



基于能量耗散视角的红树林海岸沉积地貌学

李 炎, 陈一宁

Sedimentary geomorphology of mangrove coasts in perspective of energy dissipation

LI Yan and CHEN Yining

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023091301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晚全新世淇澳岛红树林有孔虫记录与古环境意义

Late Holocene foraminiferal record from mangrove reserve, Qi' ao Island, Pearl River Estuary and its implications for paleoenvironment

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 74-86

潮滩环境沉积物吸附多环芳烃的粒径因素影响

Adsorption of PAHs by the sediments from the Yangcheng tidal flat: the influence of particle size

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 54-61

南黄海辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化再认识

Rethinking on shallow sedimentary sequence and its evolution of the Xiyang tidal channel in the Radial Sand Ridge Field, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 13-26

1955年以来辽东湾重金属沉积通量变化及其与人类活动的关系

Change in heavy metal depositional fluxes in the tidal flat of Liaodong Bay since 1955 and its relation to human activities

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 32-43

火山地貌例述

A summarization of volcanic geomorphologies

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 1-20

声学水面无人艇在浅水海底地貌调查中的应用

Application of acoustic unmanned surface vehicle to submarine geomorphology survey in shallow water

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 219-226



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李炎, 陈一宁. 基于能量耗散视角的红树林海岸沉积地貌学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 25-33.

LI Yan, CHEN Yining. Sedimentary geomorphology of mangrove coasts in perspective of energy dissipation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 25-33.

基于能量耗散视角的红树林海岸沉积地貌学

李炎^{1,2}, 陈一宁^{1,3}

1. 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 杭州 310012

2. 厦门大学东山太古海洋观测与实验站, 厦门 361005

3. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

摘要: 能量耗散是海岸带沉积地貌学的重要研究方向。地貌系统中的能量耗散往往存在极值, 但是关于地貌演化的能量耗散趋向是最大值还是最小值, 一直存在争议。本文试图从文献梳理入手, 回顾海岸带地貌过程中的能量耗散问题, 并用阻抗匹配概念来解释能量耗散的极值问题: 当地貌系统的机械储能效率最大而热力学耗散最小时, 表现为“共振阻抗匹配”, 反之则表现为“梯度阻抗匹配”。基于无量纲沉降速度 Ω 的海滩地貌分类体系, 正是表现从“共振阻抗匹配”到“梯度阻抗匹配”的典型谱系。在此基础上, 从能量耗散的视角, 对红树林生态系统的沉积地貌过程进行了文献综述, 总结了潮沟-潮滩-红树林界面上的阻抗匹配和能量耗散问题, 讨论了界面能量耗散行为如何通过水动力学和热力学过程反馈到红树林的生长过程, 指出了红树林生态系统中潮沟-潮滩三维地形结构的重要性, 并建议在红树林生态修复工程中应用这种结构来更好地维持系统的稳定性。

关键词: 能量耗散; 沉积地貌; 红树林; 潮沟; 潮滩

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023091301

Sedimentary geomorphology of mangrove coasts in perspective of energy dissipation

LI Yan^{1,2}, CHEN Yining^{1,3}

1. Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, MNR, Hangzhou, 310012, China

2. Dongshan Swire Marine Station, Xiamen University, Xiamen, 361005, China

3. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou, 310012, China

Abstract: Energy dissipation has been widely studied in coastal sedimentary geomorphology. It has been assumed that thresholds in energy dissipation may exist in geomorphological evolution; however, whether energy dissipation evolves towards a minimum, maximum, or both, aroused a big debate in a long history. We summarized the previous publications to revisit the energy dissipation problem in coastal geomorphology, and proposed a concept of ‘impedance matching’ to explain the problem regarding minimum and maximum values of energy dissipation. Once the geomorphological system showed a maximal mechanical energy storage but a minimal thermal energy dissipation, it could be a ‘resonance impedance matching’ system. Otherwise, it could be a ‘gradient impedance matching’ system. The Ω classification of beaches obtained by dimensionless settling velocity was a typical example for these two ‘impedance matching’ systems. Based on the new concept, we reviewed geomorphological studies on mangrove ecosystems, and revealed the ‘impedance matching’ and the energy dissipation across the interfaces of tidal creek–tidal flat–mangrove systems. In addition, we discussed how the energy dissipation could affect the growth of mangroves through hydrodynamics and thermal dynamics, and pointed out that the three-dimensional structure of tidal creek–tidal flat is very important to maintain the stability of mangrove ecosystems and therefore should be considered in the future mangrove restoration projects.

Key words: energy dissipation; sedimentary geomorphology; mangrove; tidal creek; tidal flat

能量耗散是沉积地貌学经久不衰的一个研究命题。流体或掺有固体的多相流体在一定边界条

件下运动时, 除满足质量(如水流连续方程和颗粒物连续方程), 以及能量(如伯努利方程)或动量(如

资助项目: 国家重点研发计划项目课题“滨海湿地固碳与生物多样性维持等协同提升技术研发”(2022YFC3105404); 浙江省自然科学基金重点项目“潮沟地貌对浙江人工红树林抗寒的影响”(LZ21D060001); 浙江省科技计划特殊支持项目(2022R52016)

作者简介: 李炎(1954—), 男, 教授, 研究方向为河口海岸学, E-mail: liyan@xmu.edu.cn

通讯作者: 陈一宁(1979—), 女, 研究员, 研究方向为滨海湿地生物地貌学, E-mail: yiningchen@sio.org.cn

收稿日期: 2023-09-13; 改回日期: 2023-11-21. 周立君编辑

运动方程)的守恒外,还需要额外增加限定条件,才能准确描述泥沙运动特征,这是一个世纪前就提出的第四个封闭方程难题。近半个世纪来,河流学的解决路线渐渐靠向不可逆过程的热力学理论和方法,试图利用能量耗散或熵产生的概念,把流体或多相流体系统的水流、泥沙运动和边界的变化及其他约束条件贯穿和联系起来进行统一研究,从而给出河流运动在空间和时间过程上的较完整的概貌^[1]。科罗拉多州立大学杨志达教授将最小能量耗散率假说视为河流泥沙动力学的第四个封闭方程,尝试替代经验性的河相关系,演绎河道演变规律^[2]。清华大学黄万里教授1981年在《清华大学学报》上发表了题为“连续介质动力学最大能量消散率定律”研究论文^[3],质疑了最小能量耗散率假说,提出最大耗散率假说存在的可能性,这两种极值的存在“或许由于数学法则中微分等于零作为必需条件同样适用于最大和最小两极,但不能作为足够的条件”。一时间内,到底是最小能耗还是最大能耗,抑或是兼而有之引起了当时学术界的广泛争论。2010年,黄才安^[4]回顾了这场几十年前的争论,提出:“能耗率极值原理可以叙述为:流体或掺有固体的多相流体,当处在一个独立系统内,在给定的初始和边界条件下流动时,任何时刻的某因变物理量总是这样的分布,使得系统整体的能量耗散率随时为一个极值。将这一原理在不同条件下,用数学形式表达出来,就构成了数学上的极值问题。能耗率极值原理有2种,一是以杨志达、张海燕为代表的最小能耗率原理;二是以黄万里为代表的最大能耗率原理”。这段评述已将内外营力共同作用于地表过程的复杂系统,以“系统整体的能量耗散率随时为一个极值”简洁描述概括了该系统存在的最小能耗率和最大能耗率两大类状态。这一能耗极值原理,可以应用到海岸带的地貌研究之中,并给出简洁的表达方式。本文聚焦于海岸带地貌过程中的能量耗散这一问题,通过回顾和梳理文献,阐明能量耗散的概念,以常见海岸带地貌类型为例解释了最小值原理和最大值原理,最后从能量耗散角度来总结红树林生物地貌动力学过程。

1 能量耗散概念

陆海界面系统的能流和物质流输入以及相应的地形和物质储库可以自动调整到相互适应的匹配状态^[5]。根据能量传输视角,简洁地沿用波动学中相当成熟的阻抗匹配概念^[6]:当海岸沉积地貌系

统处于阻抗匹配状态,海洋输入的水波(包括潮波和波浪)能量若在系统中完全耗散,未被反射回来,海岸沉积地貌系统则处于“系统整体的能量耗散率随时为一个极值”的稳态之中。当总能量 E 对时间 t 的二阶导数,即总能流的一阶导数等于0时,即:

$$\frac{d^2 E}{dt^2} = 0 \quad (1)$$

此时总能流随时为一个极值。总能流可以分解为势能存储率 E_s 、动能存储率 E_k ,以及通过热量转移的能量耗散率 E_d 等三项:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_s}{dt} + \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_d}{dt} \quad (2)$$

当输入水波能量与海岸沉积地貌系统的谐振单元相互作用,产生有限模态的基频或谐波共振,海岸与海洋的阻抗匹配,具备完美传输性能。此时,水波谐振单元大量吸收并存储了势能与动能,通过热量转移的能量耗散率则表现为极小值,该稳态简称为“共振阻抗匹配”。当输入水波能量与阻抗逐级变化的海岸沉积地貌系统相互作用,沿程逐渐耗散至尽,存储的势能与动能相对受限,通过热量转移的能量耗散率表现为极大值,该稳态简称为“梯度阻抗匹配”。以此视角,杨志达、张海燕为代表的最小能耗率原理,关注的是沉积地貌系统的共振阻抗匹配状态,强调了沙波、沙脊、心滩等周期性地貌组合对水波能量的存储与调控作用。黄万里为代表的最大能耗率原理,关注的是沉积地貌系统的梯度阻抗匹配状态,强调了沿程连续变化的水波能量耗散。

2 海滩系统的能量耗散

以波浪主导的海岸沉积地貌系统水波能量耗散图像为例,按照目前引用率最高的海滩沉积地貌系统分类方案,即Wright和Short于1984年提出的无量纲沉降速度 Ω 分类分案(图1, $\Omega = H_b / W_s T$,其中 H_b 是破波波高, W_s 是泥沙沉降速率, T 是波浪周期),下分反射型、耗散型两种端点类型,以及脊-槽或低潮阶地型、横向沙坝裂流型、韵律沙坝海滩型、沿岸沙坝-凹槽型等4种过渡类型^[7]。

除了明显海岸侵蚀而处于非稳态的反射型海滩以外,无论是耗散型海滩,还是过渡型海滩,海洋输入的波浪能量,均可被处于稳态的海岸沉积地貌系统所吸收。以图1所示的平直海滩为例,正向入射海滩的波浪,经海滩的透射、反射和吸收,构建具有一维特征的海滩系统稳态。而偏离海滩法线方

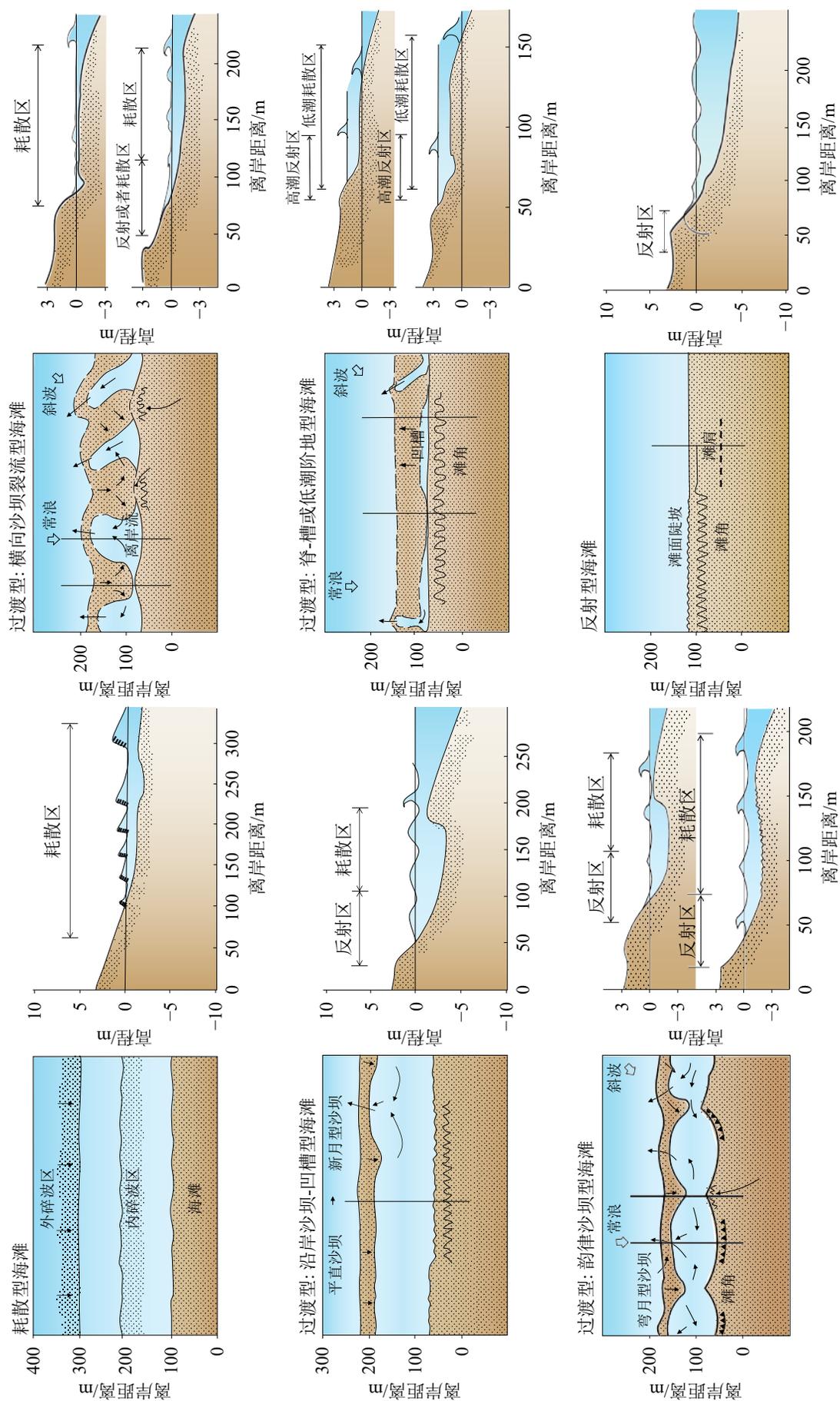


图 1 海滩 Ω 分类概念模式图
 Fig.1 The Ω classification and conceptual models for beaches

向的斜入射波浪,则经海滩的折射、透射、反射和吸收,汇聚到以低波速滩面为核心的水波波导上(比如濒岸分布的边缘波带,或顺着沿岸沙坝分布的破波带),调控入射水波能流,构建具有二维特征的海滩系统稳态。其中,坡面平缓的耗散型海滩则更多地表现出海岸与海洋的梯度阻抗匹配状态;而脊-槽型或低潮阶地型、横向沙坝裂流型、韵律沙坝型、沿岸沙坝凹槽型等4种周期性地貌占优的过渡类型,集中地表现出海岸与海洋的共振阻抗匹配状态。

无量纲沉降速度 Ω 相当于海滩沉积物活动量与粒度的对比。高 Ω 值的耗散型海滩可调动大活动量但粒度较细的沉积物,采用最简洁的斜坡地形实现梯度阻抗匹配,适应波能输入环境。低 Ω 值的反射型海滩沉积物有限,只能依赖运动门槛较高的海崖蚀余沉积物,运用大斜坡与粗粒度沉积物的结合,趋近梯度阻抗匹配,争取适应高波能输入环境。中等 Ω 值的过渡类型海滩调动中等程度的沉积物活动量与粒度,则需利用有限的活动性沉积物,建造诸如低潮阶地、横向沙坝裂流、韵律沙坝、沿岸沙坝凹槽等不同维度的周期性地貌组合,通过结构性升维以调控共振阻抗匹配状态,去适应不同配置的波能输入环境。由此可见,海滩系统的地貌动力学主控因素,是由活动量与粒度来量度的沉积物源条件。

3 河口湾系统的能量耗散

关于潮波能量耗散主导的河口湾沉积地貌系统分类方案一直是百家争鸣。按照1995年Gerardo M E Perrillo推荐的成因-地貌分类系统,原生型(陆地外营力和构造内营力为主)河口湾类型下分溺谷、峡湾、河流主控和构造主控等4个地貌类型,还再细分若干亚类;次生型(海洋外营力为主)河口湾下有海岸潟湖一个地貌类型,并根据沙坝的封闭状态(潟湖口门的特征)细分若干亚类(图2)^[8]。

达到均衡态的河口湾,无论是原生型河口湾,还是次生型河口湾,海洋输入的潮波能量,均可被稳态的河口湾沉积地貌系统所吸收。能流强劲的湾口,具有周期性沉积地貌特征的潮流脊槽系统,尽其所能调动来源有限的活动性沉积物,建造诸如潮流脊槽、分汊河道等不同维度的周期性地貌组合,通过结构性升维组织共振阻抗匹配状态,去适应不同配置的潮波能流环境。在能流逐渐转弱,而沉积物源相对富足的湾顶,借助浅滩坡面以及多级潮沟-潮滩系统,水波波速和缓过渡,能流逐级耗散,更多地表现出梯度阻抗匹配状态。次生型河口湾的沙坝潟湖海岸,既利用潮汐汊道涨潮落潮三角洲的潮流脊槽系统共振阻抗匹配贡献,也利用潟湖内多级潮沟-潮滩系统的梯度阻抗匹配贡献,组织对

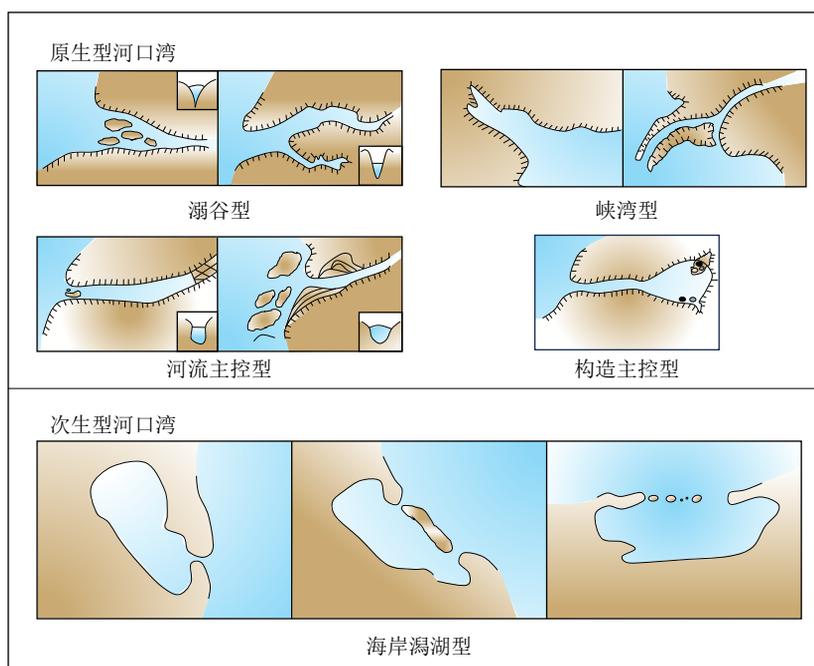


图2 河口湾成因-地貌分类概念模式图^[8]

Fig.2 The geomorphologic classification of estuaries^[8]

潮波能流的阻抗匹配状态, 而且还利用沙坝外侧耗散海滩的梯度阻抗匹配贡献, 或者是过渡型海滩的共振匹配贡献, 组织对波浪能流的阻抗匹配状态, 整体表现为一种可以灵活应对海岸沉积地貌系统的水波能量输入, 兼具复合型阻抗匹配能力的自适应沙坝-潟湖海岸滤波器。

4 红树林生态系统的潮沟-潮滩系统

红树林是指生长在热带、亚热带海岸潮间带, 以红树植物为主的常绿乔木、灌木组成的木本植物群落, 是海陆交错带上独特的生态系统, 也是全球生态系统碳汇的主要贡献者^[9-10]。多级潮沟-潮滩系统为特征的河口湾湾顶, 无论是原生型的还是次生型的, 均是红树林群落的最佳生境^[11]。相对富足的沉积物源, 和缓过渡的滩面水深, 逐渐减慢的水波波速, 调控出潮波能流逐级耗散的梯度阻抗匹配状态, 形成了具备高效耗散能量并捕获沉积物的生态系统^[12-13]。河口湾潮沟-潮滩系统与红树林群落存在着生物地貌学层次的有机联系。生物地貌学研究生物过程和地貌过程之间的双向交互作用, 涉及到大尺度(景观尺度)、中尺度(地貌尺度)和小尺度(生物尺度)的不同过程和机理的集合^[14]。从不同的空间尺度出发, 可能存在能量耗散概念模式下的河口湾潮沟-潮滩系统红树林地貌学过程(图 3)。

依照小尺度动力机制研究视角, 滩地水生植物力学结构与水体湍动力结构的相干性, 能够驱动输入水波能量与水生植被产生有限模态的基频或谐波共振一类响应, 两者之间的退相干性, 则导致水波能量的沿程耗散响应。综合映射到滩地平均流、湍流和物质运输机制等表观垂向二维分布参数时, 可以实现复杂多样的组合^[15-16]。

到了中尺度分析层次上, 河口湾潮沟-潮滩系统

红树林湿地的降维特征是显著的。Schwarz 等运用遥感观测数据比较了盐沼和红树林中的潮沟形态参数, 发现世界各地的红树林湿地和盐沼湿地均具有相似的潮沟系统分支规律, 但比起盐沼湿地, 红树林湿地潮沟系统具有更低的密度、更长的流路, 以及稳健的形态^[11]。仅引用红树林湿地观测到的等效参数, 比如按陈一宁等在福建漳江口红树林滩地前缘的观测(红树林滩等效拖曳系数为 0.35, 分别是同水深光滩和互花米草滩的 8.75 和 2.19 倍, 红树林滩等效水波波速为 0.8 m/s, 分别是同水深光滩和互花米草滩的 36% 和 44%)^[12], 就可简洁地将红树林滩的发育与潮沟-潮滩系统的阻尼减速, 以致整个河口湾的水波能量调控与梯度阻抗匹配状态联系起来: 在此中尺度窗口内, 沉积地貌建造物源不足导致的能量耗散图像缺陷, 可转由水生植被的生物地貌学建造来弥补。依此窗口, 拥有明显水波波速梯度的红树林滩与光滩交界带, 一方面将斜入射水波能量汇入此“边缘波导”, 均匀地分散到潮沟-潮滩系统曲折的交界带上, 另一方面也引导正入射的水波能量透入红树林湿地, 支持着与交界带法向相交潮沟的发育以及能量与物质交换^[13]。同时, 潮沟的存在为红树林的胚轴和种子的空间扩张提供了机会窗口。现场调查和模拟显示, 大量的种子和果实在经过水动力输运以后会富集在潮沟周围^[17]。这一结果, 不仅指示了潮沟-光滩交界处的能量调控能力, 同时还提示了植物如何通过生物地貌过程来完成空间上的扩张。

依照大尺度分析视角, 河口湾湾顶的地表高程上升速率若赶不上海平面上升速率, 红树林湿地前缘发育趋势将受到全球气候变化的抑制。Kirwan 和 Megoniga 认为, 由于滨海湿地植物生长和地表高程上升速率之间的生态学正反馈, 只要留足湿地后缘的可修复空间, “活”的滨海湿地就能够不断适应

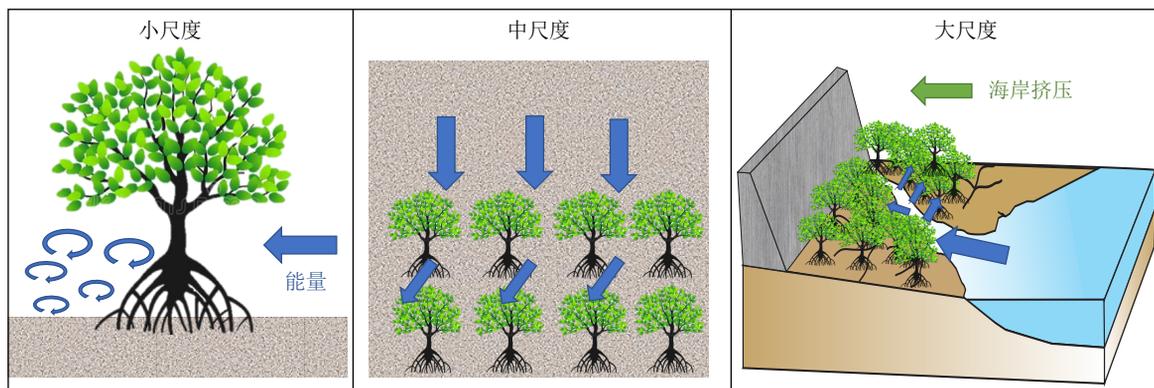


图 3 不同尺度上的红树林生态系统能量耗散过程示意图

Fig.3 The schematic diagram of energy dissipation processes in mangrove ecosystems at different scales

海平面上升的影响^[18]。但孟加拉河口三角洲 Sundarbans 红树林湿地 1988—2022 年间演变的遥感监测揭示,当红树林湿地前缘遭受了与海平面上升过程同步的红树林湿地侵蚀损失时,一直处于自然保护区范围内的红树林湿地后缘却未出现向陆迁移趋势,同期新增的红树林湿地主要分布在河口湾顶潮动力活跃且泥沙物源充足的潮沟-潮滩系统新淤滩地上^[19]。“活”的红树林湿地发育于活跃的潮沟-潮滩系统,而不出现在潮动力和泥沙活动性趋于沉寂的红树林湿地后缘。

红树林湿地前缘面临海平面上升压力,后缘遭受农业、养殖业和工业化发展的围填海和污染压力,“海岸挤压”状态下的红树林湿地逐渐退化。中国红树林湿地的退化,主要与修建海堤阻隔海陆联系、养殖污染排放、外来生物入侵等人为因素有关,表观上来自海岸带空间、环境承载力和生态位的协同“挤压”^[20]。然而到了中尺度分析层次上,红树林湿地的“海岸挤压”效应主要通过河口湾潮沟-潮滩系统的沉积地貌学与生物地貌学过程协同调控。修建海堤将河口湾潮沟-潮滩系统的上游部分渠闸化,输入的潮波失去了有序耗散,也失去了水体和物质的有序交流,为了耗散过剩的潮波能量和沉积物,河口湾潮沟-潮滩系统出现明显的“闸下淤积”,新淤光滩被非常适应高沉积速率生境的互花米草群落迅速取代,接着也出现明显的“闸下侵入”^[21-22]。潮沟形态也转化为比红树林湿地潮沟系统具有更高密度、更畅流路,以及更强适应能力的盐沼潮沟系统^[11]。

5 能量耗散对红树林生态系统的作用

能量耗散概念模式下,梯度阻抗匹配是河口湾潮沟-潮滩系统红树林地貌学过程的主导。伴随着水动力能量梯级分配状态的形成,水交换的梯级分布、热交换的梯级分布、生境的梯级分布、生态系统结构与功能的梯级分布,维系着红树林生态系统的生境多样性与生物多样性。

红树林不仅具有重要的生态系统服务功能,而且在防风消浪、促淤护岸上具有重要的防护作用,形成了海岸带的有效绿色防护手段,减少了海岸防护的经济投入^[9-10]。科学家们很早之前就注意到红树林生态系统对于水动力的耗散效应^[23-24]。红树林植物对水动力的削减作用主要由两个原因引起:底部摩擦和植物本身带来的拖曳力增加^[15,25-26]。从能量变化视角来看,红树林对波浪的能量耗散效率研

究是一个较为常见的例子。红树林对于波浪能量的耗散研究大多通过对比断面上的沿程变化来展开,采用现场观测、实验室模拟和数值模拟等手段^[27-31]。能量耗散效率可以用波高在单位距离上的减弱来进行量化^[25]:

$$r = \frac{\Delta H}{H} \frac{1}{\Delta x} \quad (3)$$

其中, r 为波浪削减效率, H 为波高, x 为波浪传播距离。这一公式和流体能量耗散公式十分接近,即单位重量的水体流动功率,可用速度和坡降的乘积表示^[2]。

通过总结前人的研究,Kamil等^[31]将影响红树林对于波浪耗散的因素归纳为以下几类:①和红树林本身特征相关的因素,如植物带宽、种类、物理结构特征、植物密度和年龄;②和环境相关的因素,如水深、地表高程、入射波特征等。值得注意的是,在红树林生态修复过程中可以利用这些特征使得海岸防护能力得到提高。基于红树林对波浪的削减作用,Adytia和Husrin^[32]提出种植特定宽度的红树林带进行海岸防护的方法。他们的模拟结果发现,当红树林带的宽度是入射波波长的4倍时,耗散效果最佳。这种波长倍数关系,和植物引起的基频或谐波共振响应相关。前人的研究显示^[33-34],红树林对于短波的耗散作用要好于长波(如涌浪、海啸巨浪),这可能与红树林本身的空间结构特征有关,因为红树林植株生长的天然间隔大约是几十厘米到几米,对应共振吸收频段位于短波。

事实上,除了沿程变化这种二维视角以外,红树林生活的潮滩具有三维结构,这种结构对于能量的有序耗散非常重要。潮滩由滩面(tidal platform)和潮沟(tidal creek)这两类地貌单元共同构成^[35]。潮沟是潮滩上的负地貌,对于潮滩的演化有着非常重要的作用,是潮滩整体能量和物质运输的主要通道^[36-38]。潮沟作为一种沟状地貌,具有多级的分汊,通过空间自组织结构来完成能量的有效耗散^[39]。尽管潮沟阻断了植物的连续性分布,但是通过水文连通性,潮沟的存在有助于繁殖体扩散和存活,最终会对植物扩散和后续种间竞争产生重要的影响^[40-41]。因此,潮沟-植物滩面之间存在交互作用,是一个典型的海岸带生物地貌学问题^[14]。

尽管潮沟底部不生长植物,但是潮沟两侧的岸壁上生长的植物可以稳定潮沟,而且植物生长初期的不均一性也是促使新潮沟发育的重要机制之一^[22,42-43]。同时,由于潮沟是能量耗散的主要通道,这个系统形成了植被繁殖体(如种子、胚轴、根茎

片段)传播、扩散的主要路径。已有研究显示,潮沟的存在为外来红树林种-无瓣海桑的空间扩张提供了机会窗口:大量的种子和果实在经过水动力输运以后会富集在潮沟周围^[17]。对越南 Lac Bay 潟湖中红树林的研究则显示了在生态系统修复过程中如何利用人工的潮沟来恢复红树林^[44]。该地区由于人类活动的影响,造成红树林潮沟的消亡,最终因为咸淡水混合变弱而导致红树林受到盐度胁迫而死亡。研究人员考虑了潮沟带来的物质交换和能量交换过程,设计了人工潮沟,形成了有效的生态修复方案。

梯级分布的潮沟系统也调控着红树林生态系统的水温环境,决定着热能的耗散。前人的研究已经发现,当涨潮发生时,潮流的主要通道为潮沟,当潮沟被填满之后,才出现漫滩现象;当落潮发生时,滩面归槽水进入潮沟再排出,因此潮沟整体的淹没时间远远超过滩面^[36,45]。由于海水水温和潮滩气温、土壤温度具有差异性,潮沟的涨落潮过程往往对局地温度变化有影响^[46-47]。局地的水温和气温变化均能对红树林的幼苗生长产生影响,实验表明气温对胚轴萌发的影响可能大于水温^[48]。土壤温度的变化则能够影响土壤呼吸作用,特别是根呼吸作用^[49]。近期实验发现潮滩土壤温度变化可以通过红树林根部菌群的调节来改变红树的抗寒能力^[50]。在我国,红树林天然分布北界为福建省福鼎市(27°20'N),人工引种北界为浙江省乐清市(28°25'N)。随着全球气候变化,极端天气事件发生的频率变高,包括极端高温和极端低温^[51]。对红树植物来说,极端低温尤其不利,严重限制我国红树林的北移范围。我国人工红树林分布的最北缘——乐清湾红树林区的现场观测揭示了潮沟对于红树林抵抗冬季低温的重要促进作用^[47]。沿着潮沟分布的红树林的气温、土温和没有潮沟的滩面具有显著的差异。潮沟的存在,可以使得沿程的红树林气温提高1~3℃,土温提高0.6~1.4℃,有效促进了人工红树林的越冬概率^[47]。潮沟系统在热能耗散上的调整,对红树林这类温度敏感型的潮间带植物具有重要的影响,是需要开展进一步研究的方向。

6 结语

能量耗散是陆海界面沉积地貌发育的重要动力过程。当海岸沉积地貌系统处于阻抗匹配状态,海岸沉积地貌系统则处于能量耗散极大值或者极小值的稳态之中,形成“梯度阻抗匹配”和“共振阻

抗匹配”。运用这样的概念,红树林的生物地貌过程事实上由潮沟-潮滩-植被界面上的能量耗散特征所决定的。红树林不仅可以调制界面上的能量耗散,而且这种能量耗散过程也能反过来影响红树林的生长和发育,这种基于能量耗散角度的生物地貌过程对于驱动红树林这一生态系统的发育具有重要的作用。

在我国人工红树林修复的工作中,寻找适合红树林生长的最适环境条件是一个关键的环节。前人的工作已经关注大范围的温度、盐度和高程的影响,并从生态学和植物生理学角度提出了很多新的思考^[14,20,51]。相比之下,潮滩局部地形和水动力的影响,特别是潮滩不同地貌单元(如潮沟)带来的局地高程与温度环境变化,会使系统性的能量耗散调整,但是现有的观测数据非常有限^[47]。目前,我国红树林的人工造林大多数采用滩面平整后种植的思路,尽管也有微地形的调整,但是像潮沟这样的大型地貌单元在系统层面上对整个修复的生态系统有什么重要的作用,还有待进一步的研究。从能量耗散的视角来看,生态系统修复理论需要从二维的滩面高程思路扩展到三维思路,同时考虑滩面和潮沟这两种正、负地貌的空间组合和沿程能量耗散,从而寻找到适合红树林定植、生长和扩散的关键“生物-环境”反馈条件。

参考文献 (References)

- [1] 郭振仁. 能量耗散率极值原理评述 [J]. 重庆交通学院学报, 1983(2): 95-100. [GUO Zhenren. Comments on the law of extreme rate on energy dissipation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1983(2): 95-100.]
- [2] Yang C T, Song C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105(7): 769-784.
- [3] 黄万里. 连续介质动力学最大能量消散率定律 [J]. 清华大学学报, 1981, 21(1): 87-96. [HUANG Wanli. The law of maximum rate of energy dissipation on continuum dynamics[J]. Journal of Tsinghua University, 1981, 21(1): 87-96.]
- [4] 黄才安, 赵晓冬, 周济人. 明渠水力设计中的能耗极值假说 [J]. 水道港口, 2010, 31(5): 330-334. [HUANG Caian, ZHAO Xiaodong, ZHOU Jiren. Extremal hypotheses of energy dissipation used in open channel design[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(5): 330-334.]
- [5] 李炎, 陈一宁, 吴祥柏. 论陆-海界面的复参数化 [J]. 海洋学研究, 2022, 40(3): 3-8. [LI Yan, CHEN Yining, WU Xiangbai. Complex parameterization for land-ocean interface: a perspective[J]. Journal of Marine Sciences, 2022, 40(3): 3-8.]
- [6] 席兵. 关于传输线阻抗匹配问题的分析 [J]. 重庆邮电学院学报, 1999,

- 11(2): 42-44,87. [XI Bing. Analysis on impedance matching problems about transmission line[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 1999, 11(2): 42-44,87.]
- [7] Wright L D, Short A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis[J]. *Marine Geology*, 1984, 56(1-4): 93-118.
- [8] Perillo G M E. Chapter 2 Definitions and geomorphologic classifications of estuaries[J]. *Developments in Sedimentology*, 1995, 53: 17-47.
- [9] Lewis III R R. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(4): 403-418.
- [10] Goldberg L, Lagomasino D, Thomas N, et al. Global declines in human-driven mangrove loss[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): 5844-5855.
- [11] Schwarz C, van Rees F, Xie D H, et al. Salt marshes create more extensive channel networks than mangroves[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 207.
- [12] Chen Y N, Li Y, Cai T L, et al. A comparison of biohydrodynamic interaction within mangrove and saltmarsh boundaries[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(13): 1967-1979.
- [13] Chen Y N, Li Y, Thompson C, et al. Differential sediment trapping abilities of mangrove and saltmarsh vegetation in a subtropical estuary[J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 270-282.
- [14] 陈一宁, 陈鹭真, 蔡廷禄, 等. 滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望 [J]. *海洋与湖泊*, 2020, 51(5): 1055-1065. [CHEN Yining, CHEN Luzhen, CAI Tinglu, et al. Advances in biogeomorphology in coastal wetlands and its application in ecological restoration[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 1055-1065.]
- [15] Nepf H M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, 44: 123-142.
- [16] Chang Y, Chen Y N, Li Y. Flow modification associated with mangrove trees in a macro-tidal flat, southern China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(2): 1-10.
- [17] Chen L Z, Feng H Y, Gu X X, et al. Linkages of flow regime and micro-topography: prediction for non-native mangrove invasion under sea-level rise[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 1780159.
- [18] 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.
- [19] Ahmed M R. Assessing changes in Sundarbans mangrove wetlands: identifying influencing factors and developing effective management strategies[D]. Coastal and Ocean Management Institute, 2023.
- [20] 王文卿, 石建斌, 陈鹭真, 等. 中国红树林湿地保护与恢复战略研究 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021. [WANG Wenqing, SHI Jianbin, CHEN Luzhen, et al. Research of Conservation and Restoration Strategy of Mangrove Wetlands in China[M]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2021.]
- [21] Xiao M, Cai T L, Wang X K, et al. Response of native and exotic salt-marsh species to sediment deposition addition[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 888: 164271.
- [22] 李屹, 陈一宁, 李炎. 红树林与互花米草盐沼交界区空间格局变化规律的遥感分析 [J]. *海洋通报*, 2017, 36(3): 348-360. [LI Yi, CHEN Yining, LI Yan. Remote sensing analysis of the changes in the ecotone of mangrove forests and *Spartina alterniflora* saltmarshes[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(3): 348-360.]
- [23] Furukawa K, Wolanski E, Mueller H. Currents and sediment transport in mangrove forests[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44(3): 301-310.
- [24] Massel S R, Furukawa K, Brinkman R M. Surface wave propagation in mangrove forests[J]. *Fluid Dynamics Research*, 1999, 24(4): 219-249.
- [25] Mazda Y, Kobashi D, Okada S. Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2005, 13(6): 647-655.
- [26] Horstman E M, Dohmen-Janssen C M, Bouma T J, et al. Tidal-scale flow routing and sedimentation in mangrove forests: combining field data and numerical modelling[J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 244-262.
- [27] Vo-Luong P, Massel S. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 74(1-2): 603-622.
- [28] Tanino Y, Nepf H. Laboratory investigation of mean drag in a random array of Rigid, Emergent Cylinders[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(1): 34-41.
- [29] Horstman E M, Dohmen-Janssen C M, Narra P M F, et al. Wave Attenuation in Mangroves: A Quantitative Approach to Field Observations. *Coastal Engineering*, 2014, 94: 47-62.
- [30] Hu Z, Van Belzen J, Van Der Wal D, et al. Windows of opportunity for salt marsh vegetation establishment on bare tidal flats: the importance of temporal and spatial variability in hydrodynamic forcing[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2015, 120(7): 1450-1469.
- [31] Kamil E A, Takaijudin H, Hashim A M. Mangroves as coastal bio-shield: a review of mangroves performance in wave attenuation[J]. *Civil Engineering Journal*, 2021, 7(11): 1964-1981.
- [32] Adytia D, Husrin S. Numerical simulations of nonbreaking solitary wave attenuation by a parameterized mangrove forest model[J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2019, 8(1.9): 10-16.
- [33] Braatz S, Fortuna S, Broadhead J et al. Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean Tsunami: what role for forests and trees?[C]//Proceedings of the Regional Technical Workshop. Khao Lak, Thailand, 2007: 161-184.
- [34] Zhang K Q, Liu H Q, Li Y P, et al. The role of mangroves in attenuating storm surges[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 102-103: 11-23.
- [35] Allen J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and southern North Sea coasts of Europe[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(12): 1155-1231.
- [36] 汪亚平, 张忍顺. 江苏盐沼盐沼风车河潮沟地貌与动力演化 [J]. *海洋科学集刊*, 1999(41): 40-50. [WANG Yaping, ZHANG Renshun. Evolution of geomorphology and hydrodynamics in Fengche creek at Jianggang Saltmarsh, Jiangsu, China[J]. *Studia Marina Sinica*, 1999(41): 40-50.]
- [37] 汪亚平, 张忍顺, 高抒. 论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应 [J]. *科学通报*, 1998, 43(21): 2315-2320. [WANG Yaping, ZHANG Renshun, GAO Shu. Geomorphic and hydrodynamic responses in salt marsh-tid-

- al creek systems, Jiangsu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(6): 544-549.]
- [38] 汪亚平, 高抒, 贾建军. 浪流联合作用下潮滩沉积动力过程的高分辨率数据采集与分析[J]. *科学通报*, 2006, 51(3): 339-348. [WANG Yaping, GAO Shu, JIA Jianjun. High-resolution data collection for analysis of sediment dynamic processes associated with combined current-wave action over intertidal flats[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 866-877.]
- [39] Coco G, Zhou Z, Van Maanen B, et al. Morphodynamics of tidal networks: advances and challenges[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 1-16.
- [40] Liu B, Cai T L, Chen Y N, et al. Sediment dynamic changes induced by the presence of a dyke in a *Scirpus mariqueter* saltmarsh[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 174: 104119.
- [41] Kim D, Cairns D M, Bartholdy J. Tidal creek morphology and sediment type influence spatial trends in salt marsh vegetation[J]. *The Professional Geographer*, 2013, 65(4): 544-560.
- [42] 龚政, 白雪冰, 靳闯, 等. 基于植被和潮动力作用的潮滩剖面演变数值模拟[J]. *水科学进展*, 2018, 29(6): 877-886. [GONG Zheng, BAI Xuebing, JIN Chuang, et al. A numerical model for the cross-shore profile evolution of tidal flats based on vegetation growth and tidal processes[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(6): 877-886.]
- [43] Chen Y, Thompson C E L, Collins M B. Saltmarsh creek bank stability: biostabilisation and consolidation with depth[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 35: 64-74.
- [44] Van Zee R. The role of creeks for tidal exchange in the mangrove forest of Lac Bay, Bonaire[D]. Master Dissertation of University of Twente, 2022: 84.
- [45] 张忍顺, 王雪瑜. 江苏省淤泥质海岸潮沟系统[J]. *地理学报*, 1991, 46(2): 195-206. [ZHANG Renshun, WANG Xueyu. Tidal creek system on tidal mud flat of Jiangsu province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(2): 195-206.]
- [46] Hosseini S T, Chegini V, Sadrinasab M, et al. Temperature, salinity and water-age variations in a tidal creek network, Bushehr Port, Iran[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2018, 22(6): 1093-1106.
- [47] Chen Y N, Chen L Z, Zhang Z Y, et al. Tidal creeks mediate micro-climate within artificial mangroves at their northmost boundary in China[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 192: 106970.
- [48] Borges J S, De Grande F R, Costa T M. Do Lower air or water temperatures limit the southern distribution of the white mangrove *Laguncularia racemosa* in South America?[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 230: 106449.
- [49] 卢昌义, 金亮, 叶勇, 等. 秋茄红树林湿地土壤呼吸昼夜变化及其温度敏感性[J]. *厦门大学学报:自然科学版*, 2012, 51(4): 793-797. [LU Changyi, JIN Liang, YE Yong, et al. Diurnal variation of soil respiration and its temperature sensitivity in *Kandelia candel* mangrove wetland[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2012, 51(4): 793-797.]
- [50] Chen E J, Blaze J A, Smith R S, et al. Freeze tolerance of poleward-spreading mangrove species weakened by soil properties of resident salt marsh competitor[J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(4): 1725-1737.
- [51] 陈鹭真, 杜晓娜, 陆銮眉, 等. 模拟冬季低温和夜间退潮对无瓣海桑幼苗的协同作用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 953-958. [CHEN Luzhen, DU Xiaona, LU Luanmei, et al. Synergistic effects of low temperature in winter and ebb tide at night on *Sonneratia apetala* seedlings growth and key eco-physiological traits[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 953-958.]