

海南常见红树植物叶片脂肪酸组成

杨睿尧^{1,2}, 谢丽梅³, 安文硕^{2,4}, 陈顺洋^{2,4}, 陈彬^{1,2,4}, 陈光程^{1,2,4*}

(1.上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2.自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005;
3.厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361005;
4.自然资源部北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西 北海 536015)

摘要:脂肪酸的组成分析对认识红树植物脂肪酸资源、红树林生态系统内部的营养关系、食物网的结构,以及红树植物对生境的适应等具有重要参考价值。本研究分析了海南岛铁炉港和清澜港两个港湾的红海榄(*Rhizophora stylosa*)、杯萼海桑(*Sonneratia alba*)、木果楝(*Xylocarpus granatum*)、角果木(*Ceriops tagal*)、榄李(*Lumnitzera racemosa*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)和正红树(*Rhizophora apiculata*)等 7 种不同红树植物叶片中脂肪酸的组成及含量。在样品中共检测出 25 种脂肪酸,其中月桂酸、棕榈酸和肉豆蔻酸等 8 种存在于所有样品中。样品中含量最高的饱和脂肪酸均为棕榈酸(占比 44.32%),其次为硬脂酸(占比 7.74%),不饱和脂肪酸含量较高的有油酸(占比 7.61%)、亚油酸(占比 9.81%)和二十碳烯酸(占比 12.16%)。植物样品的脂肪酸不饱和指数为 0.24~1.13。除木果楝和清澜港采集的木榄样品外,其余样品种的不饱和脂肪酸含量均低于饱和脂肪酸。铁炉港的红海榄、杯萼海桑、角果木和榄李 4 种植物叶片不饱和脂肪酸含量高于清澜港同一物种的,而木榄的不饱和脂肪酸含量则表现为清澜港高于铁炉港。脂肪酸组成上,木果楝和正红树在两个港湾的相似性高于其他红树植物,棕榈酸、二十碳烯酸和亚油酸是造成红树植物脂肪酸组成差异的主要组分。本研究的结果表明红树植物的脂肪酸组成与物种和区域有关,而热带地区红树植物可能具有不饱和脂肪酸含量低的特点。

关键词:海洋生物学;红树;叶片脂肪酸;特征脂肪酸;脂肪酸不饱和指数

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20220329001

中图分类号:P735

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2023)03-0434-08

分布在热带、亚热带地区潮间带的红树林通常会促进潮间带生境的复杂性和多样性,为诸多生物提供栖息和觅食的环境,为各种生物的生存繁衍提供了物质基础,维持着与其密切相关的底栖动物群落和生物多样性^[1]。脂肪酸是植物细胞重要的组成部分,其组成与植物自身的生理功能密切相关,在不同物种和地理区域表现出明显的差异^[2-3]。脂肪酸在动物摄食过程中能够相对保守地同化至消费者体内,随着食物链传递至下一营养级,通过比较脂肪酸成分,能够反映一段时间内动物的摄食情况^[4]。一些学者也指出,红树植物体内多不饱和脂肪酸种类多,含有较多人体和动物必需的脂肪酸,是潜在的

脂肪酸资源^[5-6]。因此脂肪酸的组成分析对认识红树植物脂肪酸资源、红树林生态系统内部的营养关系、食物网的结构,以及红树植物对生境的适应等具有重要参考价值^[7]。

目前我国针对秋茄(*Kandelia obovata*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)等广布种开展了植物体脂肪酸的研究^[5,8-10],但总体上研究仍有限,对于热带地区红树物种的脂肪酸组成及差异的报道较少。本研究比较了我国海南三亚铁炉港和文昌清澜港常见红树植物叶片脂肪酸的组成,分析植物叶片脂肪酸在物种和区域之间的差异,以期丰富红树植

收稿日期:2022-03-29
资助项目:福建省自然科学基金(2020J06030);国家自然科学基金(42176171);自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费(海三科2020017)
作者简介:杨睿尧(1995—),男,硕士研究生;E-mail: 551982331@qq.com
* 通讯作者:陈光程(1982—),男,博士,研究员;E-mail: gc.chen@tio.org.cn

物脂肪酸组成、资源利用潜力和生态学作用的信息。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究的植物样品采集自海南岛南部的三亚市铁炉港(18°15'N, 109°42'E)和东部的文昌市清澜港(19° 54'N,110° 84'E)。这两个港湾属于热带季风气候,三亚市的年均气温为 25.5 ℃,年均降水量为 1 738 mm;文昌市的年均气温为 24.1 ℃,年均降水量为 2 106 mm^[11-12]。铁炉港地貌上属沙坝-潟湖型港湾,潮汐为不规则日潮型;土壤以砂土、砂质粘土为主,多砂石及贝壳珊瑚碎屑^[13]。清澜港属潟湖潮汐通道港湾,潮汐为不规则日潮型,土壤以细砂、砂-粉砂-粘土为主^[14]。

1.2 植物样品采集与脂肪酸分析

本研究在铁炉港和清澜港分别采集红海榄(*Rhizophora stylosa*)、杯萼海桑(*Sonneratia alba*)、木果楝(*Xylocarpus granatum*)、角果木(*Ceriops tagal*)、榄李(*Lumnitzera racemosa*)、木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)和正红树(*Rhizophora apiculata*)等 7 种植物的叶片。随机采集红树植株上的成熟叶片,在每株植物上采集 3~5 片成熟叶片合并为 1 份样品,每个物种采集 3 份样品。样品运回实验室后用蒸馏水洗净,于-40 ℃冷冻干燥后研磨待测。

本研究中脂肪酸的表达式写为 CA:BnXt 或 CA:BnXc,A 表示脂肪酸碳链的碳数,B 表示双键的数量,X 表示第一个双键离甲基端的碳数,t 表示反式脂肪酸,c 表示顺式脂肪酸。碳链中含一个双键的脂肪酸为单不饱和脂肪酸,含两个及以上双键的脂肪酸为多不饱和脂肪酸。脂肪酸的提取和测定参考崔莹^[15]和刘梦坛^[16]的方法进行改进。取 50 mg 样品,加入 C19:0 作为内标,用体积比为 2:1 的二氯甲烷与 0.01%BHT-甲醇混合液在 80 ℃水浴下加热 2 h 提取脂质,60 ℃水浴蒸干后加入 3 mL 甲醇和 1 mL 盐酸,50 ℃条件下水浴 4 h 进行甲酯化。结束后迅速冷却至室温,用正己烷萃取,样品定容至 1 mL。脂肪酸组成和含量用气相色谱仪测定,使用 HP88 色谱柱(60 m×0.25 mm×0.2 μm),柱箱初始温度为 100 ℃,以 10 ℃/min 程序升温至 210 ℃,保持 2 min,再以 1.5 ℃/min 程序升温至 240 ℃,保持 3 min。采用峰面积归一化法得到各种脂肪酸成分在样品中的含量占比情况。样品加标回收率为 70%~90%;脂肪酸含量检测限为 1.01 μg/mL。

1.3 数据处理

运用 SPSS 23.0 软件,对铁炉港和清澜港红树

植物样品中脂肪酸的含量在不同物种之间的差异进行单因素方差分析比较。基于样品的脂肪酸含量组成,在 Primer 软件中采用聚类分析对样品进行分组,再用相似性分析(One-way ANOSIM)和相似性百分比分析(Simper)检验植物样品处理组之间的相似性。不同植物样品中脂肪酸组成的差异用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)的多维度分析(OriginPro 2019b)。

2 结果与讨论

2.1 红树植物叶片脂肪酸种类组成

在铁炉港和清澜港采集的红树叶片中共检测到 25 种脂肪酸(表 1、2),铁炉港的植物样品中检测到 22 种,十五烷酸(C15:0)、亚麻酸(C18:3n3)和芥酸(C22:1)未检出;清澜港的样品中检测到 23 种,葵酸(C8:0)和二十碳五烯酸(C20:5)未检出。月桂酸(C12:0)、肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)、硬脂酸(C18:0)、油酸(C18:1n9c)、亚油酸(C18:2n6c)、二十碳烯酸(C20:1n9)和二十四烷酸(C24:0)等 8 种脂肪酸在所有样品中均有检测出。样品中共检测到 16 种饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA),不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)包括 5 种单不饱和脂肪酸(mono unsaturated fat acid, MUFA)和 4 种多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)。

所有脂肪酸中含量最高的是 SFA 中的 C16:0,在所有样品中占比均超过 30.00%(30.06%~60.68%),除铁炉港的红海榄外,样品中 C18:0(4.38%~12.05%)占比也高于其他饱和脂肪酸。含量较高的 UFA 有 C18:1n9c、C18:2n6c 和 C20:1n9。其中 C20:1n9 在木榄和木果楝中的占比均超过 20.00%。木果楝和清澜港的木榄样品中 C18:2n6c 的占比也超过 20.00%。脂肪酸不饱和指数(以 UFA/SFA 总含量比值表示)在 0.19~1.13 之间,木果楝和清澜港的木榄样品中脂肪酸不饱和指数大于 1。碳原子数小于 12 的脂肪酸只在木果楝和木榄中检测到,最短链脂肪酸为己酸(C6:0)。最长链脂肪酸为三十烷酸(C30:0),占比介于 0.46%~5.22%,铁炉港的正红树中未检测到,清澜港的红海榄和杯萼海桑中也未检出。

2.2 红树植物叶片脂肪酸含量比较

在两个港湾,相同的红树物种叶片所含脂肪酸数量和组成有所不同,其中 C16:0、C18:2n6c 和 C20:1n9 的变化较明显(表 1、2)。在脂肪酸的组成上,这 3 种脂肪酸为所有红树植物脂肪酸的主要组成。正红树、角果木和木果楝的 C16:0 含量在两个

表 1 海南铁炉港红树植物叶片脂肪酸组成及占比

Tab. 1 Fatty acid composition and proportion content of mangrove leave samples in Tielugang, Hainan

脂肪酸		占比/%						
		红海榄 (<i>Rhizophora stylosa</i>)	杯萼海桑 (<i>Sonneratia alba</i>)	木果楝 (<i>Xylocarpus granatum</i>)	角果木 (<i>Ceriops tagal</i>)	榄李 (<i>Lumnitzera racemosa</i>)	木榄 (<i>Brugiera gymnorrhiza</i>)	正红树 (<i>Rhizophora apiculata</i>)
饱和 脂肪酸	己酸 C6:0	—	—	2.07±0.07	—	—	—	—
	癸酸 C8:0	—	—	—	—	—	0.23±0.03	—
	月桂酸 C12:0	2.33±0.01 ^{ab}	2.44±0.27 ^a	1.48±0.44 ^{cd}	2.15±0.51 ^b	1.88±0.22 ^{bc}	1.33±0.54 ^d	1.62±0.40 ^{cd}
	十三烷酸 C13:0	0.53±0.01 ^d	2.49±0.07 ^a	1.48±0.20 ^b	1.11±0.01 ^{bc}	1.48±0.34 ^b	0.98±0.37 ^c	1.06±0.03 ^c
	肉豆蔻酸 C14:0	6.16±0.03 ^a	1.20±0.07 ^f	1.52±0.04 ^e	5.55±0.10 ^b	1.52±0.01 ^e	3.06±0.10 ^d	3.56±0.08 ^c
	棕榈酸 C16:0	49.89±0.52 ^a	38.10±0.41 ^c	32.04±0.78 ^d	44.88±0.75 ^b	38.92±3.19 ^c	46.41±4.11 ^{ab}	46.28±0.71 ^{ab}
	十七烷酸 C17:0	2.03±0.12 ^a	1.09±0.03 ^c	0.98±0.02 ^c	1.46±0.05 ^b	0.70±0.17 ^d	0.95±0.08 ^c	1.41±0.07 ^b
	硬脂酸 C18:0	5.90±0.29 ^b	5.01±0.41 ^b	4.28±0.27 ^b	7.42±0.44 ^b	10.68±4.70 ^a	6.08±0.43 ^b	6.62±0.54 ^b
	花生酸 C20:0	0.59±0.01 ^c	1.53±0.03 ^a	—	0.89±0.02 ^b	1.58±0.20 ^a	0.77±0.12 ^b	0.79±0.05 ^b
	二十一烷酸 C21:0	—	3.52±0.11	—	—	0.51±0.06	—	—
	山嵛酸 C22:0	0.75±0.01 ^c	2.00±0.02 ^a	0.68±0.08 ^c	0.81±0.01 ^c	1.48±0.20 ^b	0.49±0.07 ^d	0.73±0.02 ^c
	二十三烷酸 C23:0	1.13±0.35	—	—	—	0.90±0.27	—	—
	二十四烷酸 C24:0	1.32±0.02 ^a	0.74±0.01 ^b	0.88±0.26 ^b	1.28±0.03 ^a	1.27±0.17 ^a	1.03±0.25 ^{ab}	0.95±0.19 ^b
	二十六烷酸 C26:0	—	—	—	2.79±0.04	2.38±0.60	—	—
	三十烷酸 C30:0	1.76±0.05 ^b	1.30±0.43 ^b	2.39±0.38 ^a	2.78±0.02 ^a	1.77±0.17 ^b	1.36±0.14 ^b	—
不饱和 脂肪酸	肉豆蔻烯酸 C14:1	—	0.99±0.05	—	—	—	—	—
	棕榈油酸 C16:1	1.03±0.00 ^b	0.97±0.03 ^b	—	0.94±0.08 ^b	1.22±0.09 ^a	—	—
	油酸 C18:1n9c	9.87±0.30 ^b	8.59±0.17 ^c	5.81±0.31 ^d	10.83±0.24 ^a	8.09±1.28 ^c	4.71±0.43 ^c	9.55±0.05 ^b
	亚油酸 C18:2n6c	7.67±0.06 ^d	7.30±0.18 ^d	20.39±0.38 ^a	6.15±0.20 ^d	12.88±2.38 ^b	11.61±0.91 ^b	9.82±0.15 ^c
	二十碳烯酸 C20:1n9	8.87±0.02 ^e	16.36±0.28 ^c	24.04±0.63 ^a	7.80±0.24 ^e	13.43±2.38 ^d	20.66±2.43 ^b	16.17±0.44 ^c
	花生四烯酸 C20:4n6	—	6.14±0.16 ^a	1.40±0.38 ^b	0.84±0.05 ^c	0.51±0.02 ^c	—	0.58±0.04 ^c
	二十碳五烯酸 C20:5	—	—	0.45±0.03	0.97±0.02	—	—	—
	UFA/SFA 总含量比值	0.38±0.01	0.68±0.02	1.09±0.03	0.39±0.01	0.56±0.14	0.59±0.10	0.57±0.02
	偶数碳原子占比/%	96.15±0.48	92.68±0.39	97.43±0.62	96.09±0.13	97.61±1.99	97.76±0.44	96.6±0.05

注:“—”表示未检出;同一行上标字母不同表示不同物种叶片脂肪酸含量差异显著($P<0.05$),下表同。

表 2 海南清澜港红树植物叶片脂肪酸组成及占比

Tab. 2 Fatty acid composition and proportion content of mangrove leave samples in Qinglangang, Hainan

脂肪酸		占比/%						
		红海榄 (<i>Rhizophora stylosa</i>)	杯萼海桑 (<i>Sonneratia alba</i>)	木果楝 (<i>Xylocarpus granatum</i>)	角果木 (<i>Ceriops tagal</i>)	榄李 (<i>Lumnitzera racemosa</i>)	木榄 (<i>Brugiera gymnorrhiza</i>)	正红树 (<i>Rhizophora apiculata</i>)
饱和 脂肪酸	己酸 C6:0	—	—	1.42±0.29	—	—	1.48±0.15	—
	月桂酸 C12:0	1.62±0.11 ^{cd}	1.09±0.18 ^d	2.15±0.02 ^{bc}	3.31±0.06 ^a	2.57±0.92 ^b	2.36±0.10 ^b	1.67±0.09 ^{cd}
	十三烷酸 C13:0	0.75±0.07 ^b	—	—	1.15±0.11 ^a	—	1.17±0.02 ^a	1.06±0.18 ^a
	肉豆蔻酸 C14:0	4.78±0.30 ^b	1.91±0.07 ^c	1.67±0.07 ^c	6.08±0.10 ^a	4.24±0.27 ^c	1.72±0.05 ^c	3.60±0.41 ^d
	十五烷酸 C15:0	0.39±0.03	—	—	—	—	—	—
	棕榈酸 C16:0	60.68±1.79 ^a	53.88±0.73 ^b	30.60±0.72 ^c	45.31±1.43 ^d	46.30±0.64 ^{cd}	30.71±0.14 ^c	48.17±1.56 ^c
	十七烷酸 C17:0	1.67±0.22 ^b	1.73±0.49 ^b	1.14±0.28 ^b	10.21±1.38 ^a	—	1.19±0.36 ^b	1.52±0.20 ^b
	硬脂酸 C18:0	8.03±2.16 ^b	8.72±2.09 ^b	4.64±0.23 ^c	15.46±0.05 ^a	8.93±1.91 ^b	5.15±1.00 ^c	6.33±0.26 ^{bc}
	花生酸 C20:0	0.72±0.03 ^c	2.38±0.12 ^a	0.55±0.02 ^d	—	2.35±0.00 ^a	—	0.92±0.08 ^b
	二十一烷酸 C21:0	0.73±0.10	3.68±0.26	—	—	—	—	—
	山嵛酸 C22:0	0.66±0.06 ^c	2.43±0.05 ^b	0.75±0.03 ^c	—	3.14±0.03 ^a	0.74±0.13 ^c	0.78±0.09 ^c
	芥酸 C22:1n9	—	—	0.42±0.06 ^b	—	—	0.65±0.13 ^a	0.36±0.10 ^b
	二十三烷酸 C23:0	—	—	—	—	1.16±0.04	0.77±0.04	—
	二十四烷酸 C24:0	0.63±0.09 ^c	1.20±0.46 ^b	0.69±0.13 ^c	1.54±0.08 ^b	2.06±0.02 ^a	0.80±0.23 ^c	0.72±0.20 ^c
	二十六烷酸 C26:0	—	—	—	4.08±1.33	2.94±0.24	—	—
	三十烷酸 C30:0	—	—	2.28±1.14 ^b	3.04±1.20 ^b	5.22±0.66 ^a	2.53±0.13 ^b	0.46±0.10 ^c

续表

脂肪酸		占比/%						
		红海榄 (<i>Rhizophora stylosa</i>)	杯萼海桑 (<i>Sonneratia alba</i>)	木果楝 (<i>Xylocarpus granatum</i>)	角果木 (<i>Ceriops tagal</i>)	榄李 (<i>Lumnitzera racemosa</i>)	木榄 (<i>Brugiera gymnorhiza</i>)	正红树 (<i>Rhizophora apiculata</i>)
不饱和 脂肪酸	肉豆蔻烯酸 C14:1	—	—	0.43±0.14	—	—	—	—
	棕榈油酸 C16:1	0.30±0.08 ^b	0.65±0.13 ^b	—	1.59±0.51 ^a	—	—	—
	油酸 C18:1n9c	10.37±0.48 ^a	7.48±0.44 ^c	6.29±0.29 ^d	4.06±0.60 ^e	5.07±0.17 ^e	6.59±0.10 ^d	9.44±0.11 ^b
	亚油酸 C18:2n6c	3.38±0.18 ^c	6.51±0.60 ^b	22.43±0.24 ^a	3.60±0.91 ^c	7.45±0.30 ^b	22.87±0.71 ^a	6.79±0.02 ^b
	二十碳烯酸 C20:1n9	3.66±0.28 ^e	6.71±0.62 ^d	20.83±0.29 ^a	7.72±0.96 ^c	3.73±0.09 ^e	21.06±0.51 ^a	16.20±0.23 ^b
	亚麻酸 C18:3n3	—	1.12±0.21	—	—	3.62±0.14	—	—
	花生四烯酸 C20:4n6	0.85±0.18 ^b	—	1.35±0.30 ^a	—	1.23±0.14 ^a	0.68±0.03 ^b	—
UFA/SFA 总含量比值		0.24±0.01	0.29±0.03	1.13±0.02	0.19±0.02	0.27±0.01	1.07±0.05	0.50±0.01
偶数碳原子占比/%		95.6±0.84	94.08±1.78	96.51±0.34	95.80±1.46	98.85±0.86	97.34±1.03	95.4±1.02

港湾之间接近,红海榄和杯萼海桑的 C16:0 含量则表现为铁炉港低于清澜港。两个港湾木果楝的 C18:2n6c 和 C20: 1n9 含量也相似,木榄的 C20: 1n9 含量在两地之间也接近,而 C18:2n6c 含量在两地之间差异较大。除正红树、木果楝和木榄外,其他物种的饱和脂肪酸占比表现为清澜港显著高于铁炉港 ($P<0.05$,图 1)。清澜港和铁炉港红树植物脂肪酸含量也表现出不一样的种间差异。样品中 C16:0

含量在不同物种中的差异较大,两个港湾红海榄 C16:0 含量显著高于其他物种,木果楝的含量则最低。相反,木果楝中含有较高含量的 C18:2n6c 和 C20: 1n9(占比>20.00%),并且脂肪酸不饱和指数大于 1,表现出与其他物种不同的脂肪酸组成特征。木榄中的 C20: 1n9 占比在两港湾均超过 20.00%,但 C18:2n6c 的含量在清澜港和铁炉港之间存在差异。

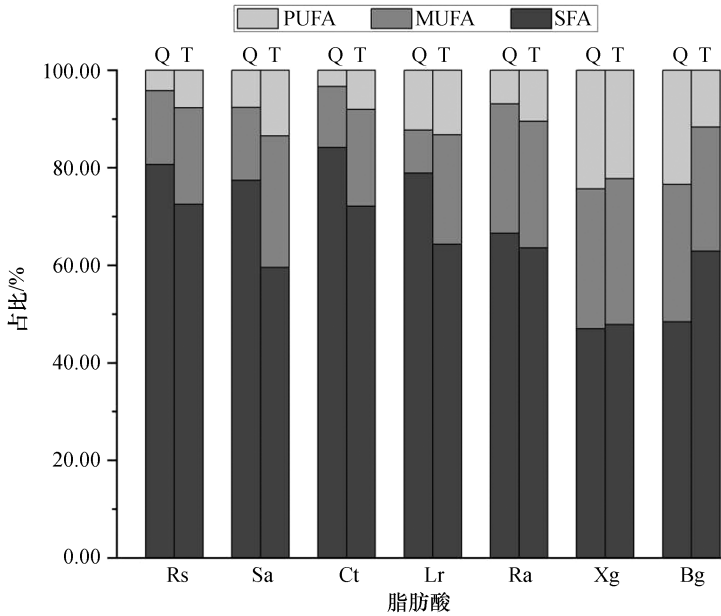


图 1 海南铁炉港和清澜港红树植物叶片脂肪酸中各类脂肪酸的占比

Fig. 1 Proportion of various fatty acids in the leaves of mangrove plants in Tielugang and Qinglangang, Hainan
PUFA:多不饱和脂肪酸, MUFA:单不饱和脂肪酸, SFA:饱和脂肪酸; Rs: 红海榄, Sa: 杯萼海桑, Ct: 角果木, Lr: 榄李, Ra: 正红树, Xg: 木果楝, Bg: 木榄; Q:清澜港, T:铁炉港,下同。

2.3 基于脂肪酸组成的树种差异和空间差异分析

红树叶片脂肪酸组成的聚类分析结果显示,红树植物脂肪酸组成因物种和采样地点而异(图 2),

在 7 种红树植物中,两个港湾样品中脂肪酸组成相似水平达 90%以上的只有木果楝和正红树两个物种,其他物种在两个采样区域表现出明显的差异。

基于聚类分析的结果,在相似性 71%水平下区分为 3 组进行 One-way ANOSIM 分析。结果表明,组 I 与组 II($R=0.434,P=0.012$)、组 I 与组 III($R=0.935,P=0.022$)之间存在显著差异。对 I、II 组之间差异性贡献最大的脂肪酸是 C16:0,其次是 C20:1n9 和 C18:2n6c;对 II、III 组之间差异性贡献最大的同样为 C16:0,其次是 C18:0、C18:1n9c 和 18:2n6c;对 I、III 组之间差异性贡献最大的则是 C20:1n9。

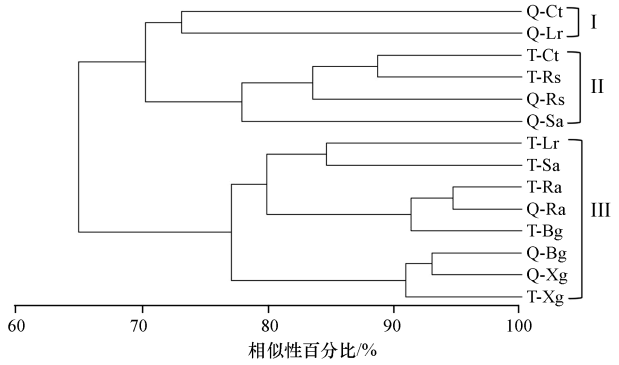


图 2 海南铁炉港和清澜港红树植物叶片脂肪酸组成的聚类分析结果

Fig. 2 Cluster analysis results of fatty acid composition of mangrove leaves collected from Tielugang and Qinglangang, Hainan

PCA 分析将红树植物的脂肪酸组成分为 4 组(图 3),两个港湾相同物种的脂肪酸组成上只有木果楝、正红树、红海榄和木榄处于相同分组,在相似性上两个港湾红海榄和木榄的相似程度低于木果楝和正红树,结果与聚类分析结果相似。对两个港湾其余物种 Simper 分析表明,造成各组内部物种之间差异贡献最大的脂肪酸是 C16:0(贡献率 35.47%~56.67%);C16:0 是造成组 4 与其他 3 组之间差异性贡献最大的脂肪酸(贡献率 12.43%~25.51%);C20:1n9 是造成 1、2 组与 2、3 组之间差异性贡献最大的脂肪酸(贡献率 21.94%、19.23%);1、3 组之间的差异性则由 18:2n6c 引起(贡献率 25.94%)。

2.4 讨论

本研究调查了海南三亚铁炉港和文昌清澜港 7 种红树植物叶片的脂肪酸组成及其差异。在样品中检测到 25 种脂肪酸,脂肪酸碳链长度集中在 C12~C20 之间,与前人对秋茄、桐花树、木榄、无瓣海桑等红树叶片脂肪酸的研究相一致^[8-10]。本次研究中红树植物脂肪酸以 C20 以下脂肪酸为主,其中 C20 脂肪酸含量低于 C16 和 C18 脂肪酸含量。植物脂肪酸的合成是乙酰辅酶 A 在乙酰辅酶 A 羧化酶和脂肪酸合成酶的共同作用下发生连续的聚合反应,最

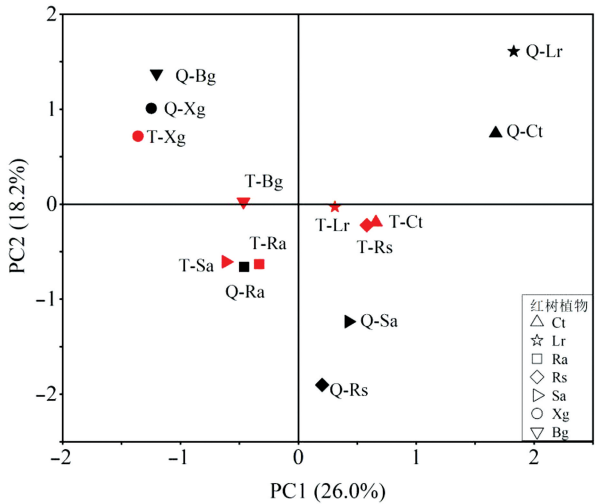


图 3 海南铁炉港和清澜港红树植物叶片的脂肪酸组成 PCA 分析结果

Fig. 3 PCA analysis results of fatty acid composition of the mangrove leaves collected from Tielugang and Qinglangang, Hainan
红色图形为铁炉港,黑色图形为清澜港。

终合成 C16 至 C18 的饱和脂肪酸,大多数高等植物脂肪酸碳链长度在 C18 以下^[2],由于普通高等植物缺少脂肪酸碳链延长的相关酶(如 Δ6 脂肪酸去饱和酶),所以高等植物 C18 以上的多不饱和脂肪酸含量较少^[17]。脂肪酸组成上,C16:0、C18:0、C18:1n9c、C18:2n6c 和 C20:1 在各样品中均有较高的含量,在所有样品中含量最高的 C16:0 已被证实为红树植物叶片脂肪酸组成中的主要成分。一些研究指出红树植物叶片中不饱和脂肪酸含量通常高于饱和脂肪酸含量^[5,10]。本研究则发现,除木果楝外的其他红树植物叶片脂肪酸的组成以饱和脂肪酸为主,木榄的不饱和脂肪酸含量在铁炉港和清澜港之间也存在明显的差异,说明红树植物脂肪酸的组成上因地区和物种等因素而异。这种差异在以往的研究中也被报道,例如,珠海淇澳岛的木榄样品中饱和脂肪酸含量低于不饱和脂肪酸,但湛江特呈岛的饱和脂肪酸含量可达到不饱和脂肪酸的两倍^[10]。除物种和地理因素外,谢丽梅等发现,红树叶片衰老和腐烂后脂肪酸不饱和指数出现明显的变化^[18]。

由于生物体自身代谢水平的差异,一些生物类群会合成特异性的脂肪酸种类或是趋向于较多地合成某几种脂肪酸,这些脂肪酸就是该生物类群的特征脂肪酸^[2]。在滨海湿地植物中,碳链长度大于 24 的脂肪酸被认定为红树植物的特征脂肪酸而被广泛用于指示红树植物对海洋动物的食物供给^[7]。红树植物的特征脂肪酸组成存在明显的种间差异和区

域差异,其长链脂肪酸的组成和含量存在很大的不确定性,在一些物种中存在两种及以上的长链脂肪酸,但一些物种中甚至未能检测到长链脂肪酸^[8-10]。本研究中红树植物的特征脂肪酸组成也表现出种间和区域间的差异;清澜港的红海榄和杯萼海桑,以及铁炉港的正红树中未检测出特征脂肪酸。因此,采用脂肪酸示踪研究红树林动物食源时,需根据植物脂肪酸的组成选择特征脂肪酸,并结合胃含物分析和稳定同位素示踪等方法提高结果的准确性^[7]。

除自身的遗传特性决定外,植物体内脂肪酸组成也受多种环境因素的影响^[19]。低温、光照、病害和盐度等环境因素对植物不饱和脂肪酸的合成有一定的调控作用^[20]。由于植物脂肪酸组成与植物细胞膜的结构和功能密切相关,不饱和脂肪酸含量增加则会提高膜的流动性,提高植物对环境的抗逆性和适应性^[21]。本研究中 C18:1n9c、C18:2n6c 和 C20:1 是造成不同红树物种之间差异性的主要脂肪酸,铁炉港和清澜港红树叶片中不饱和脂肪酸的含量也存在差异,除木果楝和木榄外其他物种总体上表现出清澜港低于铁炉港。光照时长和气温可能是造成两个研究区域之间红树叶片脂肪酸组成差异的因素。三亚年日照时长(2 500 h)高于文昌(1 800 h)^[14]。光照时长已被证实会使植物脂肪酸的含量和组成产生明显差异,随着光照时间的延长,不饱和脂肪酸如 C18:1n9c 的占比增加^[22-23]。植物的脂肪酸不饱和指数与植物对温度的适应性密切相关^[24],低温能够诱导植物中脂肪酸的去饱和相关酶表达,使脂肪酸不饱和指数升高,提高植物的耐寒性^[25-26]。本研究样品采集于低纬度的热带地区,这

些植物叶片的脂肪酸不饱和指数总体上低于其他地区报道的秋茄、桐花树、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)等物种的结果^[5,10],说明这些红树林物种的地理分布可能与它们体内脂肪酸不饱和指数关系密切。以红海榄为例,其脂肪酸不饱和指数在福建九龙江口和广东湛江(特呈岛)分别为1.12和0.76^[5,27],在清澜港和铁炉港则分别为0.38和0.24,总体上随纬度降低而降低。在环境温度的变化中能否调节体内脂肪酸组成的能力也关系着植物对低温条件的适应性^[28],因此,我们推测一些红树林广布种可能具有较强的脂肪酸调控能力以适应不同的气温条件,但还需要进一步的验证。

3 结论

本研究结果表明,海南三亚铁炉港和文昌清澜港7种红树植物的脂肪酸以偶数碳原子脂肪酸为主,其中C16:0在所有植物中含量最高,红树植物中存在C26:0和C30:0等特征脂肪酸。不同红树物种之间脂肪酸的组成不同,除木榄和正红树外的其他红树植物的脂肪酸在两个区域之间也存在差异,这些差异主要归因于植物叶片中C16:0、C18:1n9c和C18:2n6c含量的变化。总体上,铁炉港红树植物中不饱和脂肪酸占比高于清澜港,但两地的红树植物中脂肪酸不饱和指数较低,可能与温度和光照时长等环境因素有关。因此,脂肪酸的组成可应用于红树植物对环境因素生理响应的研究,而不同物种在其适宜分布的地理区域内对环境适应性的差异、脂肪酸组成是否反映热带地区的植物种源北移的抗寒性等问题还需要进一步探索。

参考文献:

- [1] 陈光程,余丹,叶勇,等.红树林植被对大型底栖动物群落的影响[J].生态学报,2013,33(2):327-336.
CHEN G C, YU D, YE Y, et al. Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 327-336.
- [2] 李昌珠,李正茂.植物脂肪酸的生物合成及其生理功能的研究进展[J].湖南林业科技,2009,36(6):45-49.
LI C Z, LI Z M. Advance of research on biosynthesis and physiological function of plant fatty acids[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2009, 36(6): 45-49.
- [3] 许玉兰,蔡年辉,吴裕,等.几种风吹楠属植物脂肪酸成分分析[J].中国油脂,2012,37(5):80-82.
XU Y L, CAI N H, WU Y, et al. Fatty acid composition analysis of several plants of *Horsfieldia*[J]. China Oils and Fats, 2012, 37(5): 80-82.
- [4] OLSEN Y. Lipids and essential fatty acids in aquatic food webs: what can freshwater ecologists learn from mariculture[M]//ARTS M T, WAINMAN B C. Lipids in freshwater ecosystems. New York: Springer, 1999: 161-202.
- [5] 卢昌义,林良牧,汪和海.红树植物叶片中脂肪酸组成及其资源价值[J].厦门大学学报(自然科学版),1997,36(3):454-459.
LU C Y, LIN L M, WANG H H. Composition of fatty acids in mangrove leaves and their worth as natural resources[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1997, 36(3): 454-459.
- [6] 范润珍,林宏图,宋文东,等.气相色谱-质谱联用法测定红树科植物木榄叶中脂肪酸[J].理化检验-化学分册,2009,45(12):1 448-1 450.
FAN R Z, LIN H T, SONG W D, et al. Determination of fatty acids in mangrove leaves of *Brugiera gymnorhiza* by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Analysis), 2009, 45(12): 1 448-1 450.
- [7] GUO F, LEE S Y, KAINZ M J, et al. Fatty acids as dietary biomarkers in mangrove ecosystems: current status and future perspective[J]. Science

- of the Total Environment, 2020, 739: 139907.
- [8] 林海生, 宋文东, 吴婕, 等. 无瓣海桑叶子和果实中脂肪酸成分的检测分析[J]. 福建分析测试, 2009, 18(3): 5-9.
LIN H S, SONG W D, WU J, et al. Analysis of fatty acids components in the leaves and gains of *Sonneratia apetala*[J]. Fujian Analysis & Testing, 2009, 18(3): 5-9.
- [9] 宋文东, 王浩, 张夏娟. 气相色谱-质谱测定红树植物桐花树叶中的挥发油和脂肪酸的组成[J]. 分析试验室, 2007(增刊 1): 353-356.
SONG W D, WANG H, ZHANG X J. Determination of volatile oil and fatty acid composition in mangrove plant *Aegiceras corniculatum* leaves by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2007(S1): 353-356.
- [10] 黄飘平, 崔志民, 唐以杰, 等. 珠海淇澳岛几种红树植物叶片脂肪酸组成比较分析[J]. 现代农业科技, 2019(15): 137-140.
HUANG P P, CUI Z M, TANG Y J, et al. Comparative analysis on leaf fatty acid composition of leaves of several mangrove plants in Qi'ao Island of Zhuhai[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(15): 137-140.
- [11] 李鹏飞. 海南岛旅游气候资源及其影响力评价[D]. 海口: 海南师范大学, 2013.
LI P F. Evaluation on climate resource for tourism and its influence in Hainan Island[D]. Haikou: Hainan Normal University, 2013.
- [12] 涂志刚, 吴瑞, 张光星, 等. 海南岛清澜港红树植物群落类型及其特征[J]. 热带农业科学, 2015, 35(11): 21-25.
TU Z G, WU R, ZHANG G X, et al. Types and characteristics of mangrove plants in Qinglan Harbour in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2015, 35(11): 21-25.
- [13] 唐宪, 曾德华, 郁培义, 等. 浅析铁炉港红树林保护区潮间带生物多样性[J]. 热带林业, 2017, 45(1): 31-34.
TANG X, ZENG D H, YU P Y, et al. Analysis on the biodiversity of mollusk fauna in Tielu Harbor, Hainan[J]. Tropical Forestry, 2017, 45(1): 31-34.
- [14] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第十一分册: 海南省海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
China Gulf Chronicles Compilation Committee. China gulf chronicle: volume 11: Hainan gulf[M]. Beijing: Ocean Publishing, 1999.
- [15] 崔莹. 基于稳定同位素和脂肪酸组成的中国近海生态系统物质流动研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
CUI Y. Study on the carbon flow within the estuarine ecosystem in China based on stable isotopes and fatty acid composition[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [16] 刘梦坛. 脂肪酸标记在黄海生态系统营养关系研究中的指示作用[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
LIU M T. Study on the trophic relationship in the Yellow Sea ecosystem using fatty acid markers[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [17] 曹福亮, 王欢利, 郁万文, 等. 高等植物脂肪酸去饱和酶及编码基因研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 125-132.
CAO F L, WANG H L, YU W W, et al. Progress of research on fatty acid desaturase and their coding genes in higher plant[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science), 2012, 36(2): 125-132.
- [18] 谢丽梅, 吴志强, 陈彬, 等. 不同状态红树和盐沼植物样品的脂肪酸组成比较研究[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(4): 614-621.
XIE L M, WU Z Q, CHEN B, et al. Comparison of fatty acid compositions between mangrove and salt marsh plants in different stages[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(4): 614-621.
- [19] UPCHURCH R G. Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress[J]. Biotechnology Letters, 2008, 30(6): 967-977.
- [20] 刘文献, 刘志鹏, 谢文刚, 等. 脂肪酸及其衍生物对植物逆境胁迫的响应[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1 556-1 565.
LIU W X, LIU Z P, XIE W G, et al. Responses of fatty acid and its derivatives to stress in plants[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(8): 1 556-1 565.
- [21] LI H, LI X, ZHANG D, et al. Effects of drought stress on the seed germination and early seedling growth of the endemic desert plant *Eremosparton songoricum*(Fabaceae)[J]. EXCLI Journal, 2013, 12: 89-101.
- [22] TRÉMOLIÈRES A, LEPAGE M. Changes in lipid composition during greening of etiolated pea seedlings[J]. Plant Physiology, 1971, 47(2): 329-334.
- [23] GREGORINI P, SODER K J, SANDERSON M A. A snapshot in time of fatty acids composition of grass herbage as affected by time of day[J]. The Professional Animal Scientist, 2008, 24(6): 675-680.
- [24] 赵金梅, 周禾, 孙启忠, 等. 植物脂肪酸不饱和和性对植物抗寒性影响的研究[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 129-134.
ZHAO J M, ZHOU H, SUN Q Z, et al. Study on the influence of plant fatty acid desaturation on cold tolerance[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(9): 129-134.
- [25] 王利民, 符真珠, 高杰, 等. 植物不饱和脂肪酸的生物合成及调控[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(1): 254-258.
WANG L M, FU Z Z, GAO J, et al. Molecular mechanism of unsaturated fatty acids synthesis and regulation in plant[J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(1): 254-258.
- [26] WATANABE K, OURA T, SAKAI H, et al. Yeast $\Delta 12$ fatty acid desaturase: gene cloning, expression, and function[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2004, 68(3): 721-727.
- [27] 宋文东, 郭先霞, 奚旦立. 红树植物红海榄脂肪酸的 GC-MS 分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 15(5): 447-449.
SONG W D, GUO X X, XI D L. GC-MS analysis of fatty acids in mangrove plant *Rhizophora stylosa*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2007, 15(5): 447-449.
- [28] 杨亚军, 郑雷英, 王新超. 低温对茶树叶片膜脂脂肪酸和蛋白质的影响[J]. 亚热带植物科学, 2005, 34(1): 5-9.
YANG Y J, ZHENG L Y, WANG X C. Changes of membrane fatty acid composition and protein in tea leaves at low temperature[J]. Subtropical

Plant Science, 2005, 34(1): 5-9.

Leaf fatty acid composition of common mangrove species in Hainan

YANG Ruiyao^{1,2}, XIE Limei³, AN Wenshuo^{2,4}, CHEN Shunyang^{2,4},
CHEN Bin^{1,2,4}, CHEN Guangcheng^{1,2,4*}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China;

3. College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

4. Department of Natural Resources Beibu Gulf Coastal Wetland Ecosystem Field Scientific Observation
and Research Station, Beihai 536015, China)

Abstract: The fatty acid composition has important reference value for understanding the fatty acid resources of mangrove plants. The nutritional relationship within the mangrove ecosystem, the structure of food web and the adaptation of mangrove plants to habitat. In this study, composition and relative content of fatty acids in leaves of 7 mangrove species were analyzed, they were *Rhizophora stylosa*, *Sonneratia alba*, *Xylocarpus granatum*, *Ceriops tagal*, *Lumnitzera racemosa*, *Bruguiera gymnorrhiza* and *Rhizophora apiculata* collected from Tielugang Bay in Sanya City and Qinglangang Bay in Wenchang City, Hainan, China. As results, a total of 25 species of fatty acids were recorded, and 8 fatty acids including lauric acid, palmitic acid and myristic acid were found in all samples. Palmitic acid had the highest average content (44.32%) among saturated fatty acids in the samples, followed by stearic acid (7.74%) and the unsaturated fatty acids with relative high contents of oleic acid (7.61%), linoleic acid (9.81%) and eicosanoid acid (12.16%). Ratio of unsaturated fatty acids in mangrove leaf samples fell within a range of 0.24–1.13. Unsaturated fatty acid had a lower proportion than that of saturated fatty acids in most samples, except in samples of *X. granatum* and *B. gymnorrhiza* (in Qinglangang). The proportion of unsaturated fatty acids in 4 species, *i.e.* *R. stylosa*, *S. alba*, *C. tagal* and *L. racemose* were higher in Tielugang samples than in Qinglangang samples, while the proportion in *B. gymnorrhiza* leaves was higher in Qinglangang samples. In terms of fatty acid composition, *X. granatum* and *R. apiculata* had higher similarity between the two sampling locations than those of other pairs of mangrove species. Difference in fatty acid composition among different leaf samples was mainly attributed to the variations of the contents of palmitic acid, linoleic acid and eicosanoid acid. Results suggested that the fatty acid composition of mangrove leaf samples was related to mangrove species and the sampling location, and the mangrove leaves in tropical areas might have generally low proportion of unsaturated fatty acids.

Key words: marine biology; mangrove; leaf fatty acids; characteristic fatty acids; unsaturated ratio of fatty acids

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20220329001

* Corresponding author (E-mail: gc.chen@tio.org.cn)

(责任编辑:王 静)