



不同时间尺度红树林演化的示踪方法及受控机制

张 尧, 孟宪伟, 夏 鹏, 张道来, 张 俊, 徐元芹, 潘良浩, 邱广龙

Research progress on mangrove development in different time scales

ZHANG Yao, MENG Xianwei, XIA Peng, ZHANG Daolai, ZHANG Jun, XU Yuanqin, PAN Lianghao, and QIU Guanglong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024032903>

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

基于能量耗散视角的红树林海岸沉积地貌学

Sedimentary geomorphology of mangrove coasts in perspective of energy dissipation

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 25-33

北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏特征

The characteristics of sedimentary organic carbon in the mud area in the western North Yellow Sea since the Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 110-119

中国西北地区中晚全新世火历史集成重建与气候演化

Integrated reconstruction of fire history and climatic changes in Northwest China since mid-late Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 156-169

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77-89

全新世以来福建宁德地区环境演变及人类活动的孢粉记录

Palynological evidence for palaeoenvironmental change and human activity in Ningde of Fujian Province during Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 170-181



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张尧, 孟宪伟, 夏鹏, 等. 不同时间尺度红树林演化的示踪方法及受控机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 197-210.
ZHANG Yao, MENG Xianwei, XIA Peng, et al. Research progress on mangrove development in different time scales[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 197-210.

不同时间尺度红树林演化的示踪方法及受控机制

张尧^{1,2}, 孟宪伟³, 夏鹏³, 张道来¹, 张俊³, 徐元芹³, 潘良浩⁴, 邱广龙⁴

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 自然资源部北方滨海盐沼湿地生态地质野外科学观测研究站, 青岛 266237
3. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061
4. 广西海洋科学院(广西红树林研究中心), 广西红树林保护与利用重点实验室, 北海 536000

摘要: 红树林具有多重生态系统服务功能, 是减缓和适应气候变化的战略要地, 其对未来全球变化的响应可通过重建过去红树林的演化来实现, 进而为制定适应不同战略需求的短期/长期红树林保护和修复方案奠定科学基础。本文归纳了红树植物花粉、有机碳氮及其稳定同位素和三萜类化合物等红树林演化示踪指标的优缺点, 并对红树林有机碳来源定量判别方法进行了介绍; 重点从长时间尺度(晚白垩世以来和全新世以来)和短时间尺度(近百年来和近几十年来)回顾和总结了红树林起源、进化、灭绝、迁移、兴衰和演替等多样化的演化历史; 揭示了自然环境(构造运动、海平面、气候和水文环境等)和人类活动(海水养殖、围垦、伐木、工程建设和人工保护修复等)对红树林演化的控制作用; 最后提出了未来在深化红树林演化研究领域的关键科学目标。

关键词: 红树林演化; 红树林源有机碳; 海平面和气候变化; 人类活动; 全新世; 近百年来

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024032903](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024032903)

Research progress on mangrove development in different time scales

ZHANG Yao^{1,2}, MENG Xianwei³, XIA Peng³, ZHANG Daolai¹, ZHANG Jun³, XU Yuanqin³, PAN Lianghao⁴, QIU Guanglong⁴

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
2. Northern Observation and Research Station of Coastal Salt Marshes, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266237, China
3. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China
4. Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Marine Sciences (Guangxi Mangrove Research Center), Beihai 536000, China

Abstract: Mangroves provide multiple ecosystem services and are strategic locations for climate change mitigation and adaptation. The response of mangrove forests to future global changes can be understood by reconstructing the mangrove development in the past. Over the years, scholars from different disciplinary fields have conducted in-depth studies on mangrove development and its constraints in different time scales, which has greatly contributed to the development of palaeoecological studies on coastal vegetated habitats represented by mangroves, and laid the scientific foundation for the formulation of short-term/long-term mangrove protection and restoration programs for different strategic needs. We summarized the tracing indicators and key methods of mangrove development in different time scales, reviewed the history of mangrove dynamics at long time scales (i.e., since the Late Cretaceous and since the Holocene) and short time scales (i.e., in the last hundred years and in the last few decades), deeply revealed the controlling roles of changes in natural environments and anthropogenic factors on mangrove forests, and finally proposed key scientific objectives for future research in the field of mangrove development.

Key words: mangrove development; mangrove-derived organic carbon; sea level and climate change; human activities; Holocene; the past ~100 years

资助项目: 中国博士后科学基金(2023M731853); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2021Q04); 国家自然科学基金面上项目“~4.2 kaBP 广西北海-英罗湾红树林‘此消彼长’与相对海平面骤然下降求证”(41976068); 青岛市博士后应用研究项目(QDBSH20220202112)

作者简介: 张尧(1993—), 男, 博士, 从事滨海湿地地质学研究, E-mail: zhangyao0726@163.com

通讯作者: 夏鹏(1983—), 男, 博士, 研究员, 从事滨海湿地地质学研究, E-mail: pengxia@fio.org.cn

收稿日期: 2024-03-29; 改回日期: 2024-05-06. 周立君编辑

红树林是低纬度地区仅有的占据海陆交界地带的木本植物群落。尽管其面积仅占世界热带森林总面积的 0.7%^[1],但它们却具有防风消浪、保滩促淤、净化水质、提供产品和维持生物多样性等多重生态系统服务功能^[2-4]。更重要的是,它作为高效的碳生产者、捕获者和埋藏者,在全球碳循环过程中占据着举足轻重的地位,是地球上最重要的蓝碳生态系统之一,进而成为减缓和适应气候变化的关键地带^[5-8]。

然而,红树林对环境变化非常敏感,例如:海平面、气温、季风、水文地貌条件等要素的改变均会影响红树林的动态^[9-13];特别是近百年来,污染和土地利用模式转换等人类活动更是极大地影响了红树林生长发育、群落演替和结构功能^[14-15]。而这种红树林的演化将直接改变其碳汇功能,进而对全球气候产生显著的“反馈效应”,同时也改变其他生态系统服务功能的效力^[6,10]。当今,在全球快速变暖、海平面迅速上升以及人类活动急剧增强的背景下,红树林生态系统正面临前所未有的挑战。为了科学预测红树林生态系统在未来“多重胁迫”情境下的命运,就必须基于“以古论今”的思想,了解它们在过去是如何繁盛、衰退、迁移和演替的,即对红树林演化历史进行重建^[16-17]。

近年来,随着对红树林蓝碳生态系统认识的不断深入,地质学、植物学、生态学和遥感科学等不同领域的学者从不同时间尺度对红树林的演化及其对环境变化的响应进行了深入研究,极大地推动了以红树林为代表的滨海植被湿地古生态学研究的发展,并为制定适应不同战略需求的短期/长期红树林保护和修复方案奠定科学基础。本文将归纳不同时间尺度红树林演化的示踪指标和关键技术,重点从长时间尺度和短时间尺度回顾和总结红树林的演化过程,揭示红树林演化对自然环境变化和人类活动的响应,提出未来在红树林演化研究领域的努力方向。

1 红树林演化示踪方法

在近几十年来或者更短时间尺度上,红树林的演化可直接借助遥感手段进行恢复^[18],而在更长时间尺度上,可利用沉积物中埋藏的动态替代性指标进行重建^[16]。因此,红树林演化的示踪方法因时间尺度而异,下面将对主要的示踪指标及其关键技术方法进行介绍(表 1)。

1.1 红树植物花粉

红树植物花粉是红树林湿地沉积环境中的特有标志,其种类及含量变化不仅可以指示红树林生长发育状态,还可以识别红树群落演替特征,其组合和丰度已被证明是重建红树林演化的经典指标^[19-20],被广泛用于红树林演化历史的重建研究中^[16,19,21-26]。但是,该方法也存在诸多局限性,主要体现在:孢粉数据获取过程中具有样品预处理繁琐、鉴定耗时长和数据主观性较强等特点;孢粉鉴定通常只针对某一特定粒级,因此对沉积物的整体特征缺乏代表性,特别是当沉积物中孢粉浓度较低时,其指示意义并不明确;受沉积物孢粉浓度和鉴定所需样品的限制,难以进行基于精细分样的高分辨率研究。

1.2 有机碳氮及其稳定同位素

由于红树植物具有典型的木本植物属性且通过 C₃ 光合途径固定大气中的 CO₂,其体内的有机碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)和 C/N 组成有别于海洋浮游生物、海草和河流沉积物等其他物质;例如,红树植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在-30‰左右,而其他物质来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 与之相比显著偏正(表 2),若沉积物记录的 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现负偏/正偏趋势,可以在一定程度上指示红树林的繁盛/衰退演化过程。基于上述原理,有机碳氮及其稳定同位素(TOC、TN、C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)已被广泛用于海岸带古气候、古环境和古生态重建研究^[27-29],其

表 1 红树林演化的主要示踪指标对比

Table 1 Comparison of major tracers of mangrove development

示踪指标	所需仪器/方法	优势	劣势
红树植物花粉	显微镜	指代明确,可直接有效地识别红树林的生长发育和群落演替变化	时间成本高,数据存在主观性,对样品的适用性要求严格,不利于高分辨率研究
有机碳氮及其稳定同位素	元素分析仪 同位素质谱仪	测试技术成熟,数据获取成本低,易于推广,适用于高分辨率研究	难以进行群落演替研究,指标可能受早期成岩作用影响
三萜类化合物	气相色谱-质谱	不易受早期成岩作用影响,反应灵敏,适用于高分辨率研究	群落指代不明确,实验过程繁琐,测试成本较高
红树林面积/范围	卫星/航空遥感影像	直观性强,指标数据与年代数据对应准确,节约野外成本	难以进行群落演替研究,起步较晚,不适用于长时间尺度研究

表 2 红树林埋藏有机碳潜在端元的 C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 端元值

Table 2 C/N, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of potential end-members of buried organic carbon in mangrove forests

潜在端元	区域（样本数）	C/N		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$		参考文献	
		均值	范围	均值	范围	均值	范围		
红树林源	红树林叶片	广西英罗湾（16）	38.2±12.6	20.6~71.9	-28.7±0.8	-29.9~-27.1	10.6±1.8	8.5~14.8	文献[32]，笔者未发表数据
	红树林叶片	广西钦州湾（16）	33.3±11.5	20.3~68.1	-28.6±0.8	-30.0~-27.0	12.8±1.9	7.6~15.3	文献[33]，笔者未发表数据
	红树林叶片	广西南流江口（26）	48.3±6.4	—	-29.6±1.4	—	7.8±1.4	—	文献[48]
	红树林叶片	海南文昌河口（5）	—	—	-28.6±1.9	—	3.3±2.2	—	文献[49]
	红树林叶片	波多黎各（7）	34.6±11.1	20.1~52.4	-30.5±1.5	-32.2~-28.4	—	—	文献[50]
	红树林叶片	印度尼西亚（4）	33.6±6.3	—	-31.7±0.5	—	2.7±0.6	—	文献[51]
	红树林枝干	波多黎各（7）	135.5±45.0	82.3~203.8	-26.0±1.6	-28.7~-24.1	—	—	文献[50]
	红树林枝干	印度尼西亚（4）	298.0±22.0	—	-29.4±0.4	—	2.0±0.1	—	文献[51]
	红树林根系	波多黎各（7）	72.1±18.1	48.6~96.5	-26.0±1.5	-28.5~-24.5	—	—	文献[50]
	红树林根系	印度尼西亚（4）	91.7±16.8	—	-29.7±0.6	—	3.0±0.6	—	文献[51]
红树林凋落物	印度尼西亚（4）	69.1±1.1	—	-30.5±0.3	—	2.5±0.6	—	文献[51]	
陆源	河流沉积物	钦江和茅岭江（7）	12.6±1.85	10.4~16.5	-24.3±0.6	-25.1~-23.3	8.4±0.7	7.3~9.3	文献[32]
	河流沉积物	珠江（8）	12.5±2.2	9.8~17.2	-23.9±1.4	-25.6~-21.2	—	—	文献[52]
	河流悬浮体	钦江和茅岭江（8）	19.0±3.7	11.0~24.9	-25.6±0.3	-26.1~-25.2	0.5±1.2	-1.2~2.6	文献[53]
	河流悬浮体	南流江（30）	7.1±1.5	—	-26.3±1.3	—	7.5±2.2	—	文献[48]
	海岸带坡积物	广西北海（5）	13.3±1.8	10.6~15.8	-20.0±2.4	-23.0~-18.0	8.9±1.1	7.6~10.2	笔者未发表数据
海源	浮游植物	南海北部	6.5±0.1	—	-16.1±0.8	—	—	—	文献[54]
	浮游植物	雷州半岛	—	—	-18.2±0.6	-18.8~-17.7	8.9±1.3	7.6~10.1	文献[55]
	浮游动物	雷州半岛	—	—	-17.7±1.2	-19.0~-16.9	9.1±1.3	8.1~10.6	文献[55]
	大型藻类	雷州半岛	—	—	-15.7±2.8	-20.4~-10.1	10.1±1.3	6.9~11.5	文献[55]
	大型藻类	波多黎各（3）	19.0±14.2	6.4~38.8	-17.5±1.1	-18.9~-16.3	—	—	文献[50]
	大型藻类	广西北海（4）	—	—	-14.8±0.7	-15.7~-13.9	10.1±1.7	8.0~12.6	文献[56]
	海草	广西铁山港（19）	27.2±11.9	16.6~51.5	-13.5±0.7	-14.5~-11.7	5.9±1.3	1.9~7.6	邱广龙未发表数据
	海草	波多黎各（3）	22.7±1.1	21.7~24.2	-10.2±0.9	-11.1~-9.0	—	—	文献[50]

与红树植物花粉相结合, 可成为研究红树林演化历史的常用联合示踪指标^[25]。与红树花粉相比, 有机碳氮及其稳定同位素在国内的大多数地球科学实验室均可以低成本高精度地完成测试, 其低样本需求更是使得重建高分辨率的红树林演化历史成为可能。需注意的是, 该方法假定了碳氮元素基本不受早期成岩作用的影响, 但事实上这种影响是客观存在的, 尤其是对于氮元素而言^[30-31]。近年来, 研究者在有机碳氮及其稳定同位素指标基础上, 进一步利用 $\delta^{13}\text{C}$ -C/N 联合定量判识红树林源有机碳 (Mangrove-derived Organic Carbon, MOC) 的相对贡献, 将其作为示踪红树林演化的新指标^[32-34], 同时又

基于全球四区 (中国北部湾、波多黎各潟湖、亚马孙河口和印度半岛西海岸) 的 MOC 相对贡献和红树植物花粉丰度变化趋势的一致性及其显著正相关关系, 验证了 MOC 在示踪红树林演化方面的科学性和普适性^[31]。此外, 除了联用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N, 也可根据研究需要选取更加合理的联合定量判识参数, 以获得更加可靠的 MOC 结果。

1.3 三萜类化合物

三萜类化合物 (Triterpenoids) 是一种类脂生物标志物, 其碳骨架稳定、不易受早期成岩作用影响, 在沉积物中可长期稳定存在^[35]。虽然这种脂质在

大多植物中的相对含量很低,但在红树植物的非极性化合物中却占有较高的比例^[36]。因此,三萜类化合物在示踪红树林演化方面颇具潜力,尤其当沉积层位中因孢粉颗粒数量较少而缺乏统计意义时,能客观地反映历史时期的红树林群落信息^[35,37]。业已证明,蒲公英萜醇(Taraxerol)是最具代表性的示踪红树林演化的三萜类化合物,能灵敏反演地质历史时期红树林的兴衰变化^[22,38]。在实际应用中,通常会使用蒲公英萜醇与其他脂质生物标志物(如烷烃)的比值来构建示踪指标,从而降低其他维管植物的干扰,增加该指标应用的准确性^[35,39-40]。然而,由于红树植物种属众多,蒲公英萜醇并非对所有种属的红树植物都具有显著指示意义,几种其他的三萜类化合物对群落种类的指示意义亦不清晰,相互发生交叉重叠,例如:木榄植物中主要为 β -香树脂醇和羽扇豆醇,秋茄中主要为日耳曼醇、 β -香树脂醇、 α -香树脂醇和少量蒲公英萜醇,白骨壤中主要为 β -香树脂醇、羽扇豆醇、 α -香树脂醇、日耳曼醇等^[41]。不同萜醇种类组合能否反映红树林群落组成尚缺乏探索,加之该类指标的分析测试过程繁琐,技术门槛较高,使得其应用受到一定限制^[40,42]。

1.4 红树林源有机碳贡献的定量判识

尽管 MOC 相对贡献可用于红树林演化的重建

研究,但其定量判识主要面临两个关键问题:一是有机碳潜在端元识别及其端元值确定;二是利用端元混合模型定量计算各端元有机碳的相对贡献。红树林埋藏有机碳的潜在端元通常包括3部分:一是红树林源,即红树林自身生产;二是陆源,即陆地径流输入的物质,包括陆地 C_3 和 C_4 植物以及土壤等;三是海源,即由潮汐输入的浮游生物和海草等物质^[32-34](图1)。由于 C/N 、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 在沉积有机碳来源判识中应用得更为普遍,故在表2中汇总了红树林沉积物有机碳三个潜在来源的端元值。从表中可知,同一潜在来源的 C/N 、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 数据之间有一定差异(表2),即使是红树林的根、茎、叶的端元值亦有所不同。因此,在实际研究中应结合区域背景充分考虑各端元的代表性,进而确保定量判识结果的可靠性。

有机碳来源的定量计算可通过端元混合模型实现,对于常用的三端元混合模型(图1),可根据实际需要从 C/N 、 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{15}N$ 和蒲公英萜醇等参数中选取两个进行计算,以 C/N - $\delta^{13}C$ 联合指标为例,其表达式为:

$$\delta^{13}C_{\text{sample}} = [f_A \times \delta^{13}C_A] + [f_B \times \delta^{13}C_B] + [f_C \times \delta^{13}C_C]$$

$$C/N_{\text{sample}} = [f_A \times C/N_A] + [f_B \times C/N_B] + [f_C \times C/N_C]$$

$$f_A + f_B + f_C = 1$$

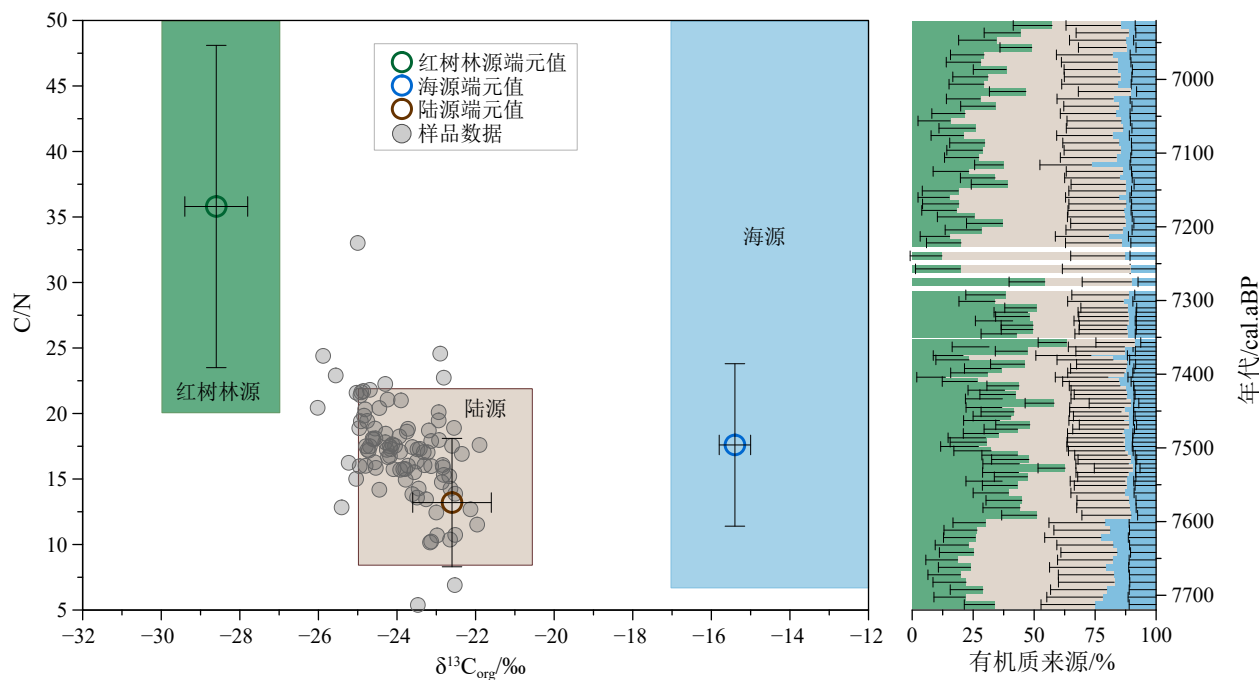
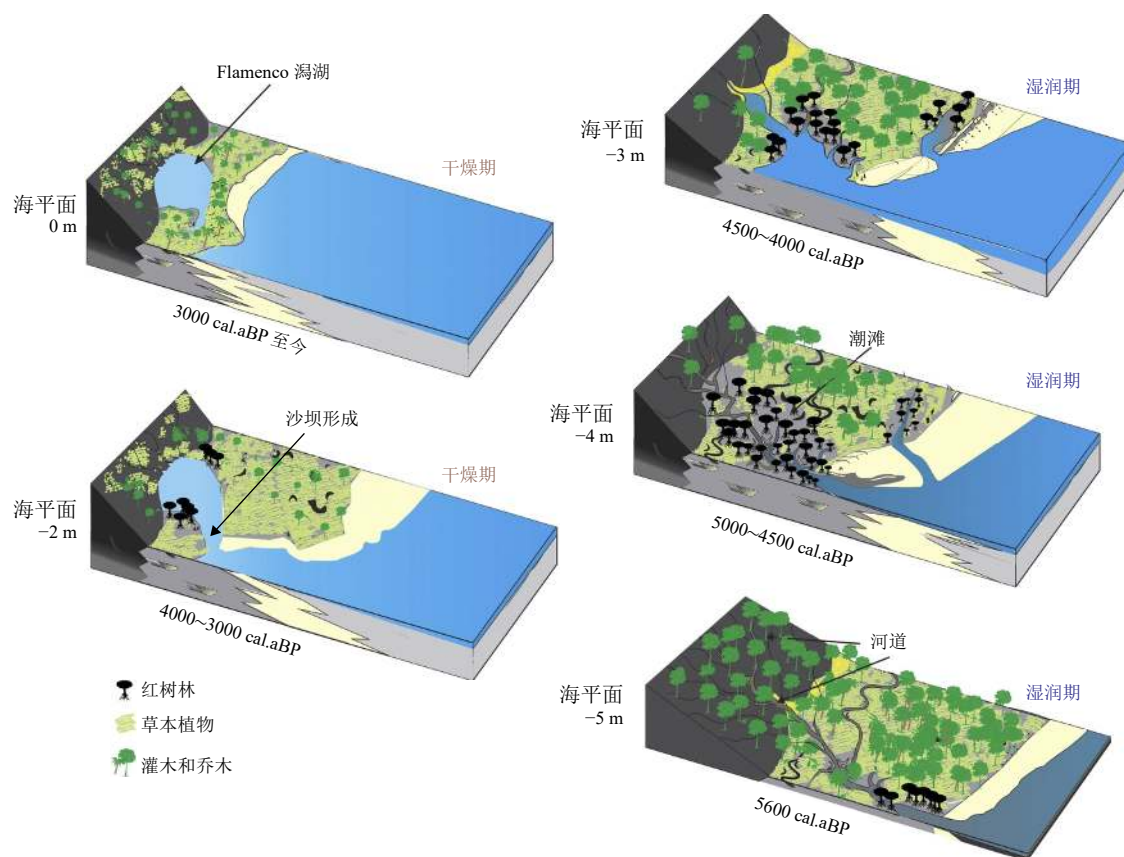


图1 基于 C/N - $\delta^{13}C$ 构建的红树林埋藏有机碳来源判别图及各端元的贡献
以广西钦州湾岩芯数据为例^[34]。

Fig.1 Discriminant diagram of mangrove buried organic carbon sources based on C/N - $\delta^{13}C$ and the contributions of each endmember
Core data from Qinzhou Bay, Guangxi, China^[34].

图 2 全新世中晚期波多黎各 Flamenco 潟湖红树林演化模式^[26]Fig.2 Model of mangrove development in the Flamenco Lagoon, Puerto Rico, during the middle and late Holocene^[26]

其中, A、B 和 C 代表有机碳来源的端元, f 代表不同端元对样品中有机碳的贡献比例。对端元混合模型的解析有两种常用方法: 一种是传统的同位素质量平衡方程计算方法^[43]; 另一种是新兴的马尔科夫链蒙特卡洛模拟 (Markov Chain Monte Carlo) 方法^[44-45]。相比传统方法, 蒙特卡洛模拟充分考虑了端元值的变异性, 基于大量随机取样和重复计算得出结果, 已在湿地^[34]、海洋^[46]、河流^[47]以及大气^[45]等多种环境下得到有效应用。

2 长时间尺度红树林演化

已有证据表明, 红树林是在晚白垩世—古近纪期间 (50~100 Ma) 从陆地迁移入海的陆生植物, 并首次出现于古地中海^[57-60]。由于海陆变迁剧烈和地质记录难寻, 限制了对晚白垩世以来这种超长时间尺度的红树林演化研究; 末次盛冰期以来海平面持续上升, 并于大约 7 ka 达到与现今海平面相对一致的高度^[61]。因此, 地球上现有的红树林也正是在该时期出现的, 进而使得全新世以来的红树林演化研究案例不胜枚举。下面, 将对晚白垩世以来构造尺

度, 特别是全新世以来千年尺度的红树林演化进行回顾。

2.1 晚白垩世以来红树林演化

在晚白垩世以来的构造时间尺度上, 红树林经历了起源、进化、迁移和灭绝等多样化的演化过程, 并与地质历史时期的构造运动、洋流、气候和海平面变化密切相关。标志性的阶段包括: ①在晚白垩世, 一些生长在淡水沼泽中的被子植物祖先在广阔的潮间带获得耐盐性而成功地生存下来^[59]; ②在古近纪和新近纪, 大陆的解体和合并导致了新的潮间带栖息地的形成, 红树林的繁殖体通过洋流进行迁移, 同时红树林基因的大量混合和分散导致红树林生物地理屏障的形成并延续至今, 即印度-西太平洋 (IWP) 和大西洋-东太平洋 (AEP) 两个区域显示出不同的红树林种属^[57,62]; ③在新近纪晚期, 喜马拉雅隆起和亚洲季风系统的建立进一步影响了海陆相互作用, 从而影响了印-太大陆海岸带红树林分布^[59]。

除了构造运动, 在古新世晚期、始新世晚期和上新世中期, 气候条件变化也驱动了红树林演化,

致使红树林植物区系进化和扩张,特别是在始新世,温暖湿润的气候条件使得红树林步入了前所未有的全盛时期^[59,63]。另外,海平面对红树林演化亦具有深刻影响,基于物种基因组的研究表明,晚白垩世以来红树林经历了数次灭绝,这一现象可由地质记录中频繁且快速的海平面上升和下降来解释。因此,即使红树林已经历了长达近亿年的进化,但其物种数量(约70种)却十分有限^[60,64]。在区域尺度上,Rull等^[17]汇编并分析了一个包含140多个地点的数据库(CARMA),对晚白垩世至今加勒比地区红树林的兴衰及其对过去全球变化的响应进行了系统论述,并根据这些古生态学和演化研究结果,提出了红树林保护和修复建议,是为数不多的构造尺度区域红树林演化研究案例。

2.2 全新世以来红树林演化

基于AMS¹⁴C等定年手段,选取合适的示踪指标可重建全新世以来的红树林演化历史。由于该时期构造运动和海平面相对稳定,故红树林演化主要表现为生长态势、群落演替和向陆/海迁移等变化,并主要受海平面和气候及其衍生的干湿交替、淡水输入、水体盐度、季风强度和环境温度等多因素控制。

早在20世纪80年代,Woodroffe等^[65]便对约7000~5500 a期间澳大利亚北部的红树林演化进行了研究,花粉证据指示了红树林由盛转衰的演化模式,并将其与海平面变化和沉积相互作用联系起来。20世纪末,张玉兰等^[21]利用红树花粉探讨了中全新世海南岛东北部红树林演化特征及其与海平面变化的关系。由此可见,有关全新世红树林演化及其对海平面变化响应的研究起步很早。随着分析技术的不断进步,更多的学者对这一科学问题进行了深入探索。如:①Cohen等^[66]综合了34个岩芯的C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和孢粉数据,在72个放射性碳测年的控制下,重建了全新世亚马孙红树林带的古环境史,揭示了在>8990~8690至2300~2230 cal.aBP期间该地区发育了一个比现今更宽更连续的红树林带,而末次冰消期海平面上升引起的海侵以及全新世早期和中期的构造沉降是这一现象的主要控制因素;②Li等^[23]根据柬埔寨湄公河三角洲两个岩芯的孢粉学记录,发现了早中全新世9400~6300 cal.aBP期间显著的红树林群落演替,这种现象很好地响应了约8300 cal.aBP海平面减速上升和7500~7000 cal.aBP期间的海平面持续上升;③Hait和Behling^[67]基于不连续的红树花粉记录推断早全

新世约9240 cal.aBP的快速海侵导致了印度恒河-雅鲁藏布江三角洲西部红树林的消失;④晚全新世海平面对红树林的影响相对缓和,Setyaningsih等^[68]揭示了2300 cal.aBP以来苏门答腊岛Mendahara Ilir地区红树林湿地植物群落随海平面升降变化发生同步迁移。总体而言,红树林对海平面变化非常敏感,随着海平面的上升或下降红树林会向陆或向海迁移并发生群落演替;而过快的海平面变化会导致红树林栖息地的减少甚至消失,特别是在海平面显著上升的全新世早期和中期^[13,69]。

大量的研究表明,气候变化及其引发的干湿交替、淡水输入、水体盐度、季风强度和环境温度等要素的变化对于红树林演化的影响亦十分显著,特别是在海平面趋于稳定的全新世中晚期,且影响红树林演化的各气候要素之间本身就存在复杂的相互制约关系。如:①Cohen等^[26]研究发现在大约4400 cal.aBP波多黎各Flamenco泻湖海平面趋于稳定,气候条件愈发干燥,当海岸沙坝形成时,内海盆地关闭,高蒸发量增加了水体盐度,致使红树林至今都被草本和灌木植被所取代(图2);②Proske等^[70]发现在7400~6300 cal.aBP期间,澳大利亚西北部红树林由于气候干燥而逐渐衰退收缩,并随着干旱峰值的到来,其种群多样性有所降低;③Cordero-Oviedo等^[71]亦发现墨西哥湾西海岸红树林生态演替被5400~3700 cal.aBP的区域性干旱事件所打断。由此可见,气候干旱对红树林生态系统发展具有十分不利的影响。进一步的研究表明,此类干旱可能来自热带辐合带(ITCZ)和厄尔尼诺南方涛动(ENSO)迁移活动的影响,例如:在全新世海平面相对稳定后,墨西哥尤卡坦半岛的红树林变化与ENSO和ITCZ之间存在显著的相关性^[72];对大约6000 cal.aBP阿曼东北部红树林的演化研究显示,ITCZ南移导致降水量减少,从而造成淡水输入减少和土壤盐分增加,进而使红树林生态系统迅速崩溃^[73]。

气候干湿交替和降水多寡对红树林演化的影响是复杂的,尽管气候干旱导致红树林衰退的案例有很多,但气候湿润也未必会有利于红树林的扩张。多名学者在亚马孙红树林带全新世古环境史的研究中发现^[24,66,74],晚全新世亚马孙河流域气候由干旱向潮湿转变,导致亚马孙河流量增大,红树林被淡水植被所取代,连续的红树林带逐渐破碎化,海岸形态因进积逐渐演化为直线形海岸;这种湿润的气候亦导致了巴西东南部Doce河口海岸系统的砂质沉积物供应增加,使红树林被灌木和草本植物取代^[25]。

还有学者从季风强度变化的角度出发, 揭示了其与红树林演化之间的密切联系: ① Meng 等^[75]在广西英罗湾的红树林演化研究中发现, 约 2 000 cal.aBP 以来红树林的三个繁荣阶段和两个衰退阶段分别对应着亚洲夏季风增强和亚洲冬季风增强时期; ② Xu 等^[76]在泰国攀牙府以及 Limaye 和 Kumaran^[77]的印度西南海岸红树林演化研究中也发现了类似

的对应关系; ③ 更高分辨率的研究表明, 在 7 800~6 900 cal.aBP 的 900 年间亚洲冬季风反复增强导致了广西钦州湾高频红树林衰退现象^[34]。另有研究强调了气温对于红树林演化的控制作用, 如 Zhang 等^[77]发现 3 000 cal.aBP 以来广西钦州湾红树林繁盛/衰退的阶段与中国历史上的暖期/冷期更替具有良好的对应关系(图 3)。

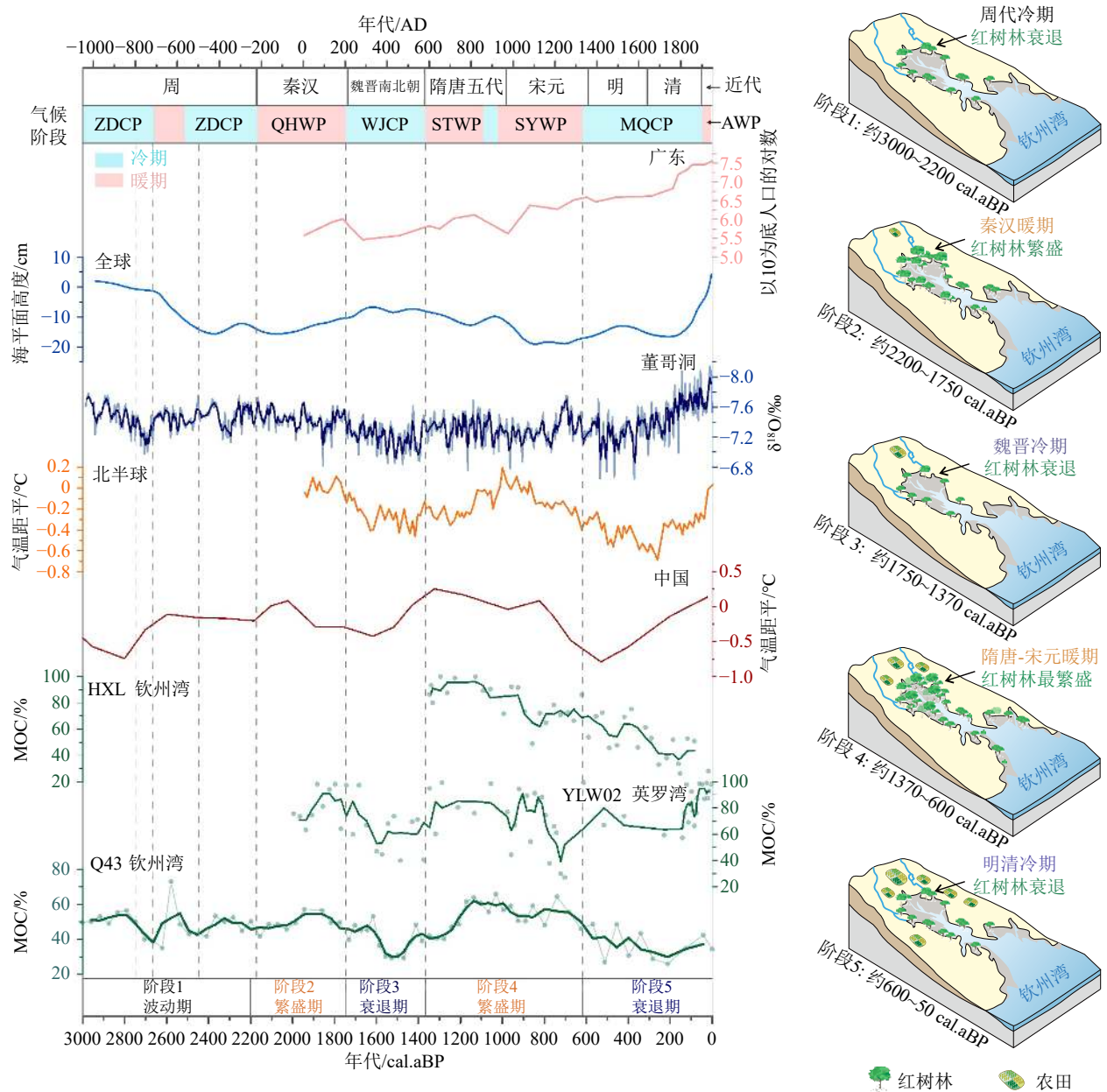


图 3 广西钦州湾 3 000 年以来的红树林演化及其制约因素^[78]
ZDCP: 周代冷期, QHWP: 秦汉暖期, WJCP: 魏晋冷期, STWP: 隋唐暖期, SYWP: 宋元暖期, MQCP: 明清冷期, AWP: 人类世暖期, MOC: 红树林源有机碳。

Fig.3 Mangrove development and its constraints in Qinzhou Bay, Guangxi, China over the past ~3 000 years^[78]
ZDCP: Zhou Dynasty cold period, QHWP: Qin-Han Dynasty warm period, WJCP: Wei-Jin Dynasty cold period, STWP: Sui-Tang warm Dynasty period, SYWP: Song-Yuan Dynasty warm period, MQCP: Ming-Qing Dynasty cold period, AWP: Anthropocene warm period, MOC: Mangrove-derived organic carbon .

3 短时间尺度红树林演化

基于 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 等人工核素构建年代框架,选取合适的示踪指标可重塑近百年来这种短时间尺度的红树林演化史。而且,随着近几十年遥感技术的诞生与进步可以更加便捷地恢复十年甚至年际时间尺度的红树林演化过程。与长时间尺度相比,短时间尺度的构造运动和海平面虽更加稳定,但人类活动却十分剧烈。在国际年代地层表中增加“人类世”,并将1950年或1850年等时间节点作为其底界的提议方兴未艾^[79-80]。这意味着,短时间尺度的红树林演化除了受气候和海平面等自然条件的影响外,可能更多地受到人类活动的制约。下面将对近百年来红树林的演化进行阐述,并简要介绍近几十年来依托遥感技术示踪的更短时间尺度的红树林演化研究进展。

3.1 近百年来红树林演化

工业革命以来,人类作用越来越成为一种重要的地质营力,对地球环境产生了清晰可辨的影响^[81]。因此,近百年来自然状态下的红树林与受人类活动干扰的红树林有着不同的演化模式。

自然状态下的红树林主要面临全球变暖背景下气温和海平面的上升,正如在全球大多数地区所观察到的,红树林倾向于栖息在气候湿热的低纬度地区^[1],同一红树林物种的高度在赤道和热带边缘地区甚至有着十倍之差,说明在一定阈值内较高的气温可能有利于红树林发展;与末次冰消期快速海平面上升(约47 mm/a)导致红树林消失不同,近百年来海平面的上升速率(约3.2 mm/a)仍在红树林生存阈值(>6.1 mm/a)内^[82-83],红树林有能力随着海平面上升而向陆迁移。

部分学者为近百年来自然状态下的红树林演化提供了研究案例:①广西英罗湾是一个自然条件优越,无河流注入,人为影响很小的海湾,发育典型的岬湾红树林,1990年于该地成立山口红树林国家级自然保护区,并于2002年列入《国际重要湿地名录》,Xia等^[32]基于MOC和红树花粉丰度重建了该区1870年以来的红树林演化史,并揭示了气温上升是导致红树林逐渐繁盛的主因;②Bozi等^[84]对巴西东南部圣埃斯皮里图州面积最大、保存最完好的红树林进行了研究,3个岩芯的结果分别显示自1878年、1955年和1958年以来,红树林逐渐繁盛并向陆迁移,而这可能与小冰期结束以来海平面和气

温上升有关。由此可见,全球变暖似乎有利于近百年来红树林的发展,但关于该尺度下特定地点红树林随时间演化的研究仍比较有限。不过,红树林在空间尺度上的演化印证了全球变暖对红树林发展的促进作用:Yao等^[85]利用多指标联合示踪和遥感技术揭示了4个全球红树林地理边界地区(巴西Santa Catarina、美国佛罗里达、德克萨斯和路易斯安那州)的红树林在过去几十年/近百年的显著扩张/繁盛现象,并表明这种“向极扩张”并非受全新世气候变率的影响,而是工业时代以来全球气候变化的产物,即可能由冬季变暖和冬季极端冰冻减少所驱动,这与之之前在北美和南美的研究也是一致的^[86-87]。总的来说,近百年来全球变暖背景下,自然状态下的红树林可能整体上是趋于繁盛的。

随着人口增长和人类活动范围扩大,受干扰的红树林在全球红树林中占据的比例也越来越重,其演化模式也因海水养殖、围垦、伐木、海堤建设、港口建设和保护区设立等形式的人类活动影响而变得复杂。某些区域的红树林在近百年来可能一直处于衰退的状态,例如:①Meng等^[33]重建了广西钦州湾红树林演化的两个阶段,即缓慢衰退期(1926—1980年)和快速衰退期(1980—2011年),这一现象则归因于虾塘建设和围垦等人类活动,与前文提及的自然状态下广西英罗湾的红树林繁盛形成鲜明对比,笔者对两区域红树林演化的进一步对比研究表明,尽管两区域具有相似的自然背景,但MOC随时间变化的整体趋势完全相反,表明两区域红树林呈现了差异性演化模式,人类活动对红树林的自然演化过程具有逆转作用(图4);②Chu等^[40]基于MOC也揭示了由于虾塘建设导致1960年以来海南儋州湾红树林遭到破坏,有机碳埋藏速率降低;③Hapsari等^[88]基于红树属和木榄属的花粉数据表明,1910年以来印度尼西亚爪哇岛南部红树林由于殖民产业对木材的需求和农业用地的扩张而持续退化。

然而,随着生态保护意识的增强,人类对红树林也产生了积极的影响,使得某些区域的红树林演化从衰退转向繁盛,例如:①Punwong等^[89]对泰国沙没颂堪府红树林演化的研究结果显示,始于1960s的集约化养虾导致大规模土地利用形式转换,红树林衰退,而1990s之后红树林保护和恢复管理工作启动,开展人工红树林种植,使得红树林重新繁盛;②Chu等^[40]研究表明,1960年以来海南八门湾红树林遭到持续破坏,但1981年成立了红树林省级自然保护区,使得红树林有机碳埋藏速率从

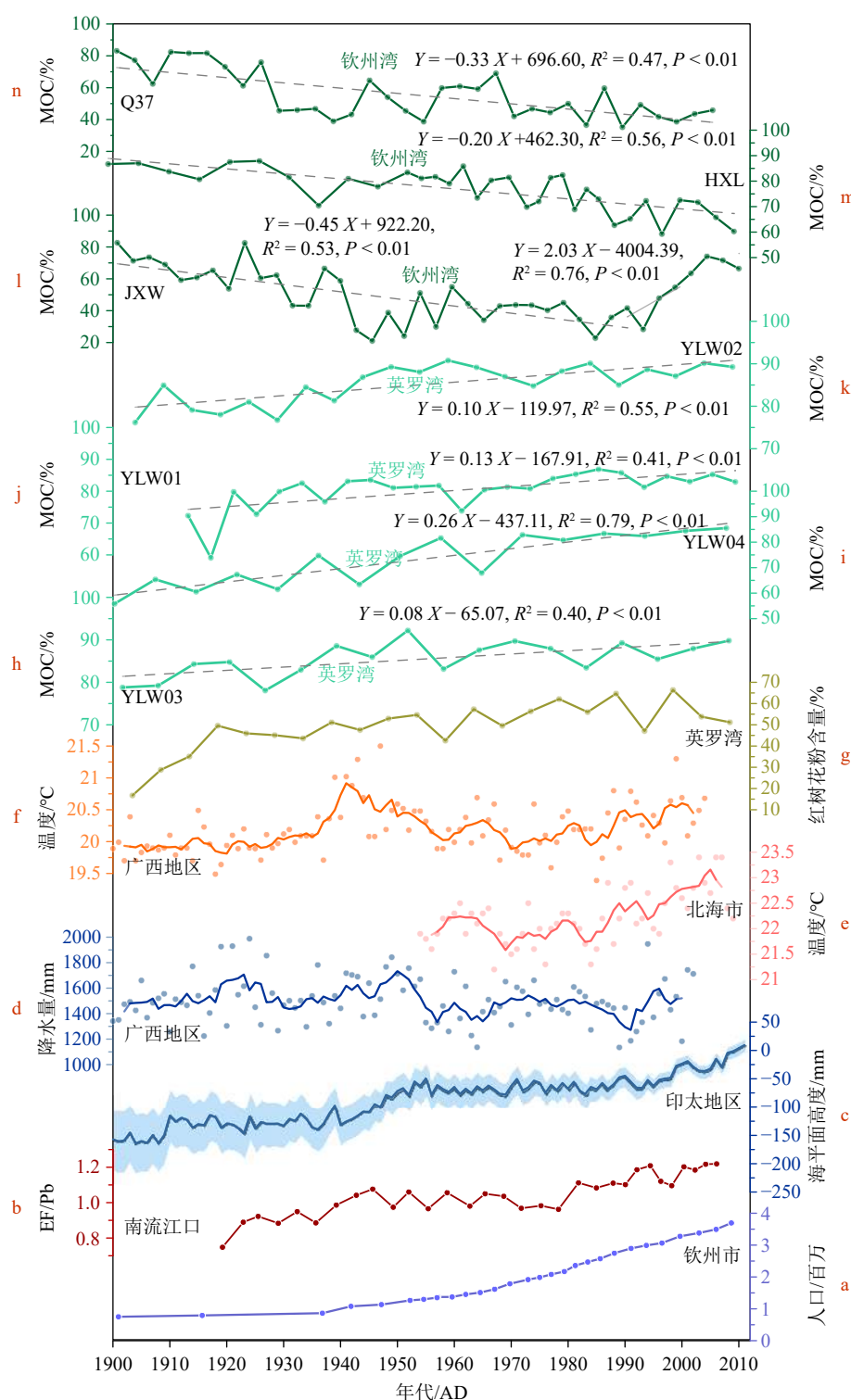


图4 1900年以来广西钦州湾和英罗湾红树林的差异化演化

a: 钦州市人口(广西壮族自治区地方志编纂委员会), b: 南流江口EF(Pb)^[90], c: 印太地区海平面^[91], d和f: 广西地区的年平均降水和气温^[92], e: 北海市年平均气温(北海市气象局数据), g: 英罗湾红树林花粉含量^[32], h-n: 英罗湾和钦州湾各岩芯红树林源有机碳(MOC)变化。数据来自文献[32,33]和笔者未发表数据。

Fig.4 Differential mangrove development in Qinzhou Bay and Yingluo Bay, Guangxi since 1900 AD

a: population of Qinzhou City (Local Records Compilation Committee of Guangxi Province), b: EF(Pb) of Nanliu River estuary^[90], c: sea-level changes in Indian-South Pacific region^[91], d and f: annual average air temperature and average rainfall of Guangxi Province^[92], e: annual average air temperature in Beihai City (Beihai Meteorological Bureau), g: mangrove pollen content in the Yingluo Bay^[32], h-n: MOC (mangrove-derived organic carbon) in the Yingluo Bay and Qinzhou Bay (from references [32-33] and author unpublished data).

0.29 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升到 6.54 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 红树林对沉积有机碳库的贡献增加了 31%; 笔者对广西茅尾海坚心围(JXW)的红树林演变研究亦发现 1990 年之后红树林的繁盛对人工红树林种植和自然保护区的设立具有良好响应(图 41)。

3.2 近几十年来红树林演化

遥感技术为研究红树林演化提供了宝贵的时空便利性, 尽管该项技术在应用上具有时间上限, 但研究人员可以清晰地从时间序列上追溯近几十年来的红树林变化趋势。更重要的是, 该技术使得从全球、国家和区域等不同空间尺度上探究红树林的分布和迁移成为可能。Hamilton 和 Casey^[93] 基于全球森林变化数据库、世界陆地生态系统数据库和世界红树林数据库, 以高时空分辨率提取红树林土地覆被, 发现在 2000—2012 年间, 由于森林采伐, 全球红树林的损失率为 1.97%, 特别是在东南亚, 损失率高达 3.58%~8.08%, 而该地区的红树林面积占全球的一半。贾明明等^[94] 利用 Landsat 系列卫星数据和面向对象分析方法研究了国家尺度上的红树林变化, 结果表明: 1973—2000 年由于养殖池塘建设和围垦等因素, 中国红树林面积减少 30 199 ha(占 1973 年的 62%), 2000—2020 年由于中国政府的大力保护和造林行动, 全国新增红树林 9 408 ha, 基本恢复到 1980 年的水平。对于区域尺度上的红树林变化研究更为普遍, 例如: ① Murillo-Sandoval 等^[95] 基于 Landsat 系列卫星数据对哥伦比亚 1984—2020 年的红树林面积变化进行了研究, 发现哥伦比亚海岸最大的海湾(Urabá湾)东海岸红树林由于快速城市化使其面积减小, 而 Sanquianga 保护区的红树林却由于厄尔尼诺和拉尼娜事件更替引发的环境温度变化, 使红树林扩张和萎缩; ② Yao 等^[85] 基于 QuickBird 卫星图像和 Phantom 4 Advanced 无人机图像研究发现, 巴西 Santa Catarina、美国佛罗里达、德克萨斯和路易斯安那州红树林面积在 21 世纪初至 2019 年左右均呈现多倍增长, 由此进一步证明了持续发生的红树林向极迁移现象。

4 总结与展望

4.1 总结

本文对红树植物花粉、有机碳氮及其稳定同位素和三萜类化合物等常用的红树林演化示踪指标及其优缺点进行了论述, 并介绍了红树林源有机碳

的定量判识方法。基于大量研究实例, 分别对长时间尺度(晚白垩世以来和全新世以来)和短时间尺度(近百年来和近几十年来)的红树林演变历史进行了阐述, 并揭示了不同时间尺度红树林演化的差异性受控机制, 主要包括以下几方面。

(1) 在晚白垩世以来这种构造时间尺度上, 红树林历经了起源进化、迁移扩张、区系建立和消亡灭绝等多样化的演化过程, 并与地质历史时期的构造运动、气候、洋流和海平面变化密切相关。

(2) 全新世红树林会随着海平面变化而发生迁移, 过快的海平面变化可能会导致红树林消失, 特别是在海平面快速上升的全新世早期和中期; 气候变化及其引发的干湿交替、淡水输入、水体盐度、季风强度和环境温度等要素的变化对于红树林演化的影响亦十分显著, 特别是在海平面趋于稳定的全新世中晚期, 且各气候要素之间存在复杂的耦合关系。

(3) 近百年来全球变暖背景下, 自然状态下的红树林可能整体上是趋于繁盛的; 然而, 受海水养殖、围垦、伐木、海堤建设和港口建设等人类活动的影响, 使得红树林的自然演化过程遭到逆转而呈现不同程度的衰退态势; 但随着生态保护意识的增强以及红树林保护和修复政策的实施, 人类对红树林演化也产生了积极的影响。

(4) 近几十年来, 遥感技术的诞生和进步为研究红树林演化提供了宝贵的时空便利性, 研究人员不仅清晰地从时间序列上追溯了近几十年来的红树林变化; 还从全球、国家和区域等不同空间尺度上探究了红树林的分布和迁移。

4.2 展望

前人已从不同时间尺度对红树林演化进行了大量研究, 但面临分析测试技术进步、宜居地球理念发展和快速全球变化威胁等现状, 本文对红树林演化的研究也提出了新的期待。

(1) 基于多学科多指标联合示踪红树林演化史。沉积记录中用于红树林演化的示踪指标主要有红树植物花粉、有机碳氮及其稳定同位素和三萜类化合物等生物标志物, 应进一步发掘其联合示踪潜力, 例如将有机碳稳定同位素与蒲公英萜醇指标相结合定量构建 MOC 从而重建红树林演化史^[40], 进一步探索不同萜醇种类组合在反映红树林群落组成研究中的功能; 另外, 遥感技术作为一种便捷的调查和监测红树林生态系统的方法已成为共识, 但不能仅局限于红树林面积和范围的测绘, 还应朝

着解决生物物理参数反演和生态系统过程表征等科学问题的方向发展^[96-97]。

(2)重视全新世气候适宜期高分辨率红树林演化研究。全新世气候适宜期通常是指全新世早期至中期最温暖和湿润的时期,被认为是与21世纪气候最为相似的时期^[98-99],已有研究表明,7300~6700 cal.aBP期间的海平面平均上升速率(3.7 mm/a)与我国近40年沿海海平面的上升速率(3.4 mm/a)相当^[100],因此,研究这一时期红树林的高分辨率演化及其对环境变化的响应可为预测未来全球变暖背景下红树林的命运提供“以古论今”的新思路。

(3)关注气候变化特别是极端气候事件对红树林演化的影响。尽管海平面与红树林动态之间的关系备受关注,但自然状态下红树林有足够的适应能力适应目前海平面上升的步伐^[12,83],随着红树林保护意识的增强,人类活动导致的红树林损失率也逐步下降,但值得注意的是,极端天气和气候事件的强度和频率却在全球范围内不断增加^[101],对红树林生态系统造成巨大威胁。2008年我国南方遭遇特大寒潮,致使广西红树林植物出现了衰退甚至死亡,防城港人工种植的十年生红海榄幼树更是无一幸存^[58]。红树林沉积记录亦显示即使在气候暖湿的全新世气候适宜期,广西钦州湾也因冬季风增强发生了频率为50a/次的红树林高频衰退事件^[34];无独有偶,在邻近的雷州半岛珊瑚礁,也记录了同期9次冬季冷事件导致的珊瑚“冷白化”死亡事件^[102]。因此,有必要深化气候变化特别是极端气候事件对红树林动态影响的认识,从而为全球变化背景下红树林的保护和修复提供信息。

致谢:感谢海洋负排放国际大科学计划(Ocean Negative Carbon Emissions Program)的支持。

参考文献 (References)

- [1] Giri C, Ochieng E, Tieszen L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154-159.
- [2] Duke N C, Meynecke J O, Dittmann S, et al. A world without mangroves?[J]. *Science*, 2007, 317(5834): 41-42.
- [3] Lee S Y, Primavera J H, Dahdouh-Guebas F, et al. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(7): 726-743.
- [4] Himes-cornell A, Grose S O, Pendleton L. Mangrove ecosystem service values and methodological approaches to valuation: where do we stand?[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 376.
- [5] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. Blue Carbon: the Role of Healthy Oceans in Binding Carbon[M]. United Nations Environment Programme, Arendal, Norway, 2009: 11-65.
- [6] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(11): 961-968.
- [7] Alongi D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6: 195-219.
- [8] Lovelock C E, Reef R. Variable impacts of climate change on blue carbon[J]. *One Earth*, 2020, 3(2): 195-211.
- [9] Alongi D M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(1): 1-13.
- [10] Jennerjahn T C. Biogeochemical response of tropical coastal systems to present and past environmental change[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(1-2): 19-41.
- [11] Ellison J C. Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(2): 115-137.
- [12] 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.
- [13] Woodroffe C D, Rogers K, McKee K L, et al. Mangrove sedimentation and response to relative sea-level rise[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2016, 8: 243-266.
- [14] Friess D A, Rogers K, Lovelock C E, et al. The state of the world's mangrove forests: past, present, and future[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2019, 44: 89-115.
- [15] Veettil B K, Ward R D, Quang N X, et al. Mangroves of Vietnam: historical development, current state of research and future threats[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 218: 212-236.
- [16] Ellison J C. Long-term retrospection on mangrove development using sediment cores and pollen analysis: a review[J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 93-104.
- [17] Rull V. Rise and fall of Caribbean mangroves[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163851.
- [18] Giri C. Observation and monitoring of mangrove forests using remote sensing: opportunities and challenges[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 783.
- [19] Caratini C, Bentalab I, Fontugne M, et al. A less humid climate since ca. 3500 yr B. P. from marine cores off Karwar, western India[J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 109(2-4): 371-384.
- [20] 王开发, 张玉兰, 李珍. 海滨红树林花粉与古环境研究进展 [J]. 地球科学进展, 1997, 12(6): 541-545. [WANG Kaifa, ZHANG Yulan, LI Zhen. Development of the study on paleoenvironment and coastal mangrove pollen[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12(6): 541-545.]
- [21] 张玉兰, 封卫青, 王开发, 等. 从海南岛全新世孢粉研究看海滨红树林的演化 [J]. 海洋学报, 2000, 22(3): 117-122. [ZHANG Yulan, FENG Weiqing, WANG Kaifa, et al. The evolution of mangrove forest on the basis of palynological study of Holocene in Hainan Is-

- land[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(3): 117-122.]
- [22] Versteegh G J M, Schefuß E, Dupont L, et al. Taraxerol and *Rhizophora* pollen as proxies for tracking past mangrove ecosystems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(3): 411-422.
- [23] Li Z. Palynological assemblage and coastal evolution within the last hundred years in Guangxi, China[J]. *Quaternary International*, 2012, 279-280: 278-279.
- [24] Guimarães J T F, Cohen M C L, Pessenda L C R, et al. Mid- and late-Holocene sedimentary process and palaeovegetation changes near the mouth of the Amazon River[J]. *The Holocene*, 2012, 22(3): 359-370.
- [25] França M C, Alves I C C, Castro D F, et al. A multi-proxy evidence for the transition from estuarine mangroves to deltaic freshwater marshes, Southeastern Brazil, due to climatic and sea-level changes during the late Holocene[J]. *Catena*, 2015, 128: 155-166.
- [26] Cohen M C L, Lara R J, Cuevas E, et al. Effects of sea-level rise and climatic changes on mangroves from southwestern littoral of Puerto Rico during the middle and late Holocene[J]. *CATENA*, 2016, 143: 187-200.
- [27] Wooller M, Smallwood B, Scharler U, et al. A taphonomic study of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in *Rhizophora* mangle leaves for a multi-proxy approach to mangrove palaeoecology[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(9): 1259-1275.
- [28] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1-4): 29-57.
- [29] Tue N T, Hamaoka H, Sogabe A, et al. The application of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios as indicators of organic carbon sources and paleoenvironmental change of the mangrove ecosystem from Ba Lat Estuary, Red River, Vietnam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(5): 1475-1486.
- [30] Thimdee W, Deen G, Sangrungruang C, et al. Sources and fate of organic matter in Khung Krabaen Bay (Thailand) as traced by $\delta^{13}\text{C}$ and C/N atomic ratios and C/N atomic ratios[J]. *Wetlands*, 2003, 23(4): 729-738.
- [31] Xia P, Meng X W, Zhang Y, et al. The potential of mangrove-derived organic matter in sediments for tracing mangrove development during the Holocene[J]. *Estuaries and Coasts*, 2021, 44(4): 1020-1035.
- [32] Xia P, Meng X W, Li Z, et al. Mangrove development and its response to environmental change in Yingluo Bay (SW China) during the last 150 years: stable carbon isotopes and mangrove pollen[J]. *Organic Geochemistry*, 2015, 85: 32-41.
- [33] Meng X W, Xia P, Li Z, et al. Mangrove degradation and response to anthropogenic disturbance in the Maowei Sea (SW China) since 1926 AD: mangrove-derived OM and pollen[J]. *Organic Geochemistry*, 2016, 98: 166-175.
- [34] Zhang Y, Meng X W, Xia P, et al. High-frequency mangrove degradation events during the Holocene climatic optimum in the Maowei Sea of tropical China[J]. *Journal of Sea Research*, 2023, 194: 102390.
- [35] Koch B P, Souza Filho P W M, Behling H, et al. Triterpenols in mangrove sediments as a proxy for organic matter derived from the red mangrove (*Rhizophora mangle*)[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(1): 62-73.
- [36] Williams L A D. *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae) triterpenoids with insecticidal activity[J]. *Naturwissenschaften*, 1999, 86(9): 450-452.
- [37] Koch B P, Rullkötter J, Lara R J. Evaluation of triterpenols and sterols as organic matter biomarkers in a mangrove ecosystem in northern Brazil[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2003, 11(4): 257-263.
- [38] Xu Y P, Holmes C W, Jaffé R. Paleoenvironmental assessment of recent environmental changes in Florida Bay, USA: a biomarker based study[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73(1-2): 201-210.
- [39] He D, Nemiah ladd S, Park J, et al. Carbon and hydrogen isotopes of taraxerol in mangrove leaves and sediment cores: implications for paleo-reconstructions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 324: 262-279.
- [40] Chu M F, Sachs J P, Peng P, et al. Temporal variations of mangrove-derived organic carbon storage in two tropical estuaries in Hainan, China since 1960 CE[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 627: 111726.
- [41] Basyuni M, Oku H, Baba S, et al. Isoprenoids of Okinawan mangroves as lipid input into estuarine ecosystem[J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(4): 601-608.
- [42] 张道来, 王许玲, 姜学钧, 等. 超声提取/气相色谱-质谱法测定红树林沉积物中蒲公英萜醇 [J]. *分析测试学报*, 2015, 34(6): 658-663. [ZHANG Daolai, WANG Xuling, JIANG Xuejun, et al. Determination of Taraxerol in mangrove sediments by GC-MS with ultrasonic extraction[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2015, 34(6): 658-663.]
- [43] Dittmar T, Lara R J, Kattner G. River or mangrove? Tracing major organic matter sources in tropical Brazilian coastal waters[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 73(3-4): 253-271.
- [44] Andersson A. A systematic examination of a random sampling strategy for source apportionment calculations[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 412-413: 232-238.
- [45] Andersson A, Deng J J, Du K, et al. Regionally-varying combustion sources of the January 2013 severe haze events over eastern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4): 2038-2043.
- [46] Yu M, Eglinton T I, Haghipour N, et al. Contrasting fates of terrestrial organic carbon pools in marginal sea sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 309: 16-30.
- [47] Wu Y, Eglinton T I, Zhang J, et al. Spatiotemporal variation of the quality, origin, and age of particulate organic matter transported by the Yangtze river (Changjiang)[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(9): 2908-2921.
- [48] Kaiser D, Unger D, Qiu G L. Particulate organic matter dynamics in coastal systems of the northern Beibu Gulf[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 82: 99-118.
- [49] Herbeck L S, Unger D, Krumme U, et al. Typhoon-induced precipitation impact on nutrient and suspended matter dynamics of a tropical

- estuary affected by human activities in Hainan, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(4): 375-388.
- [50] Khan N S, Vane C H, Engelhart S E, et al. The application of $\delta^{13}\text{C}$, TOC and C/N geochemistry of mangrove sediments to reconstruct Holocene paleoenvironments and relative sea levels, Puerto Rico[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105963.
- [51] Sasmito S D, Kuzyakov Y, Lubis A A, et al. Organic carbon burial and sources in soils of coastal mudflat and mangrove ecosystems[J]. *CATENA*, 2020, 187: 104414.
- [52] Yu F L, Zong Y Q, Lloyd J M, et al. Bulk organic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 87(4): 618-630.
- [53] Zhang Y, Meng X W, Bai Y Z, et al. Sources and features of particulate organic matter in tropical small mountainous rivers (SW China) under the effects of anthropogenic activities[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107471.
- [54] He B, Dai M, Huang W, et al. Sources and accumulation of organic carbon in the Pearl River Estuary surface sediment as indicated by elemental, stable carbon isotopic, and carbohydrate compositions[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(10): 3343-3362.
- [55] 杨国欢, 侯秀琼, 孙省利, 等. 流沙湾食物网结构的初探: 基于稳定同位素方法的分析结果 [J]. *水生生物学报*, 2013, 37(1): 150-156. [YANG Guohuan, HOU Xiuqiong, SUN Xingli, et al. Construction food web model of Liusha Bay-using stable isotope analysis results[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(1): 150-156.]
- [56] Kwan K Y, Bopp J, Huang S Y, et al. Ontogenetic resource use and trophic dynamics of endangered juvenile *Tachypleus tridentatus* among diversified nursery habitats in the northern Beibu Gulf, China[J]. *Integrative Zoology*, 2021, 16(6): 908-928.
- [57] Ricklefs R E, Schwarzbach A E, Renner S S, et al. Rate of lineage origin explains the diversity anomaly in the world's mangrove vegetation[J]. *The American Naturalist*, 2006, 168(6): 805-810.
- [58] 范航清, 陆露, 阎冰. 广西红树林演化史与研究历程 [J]. *广西科学*, 2018, 25(4): 343-351. [FAN Hangqing, LU Lu, YAN Bing. Evolution history and research processes of Guangxi mangroves[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(4): 343-351.]
- [59] Srivastava J, Prasad V. Evolution and paleobiogeography of mangroves[J]. *Marine Ecology*, 2019, 40(6): e12571.
- [60] He Z W, Feng X, Chen Q P, et al. Evolution of coastal forests based on a full set of mangrove genomes[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(6): 738-749.
- [61] Lambeck K, Rouby H, Purcell A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(43): 15296-15303.
- [62] Duke N C. Genetic diversity, distributional barriers and rafting continents—more thoughts on the evolution of mangroves[J]. *Hydrobiologia*, 1995, 295(1-3): 167-181.
- [63] Licht A, Boura A, De Franceschi D, et al. Late middle Eocene fossil wood of Myanmar: Implications for the landscape and the climate of the Eocene Bengal Bay[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, 216: 44-54.
- [64] Grant K M, Rohling E J, Ramsey C B, et al. Sea-level variability over five glacial cycles[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5076.
- [65] Woodroffe C D, Thom B G, Chappell J. Development of widespread mangrove swamps in mid-Holocene times in northern Australia[J]. *Nature*, 1985, 317(6039): 711-713.
- [66] Cohen M C L, Pessenda L C R, Behling H, et al. Holocene palaeoenvironmental history of the Amazonian mangrove belt[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 55: 50-58.
- [67] Hait A K, Behling H. Holocene mangrove and coastal environmental changes in the western Ganga-Brahmaputra Delta, India[J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2009, 18(2): 159-169.
- [68] Setyaningsih C A, Biagioni S, Saad A, et al. Response of mangroves to late Holocene sea-level change: palaeoecological evidence from Sumatra, Indonesia[J]. *Wetlands*, 2019, 39(5): 1103-1118.
- [69] Ellison J C, Stoddart D R. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications[J]. *Journal of Coastal Research*, 1991, 7(1): 151-165.
- [70] Proske U. Holocene freshwater wetland and mangrove dynamics in the eastern Kimberley, Australia[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2016, 31(1): 1-11.
- [71] Cordero-oviedo C, Correa-metrio A, Urrego L E, et al. Holocene establishment of mangrove forests in the western coast of the Gulf of Mexico[J]. *CATENA*, 2019, 180: 212-223.
- [72] Aragón-moreno A A, Islebe G A, Torrescano-valle N, et al. Middle and late Holocene mangrove dynamics of the Yucatan Peninsula, Mexico[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2018, 85: 307-311.
- [73] Decker V, Falkenroth M, Lindauer S, et al. Collapse of Holocene mangrove ecosystems along the coastline of Oman[J]. *Quaternary Research*, 2021, 100: 52-76.
- [74] Smith C B, Cohen M C L, Pessenda L C R, et al. Holocenic proxies of sedimentary organic matter and the evolution of Lake Arari-Amazon Region[J]. *CATENA*, 2012, 90: 26-38.
- [75] Meng X W, Xia P, Li Z, et al. Mangrove Development and Its Response to Asian Monsoon in the Yingluo Bay (SW China) over the Last 2000 years[J]. *Estuaries and Coasts*, 2017, 40(2): 540-552.
- [76] Xu Y Q, Li P, Liu J, et al. Response of mangrove development to paleoclimate variation over the past 3, 550 years in Phang Nga Province, Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 262: 106003.
- [77] Limaye R B, Kumaran K P N. Mangrove vegetation responses to Holocene climate change along Konkan coast of south-western India[J]. *Quaternary International*, 2012, 263: 114-128.
- [78] Zhang Y, Meng X W, Xia P, et al. Response of mangrove development to air temperature variation over the past 3000 years in Qinzhou Bay, tropical China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 678189.
- [79] Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, et al. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 842-867.
- [80] Syvitski J, Waters C N, Day J, et al. Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950

- CE initiated the proposed Anthropocene Epoch[J]. *Communications Earth & Environment*, 2020, 1(1): 32.
- [81] Crutzen P J, Stoermer E F. The ‘Anthropocene’ (2000)[M]/Benner S, Lax G, Crutzen P J, et al. Paul J. Crutzen and the Anthropocene: A New Epoch in Earth’s History. Cham: Springer, 2021: 19-21.
- [82] Miller K G, Schmelz W J, Browning J V, et al. Ancient sea level as key to the future[J]. *Oceanography*, 2020, 33(2): 32-41.
- [83] Saintilan N, Khan N S, Ashe E, et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise[J]. *Science*, 2020, 368(6495): 1118-1121.
- [84] Bozi B S, Figueiredo B L, Rodrigues E, et al. Impacts of sea-level changes on mangroves from southeastern Brazil during the Holocene and Anthropocene using a multi-proxy approach[J]. *Geomorphology*, 2021, 390: 107860.
- [85] Yao Q, Cohen M, Liu K B, et al. Mangrove expansion at poleward range limits in North and South America: Late-Holocene climate variability or Anthropocene global warming?[J]. *Catena*, 2022, 216: 106413.
- [86] Cavanaugh K C, Kellner J R, Forde A J, et al. Poleward expansion of mangroves is a threshold response to decreased frequency of extreme cold events[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(2): 723-727.
- [87] Rodrigues E, Cohen M C L, Pessenda L C R, et al. Poleward mangrove expansion in South America coincides with MCA and CWP: a diatom, pollen, and organic geochemistry study[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 288: 107598.
- [88] Hapsari K A, Jennerjahn T C, Lukas M C, et al. Intertwined effects of climate and land use change on environmental dynamics and carbon accumulation in a mangrove-fringed coastal lagoon in Java, Indonesia[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1414-1431.
- [89] Punwong P, Sritrairat S, Selby K, et al. An 800 year record of mangrove dynamics and human activities in the upper Gulf of Thailand[J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2018, 27(4): 535-549.
- [90] Xia P, Meng X W, Yin P, et al. Eighty-year sedimentary record of heavy metal inputs in the intertidal sediments from the Nanliu River estuary, Beibu Gulf of South China Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 92-99.
- [91] Frederikse T, Landerer F, Caron L, et al. The causes of sea-level rise since 1900[J]. *Nature*, 2020, 584(7821): 393-397.
- [92] 黄雪松, 周惠文, 黄梅丽, 等. 广西近 50 年来气温、降水气候变化[J]. *广西气象*, 2005, 26(4): 9-11. [HUANG Xuesong, ZHOU Huiwen, HUANG Meili, et al. Guangxi temperature, precipitation climatic change in nearly 50 years[J]. *Journal of Guangxi Meteorology*, 2005, 26(4): 9-11.]
- [93] Hamilton S E, Casey D. Creation of a high spatio - temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC - 21)[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(6): 729-738.
- [94] Jia M M, Wang Z M, Mao D H, et al. Spatial-temporal changes of China’s mangrove forests over the past 50 years: An analysis towards the Sustainable Development Goals (SDGs)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(30): 3886-3901.
- [95] Murillo-Sandoval P J, Fatoyinbo L, Simard M. Mangroves cover change trajectories 1984-2020: the gradual decrease of mangroves in Colombia[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 892946.
- [96] Wang L, Jia M M, Yin D M, et al. A review of remote sensing for mangrove forests: 1956-2018[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111223.
- [97] Maurya K, Mahajan S, Chaube N. Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, 7(6): 2797-2818.
- [98] Goldsmith Y, Broecker W S, Xu H, et al. Northward extent of East Asian monsoon covaries with intensity on orbital and millennial timescales[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(8): 1817-1821.
- [99] Mendieta K L, Gerber S, Brenner M. Florida wildfires during the Holocene climatic optimum (9000-5000 cal yr BP)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2018, 60(1): 51-66.
- [100] 相文玺, 王慧, 李文善, 等. 2021 年中国沿海海平面变化及影响状况 [J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(4): 516-522. [XIANG Wenxi, WANG Hui, LI Wenshan, et al. Coastal sea level change and impacts in China: the state of 2021[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(4): 516-522.]
- [101] Bellprat O, Guemas V, Doblas-reyes F, et al. Towards reliable extreme weather and climate event attribution[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1732.
- [102] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(1-2): 143-155.