

◆综述类◆

红树林湿地主要大型底栖动物的生态功能及多样性保护需求*

张林, 王瑁, 王文卿**

(厦门大学环境与生态学院, 福建厦门 361102)

摘要:大型底栖动物是红树林湿地中的消费者,也是重要的次级生产力和经济类群,更是红树林湿地生态系统物质循环和能量流动的关键环节。红树林湿地环境的复杂性和大型底栖动物分类学数据的缺失使得目前对红树林湿地大型底栖动物的生态功能和多样性维持机制认识不足,进一步导致现有红树林湿地生态系统的保护与修复工作极难且极少关注大型底栖动物多样性的保护需求。红树林湿地大型底栖动物目前面临着多种胁迫,主要包括生境丧失与转化、外来物种入侵、污染、过度捕捞等问题。本文总结了红树林湿地主要大型底栖动物类群的生态功能,阐述了红树林湿地的生境异质性对于维持大型底栖动物多样性的重要性,强调了红树林湿地作为“林-滩-沟”景观复合体对生物多样性维持的关键作用。未来的研究需要加强对红树林湿地大型底栖动物的群落特征、生物多样性等基础数据库的建设,厘清大型底栖动物群落的空间变异规律;对已受到严重捕捞活动干扰的区域和生物类群,建议逐步推进“封滩轮育”以促进多样性的恢复,从而实现大型底栖动物生物资源的可持续利用。未来红树林湿地的保护和修复规划要考虑各类群大型底栖动物的生境需求,通过红树植物物种的搭配营造不同的林下生境,在进行红树林植被恢复的同时为大型底栖动物留出额外的非植被生境。

关键词:红树林;大型底栖动物;生物多样性;生态修复

中图分类号:Q958.8 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2024)03-0197-10

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20241108.014

红树林通常泛指生长在热带、亚热带的海岸潮间带的木本植物群落,红树植物与多种其他生物类群共同构成了红树林湿地中的生物多样性,组成了一个位于海陆交错带的独特滨海湿地生态系统^[1,2]。红树林主要分布于南北纬30°之间的海岸地区,2020年全球红树林面积约为145 068 km²^[3]。潮间带的恶劣

环境导致红树植物的物种多样性极低,《2024年全球红树林状况评估报告》^[4]认为全球仅有82种真红树植物,极低的植物物种多样性是红树林区别于陆地森林的重要特征^[5,6]。但是生长在恶劣环境中的红树植物依然维持着高初级生产力,并通过产生大量的凋落物维持红树林湿地的碎屑食物链。红树植物的高

收稿日期:2024-07-31

修回日期:2024-10-22

*国家自然科学基金项目(42076161)资助。

【第一作者简介】

张林(1999-),男,在读博士研究生,主要从事红树林湿地生态学研究。

【**通信作者简介】

王文卿(1971-),男,教授,主要从事红树林湿地生态学研究,E-mail:mangroves@xmu.edu.cn。

【引用本文】

张林,王瑁,王文卿.红树林湿地主要大型底栖动物的生态功能及多样性保护需求[J].广西科学院学报,2024,40(3):197-206.

ZHANG L, WANG M, WANG W Q. Ecological Functions and Diversity Conservation Needs of Major Macrobenthos in Mangrove Wetlands [J].

Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(3): 197-206.

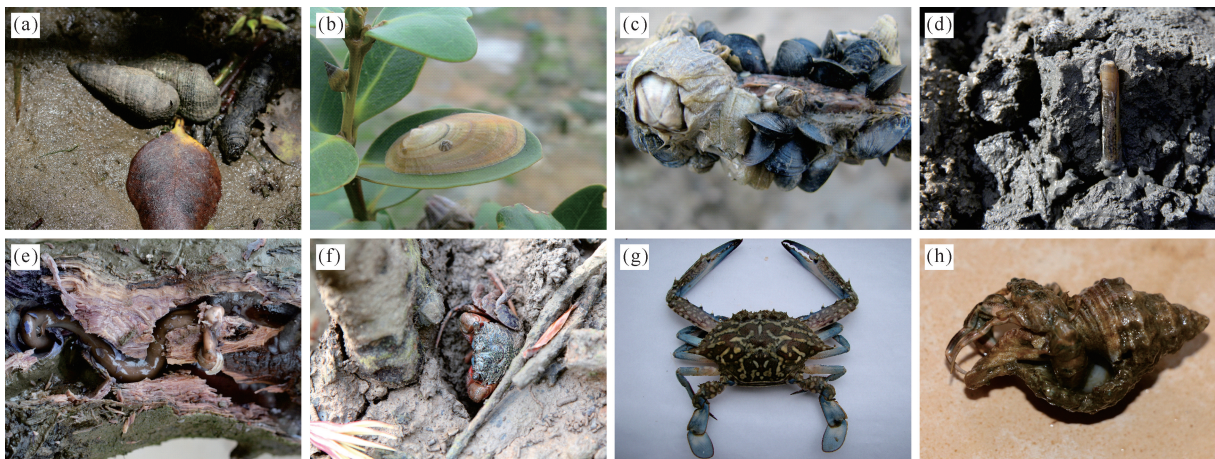
初级生产力与潮间带的生境异质性,以及与外界环境的高连通性(开放性)共同维持着红树林湿地动物类群的高多样性^[1,2],尤其是大型底栖动物。海洋底栖动物一般被定义为生活于海洋的沉积物底内、底表以及以水中其他物体为依托而栖息的动物生态类群^[7],其中大型底栖动物通常是指能够被孔径为 0.5 mm 网筛截留的底栖动物。大型底栖动物因肉眼可见且能够借助形态学信息进行物种鉴定而受到更多关注^[7,8]。大型底栖动物通常是碎屑食性动物,也是更高营养级捕食者的能量来源,其在红树林生态系统物质循环和能量流动过程中发挥关键作用^[1,9]。

早期研究人员通常以定性获取物种名录的形式,开展与红树林湿地大型底栖动物有关的研究^[10,11]。近年来的相关研究已经扩展到群落构建过程和生物多样性维持机制^[12],群落结构对极端天气事件的响应^[13],底栖动物参与的关键生态学过程等^[14,15]。在海平面上升和陆源压力共同作用造成的沿海挤压效应下,红树林湿地生态系统十分脆弱。由世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)主导的全球红树林生态系统状态最新评估结果显示,1/2 的全球红树林生态系统面临崩溃的风险,1/5 面临严重的崩溃风险^[16]。大量的红树林生态系统现状评估都注重于红树林植被覆盖的面积^[16-18],对红树林湿地中的大型底栖动物类群少有关注。Cannicci 等^[19]整合全球范围内 16 个红树林分布区底栖无脊椎动物的数据并分析,结果表明红树林中的无脊椎动物群落具有低功能冗余度和高功能脆

弱性的特点,这意味着在红树林生态系统的脆弱性评估中亟需考虑大型底栖动物类群的多样性。为了加深对红树林湿地大型底栖动物研究现状的认识,促进红树林湿地生物多样性保护,本文对近年来有关红树林湿地大型底栖动物的研究进展进行总结和论述,概述了红树林湿地大型底栖动物的多样性维持机制,总结了大型底栖动物在红树林湿地生态系统中发挥的主要功能,并对未来红树林湿地大型底栖动物多样性的保护和研究方向进行展望。

1 红树林湿地主要大型底栖动物类群及其生态功能

红树林湿地中的主要大型底栖动物类群有环节动物、软体动物、节肢动物和星虫动物等,也包括底栖的鱼类。其中最常见的是以腹足纲(Gastropoda)和双壳纲(Bivalvia)为代表的软体动物,以甲壳纲(Crustacea)为代表的节肢动物和以多毛纲(Polychaeta)为代表的环节动物,其绝大多数分布在地表和地表以下 30 cm 内^[8]。按照生活习性来划分,红树林湿地中的大型底栖动物主要有以下生活类型(图 1):匍匐生活型、固着生活型、附着生活型、底内生活型、凿穴生活型、穴居生活型、游泳生活型和寄居生活型^[1],多种生活型的大型底栖动物汇聚在一起,共同维持着红树林湿地生态系统的正常运转。后文将针对软体动物、甲壳动物、环节动物和星虫动物等红树林湿地主要大型底栖动物类群的生态功能、主要威胁和保护需求进行论述。



(a)Creeping type (*Terebralia sulcata*);(b)Fixed type (*Enigmonia aenigmatica*);(c)Attached type (*Xenosterobus atratus*);(d)Bottom dwelling type (*Solen strictus*);(e)Chiseling type (*Teredo manni*);(f)Cave dwelling type (*Parasesarma eumolpe*);(g)Swimming type (*Portunus pelagicus*);(h)Hermit type (a type of hermit crab).

图 1 红树林湿地中不同生活型的大型底栖动物

Fig. 1 Macrobenthos of different life forms in mangrove wetlands

1.1 软体动物

软体动物是无脊椎动物中软体动物门(Mollusca)动物的统称,这类动物因身体柔软而得名^[20]。软体动物是红树林湿地大型底栖动物群落中最常见的类群,无论是在物种丰富度、栖息密度还是生物量方面均居首位。红树林湿地中常见的软体动物主要包含腹足纲和双壳纲。红树林湿地中的腹足纲动物有多种多样的生活方式,其中一些滩栖螺科(Batillariidae)的常见物种主要营匍匐生活,主要刮食基质表面的颗粒状有机物或者藻类,是重要的食碎屑者。个别的腹足纲动物如海蜗牛(*Janthina janthina*)营游泳生活,而蛇螺科(Vermetidae)的覆瓦小蛇螺(*Serpulorbis imbricata*)则附着于石头或其他坚硬固体表面生活^[21,22]。软体动物通过摄食和排泄活动与环境互动,在红树林湿地生态系统的结构与功能维护中扮演着关键角色。此外,软体动物还是区域内水鸟的主要食物来源之一。作为种类最丰富且数量众多的大型底栖动物类群,软体动物的多样性及其种群变动直接关联到红树林湿地生态系统的整体结构和功能。由于对环境的微小变化极为敏感,软体动物成为监测红树林湿地健康状况、退化程度及生态修复效果的重要生物指标。如刘毅等^[11]对中国红树林区的耳螺科(Ellobiidae)物种的系统性研究表明,耳螺科物种通常分布在红树林的中、高潮带区域,对陆源的污染物和海堤建设十分敏感,是红树林健康状况的重要指示种。营底内栖息的软体动物在沉积物中的上下打洞活动会改变沉积动力学关键参数(如底床侵蚀临界剪切应力),可能进一步对潮间带浅水环境地貌演化产生重要影响^[23]。

1.2 甲壳动物

红树林湿地中的甲壳动物主要为游泳生活型的虾类和穴居生活型的蟹类。蟹类与红树林湿地的物质循环和能量流动联系紧密,是红树林湿地生态系统的重要组成部分,是生态系统中的杂食性消费者。Sharifian等^[24]通过分析大量海洋数据库数据,筛选出8262条与蟹类有关的分布记录,其中481种蟹类在红树林区存在分布。陈国贵^[25]最近的研究表明,在中国红树林区出现的蟹类有249种,其中方蟹科(Grapsidae)和沙蟹科(Ocypodinae)共占59%(147种)。红树植物群落错综复杂结构提供的异质化生境对蟹类多样性和分布有重要影响,而蟹类反过来对红树林生态系统功能的发挥起着多种重要作用。红树林蟹类通过生物扰动和参与食物网两种途径发挥生

态功能。蟹类的掘穴活动会促进沉积物土壤的气体交换,加速有机物的矿化与分解,最终促进红树植物对矿质元素的吸收和利用^[14]。蟹类对红树植物幼苗或繁殖体的选择性啃食和取食可以缓解红树植物间的竞争压力,进而影响红树植物的群落组成和结构^[25,26]。另外,红树林中的蟹类作为消费者,对红树林中的能量流动至关重要。红树林中最常见的沙蟹科蟹类通过生物扰动可以改变沉积物的化学性质和微生物群落组成,促进甲烷的释放^[27],并且增强了沉积物中氧气的渗透和硫的氧化,从而驱动了铁-磷酸盐-硫化物耦合循环^[28],如相手蟹属(*Parasesarma*)的摄食过程会促进养分的转移率和表层沉积物的初级生产力^[29]。蟹类在红树林湿地中扮演的多种角色对于红树林生态系统的健康至关重要,是红树林中当之无愧的“生态系统工程师”。

1.3 环节动物

环节动物是海洋底栖生物群落的重要类群之一,被广泛用于海洋生物监测,在生境质量和生态修复成效评估中起着重要的作用^[30,31]。红树林湿地大型底栖动物中的环节动物主要是多毛类,其在红树林中主要为底内生活型。多毛类环节动物在沉积物中移动,起到了与陆地生态系统中蚯蚓类似的“生态系统工程师”作用。多毛类环节动物的形态分类学研究进展十分缓慢,在部分科和属水平的分类学地位仍然有待厘定,同时我国还有大量新种未被世界海洋物种目录(World Register of Marine Species, WORMS)收录,这限制了分类学数据库构建的一致性^[31]。环节动物中还包含大量的小型底栖动物,小型底栖动物是指能够通过0.5 mm孔径筛网但是能被0.042 mm孔径筛网所截留的底栖动物^[32]。相较于大型底栖动物,小型底栖动物需要借助体视显微镜才能进行物种的形态学鉴定,分类难度巨大,导致目前我国红树林和泥滩中的小型底栖动物本底资料仍较匮乏^[33]。分类学数据缺失导致大多数研究人员难以在底栖动物的研究中纳入环节动物的多样性研究,使得目前环节动物群落生态学相关的研究极少。

1.4 星虫动物

星虫动物在我国沿海地区广泛分布,但是星虫动物的物种数较少。《中国生物物种名录2024版》中收录的星虫动物门物种仅有43种,其中革囊星虫属(*Phascolosoma*)和方格星虫属(*Sipunculus*)在红树林中最为常见^[34]。作为红树林湿地的重要经济物种之一,星虫动物在红树林湿地中通常是高密度分布。

如裸体方格星虫(*Sipunculus nudus*) 在红树林边缘滩涂区域分布尤为密集,其密度可达 300 个/平方米^[34]。挖掘星虫动物已成为沿海居民参与赶海活动的主要内容之一。星虫动物是典型的底内穴居类群,在红树林湿地生态系统中扮演着关键的分解者与次级生产者角色。星虫动物以吻部过滤水体中有机碎屑,后将粪便排泄在洞穴中,实现了沉积物从表层向底层的搬运过程。星虫动物在沉积物内扰动时将富含氧气的海水带入底层,显著改变了沉积物的氧化还原状态,促进了沉积物中有机质的分解与矿化过程,进而对微生物群落的构成产生影响。

2 红树林湿地大型底栖动物面临的主要威胁

全球范围内的红树林生态系统都面临着巨大的威胁,在多重因素的共同影响下红树林面积快速下降,造成了适合红树林湿地大型底栖动物生存生长的生境快速丧失。除此之外,大规模的红树林造林、外来物种入侵、过度捕捞和环境污染共同威胁着红树林湿地大型底栖动物的多样性。21 世纪以来,全球红树林的快速退化得到了广泛重视,大量的生态修复工作正在减缓红树林面积下降的速率,部分国家和地区红树林面积出现了净增长。在有效保护和恢复红树林植被覆盖的同时,维持红树林湿地大型底栖动物生物多样性应该成为未来红树林生态系统保护与修复的重要目标。

2.1 生境丧失与转化

红树林生长的海岸带地区是全球人口密集分布的区域,全球约有 40% 的人口分布在距离海岸线 100 km 的范围内^[35,36]。海堤建设对于保护沿海居民的生命财产安全至关重要,但同时也切断了海平面上升背景下红树林的退路^[37,38],而且部分海堤建设会直接影响陆地一侧红树林湿地的动植物多样性^[37]。过去几十年,中国沿海地区经历了大规模的土地围垦,截至 2014 年,中国约 65% 的海岸线受到农田、盐田、水产养殖池、道路和建筑物扩张的影响^[39]。另外,红树林还受到来自海洋一侧的海平面上升、极端风暴潮等胁迫,其中海平面上升被认为是导致全球红树林生态系统极度脆弱的主要因素^[5,16,40]。来自陆地和海洋的双重压力对红树林等滨海湿地造成了沿海挤压效应^[41,42]。周期性的潮水淹没是滨海湿地的主要环境特征,促使红树林中动植物的分布与地貌产生直接或间接关联,在潮间带尺度上通常表现出明显的动植物成带现象^[43,44]。成带物种的分布格局在沿海挤压

效应的作用下格外脆弱,高、低潮带的特有物种同时受到胁迫。同时,沿海挤压效应缩小了红树林的面积,降低了红树林湿地整体的景观异质性,而景观异质性是红树林湿地大型底栖动物多样性维持的重要机制。以增加红树林植被覆盖为目标的大规模造林项目给红树林湿地生态系统带来了重大的改变。我国早期的大规模造林通常在林外的滩涂区域种植速生的外来物种无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)和拉关木(*Laguncularia racemosa*),造林项目的实施虽然增加了改造地植被面积但是改变了其原始生境,从而干扰了红树林湿地大型底栖动物群落。

2.2 外来物种入侵

生物入侵是全球范围内生物多样性面临的重要威胁之一,红树林湿地生态系统也面临着严重的外来物种入侵。Biswas 等^[45]的研究表明全球红树林中至少已经出现了 57 种入侵植物,这些入侵植物通常具有较强的耐盐和耐水淹能力。中国红树林的外来植物主要包括无瓣海桑、拉关木和盐沼植物互花米草(*Spartina alterniflora*)。关于上述植物是否会对红树林植被区造成外来物种入侵还存在部分争论,如无瓣海桑和互花米草通常自然定植在无植被的光滩区域,在中国东南沿海广泛分布的互花米草约有 93% 的面积由光滩转化而来^[46];通过光合作用和对沉积物的促淤功能,入侵植被增强了光滩的蓝碳功能^[47]。但是,入侵生物会对大型底栖动物群落造成影响^[48,49],如江旷等^[50]的研究表明互花米草区域的底栖动物密度比光滩区低了大约 80%。大量光滩到植被区的转化,在影响大型底栖动物多样性的同时,也会进一步影响高营养级鸟类的生物多样性^[51]。除入侵植被带来的景观和生境的转化外,红树林中也存在入侵的底栖动物占据本地物种生态位的情况,如外来物种沙筛贝(*Mytilopsis salleri*)生长迅速,具有较强的适应能力,会对本地的大型底栖动物群落多样性造成影响^[52]。红树林湿地中的大型底栖动物同时面临着入侵植被带来的生境转化和入侵底栖动物带来的生境竞争威胁。

2.3 过度捕捞

红树林周边 10 km 范围内约有 2.1 亿人居住,红树林给沿海居民提供了重要的生活资料^[53,54]。在一些欠发达地区,红树林植物依然作为建筑材料和木炭原料被砍伐,小规模木材采伐被认为是最广泛的红树林资源直接利用形式之一^[55]。由于过度开发利用,全球约 26% 的红树林正在严重退化^[56]。如

Kihia^[57]在肯尼亚开展的研究表明,人类对红树林资源的过度开发利用已经破坏了当地红树林生态系统的物种组成和复杂性,使红树林的生态系统服务能力变得不可持续。在严格的保护下,我国沿海居民通常不直接砍伐利用红树林木材,昔日电、炸、毒等方式的捕鱼活动已不复存在,主要的利用方式是捕获部分经济型底栖动物。以星虫为例,渔民通常采取挖掘的形式,挖掘深度可达30—50 cm,反复地挖掘会破坏红树植物的根系,进一步造成红树植物死亡,破坏大型底栖动物的生境。另一种极具破坏性的星虫捕捞方式是利用高压水枪冲刷滩涂,这在捕获星虫的同时会带走大量的表层沉积物和其他非捕获目标生物。

2.4 环境污染

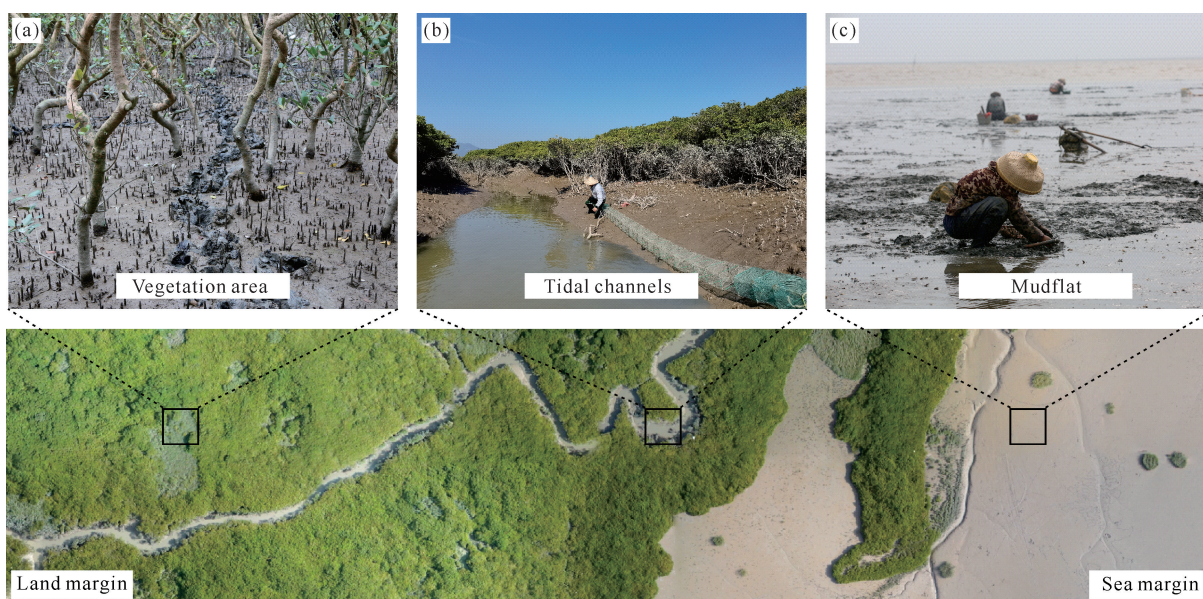
海岸地区频繁的人类活动,如城市发展、海堤建设、农业开垦、木材生产和水产养殖侵占等,是来自陆源的主要胁迫因素^[5,38,40]。例如,在沿海水产养殖污染和大量海鸭过度放养的共同影响下,广西和海南在2010年都出现了蛀木生物有孔团水虱(*Sphaeroma terebrans*)和光背团水虱(*S. retrolaeva*)的大量暴发,造成了红树林规模性死亡和底栖环境的快速退化^[58]。养殖清塘排放的高浓度污水会直接影响邻近红树林,虽然红树林具有一定程度的净化能力,但是沿海快速扩张的养殖业所带来的大量污染物输入,远远超过了红树林湿地的环境容纳量。另外,红树林复杂的根系系统会滞留大量的塑料污染物,影响植物的生长和底栖动物的生存^[59]。红树林也是多种污染物

的“汇”,污染物会进入红树林的食物链并在生物体内富集^[60,61],但是污染物在底栖动物群落水平的生态学效应仍然亟待评估。

3 多样性维持机制与保护需求

3.1 生境异质性维持大型底栖动物多样性

海岸地貌和周期性水淹给红树林湿地带来高度的生境异质性,完整的红树林湿地景观通常包括植被区、潮沟、滩涂区和浅水水域(图2)。异质性的景观给多样的大型底栖动物提供了可利用的生境,是红树林湿地大型底栖动物多样性维持的重要因素。红树林湿地植被区、林缘、滩涂的大型底栖动物在密度、生物量和物种组成上都存在明显差异^[63,64]。在潮间带尺度上对群落结构的分析表明,物种周转主导了潮间带尺度上的群落变化,表明大型底栖动物在潮间带尺度上存在现实生态位的偏好性^[65,66],红树林植被区的生境异质性起到了生物多样性维持的作用。潮间带尺度上的差异不仅体现在大型底栖动物物种分布上,而且也体现在食物来源上,最近一项研究表明不同潮位间的相手蟹的稳定同位素生态位存在差异^[67]。同时,植被区也给树栖软体动物提供了重要的栖息地,如滨螺属(*Littoraria*)物种主要分布在红树植物树干和叶片表面^[68,69]。红树林的林外光滩对生物多样性也有十分重要意义,如大量滩栖螺科的物种基本不进入红树林的林区,招潮蟹属(*Uca*)物种也偏爱无植被的滩涂区域^[22,26],潮沟区和退潮时的



The orthophoto at the bottom sourced from the publicly available dataset [62].

图2 红树林湿地的主要景观要素

Fig. 2 Major landscape elements of mangrove wetlands

浅水水域是游泳生活型蟹类和虾类生物的主要栖息地。总的来说,对于红树林植被区而言,不同高程的植被区林下给不同生境偏好的大型底栖动物提供了栖息地;从景观尺度而言,植被区和非植被区都对红树林湿地大型底栖动物多样性的维持起重要作用。

3.2 生态修复中的多样性保护

恢复植被覆盖是大量生态恢复项目的主要目标,红树林生态恢复项目也不例外。全球范围内广泛开展的以造林为主的红树林生态修复项目正在降低全球红树林面积的下降速率^[18,70],我国的红树林面积在严格的保护和大量造林修复工作的加持下从21世纪初开始就出现了上升的趋势^[6,71,72]。但是以滩涂造林为主的红树林重建侵占了原本依赖滩涂生存的大型底栖动物的栖息地,进一步影响高营养级鸟类的多样性,因此在红树林生态修复中仅考虑植被覆盖可能会对当地的生物多样性造成负面影响^[5,51]。未来的红树林生态修复需要改变目标,我国2020年印发的《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》明确指出红树林的保护和修复需要“扩大红树林面积,提高生物多样性”。这意味着未来红树林生态修复工作将不只是“以林为纲”,还需进入到一个强调多样性、整体性保护和修复的时代。《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》还强调了“退塘还林”是全国红树林修复计划中的重要任务,目前部分研究已经对退塘还林区域的底栖动物生物多样性效益进行了评估^[73,74],但是如何在退塘还林中获得最大化的多样性收益依然亟待探索,应在规划阶段充分考虑生物多样性的需求,避免重走滩涂造林的老路。另外,退塘还林区域通常位于中高潮间带区域,这意味着退塘还林新营造的红树林有助于海平面上升背景下的红树林湿地生物多样性的稳定和提高。

4 展望

红树林是一个特殊的生态系统,一直以来人们对红树植物的特殊性投入了大量的研究,但是对其生境下的大型底栖动物的研究依然十分不足。生物多样性的丧失是目前地球面临的重大生态环境问题之一,就红树林而言,目前不完善的研究基础阻碍了全球变化背景下红树林的功能性保护和生态修复,大量的生态修复项目没有充分考虑生物多样性的保护。在全球红树林面积下降得到遏制的今天,未来的红树林保护和生态修复需要考虑生物多样性的维持,进行多类群、多营养级的保护和修复。红树林生态修复“以林

为纲”的时代已成为过去时,未来的红树林保护和修复应充分考虑多类群生物的生境需求,虽然挑战巨大,但是现在的时机正合适。

4.1 加强红树林生物多样性维持机制研究

生物多样性的维持是生态学研究永恒的话题,生境异质性是红树林等滨海湿地生物多样性维持的重要机制。现有研究大多聚焦于阐述盐度和水淹梯度对红树林中物种分布的筛选作用^[62,64],但诸如斑块面积、植被覆盖度、温度等因子如何影响物种多样性还亟待研究。未来研究应该选择红树林中的关键类群,充分结合实验和野外观测数据以量化红树林中主要大型底栖动物类群的理论生态位和现实生态位。生境异质对大型底栖动物多样性的维持能力主要通过比较不同生境间的物种组成差异得出,但是关于红树林湿地中的植被区、滩涂、潮沟等的空间配置、面积比例与红树林湿地景观尺度的生物多样性之间的联系还不明确。未来研究可以借助景观生态学相关的方法和理论,深入研究不同的生境斑块对维持大型底栖动物生物多样性的重要性。另外,就红树林湿地大型底栖动物研究现状而言,目前缺乏一份完善的红树林湿地大型底栖动物名录,导致常常出现同物异名或同名异物的现象,降低了研究人员对大型底栖动物大尺度整合分析的准确性,因此应加强分类学的基础研究,建立完善的分类学数据库。在完善大型底栖动物分类学多样性研究的同时,还应扩展对大型底栖动物群落功能多样性的相关研究,更深入地解释红树林湿地大型底栖动物所发挥的生态功能。

4.2 将大型底栖动物的生境需求纳入生态修复规划

过去以植被覆盖为目标的红树林修复项目已经取得成效,未来的红树林生态修复目标应该转向生物多样性和生态系统功能的恢复。大量正在开展的红树林生态修复项目给包括大型底栖动物在内的红树林生物多样性维持机制研究带来了机遇,未来研究需针对这些修复项目建立完善的、长期的生物多样性监测体系。另外,红树林的生态修复通常从无植被区开始,如退塘还林,这给外来物种的入侵也带来了机会,因此在修复区对外来入侵物种开展长期监测也至关重要。在监测生物多样性的同时,应充分借助现有观测手段获取匹配的环境特征和生态系统功能数据。对现有的生态修复项目开展生物多样性效益的评估对于未来红树林的修复策略也具有指导性意义,因此未来的研究需要对过去生态修复的生物多样性效应进行系统性评估。

4.3 促进大型底栖动物资源的可持续利用

不超过红树林生态系统自持能力的经济利用活动应该得到提倡,以充分发挥红树林生态系统的服务价值。红树林湿地大型底栖动物是当地居民重要的经济来源,林区的人为捕捞已对大型底栖动物资源造成了巨大的影响。但是考虑到沿海居民的生活需求,完全的禁止捕捞是不妥当的,因此如何对红树林生物资源进行可持续的利用是未来研究的关键问题之一。结合目前在草原中“划区轮牧”的经验,“封滩轮育”可能是对红树林湿地大型底栖动物资源进行可持续利用的一种手段。早在1996年范航清等^[75]就提出了“封滩轮育”的建议,但是目前仍未见相关的理论研究和案例报导。除此之外,养殖业的发展也可以减少沿海居民直接从红树林中获取底栖动物,如曾经主要依赖在红树林中采捕的星虫,目前已经有大量的规模化养殖。如何在利用红树林资源开展养殖业的同时减少对红树林的破坏也是未来需要重点探索的方向,Fan等^[76]提出的“地理管道红树林原位养殖系统”已经实现了多种大型底栖动物的养殖。在红树林区进行养殖和捕捞是对生物资源的主要利用形式,可持续利用的实现关键在于厘清利用强度的阈值,单位面积红树林可承载的养殖和捕捞活动的强度需要得到进一步的量化。

参考文献

- [1] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] 何斌源, 范航清, 王瑁, 等. 中国红树林湿地物种多样性及其形成[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4859-4870.
- [3] JIA M, WANG Z, MAO D, et al. Mapping global distribution of mangrove forests at 10-m resolution [J]. Science Bulletin, 2023, 68(12): 1306-1316.
- [4] LEAL M, SPALDING M D. The state of the world's mangroves 2024 [R]. [S. l.]: Global Mangrove Alliance, 2024.
- [5] 范航清, 王文卿. 中国红树林保育的若干重要问题[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(3): 323-330.
- [6] WANG W Q, FU H F, LEE S Y, et al. Can strict protection stop the decline of mangrove ecosystems in China? From rapid destruction to rampant degradation [J]. Forests, 2020, 11(1): 55-70.
- [7] 蔡立哲. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(S2): 83-89.
- [8] 解成杰, 谢焱, 宁中华, 等. 近20年黄河三角洲潮滩湿地大型底栖动物群落特征变化[J]. 环境工程, 2024, 42(9): 42-50.
- [9] ALONGI D M. The energetics of mangrove forests [M]. Dordrecht: Springer, 2009.
- [10] 邹发生, 宋晓军, 陈伟, 等. 海南东寨港红树林滩涂大型底栖动物多样性的初步研究[J]. 生物多样性, 1999, 7(3): 175-180.
- [11] 刘毅, 王瑁, 王文卿, 等. 中国红树林区的耳螺[J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 723-728.
- [12] CHEN G, WANG W, LIU Y, et al. Uncovering the relative influences of space and environment in shaping the biogeographic patterns of mangrove mollusk diversity [J]. ICES Journal of Marine Science, 2020, 77(1): 30-39.
- [13] CHEN G, GU X, LIU Y, et al. Extreme cold events reduce the stability of mangrove soil mollusc community biomass in the context of climate impact [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(9): 094050.
- [14] CHEN X, WIESMEIER M, SARDANS J, et al. Effects of crabs on greenhouse gas emissions, soil nutrients, and stoichiometry in a subtropical estuarine wetland [J]. Biology and Fertility of Soils, 2020, 57(1): 131-144.
- [15] AN Z, GAO D, CHEN F, et al. Crab bioturbation alters nitrogen cycling and promotes nitrous oxide emission in intertidal wetlands: influence and microbial mechanism [J]. Science of the Total Environment, 2021, 797: 149176.
- [16] IUCN-CEM 2022. The IUCN red list of ecosystems [EB/OL]. [2024-06-14]. <https://iucnrle.org>.
- [17] ADAME M F, CONNOLLY R M, TURSCHWELL M P, et al. Future carbon emissions from global mangrove forest loss [J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2856-2866.
- [18] SPALDING M D, LEAL M. The state of the worlds mangroves 2021 [R]. [S. l.]: Global Mangrove Alliance, 2021.
- [19] CANNICCI S, LEE S Y, BRAVO H, et al. A functional analysis reveals extremely low redundancy in global mangrove invertebrate fauna [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(32): e2016913118.
- [20] 王瑁, 刘毅, 丁弈朋, 等. 海南东寨港红树林软体动物[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2013.
- [21] 祝阁. 海南东寨港红树林软体动物生态研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [22] 章慧. 海南东寨港红树林生境异质性的对软体动物多样性的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2016.
- [23] SHI B, PRATOLONGO P D, DU Y, et al. Influence of

- macrobenthos (*Meretrix meretrix* Linnaeus) on erosion-accretion processes in intertidal flats: a case study from a cultivation zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(1): e2019JG005345.
- [24] SHARIFIAN S, KAMRANI E, SAEEDI H. Global biodiversity and biogeography of mangrove crabs: temperature, the key driver of latitudinal gradients of species richness [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2020, 92: 102692.
- [25] 陈国贵. 中国红树林蟹类多样性、群落构建及对造林的响应[D]. 厦门: 厦门大学, 2022.
- [26] 张尽函. 红树林生境异质性对蟹的种类、生物量及食物来源的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [27] QIN G, LU Z, GAN S, et al. Fiddler crab bioturbation stimulates methane emissions in mangroves: insights into microbial mechanisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 194: 109445
- [28] XIAO K, PAN F, SANTOS I R, et al. Crab bioturbation drives coupled iron-phosphate-sulfide cycling in mangrove and salt marsh soils [J]. *Geoderma*, 2022, 424: 115990.
- [29] SUDHARAKA A, RUPASINGHE A, THILAKARATHNE D, et al. Sesamid crabs as key contributors to the soil organic carbon sedimentation in tropical mangroves [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2023, 31(6): 757-773.
- [30] 蔡立哲. 大型底栖动物污染指数(MPI)[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 625-629.
- [31] 蔡立哲, 王智, 杨德援, 等. 中国海域多毛类环节动物物种多样性研究进展[J]. *生物多样性*, 2023, 31(10): 164-176.
- [32] 蔡立哲. 深圳湾底栖动物生态学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2015.
- [33] 傅素晶. 中国东南沿海潮间带小型底栖动物群落生态研究和线虫新种新记录种记述[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [34] 陈细香, 林秀雁, 卢昌义, 等. 方格星虫属动物的研究进展[J]. *海洋科学*, 2008, 32(6): 66-70.
- [35] NEUMANN B, VAFEIDIS A T, ZIMMERMANN J, et al. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding: a global assessment [J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0118571.
- [36] MERKENS J-L, REIMANN L, HINKEL J, et al. Gridded population projections for the coastal zone under the shared socioeconomic pathways [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 145: 57-66.
- [37] 范航清, 黎广钊. 海堤对广西沿海红树林的数量、群落特征和恢复的影响[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(3): 240-244.
- [38] MA Z, MELVILLE D S, LIU J, et al. Rethinking China's new great wall [J]. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [39] HOU X, WU T, HOU W, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1791-1802.
- [40] KIRWAN M L, MEGONIGAL J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise [J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 53-60.
- [41] PONTEE N. Defining coastal squeeze: a discussion [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 84: 204-207.
- [42] PHAN L K, VAN THIEL DE VRIES J S M, STIVE M J F. Coastal mangrove squeeze in the Mekong Delta [J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 300(2): 233-243.
- [43] ALONGI D M. Intertidal zonation and seasonality of meiobenthos in tropical mangrove estuaries [J]. *Marine Biology*, 1987, 95(3): 447-458.
- [44] MA W, WANG W, TANG C, et al. Zonation of mangrove flora and fauna in a subtropical estuarine wetland based on surface elevation [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(14): 7404-7418.
- [45] BISWAS S R, BISWAS P L, LIMON S H, et al. Plant invasion in mangrove forests worldwide [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 480-492.
- [46] MAO D, LIU M, WANG Z, et al. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: spatiotemporal patterns and human prevention [J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2308.
- [47] ZHANG J, MAO D, LIU J, et al. *Spartina alterniflora* invasion benefits blue carbon sequestration in China [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(12): 1991-2000.
- [48] ZHANG G, BAI J, TEBBE C C, et al. *Spartina alterniflora* invasions reduce soil fungal diversity and simplify co-occurrence networks in a salt marsh ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143667.
- [49] DAI Z, ZHANG N, WANG F, et al. Loss of microbial functional diversity following *Spartina alterniflora* invasion reduces the potential of carbon sequestration and nitrogen removal in mangrove sediments-from a gene perspective [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121569.
- [50] 江旷, 陈小南, 鲍毅新, 等. 互花米草入侵对大型底栖动

- 物群落垂直结构的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 535-544.
- [51] CHOI C Y, XIAO H, JIA M, et al. An emerging coastal wetland management dilemma between mangrove expansion and shorebird conservation [J]. Conservation Biology, 2022, 36(5): e13905.
- [52] 蔡立哲, 高阳, 刘炜明, 等. 外来物种沙筛贝对厦门马銮湾大型底栖动物的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2006, 28(5): 83-89.
- [53] PYSANCZYN J. Mangrove mania - the ecosystem that keeps on giving [EB/OL]. [2024-07-25]. <https://www.themarineries.com/tmd-blog/mangrove-mania-the-ecosystem-that-keeps-on-giving>.
- [54] 傅勤, 范航清. 亚太区红树林资源的民间传统利用[J]. 广西科学院学报, 1993, 9(2): 116-121.
- [55] SCALES I R, FRIESS D A. Patterns of mangrove forest disturbance and biomass removal due to small-scale harvesting in southwestern Madagascar [J]. Wetlands Ecology and Management, 2019, 27(5): 609-625.
- [56] VALIELA I, BOWEN J L, YORK J K. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments [J]. BioScience, 2001, 51(10): 807-815.
- [57] KIHIA C M. Impact of human physical disturbance on mangrove forest structure at the Gazi Bay, Kenya [J]. AquaDocs, 2014, 14: 31-47.
- [58] 范航清, 刘文爱, 钟才荣, 等. 中国红树林蛀木团水虱危害分析研究[J]. 广西科学, 2014, 21(2): 140-146, 152.
- [59] 何永姑. 微塑料对东寨港红树林自由生活线虫 *Viscosia heterolaima* 毒性的研究[D]. 海口: 海南大学, 2020.
- [60] HU C, MA Y, LIU Y, et al. Trophodynamics and potential health risk assessment of heavy metals in the mangrove food web in Yanpu Bay, China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 920: 171028.
- [61] XIE X, LU Y, LEI H, et al. Bioaccumulation and trophic transfer of per- and polyfluoroalkyl substances in a subtropical mangrove estuary food web [J]. Science of the Total Environment, 2024, 927: 172094.
- [62] 黄敏敏, 张宜辉, 周泽友, 等. 2013—2022年福建漳江口互花米草分布无人机遥感数据集[J]. 中国科学数据, 2023, 8(4): 145-154.
- [63] 林宇枫, 陈国贵, 谷宣, 等. 东寨港海湾尺度下红树林软体动物时空分布特征及驱动因子[J]. 广西科学院学报, 2021, 37(3): 204-214.
- [64] 赵小雨, 蔡立哲, 饶义勇, 等. 考洲洋人工种植红树林湿地大型底栖动物群落环境响应[J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5505-5516.
- [65] 陈国贵, 王文卿, 谷宣, 等. 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[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4310-4317.
- [66] 陈国贵, 王文卿, 谷宣, 等. 闽三角红树林底栖软体动物共存格局及机制[J]. 湿地科学与管理, 2021, 17(1): 9-13.
- [67] LU X, GU X, ZHANG L, et al. Tidal zone effects on the diet composition of leaf-eating crabs in natural mangrove communities: a stable isotope analysis [J]. Frontiers in Marine Science, 2024, 11: 1351183.
- [68] 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.
- [69] 唐朝艺. 红树林树栖软体动物垂直分布模式及其影响因素[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [70] FRIESS D A, YANDO E S, ABUCHAHLA G M O, et al. Mangroves give cause for conservation optimism, for now [J]. Current Biology, 2020, 30(4): R153-R154.
- [71] 贾明明, 王宗明, 毛德华, 等. 面向可持续发展目标的中国红树林近 50 年变化分析[J]. 科学通报, 2021, 66(30): 3886-3901.
- [72] LU C, LI L, WANG Z, et al. The national nature reserves in China: are they effective in conserving mangroves? [J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109265.
- [73] ZHANG Y, ZHANG L, KANG Y, et al. Biotic homogenization increases with human intervention: implications for mangrove wetland restoration [J]. Ecography, 2022, 2022(4): e05835.
- [74] 尹连政, 秦永强, 苏园园, 等. 退塘还林红树林大型底栖动物群落结构变化及影响因素[J/OL]. 热带生物学报: 1-15 [2024-07-20]. <https://doi.org/10.15886/j.cnki.rds wxb.20240009>.
- [75] 范航清, 何斌源, 韦受庆. 传统渔业活动对广西英罗港红树林区渔业资源的影响与管理对策[J]. 生物多样性, 1996, 4(3): 167-174.
- [76] FAN H Q, HE B Y, PERNETTA J C. Mangrove eco-farming in Guangxi Province China: an innovative approach to sustainable mangrove use [J]. Ocean & Coastal Management, 2013, 85: 201-208.

Ecological Functions and Diversity Conservation Needs of Major Macrobenthos in Mangrove Wetlands

ZHANG Lin, WANG Mao, WANG Wenqing^{* *}

(College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361102, China)

Abstract: Macrobenthos are consumers in mangrove wetlands, as well as important secondary productivity and economic groups, and are key links in the material cycle and energy flow in mangrove wetland ecosystems. The complexity of mangrove wetland environment and the lack of taxonomic data of macrobenthos lead to the lack of understanding of the ecological functions and diversity maintenance mechanisms of macrobenthos in mangrove wetlands, which further makes it extremely difficult and pays little attention to the diversity of macrobenthos in the protection and restoration of existing mangrove wetland ecosystems. Macrobenthos in mangrove wetlands are currently facing multiple stresses, including habitat loss and transformation, invasion of alien species, pollution and overfishing. The ecological functions of the major macrobenthos groups in mangrove wetlands are summarized in this article, the importance of habitat heterogeneity of mangrove wetland to maintain the diversity of macrobenthos is expounded, and the key role of the mangrove wetland as 'vegetation-mudflat-creek' landscape complexes in maintaining the biodiversity is emphasized. The future research needs to strengthen the construction of basic databases such as community characteristics and biodiversity of macrobenthos in mangrove wetlands, and clarify the spatial variation of macrobenthos communities. For the areas and biological groups that have been seriously disturbed by fishing activities, it is recommended to gradually promote the 'alternate mudflat closing for benthos recovery' to promote the restoration of diversity, so as to realize the sustainable utilization of biological resources of macrobenthos. In the future, the protection and restoration planning of mangrove wetlands should consider the habitat needs of various groups of macrobenthos, create different understory habitats through the matching of mangrove species, and leave extra non-vegetation habitats for macrobenthos while restoring mangrove vegetation.

Key words: mangroves; macrobenthos; biodiversity; ecological restoration

责任编辑:米慧芝,南旭



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>