100 m²)和老鼠簕(74 株/100 m²)生境则吸引更多大型底栖动物定殖。因此,超高密度的红树林并不利于维持底栖动物群落多样性。种群密度较低的秋茄、白骨壤和老鼠簕不仅可以为底栖动物提供充足的生存空间,还可以为底栖动物提供多种微生境以维持底栖动物多样性。例如,秋茄的板状根是蟹类栖息的场所,白骨壤的密集呼吸根可以营造丰富的微生境以吸引底栖动物栖息和觅食。本研究强调红树植物群落变化显著影响底栖软体动物和蟹类群落结构。

环境过滤是影响红树林底栖生物群落的重要生态过程^[13,20]。底栖蟹类和软体动物群落的不相似性均与环境距离呈显著正相关非线性关系(图 4),其中,温度、盐度、pH、氧化还原电位等影响显著($P < 0.05$; 图 5),表明漳江口红树林大型底栖群落受环境过滤的影响显著^[13,20]。在全球变化的背景下,环境压力是红树林湿地退化的主要问题之一^[11]。例如,养殖污水和生活污水任意排放等。有研究表明,红树林大型底栖动物群落受环境的影响较大,主要包括温度、海水盐度、pH、潮汐的影响^[3]。在东寨港和浙江西门岛红树林中,大型底栖动物分布与温度明显相关^[28]。在河口尺度上,温度对底栖群落的影响主要表现在季节差异上。温度对漳江口红树林大型底栖动物的影响跟本研究进行夏季(湿季)和冬季(旱季)的采样调查有关^[29]。在漳江口红树林湿地,pH 和盐度与底栖动物群落呈高度相关(图 5)。但是,植物群落变化也会通过改变环境因素而间接影响底栖动物的生态过程^[6,20,30]。红树植物群落结构退化已然成为一个全球性的问题^[11-12]。红树植物群落在变化过程中,会产生诸如水文条件变化等环境因素的改变,影响着与之伴生的海洋生物^[5]。一方面,红树林通常导致生境沉积物酸化和盐渍化,植物群落变化往往改变沉积物酸化和盐渍化^[5]。另一方面,漳江口红树林湿地的上游有大量的养殖塘和云霄县居住区,养殖废水和生活污水的排放会降低水体盐度和酸度。另外,最近的研究表明红树林大型底栖动物群落结构受扩散限制等随机过程的影响^[30]。在漳江口红树林湿地,底栖蟹类和软体动物均与地理距离呈显著正相关关系(图 4),且与空间因子关系显著(图 5),表明漳江口红树林大型底栖动物群落也显著受到扩散限制的影响。一方面,红树植物群落结构变化导致水文过程改变,进而影响大型底栖动物的扩散^[30]。另一方面,水文条件的变化(如,酸化、盐渍化或富营养化)不仅影响底栖动物的扩散过程而且还影响底栖动物扩散后的定殖^[30]。因此,红树植物群落变化同样影响底栖群落的扩散限制等随机生态过程。本研究强调红树植物群落变化对底栖群落生态过程的影响。

因此,红树植物群落变化(即物种更替和植株数量增减),导致理化环境因子和大型底栖动物的内禀特征变化,进而影响环境过滤和扩散限制等生态过程,使大型底栖动物群落结构发生变化。红树植物群落结构变化会驱动地下底栖生物群落的结构,进而改变底栖群落功能,最终影响整个红树林生态系统功能。

参考文献 (References):

- [1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, Van Der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [2] Lee S Y. Mangrove macrobenthos; assemblages, services, and linkages. *Journal of Sea Research*, 2008, 59(1/2): 16-29.

- [3] 吴瑞. 红树林区大型底栖动物研究进展. 热带农业科学, 2016, 36(10): 109-113.
- [4] 蔡立哲. 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, 2006, 45(S2): 83-89.
- [5] 肖泓, 尹焘石, 张敏, 陈桂珠, 彭逸生. 广东电白人工红树林大型底栖动物群落的功能特征及其影响因子. 生态学杂志, 2020, 39(6): 1813-1822.
- [6] 陈光程, 余丹, 叶勇, 陈彬. 红树林植被对大型底栖动物群落的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 327-336.
- [7] Tang Y J, Yu S X, Wu Y Y. A comparison of macrofauna communities in different mangrove assemblages. Zoological Research, 2007, 28(3): 255-264.
- [8] 何斌源, 范航清, 王瑁, 赖廷和, 王文卿. 中国红树林湿地物种多样性及其形成. 生态学报, 2007, 27(11): 4859-4870.
- [9] 王文卿, 王瑁. 中国红树林. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] Macreadie P I, Anton A, Raven J A, Beaumont N, Connolly R M, Friess D A, Kelleway J J, Kennedy H, Kuwae T, Lavery P S, Lovelock C E, Smale D A, Apostolaki E T, Atwood T B, Baldock J, Bianchi T S, Chmura G L, Eyre B D, Fourqurean J W, Hall-Spencer J M, Huxham M, Hendriks I E, Krause-Jensen D, Laffoley D, Luisetti T, Marbà N, Masque P, McGlathery K J, Megonigal J P, Murdiyarto D, Russell B D, Santos R, Serrano O, Silliman B R, Watanabe K, Duarte C M. Author correction: the future of Blue Carbon science. Nature Communications, 2019, 10(1): 5145.
- [11] Wang W Q, Fu H F, Lee S Y, Fan H Q, Wang M. Can strict protection stop the decline of mangrove ecosystems in China? From rapid destruction to rampant degradation. Forests, 2020, 11(1): 55-55.
- [12] Duke N C, Meynecke J O, Dittmann S, Ellison A M, Anger K, Berger U, Cannicci S, Diele K, Ewel K C, Field C D, Koedam N, Lee S Y, Marchand C, Nordhaus I, Dahdouh-Guebas F. A world without mangroves? Science, 2007, 317(5834): 41-42.
- [13] 高梅香, 何萍, 孙新, 张雪萍, 吴东辉. 环境筛选、扩散限制和生物间相互作用在温带落叶阔叶林土壤跳虫群落构建中的作用. 科学通报, 2014, 59(24): 2426-2438.
- [14] Gotelli N J, McCabe D J. Species co-occurrence: a meta-analysis of J. M. diamond's assembly rules model. Ecology: Ecological Society of America, 2002, 83(8): 2091-2096.
- [15] Guimerà R, Amaral L A N. Functional cartography of complex metabolic networks. Nature, 2005, 433(7028): 895-900.
- [16] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. 2013. <https://www.scienceopen.com/document?vid=b164ea90-95d2-43bf-9710-99753c479112>.
- [17] Carvalho J C, Cardoso P, Gomes P. Determining the relative roles of species replacement and species richness differences in generating beta-diversity patterns. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(7): 760-771.
- [18] 斯幸峰, 赵郁豪, 陈传武, 任鹏, 曾頔, 吴玲兵, 丁平. Beta 多样性分解: 方法、应用与展望. 生物多样性, 2017, 25(5): 464-480.
- [19] Pandit S N, Kolasa J, Cottenie K. Contrasts between habitat generalists and specialists: an empirical extension to the basic metacommunity framework. Ecology: Ecological Society of America, 2009, 90(8): 2253-2262.
- [20] Chen G G, Wang W Q, Zhang Y M, Liu Y, Gu X, Shi X F, Wang M. Abundant and rare species may invoke different assembly processes in response to climate extremes: Implications for biodiversity conservation. Ecological Indicators, 2020, 117: 106716.
- [21] Suzuki T, Nishihira M, Paphavasin N. Size structure and distribution of *Ovassiminea brevicula* (Gastropoda) in a Thai mangrove swamp. Wetlands Ecology and Management, 2002, 10(3): 265-271.
- [22] 陈光程, 叶勇, 卢昌义. 九龙江口秋茄红树林恢复对大型底栖动物群落的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, 47(2): 260-264.
- [23] 李蓉, 叶勇, 陈光程, 翁劲. 九龙江口桐花树红树林恢复对大型底栖动物的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, 2007, 46(1): 109-114.
- [24] 陈顺洋, 陈彬, 廖建基, 陈甘霖, 黄艳, 陈光程. 恢复初期红树林树栖滨螺科动物的组成与分布. 生态学杂志, 2017, 36(2): 460-467.
- [25] Peng Y S, Zhang M, Lee S Y. Food availability and predation risk drive the distributional patterns of two pulmonate gastropods in a mangrove-saltmarsh transitional habitat. Marine Environmental Research, 2017, 130: 21-29.
- [26] 陈光程, 叶勇, 卢昌义, 李蓉, 翁劲, 徐玉裕. 人工红树林中黑口滨螺和黑线蜒螺分布的差异性. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1721-1725.
- [27] Zhang Z B, Pech R, Davis S, Shi D Z, Wan X R, Zhong W Q. Extrinsic and intrinsic factors determine the eruptive dynamics of Brandt's voles *Microtus brandti* in Inner Mongolia, China. Oikos, 2003, 100(2): 299-310.
- [28] 黄丽, 陈少波, 仇建标, 丁文勇, 郑春芳, 伍锦姑, 周志明, 王宁. 西门岛人工秋茄林恢复对大型底栖生物的影响. 生态学报, 2013, 33(10): 3138-3147.
- [29] 吴辰, 蔡立哲, 陈昕韡, 郭涛, 卓异, 傅素晶, 彭欣, 曹婧. 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. 厦门大学学报: 自然科学版, 2013, 52(2): 259-266.
- [30] Chen G G, Wang W Q, Liu Y, Zhang Y M, Ma W, Xin K, Wang M. Uncovering the relative influences of space and environment in shaping the biogeographic patterns of mangrove mollusk diversity. ICES Journal of Marine Science, 2020, 77(1): 30-39.