

厦门筭筭湖不同修复时期人工秋茄林的碳储量

吴康丽, 邱悦, 吴佳佳, 卢昌义, 叶勇*

(滨海湿地生态系统教育部重点实验室、厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102)

摘要:1999年起, 厦门筭筭湖开展了多次红树林人工修复的种植工作以进行该湖的环境治理。这些人工修复的红树林生长状况良好, 使得筭筭湖生态修复成为国内成功的典范案例。为探究不同修复时期人工红树林碳储量的变化规律并获得筭筭湖人工修复红树林碳汇能力的基础数据, 本研究对筭筭湖4片不同林龄(10、11、12、14 a)的人工秋茄(*Kandelia obovata*)林地(对应林龄分别编号为P10、P11、P12、P14)进行碳[植株组分碳、凋落物碳和沉积物总有机碳(TOC)]储量的分析。结果表明: 单株红树植物秋茄生物量、林地单位面积生物量及年凋落物产量均随着林龄的增长而增加。植株组分的平均碳含量随着林龄的增长而增加, P14(346.29 g/kg) > P12(327.93 g/kg) > P11(313.63 g/kg) > P10(297.84 g/kg)。凋落物平均碳含量与林龄也呈现类似的正相关关系, P14(310.28 g/kg) > P12(300.44 g/kg) > P11(282.28 g/kg) > P10(279.22 g/kg)。沉积物中 TOC 含量为 5.13 ~ 12.02 g/kg, 呈垂直向下递减的分布格局。沉积物 TOC 含量随着林龄的增长而增大, 同一深度不同林龄沉积物中的 TOC 含量存在显著差异($P < 0.05$)。在不同修复时期的人工林中, 林龄对各组分的碳储量及碳密度有显著的影响。本研究有助于进一步理解潟湖人工修复红树林的动态发育过程和生态系统服务功能。有关不同修复时期潟湖人工红树林碳储量的研究对红树林的保护和修复具有重要的科学意义。

关键词:海洋生物学; 碳储量; 林龄; 人工修复红树林; 生态功能; 潟湖; 筭筭湖

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240523001

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2024)04-0744-09

滨海湿地的红树林生态系统具有高生态功能价值^[1], 其固碳功能对海岸带生物地球化学循环、适应和减缓气候变化具有重要意义^[2-3]。红树林因其强大的生态系统服务功能及抗盐抗水淹的生长特性被作为重要的沿海修复树种^[4]。筭筭湖位于厦门岛西部(24°29'N, 118°05'E), 地处亚热带气候, 原为地质作用形成的海湾, 20世纪70年代在湾口修建海堤形成人工湖, 水域面积1.5 km²^[5-6]。筭筭湖早期因水体交换条件较差, 且受周围各形式污染源的影响, 湖内水体富营养化程度高, 对生活于该区域的自然生物和居民造成不利影响。自20世纪80年代以来通过“依法治湖、截污处理、清淤筑岸、搞活水体、美化环境”的治湖策略, 实施了多次综合整治工程, 筭筭湖水质得到显著改善。湖内水体每天利用涨落潮差进行交换, 形成类似潟湖的环境, 潮水涨落使筭筭湖导流堤湖岸类似海岸潮间带, 适合红树林

生长。厦门大学卢昌义于1999年在筭筭湖内湖导流堤湖岸开展了小面积的红树林试种, 随后分别于2001、2002、2003、2006年在筭筭湖导流堤湖岸分段进行了大面积的红树林种植。截止2013年, 筭筭湖内、外湖导流堤的岸边人工建造平台上分布着用于生态修复的人工红树林带, 其优势种为秋茄(*Kandelia obovata*), 该区域的红树林面积已达 1.7×10^4 m²^[7]。有研究表明, 一定的时间跨度后, 人工红树林碳储量将达到自然红树林碳储量的水平^[8-10], 其发挥的生态功能不容小觑。然而, 对于筭筭湖红树林的生态功能尤其是碳汇能力却缺乏科学数据。

红树林生态系统地处陆海交界处, 易受人类扰动^[11], 在全球气候变化的背景下也极易受到影响^[12-14]。红树林碳库的研究对筭筭湖修复效果的评估及其对全球气候变化贡献的探讨均具有重要意义。目前, 不同修复时期红树林的碳汇变化在河口红

收稿日期: 2024-06-06

资助项目: 国家自然科学基金(42376162, 42076142, 41076049); 国家重点研发项目(2022YFF0802201)

作者简介: 吴康丽(2000—), 女, 硕士研究生; E-mail: 33120221152320@stu.xmu.edu.cn

* 通讯作者: 叶勇(1969—), 男, 博士, 教授; E-mail: yeyong@xmu.edu.cn

树林有较少报道^[15-16],而在潟湖红树林则缺乏报道。植被生物量是反映湿地固碳能力的重要指标^[17],已有不少研究从种群层面探究了红树林中不同生物的生物量情况,进而对群落初级生产力的分布进行了分析^[18-19]。有关红树植物本身碳含量的分布及其对整个生态系统碳循环的贡献仍值得进一步关注^[20]。部分研究展现了红树林沉积物碳储存的垂直分布规律^[21-23],或结合地上及地下部分分析了红树林生态系统的碳储量^[24]。受环境的限制,目前大部分研究关注的是不同优势种^[20,25]、不同地理条件(高程、盐度、温度)^[26-27]下的红树林碳储量的差异,而林龄对红树林碳储量的影响尚不清晰。

物种及地理环境对红树林碳储量影响的研究分别聚焦于红树植物主体及其生长的外在条件,在生态修复的前期均是从可控的角度对生态修复的方案设计提供建设性意见。而在生态修复的过程中,不同时期即不同林龄的红树修复林的碳固存潜力和固碳效果是否存在差异,我们是否可以根椐红树修复林碳储量的变化在时间轴上对生态修复方案进行调

整,使红树修复林在不同的阶段发挥更大的生态效益仍值得探讨。因此,掌握不同修复时期人工红树修复林生物量的情况,监测不同林龄人工红树修复林碳储量的动态变化有重要意义。本研究对红树林碳[植株组分碳、凋落物碳和沉积物总有机碳(TOC)]储量的研究从生物量及凋落物产量的分配格局角度,分析不同林龄潟湖人工秋茄红树林碳储量的大小差异及变化规律,以期为不同修复时期人工红树林生态修复方案的设计提供建设性意见和理论依据。

1 材料与方 法

2012年4月至2013年3月于筼筮湖内导流堤4片不同修复时期的人工秋茄林开展碳储量调查采样,4片立地环境相似的人工林由西至东分别种植于1999、2001、2002、2003年,林龄(至2013年)分别记为14、12、11、10 a,其林地分别记为P14、P12、P11、P10。由于人工林规则种植,植被长势相似,因此每片林地随机选取5株标准木进行生长参数的测定(表1)。

表1 筼筮湖红树林的群落参数

Tab.1 Community parameters of mangroves at Yundang Lake

林地	林龄/a	高度/cm	胸径/cm	密度/(株·m ⁻²)	郁闭度/%	面积/m ²	株数/株
P10	10	210	4.4	6.667±3.000	78.660±3.210	2 760	18 400
P11	11	303	3.7	6.667±2.000	80.400±1.250	2 460	16 400
P12	12	306	3.9	6.667±2.000	83.200±1.170	1 700	11 330
P14	14	288	4.5	6.667±2.000	84.330±1.520	667	3 670

1.1 生物量和凋落物产量的估计

根据该区域的自然环境与气候条件,将3—5月、6—8月、9—11月、12月至翌年2月划分为春季、夏季、秋季、冬季。利用优势种秋茄的回归方程^[28]对红树林的生物量进行估计:

$$\log B_{\text{树干}} = 2.162 + 0.869 \log(D^2 \cdot H) \quad (1)$$

$$\log B_{\text{树枝}} = 2.741 + 1.253 \log(D^2 \cdot H) \quad (2)$$

$$\log B_{\text{树叶}} = 1.706 + 0.943 \log(D^2 \cdot H) \quad (3)$$

$$\log B_{\text{树根}} = 2.433 + 0.990 \log(D^2 \cdot H) \quad (4)$$

式(1)至(4)中: $B_{\text{树干}}$ 、 $B_{\text{树枝}}$ 、 $B_{\text{树叶}}$ 、 $B_{\text{树根}}$ 分别为树干、树枝、树叶、树根生物量(kg), D 为胸径(m), H 为树高(m)。单株红树植物生物量为树干、树枝、树叶、树根生物量的总和。

采用孔径1.5 mm的玻璃纤维网布于地面上方约1.5 m处形成网口面积1 m²的倒三角锥形网兜收集红树林的凋落物,每片样地间隔设置3个网兜,每

个月收集1次凋落物。清除叶片表面附着的泥土及颗粒物后,一部分于60℃烘干至恒重测定凋落物的产量。林地单位面积年凋落物产量为年凋落叶、枝、花、果产量的总和。

1.2 TOC含量的测定

用PVC管采集0~10、>10~20、>20~30 cm的沉积物样品,每片林地设置3个重复,计算容重后,经自然风干、磨碎过筛进行碳含量的测定。红树植物植株组分碳、凋落物碳及沉积物的TOC含量均采用重铬酸钾容量法进行测定^[29]。

2 结果与分析

2.1 不同林龄红树林的生物量和凋落物产量

2.1.1 生物量及分配

利用回归方程对红树林生物量进行估计,并以此计算4片林地的总生物量(表2)。随着林龄的增

长,单株生物量和林地单位面积生物量均增加,即 $P_{14} > P_{12} > P_{11} > P_{10}$ 。单株生物量的年增长量约为 0.345 kg。不同组分占单株生物量的比例不同,树

干和树根的生物量大于树枝和树叶的生物量。随着林龄的增长,树干生物量的比例降低,树枝生物量的比例增加。

表 2 不同林龄红树林的生物量

Tab. 2 Biomass of mangroves at different ages

林龄/a	单株植株各组分生物量/(kg·株 ⁻¹)				单株生物量/ (kg·株 ⁻¹)	单位面积生物量/ (kg·m ⁻²)	总生物量/kg
	树干	树枝	树叶	树根			
10	1.214 (37.7%)	0.556 (17.3%)	0.283 (8.8%)	1.164 (36.2%)	3.217	21.451	59 204.76
11	1.236 (37.7%)	0.570 (17.4%)	0.288 (8.8%)	1.188 (36.2%)	3.282	21.880	53 824.80
12	1.366 (37.1%)	0.659 (17.9%)	0.321 (8.7%)	1.331 (36.2%)	3.677	24.513	41 672.10
14	1.661 (36.1%)	0.874 (19.0%)	0.397 (8.7%)	1.664 (36.2%)	4.597	30.648	20 442.22

注:括号内的数字表示与单株生物量相比的百分数。

2.1.2 凋落物产量及分配

随着林龄的增长,单位面积年凋落物产量增加,即 $P_{14} > P_{12} > P_{11} > P_{10}$ (表 3)。对凋落物产量的分析结果表明,红树林凋落物各组分占比不同,呈现出

落叶>落枝>落果>落花的规律。其中,不同林地的年落叶、落枝产量也随林龄的增长而增加,而年落果产量占年凋落物产量的比例先增大后减小。

表 3 不同林龄红树林的凋落物年产量

Tab. 3 Annual output of mangrove litter in different ages

林龄/a	单位面积年凋落物产量/(g·m ⁻²)					林地总年凋落物产量/kg
	落叶	落枝	落花	落果	总凋落物	
10	55.84(67.7%)	10.28(12.5%)	4.42(5.4%)	11.92(14.5%)	82.46	227.59
11	57.23(67.1%)	10.48(12.3%)	4.75(5.6%)	12.80(15.0%)	85.25	209.72
12	85.50(77.2%)	13.19(11.9%)	4.51(4.1%)	7.49(6.8%)	110.69	188.17
14	124.67(81.9%)	16.97(11.1%)	4.81(3.2%)	5.80(3.8%)	152.25	101.55

注:括号内的数字表示各组分与总凋落物产量相比的百分数。各产量均指干重产量。

绝大部分月份的总凋落物产量随林龄的增长而增加[图 1(a)]。从月份角度而言,整体 P_{14} 的总凋落物产量仍最大。红树林的总凋落物产量呈现季节动态变化规律,除 P_{14} 外,总凋落物产量的季节动态变化规律为夏季>春季>秋季>冬季[图 1(b)]。

2.2 不同林龄红树林植株组分和凋落物的碳含量

2.2.1 植株组分碳含量

随着林龄的增长,植株各组分的碳含量总体呈现上升的趋势,且各修复时期植株组分的碳含量呈现干>叶>根>果>花的规律[图 2(a)]。植株组分的平均碳含量随着林龄的增长而增加,即 P_{14} (346.29 g/kg)> P_{12} (327.93 g/kg)> P_{11} (313.63 g/kg)> P_{10}

(297.84 g/kg)。单位面积植株组分碳含量也随着林龄的增长而增加,即 P_{14} (10.61 kg)> P_{12} (8.04 kg)> P_{11} (6.86 kg)> P_{10} (6.39 kg)。 P_{10} 、 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{14} 林地红树植物总碳含量分别为 17.64、16.88、13.67、7.08 t。

2.2.2 凋落物碳含量

凋落物平均碳含量也呈现 P_{14} (310.28 g/kg)> P_{12} (300.44 g/kg)> P_{11} (282.28 g/kg)> P_{10} (279.22 g/kg)的结果。但与植株组分碳含量与林龄的关系不同,凋落物各组分的碳含量与林龄的关系各异[图 2(b)]。单位面积年凋落物的碳含量也与林龄呈现正相关关系,即 P_{14} (47.24 g/a)> P_{12} (33.26

g/a) $>$ P11(24.06 g/a) $>$ P10(23.02 g/a)。P10、P11、P12、P14 红树林年凋落物总碳含量分别为 63.55、59.20、56.53、31.51 kg。对比红树林植株组分和凋落物平均碳含量可知,不同林龄中的植株组分平均

碳含量均要大于凋落物平均碳含量,且 P10、P11、P12、P14 植株组分的平均碳含量比凋落物的平均碳含量分别高 6.67%、11.11%、9.15%、11.61%。

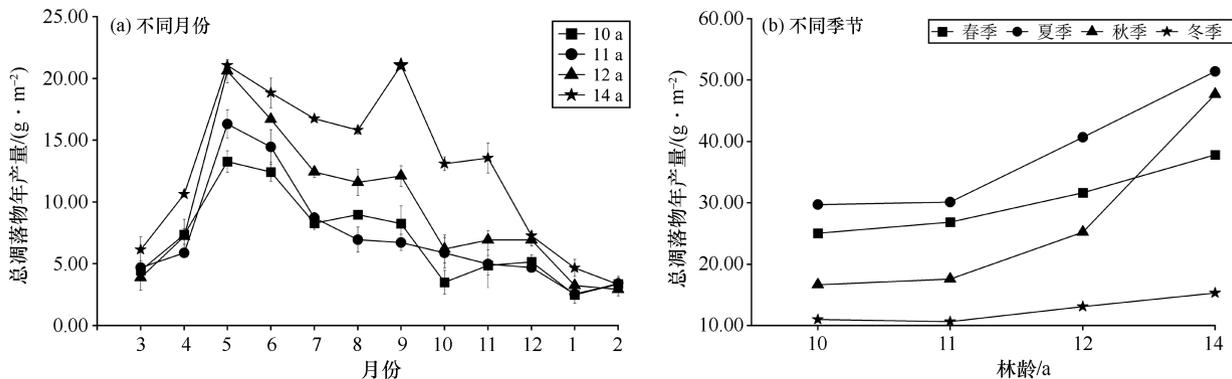


图 1 总凋落物年产量

Fig. 1 Annual output of total litter

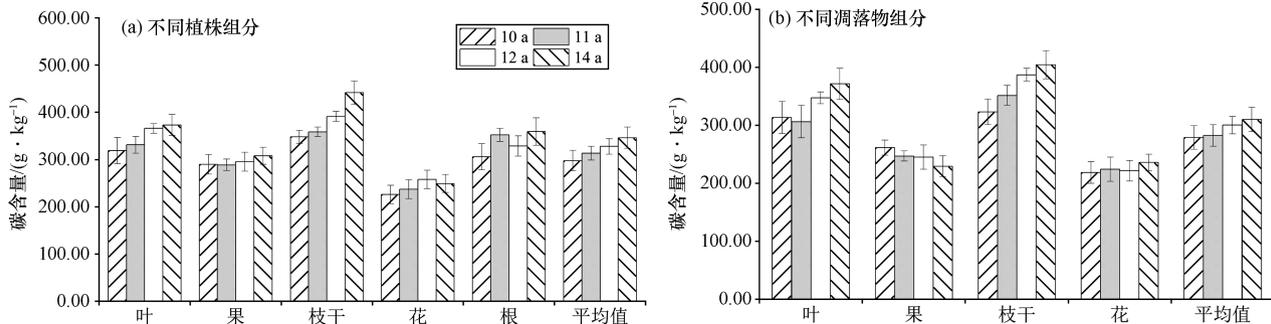


图 2 植株组分和凋落物的碳含量

Fig. 2 Carbon content of plant component and litter

2.3 不同林龄红树林沉积物 TOC 的分布格局

在 0~30 cm 的沉积物中,TOC 含量随着采集深度的增加而呈现递减的趋势[图 3(a)]。相同林龄下,沉积物深度从 0~10 cm 至 $>$ 20~30 cm, P10、P11、P12、P14 的 TOC 含量分别降低了 42.98%、50.01%、35.31%、40.80%。0~10、 $>$ 10~20、 $>$ 20~

30 cm 的沉积物中 TOC 含量的平均年增量分别为 0.895、0.647、0.612 g/kg。表明沉积物深度增加, TOC 含量平均年增量降低。同一深度不同林龄沉积物中的 TOC 含量存在显著差异($P<0.05$)。总体而言,同一深度的沉积物中,林龄越大的 TOC 含量更高[图 3(b)]。

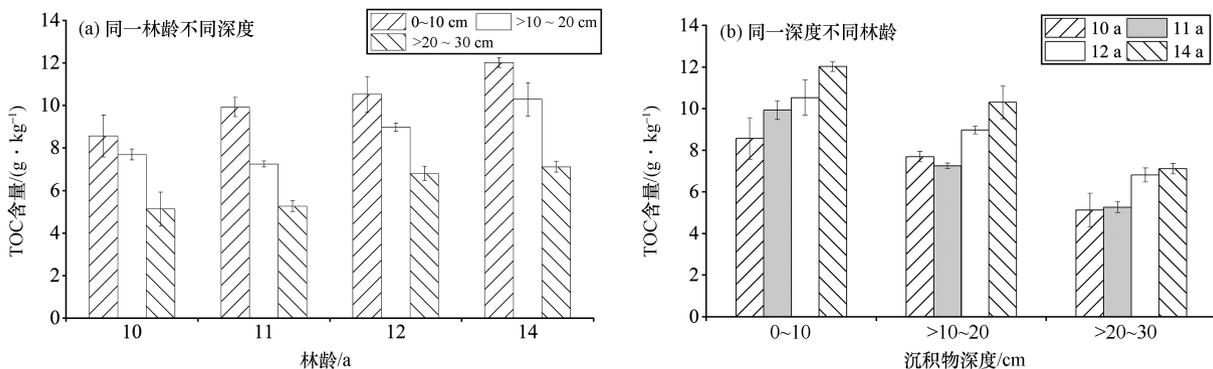


图 3 沉积物的 TOC 含量

Fig. 3 TOC content of sediments

除>10~20 cm,同一深度下,沉积物 TOC 密度随着林龄的增长而增加(表 4)。同一林龄 0~30 cm 沉积物中,浅层中的 TOC 总量比深层中的 TOC 总

量高,TOC 密度也呈现大致相同的规律。总体而言,种植年限越久、越接近表层的沉积物的碳储量要更高。

表 4 沉积物的 TOC 总量及密度

Tab. 4 Total TOC content and density of sediments

林龄/a	TOC 总量/t			TOC 密度/(t · hm ⁻²)		
	0~10 cm	>10~20 cm	>20~30 cm	0~10 cm	>10~20 cm	>20~30 cm
10	1.68	1.68	1.53	6.09	6.09	5.54
11	1.75	1.44	1.41	7.11	5.85	5.73
12	1.30	1.23	1.27	7.65	7.24	7.47
14	0.60	0.58	0.53	9.00	8.70	7.95

2.4 不同林龄红树林的碳储量及碳密度

林龄对红树林中各组分的碳储量及碳密度有一定的影响。植株组分、凋落物、沉积物和林地碳密度

均随着林龄的增长而增大,即 P14>P12>P11>P10 (表 5)。本研究中,植株组分的碳储量占主要部分,且植株组分的碳密度远高于凋落物的碳密度。

表 5 不同林龄红树林的碳储量及碳密度

Tab. 5 Carbon storage and density of mangroves in different ages

林龄/a	碳储量/t				碳密度/(t · hm ⁻²)			
	植株组分	凋落物	沉积物	林地	植株组分	凋落物	沉积物	林地
10	17.63	0.06	4.89	22.58	63.88	0.22	17.72	81.81
11	16.88	0.06	4.60	21.54	68.62	0.24	18.70	87.56
12	13.67	0.06	3.80	17.53	80.41	0.35	22.35	103.12
14	7.08	0.03	1.71	8.82	106.15	0.45	25.64	132.23

3 讨论

3.1 林龄对红树林生物量和凋落物产量的影响

红树林的生物量主要受地理位置、气候条件、物种、林龄的影响^[30]。相同情况下,红树林冠层高度与温度、降水量呈正相关,年幼林生物量比成熟林低^[31-32]。随着林龄的增长,红树植物树干生物量占比减少,树枝生物量占比增大,表明随着林龄的增长,红树植物的营养物质多用于分枝展叶中,这与植物生长中营养元素(N、P)的分配规律相吻合^[33-34]。此外,红树植物植株组分单位面积生物量随着林龄的增长而增加,表明筲箕湖的 4 片人工修复林生长状况良好。Salmo 等的研究认为,由于种内竞争,红树林的密度通常会随着种植年限的增长而下降,红树植物高度及胸径的持续增长使得红树林的生物量随林龄的增长而增加^[35],这也印证了本研究的结果。

凋落物产量是筲箕湖红树林地上生物量的重要

部分。红树植物会通过大量的落叶排出体内多余的盐分,通过此过程,红树植物的生物量很大一部分转移到了凋落物中^[31]。凋落物的产生与自身的物候相关,也受气候、人类和动物的干扰影响。筲箕湖人工红树林有着较高的恢复潜力,其 4 片林地的平均凋落物年产量均小于雷州半岛人工无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)红树林的平均凋落物年产量^[36]。这可能与物种生长特性及林地所处的地理位置不同有关。本研究中的红树林分布于潟湖内,因此受风暴潮的影响相对减弱。筲箕湖红树林凋落物年产量随着林龄的增长而增加,这与其生物量与林龄的关系一致。由于不同林龄红树植物的新陈代谢和再生能力存在差异,因此红树林的凋落物产量受林龄的影响^[37]。与雷州半岛人工无瓣海桑林类似,种植年限长的红树林的年凋落物产量较种植年限短的红树林大^[36]。P14 总凋落物年产量的季节动态规律与其他 3 个林龄的样地不同,呈现夏季>秋季>春季>冬

季的结果。推测与低林龄的人工林相比,高林龄的潟湖人工林秋季有更高的碳归还量。凋落物的季节性模式由植物的生理机制及环境变量共同决定,对于热带森林,凋落物高峰大多出现在春季或冬季^[38]。不同于其他森林生态系统,红树林因其特殊的海陆交错带分布特点极易受极端天气的影响。由于太平洋温差气流的影响,筭笪湖每年7—9月受台风的侵袭,因此4片样地夏季凋落物产量最大,这与其他红树林凋落物的季节动态相吻合^[39-40]。

3.2 林龄对红树林碳储量的影响

红树林的树龄会影响其地上和地下生物量碳储量^[41-43]。前人研究表明,树形较小、胸径较小的红树植物的碳含量较低^[44],本研究结果也呈现相似的规律。红树植物植株组分和凋落物的平均碳含量均随着林龄的增长而增加。一定林龄范围内,与幼树相比,较成熟的红树植物所进行的生长代谢更旺盛,其光合作用所固定的碳增加^[45]。彭聪姣等^[20]对白骨壤(*Avicennia marina*)、秋茄、海桑(*Sonneratia caseolaris*)、无瓣海桑的研究表明,红树植物植株各组分的碳含量存在一定差异,其中秋茄枝、叶的碳含量均比根的碳含量高,与本研究结果一致。凋落物的产生是森林生态系统中碳和养分循环的关键过程,间接影响了土壤的有机碳含量^[46-47]。

由于红树植物根际碳循环周期较长,沉积物有机碳分解速率低,大部分的红树林有机碳储存在沉积物和地下根系中^[48-49]。由于条件限制,本研究只估计了表层0~30 cm沉积物的TOC含量,更深层次沉积物的碳含量值得进一步探究。沉积物TOC含量与林内植物种类、林龄、沉积物理化特征、外源输入、营养元素的化学性质等有密切的关系^[50]。沉积物TOC含量通常呈垂直分布的特点^[31],且较浅层高于较深层,其垂直分布格局主要取决于其来源在时间尺度上的变化^[51]。Marchand等^[25]对红海榄(*Rhizophora stylosa*)林和白骨壤林沉积物TOC含量的研究也得出与本研究类似的结果,表明二者TOC均较集中地分布在表层沉积物中,并随着深度加深TOC含量显著降低。但也有研究表明,沉积物碳储量与林龄无显著关系。此结果可能归因于不同林龄沉积物存在空间异质性、沉积物受到了外界扰动的影响^[9]。

筭笪湖4片人工秋茄林的碳储量较高,植株组

分的碳密度要高于全国乔木林的平均碳密度(42.82 t/hm^2)^[52]。虽然这与人工林的种植密度有关,但也从一定程度上反映了人工林的高生态价值。本研究中,红树植物植株组分、凋落物、沉积物的碳密度、林地总碳密度均随着林龄的增长而增大。表明林龄的增长使红树林在固碳方面能够发挥更大的生态价值。因此,人工修复林投入后,需根据其林龄的增长监测其生长健康状况,进一步对资源利用、生态功能评估等方案进行及时有效的调整。Carnell等^[16]对13~35 a的红树林进行碳储量的研究,发现虽然沉积物的碳储量随着林龄的增长而增加,但17 a的地上植物碳储量最大。说明红树林的生态效益并不是与林龄呈现完全的正相关关系。但本实验结果尚未呈现该趋势,这可能归因于选取的4片红树林的林龄跨度不大。另外,有研究表明,在原有红树林分布的地方进行重建的人工红树林每公顷碳储存潜力比原先没有红树林分布的地方进行重建的人工红树林更大^[53]。因此,是否需要林龄过大、生态功能减退的潟湖人工红树林进行二次修复,从而提升人工修复林的生态效益,在海岸带修复、生态环境治理等方面值得进一步地思考与评估。红树林中共存生物、枯倒木的碳储量以及碳排放也是红树林生态系统碳循环的重要组成部分^[16],未来在综合评估潟湖人工红树林修复林的生态效益方面也值得关注。

4 结论

单株红树植物生物量、林地单位面积生物量及年凋落物产量均随着林龄的增长而增大。凋落物各组分年产量均呈现落叶>落枝>落果>落花的规律,凋落物总产量的季节动态为夏季>春季>秋季>冬季。林龄较大潟湖红树林中的植株组分及凋落物的碳含量更大;沉积物TOC含量呈垂直递减的分布格局,且TOC含量随着林龄的增长而增大。筭笪湖4片人工秋茄林的碳储量丰富,在林龄为10、11、12、14 a的红树林中,林龄对各组分的碳储量及碳密度有积极的影响。本研究从林龄的角度对潟湖人工修复红树林的碳储量进行了分析,该结果有助于进一步理解潟湖红树林的发育动态及不同修复时期下其固碳效果的变化规律,对潟湖人工红树林生态修复方案的设计与改良具有重要的科学意义。

参考文献:

- [1] BUNTING P, ROSENQVIST A, HILARIDES L, et al. Global mangrove extent change 1996–2020: global mangrove watch version 3.0[J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3657.
- [2] GIRI C. Observation and monitoring of mangrove forests using remote sensing: opportunities and challenges[J]. Remote Sensing, 2016, 8(9):

- 783.
- [3] ZHU J J, YAN B. Blue carbon sink function and carbon neutrality potential of mangroves[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153438.
- [4] GATTUSO J P, FRANKIGNOULLE M, WOLLAST R. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 405-434.
- [5] 卢昌义. 从贫筲港到贫筲湖[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2003.
- [6] 郑新庆, 王倩, 黄凌风, 等. 基于碳、氮稳定同位素的厦门贫筲湖两种优势端足类食性分析[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7 589-7 597. ZHENG X Q, WANG Q, HUANG L F, et al. Feeding habits for two dominant amphipod species in the Yundang Lagoon based on stable carbon and nitrogen isotope analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7 589-7 597.
- [7] 邱悦. 厦门贫筲湖人工秋茄红树林吸收 CNP 的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013. QIU Y. Study on C, N and P absorption by artificial *Kandelia candel* mangrove forests at Yundang Lake in Xiamen[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [8] NAM V N, SASMITO S D, MURDIYARSO D, et al. Carbon stocks in artificially and naturally regenerated mangrove ecosystems in the Mekong Delta[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2016, 24(2): 231-244.
- [9] SASMITO S D, TAILLARDAT P, CLENDENNING J N, et al. Effect of land-use and land-cover change on mangrove blue carbon: a systematic review[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(12): 4 291-4 302.
- [10] O'CONNOR J J, FEST B J, SIEVERS M, et al. Impacts of land management practices on blue carbon stocks and greenhouse gas fluxes in coastal ecosystems-a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1 354-1 366.
- [11] TEMMINK R J M, LAMERS L P M, ANGELINI C, et al. Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots[J]. *Science*, 2022, 376(6 593): eabn1479.
- [12] CAHOON D R, MCKEE K L, MORRIS J T. How plants influence resilience of salt marsh and mangrove wetlands to sea-level rise[J]. *Estuaries and Coasts*, 2021, 44(4): 883-898.
- [13] PALIT K, RATH S, CHATTERJEE S, et al. Microbial diversity and ecological interactions of microorganisms in the mangrove ecosystem: threats, vulnerability, and adaptations[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(22): 32 467-32 512.
- [14] ALONGI D M. Impacts of climate change on blue carbon stocks and fluxes in mangrove forests[J]. *Forests*, 2022, 13(2): 149.
- [15] ATWOOD T B, CONNOLLY R M, ALMAHASHEER H, et al. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 523-528.
- [16] CARNELL P E, PALACIOS M M, WARYSZAK P, et al. Blue carbon drawdown by restored mangrove forests improves with age[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 306: 114301.
- [17] SHEN X J, JIANG M, LU X G, et al. Aboveground biomass and its spatial distribution pattern of herbaceous marsh vegetation in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7): 1 115-1 125.
- [18] WOLFF M, KOCH V, ISAAC V. A trophic flow model of the caeté mangrove estuary (north Brazil) with considerations for the sustainable use of its resources[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(6): 789-803.
- [19] 胡杰龙, 辛琨, 李真, 等. 海南东寨港红树林保护区碳储量及固碳功能价值评估[J]. *湿地科学*, 2015, 13(3): 338-343. HU J L, XIN K, LI Z, et al. Carbon storage and sequestration function evaluation in Dongzhaigang mangrove reserve of Hainan[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(3): 338-343.
- [20] 彭聪姣, 钱家炜, 郭旭东, 等. 深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2 059-2 065. PENG C J, QIAN J W, GUO X D, et al. Vegetation carbon stocks and net primary productivity of the mangrove forests in Shenzhen, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2 059-2 065.
- [21] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111.
- [22] 郭志华, 张莉, 郭彦茹, 等. 海南清澜港红树林湿地土壤有机碳分布及其与 pH 的关系[J]. *林业科学*, 2014, 50(10): 8-15. GUO Z H, ZHANG L, GUO Y R, et al. Soil carbon sequestration and its relationship with soil pH in Qinglangang mangrove wetlands in Hainan Island[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(10): 8-15.
- [23] XIA S P, SONG Z L, VAN ZWIETEN L, et al. Storage, patterns and influencing factors for soil organic carbon in coastal wetlands of China[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(20): 6 065-6 085.
- [24] 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: 293-297.
- [25] MARCHAND C, ALLENBACH M, LALLIER-VERGÈS E. Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments(Conception Bay, New Caledonia)[J]. *Geoderma*, 2011, 160(3/4): 444-456.
- [26] WANG G, GUAN D S, PEART M R, et al. Ecosystem carbon stocks of mangrove forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of South China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 539-546.
- [27] RAHMAN M M, KHAN M N I, HOQUE A K F, et al. Carbon stock in the Sundarbans mangrove forest: spatial variations in vegetation types and salinity zones[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(2): 269-283.
- [28] TAM N F Y, WONG Y S, LAN C Y, et al. Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China[J]. *Hydrobiologia*, 1995, 295(1): 193-201.
- [29] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2006.

- [30] SOARES M L G, SCHAEFFER-NOVELLI Y. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2005, 65(1/2): 1-18.
- [31] 林鹏. 九龙江口红树林研究: 秋茄群落的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报, 1985, 24(4): 508.
LIN P. Studies on mangroves in Jiulong River Estuary: biomass and productivity of *Kandelia candel* community[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1985, 24(4): 508.
- [32] FEHER L C, OSLAND M J, GRIFFITH K T, et al. Linear and nonlinear effects of temperature and precipitation on ecosystem properties in tidal saline wetlands[J]. Ecosphere, 2017, doi: 10.1002/ecs2.1956.
- [33] 莫江明, 张德强, 黄忠良, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 198-206.
MO J M, ZHANG D Q, HUANG Z L, et al. Distribution pattern of nutrient elements in plants of Dinghushan lower subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2000, 8(3): 198-206.
- [34] 何斌, 黄恒川, 黄承标, 等. 秃杉人工林营养元素含量、积累与分配特征的研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 903-910.
HE B, HUANG H C, HUANG C B, et al. Concentrations, accumulation and distribution characteristics of nutrient elements in *Taiwania Flossiana* plantation[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 903-910.
- [35] SALMO S G, LOVELOCK C, DUKE N C. Vegetation and soil characteristics as indicators of restoration trajectories in restored mangroves[J]. Hydrobiologia, 2013, 720(1): 1-18.
- [36] 韩维栋. 雷州半岛红树林及其保护策略研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2002.
HAN W D. Study on mangrove and its conservation strategy of Leizhou Peninsula, China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2002.
- [37] 苏勇. 福建柏造林试验研究[J]. 广西林业科技, 1991(4): 187-192.
SU Y. Experimental study on afforestation of *Fokienia hodginsii*[J]. Guangxi Forestry Science, 1991(4): 187-192.
- [38] ZHANG H C, YUAN W P, DONG W J, et al. Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide[J]. Ecological Complexity, 2014, 20: 240-247.
- [39] 郑逢中, 卢昌义, 郑文教, 等. 福建九龙江口秋茄红树林凋落物季节动态及落叶能量季节流[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2000, 39(5): 693-698.
ZHENG F Z, LU C Y, ZHENG W J, et al. Seasonal dynamics of litter fall and energy flow through the leaf litter of *Kandelia candel* mangrove in Jiulongjiang Estuary, Fujian Province, China[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2000, 39(5): 693-698.
- [40] 王秀丽, 周亮, 许诗琳, 等. 福建九龙江口不同林龄拉关木人工林凋落物组成及季节动态[J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(4): 519-527.
WANG X L, ZHOU L, XU S L, et al. Composition and seasonal dynamics of litterfall in different ages of *Laguncularia racemosa* plantations in Jiulong River Estuary, Fujian Province[J]. Journal of Applied Oceanography, 2017, 36(4): 519-527.
- [41] ADAME M F, ZAKARIA R M, FRY B, et al. Loss and recovery of carbon and nitrogen after mangrove clearing[J]. Ocean & Coastal Management, 2018, 161: 117-126.
- [42] AZMAN M S, SHARMA S, SHAHARUDIN M A M, et al. Stand structure, biomass and dynamics of naturally regenerated and restored mangroves in Malaysia[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 482: 118852.
- [43] SASMITO S D, SILLANPÄÄ M, HAYES M A, et al. Mangrove blue carbon stocks and dynamics are controlled by hydrogeomorphic settings and land-use change[J]. Global Change Biology, 2020, 26(5): 3 028-3 039.
- [44] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MACKENZIE R A, et al. Whole-island carbon stocks in the tropical Pacific: implications for mangrove conservation and upland restoration[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 97: 89-96.
- [45] 马小伟, 郑春芳, 刘伟成, 等. 中国红树林最北缘引种区不同季节和树龄秋茄生理特征比较[J]. 科技通报, 2013, 29(3): 58-64.
MA X W, ZHENG C F, LIU W C, et al. Comparison of physiological characteristics of different aged transplanted *Kandelia obovata* trees in summer and winter in the northeast transplanted area of China[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(3): 58-64.
- [46] ROIG S, DEL RÍO M, CAÑELLAS I, et al. Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. stands under different thinning regimes[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 206(1/2/3): 179-190.
- [47] HANSEN K, VESTERDAL L, SCHMIDT I K, et al. Litterfall and nutrient return in five tree species in a common garden experiment[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(10): 2 133-2 144.
- [48] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1 153-1 159.
ZHANG L, GUO Z H, LI Z Y. Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: research progress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1 153-1 159.
- [49] ALONGI D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests[J]. Annual Review of Marine Science, 2014, 6: 195-219.
- [50] 余小青, 杨军, 刘乐冕, 等. 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3 739-3 747.
YU X Q, YANG J, LIU L M, et al. Spatial variations of biogenic elements in coastal wetland sediments of the Jiulong River Estuary[J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3 739-3 747.
- [51] 乔永民, 谭键滨, 马舒欣, 等. 深圳红树林湿地沉积物氮磷分布与来源分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(2): 34-40.
QIAO Y M, TAN J B, MA S X, et al. The distribution pattern and sources analysis for nitrogen and phosphorus in core sediment of Shenzhen mangrove wetland[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(2): 34-40.
- [52] LIU H X, REN H, HUI D F, et al. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 133: 86-93.

- [53] SONG S S, DING Y L, LI W, et al. Mangrove reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change[J]. Nature Communications, 2023, 14: 756.

Carbon storage of artificial *Kandelia obovata* forest in different restoration time at Yundang Lake of Xiamen

WU Kangli, QIU Yue, WU Jiajia, LU Changyi, YE Yong*

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystem, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Since 1999, several artificial restorations on mangroves have been carried out at Yundang Lake, Xiamen, to carry out environmental management of the lake. The artificially restored mangroves are growing well showing that the ecological restoration of Yundang Lake is a successful model case. To explore the changing law of the carbon storage of artificial mangroves in different restoration periods in lagoon and obtain the basic data of carbon sink capacity of artificial mangroves at Yundang Lake (similar to a lagoon), the carbon storage (plant component carbon, litter carbon and sediment TOC) of four artificial *Kandelia obovata* forests coded as P10, P11, P12 and P14 in ages of 10, 11, 12 and 14 years were analyzed, respectively. Results showed that the biomass of *Kandelia obovata* per plant, the biomass per unit area of forest land, and the annual litter yield increased with the growth of forest age. The average carbon content of plant component increased with the forest age, with P14 (346.29 g/kg) > P12 (327.93 g/kg) > P11 (313.63 g/kg) > P10 (297.84 g/kg). The average carbon content of litter also showed a similar positive correlation with forest age, with P14 (310.28 g/kg) > P12 (300.44 g/kg) > P11 (282.28 g/kg) > P10 (279.22 g/kg). The TOC contents in sediments were 5.13–12.02 g/kg and the content decreased with depth. The TOC content in sediments increased with the growth of forest age and there were significant differences in TOC content in sediments of different forest ages at the same depth ($P < 0.05$). In different restoration stages of plantations, forest age has a positive impact on carbon storage and the carbon density of each component. This study is helpful to understand further the dynamic development process and ecosystem service function of artificial mangrove restoration in lagoon. It is of great scientific significance to study the carbon storage of artificial mangroves with different restoration periods for the protection and restoration of mangroves.

Key words: marine biology; carbon storage; forest age; artificial mangroves; ecological function; lagoon; Yundang Lake

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240523001

* Corresponding author (E-mail: yeyong@xmu.edu.cn)

(责任编辑:王 静)