

王日明, 戴志军, 黄鹄, 等. 北部湾大风江与南流江河口红树林空间分布格局研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 54–61, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.12.006

Wang Riming, Dai Zhijun, Huang Hu, et al. Spatial patterns of the mangrove along the riverine estuaries, Nanlijiang River and Dafengjiang River of the Beibu Gulf[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(12): 54–61, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.12.006

北部湾大风江与南流江河口红树林空间分布格局研究

王日明¹, 戴志军^{2*}, 黄鹄¹, 梁喜幸¹, 黎树式¹, 胡宝清³, 周晓妍², 吴天亮¹

(1. 北部湾大学 广西北部湾海岸科学与工程实验室/钦州市环境生态修复重点实验室, 广西 钦州 535011; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 3. 南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西南宁 510310)

摘要: 生长在潮间带的红树植物在河口植物群落构成、海岸防风消浪中具有重要价值。本文基于本地种桐花树胚胎浸泡下沉实验与北部湾南流江和大风江河口段水体盐度、沿线潮间带植物群落结构与地貌分析, 探讨红树林在河口空间分布及影响因素。结果主要表明: 南流江河口和大风江河口红树林自海向陆基本展现“红树林纯林(桐花树、秋茄、无瓣海桑种类混生)→红树植物与半红树植物(黄槿、苦朗等)混生→红树植物、半红树植物与非红树植物混生→红树植物镶嵌→稀疏红树林小苗”的分布格局, 但大风江河口向陆界限主要以红树、红树幼苗及半红树混生为主。此外, 红树被浸淹时长是控制河口红树空间分布结构的主要因素。潮水上溯时长影响红树向陆生长的极限位置, 宜林滩地是红树发育生长的必要条件。

关键词: 水体盐度; 空间分布; 河口; 红树植物; 北部湾

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)12-0054-08

1 引言

红树是生长在热带亚热带河口或海岸潮间带的耐盐性木本植物, 在渔业、海岸保护、营养盐循环及捕获碳通量等方面具有极其重要的生态服务价值^[1-2]。因全球海平面上升和高强度人类活动的作用, 沿海红树林海岸遭受侵蚀, 红树林面临大规模消失的风险^[2]。红树林变化、红树林潮滩冲淤以及红树林生境及生态服务等已成为众多学者和相关政府关注的重大理论与社会问题^[1, 3-5]。较多研究针对前述问题开展了相关工作^[1-6], 对推动红树林生态、生理及生境和响应全球变化研究具有重要价值。与此同时, 作为影响红树能否发育与成活的关键因子, 盐度不仅胁迫红树组织结构, 影响抗氧化酶活性, 而且直接控制红树林种属

地域分布特征^[7-12]。故在影响红树生理与形态方面的环境因子研究中, 有不少是盐度对红树林的影响研究^[8-9]。譬如, 受潮汐淹水造成的盐度在潮滩分布不一, 红树植物在潮间带分布呈现出低滩带、中潮带和高潮带状分布特征^[3]。河口水体盐度的规律性变化成为影响红树植物沿入海河段分布的限制因子^[7, 10-11]。此外, 一些研究指出桐花树(*Aegiceras corniculatum* (L) Blanco)作为先锋红树植物的一种, 盐度会影响其幼苗萌发和生长的进程^[12], 其最适宜海水盐度为 8~15^[13], 桐花树在低盐度下生长量最大, 在中等盐度海滩可以种植桐花树^[14]。然而, 到目前为止一直较少有研究涉及入海河口段红树林自海向陆是如何分布以及不同因素在其间扮演的角色, 这在很大程度上影响了红树林宜林地选择与国家“南红北柳”——“南红”重大生

收稿日期: 2020-02-07; 修订日期: 2020-05-27。

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41930537); 国家自然科学基金(41666003)。

作者简介: 王日明(1971—), 男, 汉族, 湖南省邵阳市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为滨海景观生态修复。E-mail: wangriming@bbgu.edu.cn

* 通信作者: 戴志军, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为河海相互作用及生物动力地貌过程。E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

态工程的开展。基于此,本文以北部湾大风江和南流江为代表,研究北部湾入海河口红树林沿程空间分布格局,探讨外部因素对红树林的影响过程,旨在揭示区域入海河口红树林分布状态及驱动机制,在理论上补充河口段红树林发育与演化体系,在应用上为“南红”工程与生态堤防建设提供技术支撑。

2 研究区域概述

大风江和南流江同属于北部湾山溪型入海河流(图1)。该区域位于北热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和少雨,雨热同期。年降水量为1 693 mm,

降雨主要集中在6-9月^[15],10月至翌年5月为枯水期。潮汐属于不规则全日潮^[16],受潮汐影响的南流江入海河口发育面积约550 km²的三角洲,主入海河段16 km,河床落差达3.34‰。河口段河岸多处修建有人工河堤,自海向陆河口段形成的潮滩由发育相对平缓到坡度较陡,呈狭长的断续带状分布。受控于周边地形,大风江河口段形成深入内陆的溺谷海湾环境。河口上游东场构建有挡潮闸,导致径流较少过闸入海,仅沿线汇流区内降水进入该区域。河岸坡度较陡,河口潮滩自海向陆由发育稀疏过渡到狭长而呈断续带状分布特征。

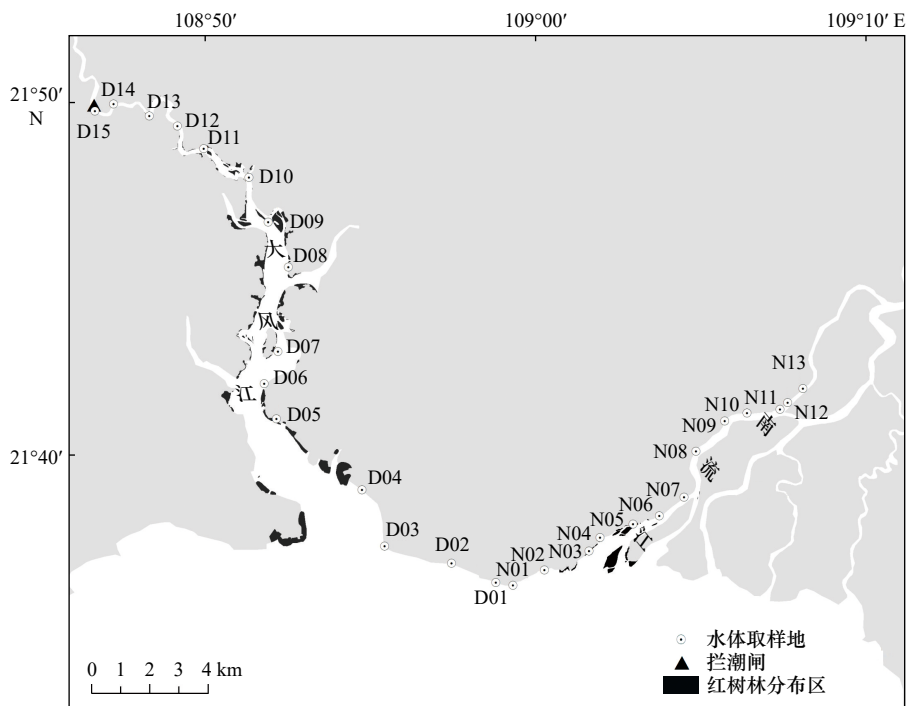


图1 研究区域红树林分布与采样站点

Fig. 1 Mangrove distribution and survey stations of the research area

3 实验设计与研究方法

为研究两个河口段自海向陆红树林的空间分布特征及其耐盐性,实验分为室内和野外两个阶段。其中室内实验选择本地河口区优势种桐花树胚胎进行不同盐度环境的沉水测试。野外实验则选择在冬季大潮高潮期间沿河口向陆地测定不同位置水体表层盐度,同时在低潮期间调查所测位置河口潮滩红树林分布及滩地坡度等。

3.1 桐花树胚胎沉水实验

3.1.1 实验材料

(1)实验所用桐花树胚胎来自南流江河口七星岛岛尾潮滩桐花树种群。这些胚胎全部是当地生长健

壮的成年树树冠外围中上部向阳面的成熟胚胎。胚胎采集时间为2019年9月22日。

(2)实验所用不同盐度配比水体:不同盐度水体包括0、20、30、40、50,其中盐度为0实验用水为静放24 h的自来水,其他盐度用水采用从实验区内所取盐度为10.9的天然海水加海盐与经静放24 h的自来水调配。不同盐度水体均用Pocket PAL-ES3盐度计标定盐度,用PZ-D-5型液体比重天平标定比重。

3.1.2 实验设计

于2019年9月23日08:00把从实验区采回的供试新鲜胚胎进行浸泡下沉实验。以盐度为0的自来水浸泡为对照,分别设盐度为20、30、40、50共4个处理,每个盐度处理设5个重复,每组样品为10颗桐

花树胚胎。为减少水分蒸发导致的水体盐度升高,保证桐花树胚胎所处水体盐度恒定在所设计盐度,每隔2 d对各盐度水体进行标定、换水。每天 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00、22:00 定时观测和记录红树林胚胎吸水下沉数量与下沉时间。

3.2 河口实地实验

为较准确地反映河口红树林的空间分布及生境特性,本文选择在枯季径流最弱期间、大潮高潮涨平阶段进行水体采样,在大潮低平期对沿岸潮滩红树进行调查。枯季大潮高潮涨平阶段河口盐水上溯抵达位置最远,即枯季河口潮区界所在。水样采集站分别沿南流江主入海河口和大风江河口河岸自口外海滨到潮区界布设,调查取样点分别为13个及15个(图1)。同时利用RTK对各个站点之间的坐标进行量测,随后基于坐标计算得到各站点之间的距离。

3.2.1 河口表层水体盐度采样设计

(1)南流江入海口河段盐度调查取样:为了取得枯水季节大潮高潮位期间涨潮水流对南流江河口段水体盐度的影响,本实验于2019年12月15日05:58–10:17测定各站点(图1)表层水体盐度。为较完整地记录高潮位盐度变化特征,于06:00在各站点水面与滩地交界处插设标杆,标杆上每隔5 cm贴标记,以记录站点水位上升、下降情况。涨潮时水面每上升5 cm时取一次水样,直到达到水位最高点;随后落潮时每下降5 cm时取一次水样,连取3~5个水样。把所取水样带回实验室经过充分搅拌后用Pocket PAL-ES3盐度计测定各水样盐度。

(2)大风江河口河段盐度调查取样:实验分别在2019年12月29日和30日涨潮至最高潮位期间驾船往返于1~15号点,每隔5 min取一次水样带回实验室测定河水盐度。

3.2.2 河口红树林植物分布调查取样

红树林植物沿河口向上游分布具有明显差异,为便于研究和比较,本文将河口潮间带植被定性归纳为5类。

I类:红树植物纯林(含多种红树植物混交林)区段,红树植物在河口段沿岸潮滩地大范围分布,极少有非红树植物混杂。

II类:红树植物大斑块区段,红树植物在河口段沿岸潮滩地聚集组团分布形成红树植物大斑块,红树植物大斑块间有半红树植物、非红树斑块,但以红树植物斑块为主。

III类:局部红树植物混交林区段,有成年红树植物小斑块镶嵌于其他非红树混交林中,以非红树植物

为主。

IV类:有一二年生红树植物小苗区段,但未发现成年红树植物。

V类:有红树植物胚胎区段,潮滩地发现有红树植物胚胎,但未发现红树植物小苗与成年树。

基于上述标准,实验在2019年12月29–30日对南流江和大风江入海河口河段沿岸红树植物分布状况采用按站点分区段普查方法进行现场调查。其中,按上述13个站点把南流江主入海河口21.3 km河段从口外海滨上溯,分成12区段,按上述15个站点把大风江河口38.1 km河段从海向陆上溯,分成14个区段(图1)。由此分别统计低潮时两个河口各区段潮滩出现的红树植物的分布状况。

4 结果分析

4.1 桐花树胚胎浸水下沉对盐度胁迫的响应

所采回供实验用桐花树成熟新鲜胚胎比重为0.923,置于盐度为0的水中,漂浮于水面,有部分悬浮于水中。随后用盐度为20、30、40、50的人工海水对桐花树胚胎浸泡处理,用盐度为0的水作为对照,观测胚胎在不同的盐度水体中吸水下沉时间与数量,结果见图2。

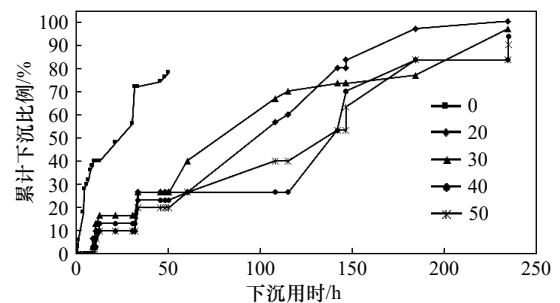


图2 新鲜桐花树胚胎对不同盐度胁迫的响应

Fig. 2 The stress response of the fresh *Aegiceras corniculatum* embryos to different salinity condition

不同时段累积下沉比例都是从0 h起累计

The accumulated setting rate in different periods with original time of 0 h

图2表明,新鲜的桐花树胚胎经不同盐度的人工海水处理,随着浸泡时间的延长出现不同的变化特征。其中,桐花树胚胎在低盐度水体中下沉速度明显快于高盐度水体(图2,表1)。具体而言,在0~10 h时段内,对照组有约25%胚胎下沉,而50盐度处理组没有下沉;20、30、40盐度处理组有不同程度下沉,但差异不显著。10~30 h、30~50 h时段内,各处理组中30盐度处理组下沉最快,50盐度处理组下沉最慢,

表 1 不同盐度水体中新鲜桐花树胚胎在不同时段内吸水下沉差异性分析

Table 1 Difference analysis for water absorption of the fresh *Aegiceras corniculatum* embryos in different salinity conditions during the different periods

盐度	0~10 h	10~30 h	30~50 h	50~150 h	150~230 h
0	(24.73±14.65)% ^a	(44.80±7.16)% ^a	(74.40±2.61)% ^a		
20	(1.22±2.71)% ^b	(10.00±0.00)% ^{bc}	(23.36±7.47)% ^b	(64.45±26.65)% ^a	(98.35±2.33)% ^a
30	(0.60±1.34)% ^b	(15.30±1.86)% ^c	(24.70±4.47)% ^b	(66.10±13.06)% ^a	(86.70±14.14)% ^a
40	(0.60±1.34)% ^b	(9.98±4.70)% ^{bc}	(21.30±4.42)% ^b	(45.57±21.55)% ^a	(86.63±5.77)% ^a
50	(0.00±0.00)% ^b	(8.86±1.81)% ^d	(18.00±4.47)% ^b	(46.10±13.04)% ^a	(85.53±3.87)% ^a

注: 同列不同小写字母表示桐花树胚胎在不同盐度水体的吸水下沉响应 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

分别为 15%、25% 与 9%、18%。到第 50 h 时, 对照组已全部下沉, 对照组与各处理组表现出显著差异。到第 230 h 时, 20 盐度处理组已全部下沉, 但 30、40、50 盐度的处理组仍有约 15% 胚胎处于漂浮(悬浮)状态, 表明桐花树胚胎在高盐度水体中漂浮(悬浮)时间更长。

4.2 入海河口段水体盐度空间分布

4.2.1 南流江河口段盐度空间分布特征

枯水期大潮涨平阶段, 潮汐向河段内推进约 15 km, 其中口外海滨 N01-N03 最高盐度在 23 以上, 盐度最高达 25.8, 平均盐度为 23.2, 潮区界左右的区段盐度平均为 3.6。向海距离越远, 盐度值越大, 向陆距离越远, 盐度值越小(图 3)。

4.2.2 大风江河口段盐度空间分布特征

类似地, 大风江河口口外海滨 D01-D04 最高盐度在 26 以上, 向海距离越远, 盐度值越大, 向河内距离越远, 盐度值越小。然而, 与南流江河口有所差异, 向陆到 33.88 km 附近, 其盐度仍高达 15.8, 平均盐度

为 10.5(D15)。有必要指出的是, D15 恰好位于大风江河流东场拦潮闸下, 因闸的阻拦作用, 进入闸下淡水径流极少, 导致潮汐作用最远距离为 33.9 km, 且盐度偏高(图 3)。

4.3 河口潮滩红树林植物空间分布特征

4.3.1 南流江河口潮滩地红树植物群落空间分布

南流江干流河口红树林面积为 109.13 hm²(图 1)。南流江主入海河段潮滩红树植物分布最集中的河段为 N03-N05, 沿线 3.5 km 的河岸潮滩与江心洲满布红树植物秋茄(*Kandelia candel* (Linn.))与桐花树, 另有少量的无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、海漆(*Excoecaria agallocha* Linn.)分布; 距 N03 站点口外的 N01-N03 沿线约 4.0 km 的海滨潮滩分布有大量的互花米草与秋茄片林; 距 N03 站点口内 3.5 km 的 N05-N06 沿线 1.5 km 的潮滩, 桐花树生长良好, 但有部分半红树植物(黄槿(*Hibiscus tiliaceus*)等)与非红树植物混杂; N06-N07 河段潮滩内偶布有桐花树成年苗, 再入上游几乎没有成年苗; N12 河段潮滩为桐花树分布上限,

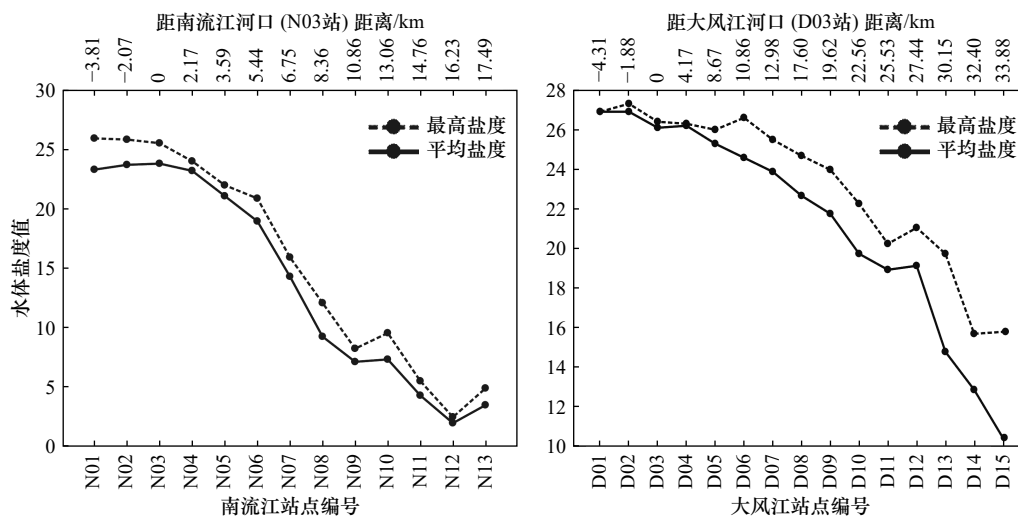


图 3 观测站点盐度

Fig. 3 The salinity of the observed sites

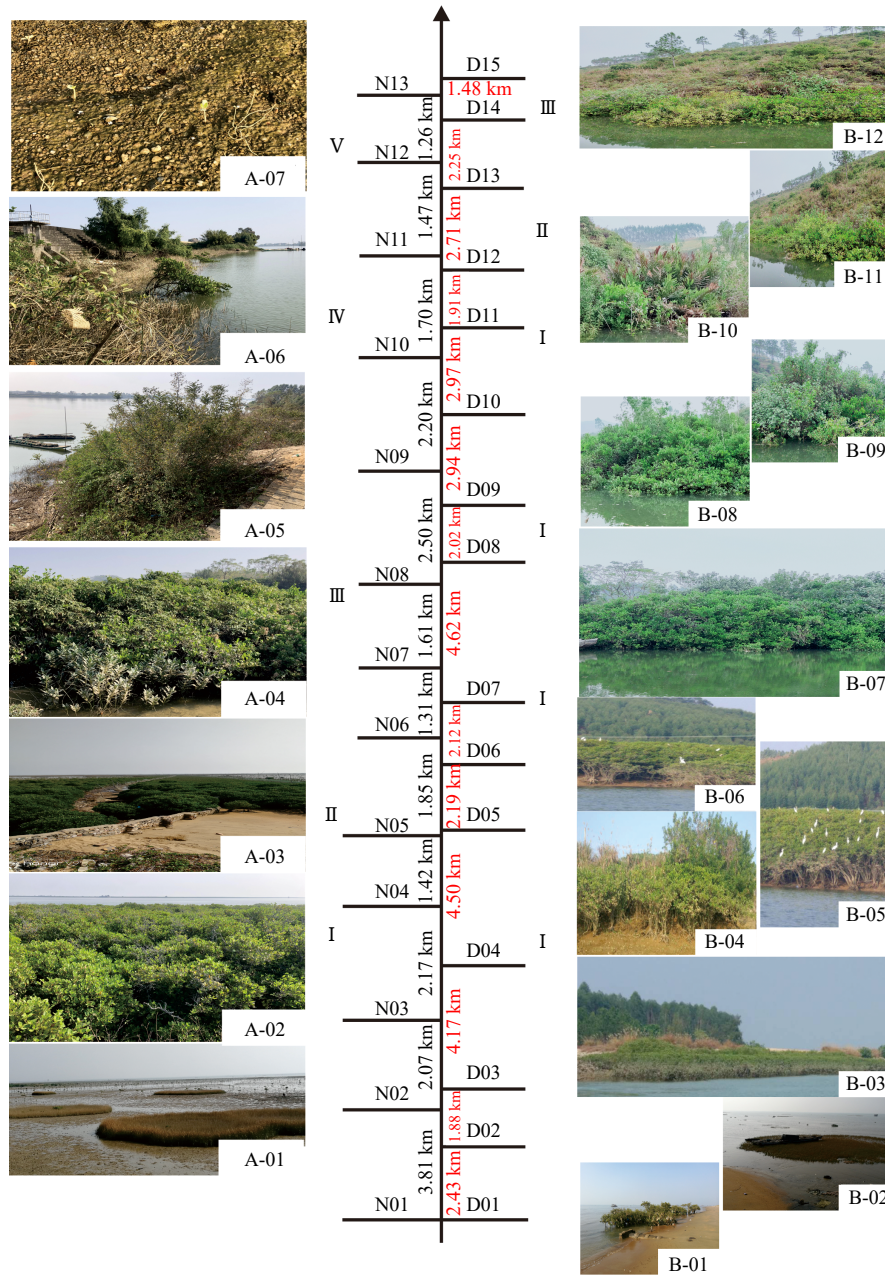


图 4 南流江河口段(A)和大风江河口段(B)红树植物空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of mangrove in the Nanliujiang Estuary (A) and Dafengjiang Estuary (B)

A-01: 互花米草, A-02: 桐花树纯林, A-03: 秋茄纯林, A-04: 桐花树优势种混交林, A-05: 桐花树与非红树植物混交林, A-06: 偶布桐花树苗与无瓣海桑, A-07: 桐花树一年生小苗; B-01: 海榄雌, B-02: 互花米草+桐花树一年生苗, B-03: 桐花树纯林, B-04: 桐花树+黄槿, B-05: 桐花树纯林, B-06: 桐花树种群间非红树植物, B-07: 半红树及非红树植物混交+桐花树成年苗, B-08: 偶布桐花树成年苗, B-09: 桐花树与非红树植物混交于高潮滩、中低潮滩偶布桐花树成年苗, B-10-B-12: 桐花树与非红树植物混交于高潮滩; I-V: 植被类型; N01-N13: 南流江站点编号、D01-D15: 大风江河口站点编号

A-01: *Spartina alterniflora* Loisel, A-02: pure forest of *Aegiceras corniculatum*, A-03: pure forest of *Kandelia candel*, A-04: mixed forests with dominant *Aegiceras corniculatum*, A-05: mixed forests of both *Aegiceras corniculatum* and non-mangrove plants, A-06: occasionally distribution of *Aegiceras corniculatum* saplings and *Sonneratia apetala*, A-07: 1-year seedling of *Aegiceras corniculatum*; B-01: *Avicennia marina*, B-02: *Spartina alterniflora* & 1-year seedling of *Aegiceras corniculatum*, B-03: pure forest of *Aegiceras corniculatum*, B-04: *Aegiceras corniculatum* & *Hibiscus tiliaceus*, B-05: pure forest of *Aegiceras corniculatum*, B-06: non-mangrove plants mixed in populations of *Aegiceras corniculatum*, B-07: semi-mangrove and non-mangrove plants mixed & adult seedling of *Aegiceras corniculatum*, B-08: occasionally distribution of adult seedling of *Aegiceras corniculatum*, B-09: non-mangrove plants mixed in the high beach & adult seedling of *Aegiceras corniculatum* occasionally distributed in the middle-low beach, B-10 to B-12: *Aegiceras corniculatum* mixed with non-mangrove plants in the high tidal flat; I-V: vegetation types; N01-N13, D01-D15: stations of the Nanliujiang Estuary and Dafengjiang Estuary

只有少量的一二年生桐花树小苗分布。总而言之,南流江口潮滩表现出离河口距离越远,红树植物分布越少,长势越差的趋势(图 4A)。

4.3.2 大风江河口红滩地红树植物群落空间分布

大风江河口红树林面积为 620.62 hm²(图 1)。大风江入海河口段潮滩红树植物分布基本表现出与南流江河口相似的趋势。D03-D10 河岸潮滩与江心洲为纯红树林,其中秋茄、桐花树为绝对优势种,高潮位以上有黄槿、海漆与苦郎(*Clerodendrum inerme* (L.))等半红树植物;距 D03 站点口外的 D01-D03 沿线约 4.5 km 的海滨潮滩大多为光滩,有少量的海榄雌(*Avicennia marina*)与桐花树一年生苗分布;距 D03 站点口内 22.0 km 的 D10-D12 沿线 5.0 km 潮滩与江心洲皆以桐花树为优势种群,间或有半红树植物(黄槿等)与非红树植物;距 D03 站点口内 27 km 以上的 D12-D15 桐花树成年苗三五成群镶嵌于半红树植物、非红树植物之间形成混交林(图 4B)。然而,相比南流江入海口,大风江入海口红树林分布范围更广,沿河上溯距离远达距海口 33.88 km 的 D15 站点拦潮闸(图 4B),且向陆界限主要以红树、红树幼苗及半红树混生为主,向陆界限不明显。

5 讨论

受潮汐强度、堤岸坡度、滩地高程等因素的影响及人为干扰作用,入海河口段沿岸不同潮滩地红树林植物的分布可能存在不同差异。

5.1 涨潮时间与胚胎吸水下沉时间

桐花树胚胎浸水实验表明,桐花树胚胎在低盐度的水中浸泡将吸水下沉,同时下沉的数量又和其浸泡时间相关(图 2)。在相对适宜盐度的水体中,宜林潮滩桐花树胚胎成熟脱落后,可悬浮于水体且随涨潮水动力向河口内陆延伸。基于此,在非整个全日潮影响下,涨潮 12 h 内,南流江河口的红树胚胎能被带到受潮汐作用影响的河段最上游 N13 段(图 4A)。基于先前研究关于河流受潮汐影响的上限是红树植物沿河分布的上限^[17]表明,如果在该上限区有合适的潮滩,胚胎落在潮滩上可以生根发育。然而,当没有适宜潮滩时,红树胚胎在河床底着地后,将随着落潮又被河水冲刷返回下游,继续随波逐流。故南流江河口上限仅发现少量的一二年生桐花树小苗分布。红树植物分布的最上限很可能由潮汐周期涨潮上溯时长与胚胎吸水下沉时间决定。此外,在盐度为 40、50 的水体中浸泡 230 h,仍有部分胚胎悬浮于水体中表明,桐花树胚胎在高盐度水体中悬浮时间长,这为桐花树胚胎

在落潮时随海水回流而远距离传播提供了可能。

5.2 潮滩地坡度

桐花树胚胎培育实验发现,胚胎在完全淹水条件下不进行生根发育过程。除受淹水影响,滩地也可能是限制性因子。基于调查中发现的南流江河口段 N06-N08 较陡滩地极少出现桐花树胚胎与一二年生幼苗,而在 N09-N12 河段缓滩发现有一二年生幼苗,在 N12-N13 低潮位出露的滩涂缓滩发现有胚胎。这就表明,当桐花树胚胎被涨潮时的潮水推进到河段上游,如果胚胎停留在过陡且有潮滩的位置,落潮后胚胎并不能有效停留在滩地,而将在落潮水动力作用下带回下游。从而胚胎不能在相对较陡的滩地有效停留。在大风江河口的 D10-D15 河段亦有类似情况,外缘没有适宜于胚胎停留的潮滩地,而仅在现有桐花树林下有少量一二年生幼苗出现。因而,入海河口段适宜坡度的宜林潮滩地是红树植物正常生长发育的必要条件。

5.3 水体盐度与潮水浸淹时间

桐花树胚胎在盐度为 10 以下时,生根发育状况最优,桐花树对低盐度表现出很强的适应性^[18]。南流江河口的现场调查表明,红树植物长势最好的河段为位于河口的 N03-N05 段,在 N01-N02 红树长势最差。产生这一现象的原因在于:N01-N02 区域,水体盐度长期大于 23,处于高盐度水平,桐花树胚胎萌发率极低^[12],故红树植物极少,以光滩为主。N03-N05 区域地处南流江河口径潮流交汇频繁作用的地带,全年盐度不仅在 10 左右,而且发育相对较大的潮滩给红树提供了栖息场所。本研究所调查盐度为南流江河口枯水季大潮涨潮期间的水体表层盐度,故盐度相对偏高,并不能代表该河段全年平均盐度水平。

然而,大风江河口 D03-D10 区段红树长势最好,所测盐度为 20 以上,且由于没有河水冲淡的作用,将常年维持这一盐度水平,但红树植物依然长势最好。其主要原因在于河岸潮滩与江心洲红树植物生长范围处于中高潮位,受潮汐浸淹时间较短,而较少受到高盐度水体影响。其中低潮位与低低潮位没有红树植物生长正解释了这一现象,即长期被高盐度水体浸泡,胚胎不能萌根,从而没有小苗发育。同时,大风江河口上段在东场建有挡潮闸,正常时段闸外水位高于闸内水位,常年没有淡水补充,该河段相当于一个较深入内陆的狭长海湾,致使河段内盐度严重偏高。经现场实测,在距离海口 33.88 km 的挡潮闸处 D15 站点的最高盐度为 15.8,平均盐度为 10.5,这就导致大风江江口红树林分布上限比南流江口远,分布范围比南流

江口广(图1)。这也是红树植物分布沿两条河河口段分布有明显不同的主要原因。故水体盐度与潮水浸淹时间是决定河段红树种类的关键因子。

6 结论

受控于河口复杂的水文与地貌条件,河口红树林空间分布较海岸复杂。本文结合室内盐度实验,通过对北部湾大风江和南流江入海河口红树林及栖息环境的分析,主要结论包括:

(1)南流江和大风江河口红树林自海向陆都展现出距离河口越远,红树群落趋于简单和长势较差的格局:红树林纯林(或桐花树、秋茄、无瓣海桑种类混

生)→红树植物与半红树植物(黄槿、苦朗等)混生→红树植物、半红树植物与非红树植物混生→红树植物镶嵌→红树林小苗。

(2)两个河口水体盐度自海向陆递减直接控制红树的分布格局,潮水浸淹时间是影响红树胚胎发育的关键因素,涨潮上溯时长决定了红树向陆生长的极限位置,河口段适宜坡度的宜林滩地为红树植物正常生长发育的必要条件。

(3)大风江口向陆构建拦潮闸,导致闸下盐度常年高于南流江,从而导致大风江口相较南流江河口的红树没有明显向陆界限,且主要分布红树、红树幼苗与半红树等。

参考文献:

- [1] Donato D C, Kauffman J B, Murdiyarso D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(5): 293–297.
- [2] Lovelock C E, Cahoon D R, Friess D A, et al. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise[J]. *Nature*, 2015, 526(7574): 559–563.
- [3] Wang Wenqing, Yan Zhongzheng, You Siyang, et al. Mangroves: obligate or facultative halophytes? A review[J]. *Trees*, 2011, 25(6): 953–963.
- [4] Reed D J. Sediment dynamics and deposition in a retreating coastal salt marsh[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, 26(1): 67–79.
- [5] Foster-Martinez M R, Lacy J R, Ferner M C, et al. Wave attenuation across a tidal marsh in San Francisco Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 136: 26–40.
- [6] Atwood T B, Connolly R M, Almahsheer H, et al. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 523–528.
- [7] Spier D, Gerum H L N, Noernberg M A, et al. Flood regime as a driver of the distribution of mangrove and salt marsh species in a subtropical estuary[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 161: 11–25.
- [8] 廖岩,陈桂珠. 盐度对红树植物影响研究[J]. *湿地科学*, 2007, 5(3): 266–273.
Liao Yan, Chen Guizhu. Review on influence of salinity on mangrove[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(3): 266–273.
- [9] 刘逸冷,覃盈盈,郑海雷. 红树植物耐水淹和高盐适应性研究进展[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2017, 56(3): 314–322.
Liu Yiling, Qin Yingying, Zheng Hailei. Research progresses of water logging tolerance and high saline adaptation of mangrove plants[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2017, 56(3): 314–322.
- [10] Ball M C. Mangrove species richness in relation to salinity and waterlogging: a case study along the Adelaide river floodplain, Northern Australia[J]. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1998, 7(1): 73–83.
- [11] Castaneda-Moya E, Rivera-Monroy V H, Twilley R R. Mangrove zonation in the dry life zone of the Gulf of Fonseca, Honduras[J]. *Estuaries and Coasts*, 2006, 29(5): 751–764.
- [12] 张宜辉. 几种红树植物繁殖体发育和幼苗成长过程的生理生态学研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2003.
Zhang Yihui. The study of propagule development and seedling growth in some mangrove species[D]. Xiamen: Xiamen University, 2003.
- [13] 张乔民,隋淑珍,张叶春,等. 红树林宜林海洋环境指标研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(9): 1427–1437.
Zhang Qiaomin, Sui Shuzhen, Zhang Yechun, et al. Marine environmental indexes related to mangrove growth[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1427–1437.
- [14] 刘昌岭,张经. 河口生物地球化学研究[J]. *海洋地质动态*, 1998, 14(4): 4–7.
Liu Changling, Zhang Jing. Study on biogeochemistry of Estuary[J]. *Marine Geology Letters*, 1998, 14(4): 4–7.
- [15] 黎树式,戴志军. 南流江现代水文-地貌过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.
Li Shushi, Dai Zhijun. Modern Hydrologic Geomorphologic Process of Nanliu River[M]. Beijing: Maritime Press, 2018.
- [16] 何斌源,赖廷和,陈剑锋,等. 两种红树植物白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)的耐淹性[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1130–1138.
He Binyuan, Lai Tinghe, Chen Jianfeng, et al. Studies of the tolerance of *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* to seawater immersion in Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1130–1138.

- [17] 信长朋. 红树植物的沿河分布格局及其对咸淡水交替环境的适应机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
Xin Changpeng. Mangroves distribution pattern along the river and the adapted mechanism to salt water and fresh water rotation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [18] 唐密, 李昆, 向洪勇, 等. 盐胁迫对两种红树植物生态、生理及解剖结构的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(3): 513–519.
Tang Mi, Li Kun, Xiang Hongyong, et al. Research on ecological, physiological and morphological adaptability of two mangrove species to salt stress[J]. Ecological Science, 2014, 33(3): 513–519.

Spatial patterns of the mangrove along the riverine estuaries, Nanliujiang River and Dafengjiang River of the Beibu Gulf

Wang Riming¹, Dai Zhijun², Huang Hu¹, Liang Xixing¹, Li Shushi¹,
Hu Baoqing³, Zhou Xiaoyan², Wu Tianliang¹

(1. Key Laboratory of Coastal Science and Engineering/Qinzhou Key Laboratory for Eco-Restoration of Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 10310, China)

Abstract: Mangrove growing on the tidal flat is of important value for the estuarine plant community compositions and coastal protection against wind and wave. This study aims to explore the spatial distribution pattern and associated influencing factors of estuarine mangrove based on the soaking and sinking experiment of aboriginal *Aegiceras corniculatum* embryo and observations on water salinity, plant community structure and geomorphology of the tidal flat along the estuaries of Nanliujiang River and Dafengjiang River. Our results show that the distribution pattern of mangrove along Nanliujiang River and Dafengjiang River estuaries exhibits a mode of “pure mangrove (e.g. mixture of *Aegiceras corniculatum*, *Kandelia candel*, *Sonneratia apetala*)→mixture of mangrove and semi-mangrove (*Hibiscus tiliaceus*, *Clerodendrum inerme* Gaertn)→mixture of mangrove, semi-mangrove and non-mangrove→mangrove mosaic→sparse mangrove seedlings” from sea to land. However, mangrove at the landward limitation of the Dafeng River estuary is characterized by a mixture of mangrove, mangrove seedlings and semi-mangrove. Besides, the time length of mangrove socking dominates the spatial distribution pattern of the estuarine mangrove while the time length of landward transport of tidal current affects the extreme location of the mangrove landward growth. A suitable tidal flat is an essential condition for the mangrove development and growth.

Key words: water salinity; spatial distribution; estuary; mangrove; Beibu Gulf