

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201504005

沈小雪,李瑞利,柴民伟,等. 深圳湾红树木榄根系生物量及空间分布格局[J]. 广西植物, 2016, 36(4):379-386

SHEN XX, LI RL, CHAI MW, et al. Root biomass and its spatial distribution of *Bruguiera gymnorhiza* in the mangrove of Shenzhen Bay, South China[J]. Guihaia, 2016, 36(4):379-386

## 深圳湾红树木榄根系生物量及空间分布格局

沈小雪<sup>1</sup>, 李瑞利<sup>1\*</sup>, 柴民伟<sup>1</sup>, 石福臣<sup>2</sup>, 邱国玉<sup>1</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院 环境与能源学院, 广东 深圳 518055; 2. 南开大学 生命科学学院, 天津 300071)

**摘要:** 采用分层挖掘法,对深圳湾乡土种红树植物木榄不同活力和径级根系生物量及相关底泥性质的空间分布格局进行了研究。结果表明:木榄人工林平均总根系生物量为  $61.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其中活根生物量占 86.42%,死根占 13.58%。在活根中,粗根(直径 $>10 \text{ mm}$ )所占比例最高(84.57%),其次为细根(2~5 mm, 5.84%)、极细根( $<2 \text{ mm}$ , 4.94%)和中根(5~10 mm, 4.66%)。木榄总根系生物量从基部到树冠落水线处递减,生物量分别为  $77.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (基部)、 $22.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (中部)和  $16.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (边缘);基部直径 $>10 \text{ mm}$ 的活根生物量为中部和边缘活根生物量的 5 倍以上;随着水平距离的增加, $<2 \text{ mm}$ 根系生物量占相应距离处活根生物量的比例增加。垂直分布以中下层(20~60 cm)居多,分别占相应水平距离处总根系生物量的 80.89%(基部)、73.41%(中部)和 71.76%(边缘);总根系生物量分布主要受水平距离的影响( $P<0.05$ )。底泥含水量、容重、pH 和电导率的变化范围分别为 30.66%~35.86%、 $1.23\sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $5.75\sim 7.01 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 和  $0.22\sim 0.37 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ,其中底泥容重与不同活力根系生物量呈显著负相关( $P<0.05$ ),是影响木榄根系生物量及其空间分布的主要环境因子。该研究结果为福田红树林地下碳分配、储量及周转速率等进一步研究提供了科学依据。

**关键词:** 地下生物量, 空间分布格局, 木榄, 福田红树林, 植物生态

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)04-0379-08

## Root biomass and its spatial distribution of *Bruguiera gymnorhiza* in the mangrove of Shenzhen Bay, South China

SHEN Xiao-Xue<sup>1</sup>, LI Rui-Li<sup>1\*</sup>, CHAI Min-Wei<sup>1</sup>, SHI Fu-Chen<sup>2</sup>, QIU Guo-Yu<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** The native species *Bruguiera gymnorhiza* in the Futian Mangrove of Shenzhen Bay, was selected to study the spatial distribution of root biomass. The hierarchical sampling method is adopted. The results showed that root biomass of the *B. gymnorhiza* was about  $61.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; among which, living root biomass accounted for 86.42%, dead root biomass accounted for 13.58%. For the living root biomass, the thick root ( $>10 \text{ mm}$  in diameter) had the highest proportion (84.57%), followed by fine root (2~5 mm, 5.84%), very fine root ( $<2 \text{ mm}$ , 4.94%), and the medium root (5~10 mm, 4.66%). From the tree base to the edge of the canopy, the horizontal distribution of root biomass presented decreasing trend, and the decrement was slowing down, with the root biomass of  $77.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (the base),  $22.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (the middle) and  $16.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (the edge), respectively. In the tree base,  $>10 \text{ mm}$  in diameter of living root biomass was

收稿日期: 2015-04-02 修回日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(31400446); 深圳市科创委基础研究项目(JCYJ20150331100946599, JCYJ20140903101847739) [Supported by National Natural Science Foundation of China (31400446); the Program of Science and Technology of Shenzhen (JCYJ20150331100946599, JCYJ20140903101847739)].

作者简介: 沈小雪(1991-),女,甘肃临夏市人,博士研究生,主要从事湿地生态学研究,(E-mail) shenxx1991@126.com。

\*通讯作者: 李瑞利,博士,副教授,主要研究方向为湿地生态学,(E-mail) liruli@pkusz.edu.cn。

more than 4 times higher than living root biomass in the middle and the edge. The proportions of < 2 mm living root biomass to the living root biomass increased from the tree base to the canopy edge. Vertical distribution of root biomass was mainly in the lower layer (20–60 cm), with root biomass accounted for 80.89% (the base), 73.41% (the middle) and 71.76% (the edge) for the total root biomass, respectively. The spatial distribution of total root biomass was mainly influenced by the horizontal distance from the tree base ( $P < 0.01$ ), with no significant impact from sediment depth ( $P > 0.05$ ). In sediments, the value of water content, bulk density, pH and electrical conductivity was  $(30.66 \pm 0.88)\% - (35.86 \pm 7.59)\%$ ,  $(1.23 \pm 0.07) - (1.40 \pm 0.00) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $(5.75 \pm 1.49) - (7.01 \pm 0.50) \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  and  $(0.22 \pm 0.02) - (0.37 \pm 0.12) \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , respectively. There was no significant relationships between root biomass and sediment properties, such as pH, water content and electrical conductivity ( $P > 0.05$ ). While, significant negative correlations were detected between bulk density and different levels of root biomass, including total root, total live root, total dead root, >10 mm live root and  $\geq 10$  mm dead root. It showed that bulk density was one of mean environmental factors influencing the root biomass and its spatial distribution. Biomass is an important basis to evaluate the capacity of carbon sink, this research can provide a basic reference for the further study of underground carbon distribution, reserves and turnover rate in the Futian Mangrove.

**Key words:** root biomass, spatial distribution, *Bruguiera gymnorrhiza*, Futian Mangrove, plant ecology

根系是树木重要的营养和功能器官,根系的分布特征能反映地下养分的分布状况及树木对环境的利用程度(马海林等,2014)。根系占林分总生物量的10%~20%(Comeau & Kimmins,1989)。细根虽仅为林分根系生物量的3%~30%,但其周转迅速,消耗的碳水化合物占净初级生产力的40%~85%,每年通过枯死细根向土壤归还大量的碳、养分和能量(Sun et al,2015;肖义发等,2013)。林木根系对森林生态系统的固碳和固氮过程起着十分重要的作用(Vogt et al,1996;苏纪帅等,2013),在养分循环和能量流动研究中受到越来越多的关注(Leppälammii-Kujansuu et al,2014;王树堂等,2010)。由于受技术条件限制,对植物地下生物量的研究总体要少于对地上部分(林鹏等,1992;朱可峰等,2011;朱远辉等,2014)。

红树林是分布在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,具有高生产力、高归还率和高分解率等特性,是维护海岸生态平衡的重要生态系统(Ren et al,2011)。尽管红树林只覆盖地球表面0.1%的面积,却固定了大气中5%的碳,固碳量可达陆地森林的2~3倍(Adame et al,2013),且能将固定的大部分碳分配到地下,说明红树林在碳贮量方面有较高的应用价值(Ren et al,2010;Tue et al,2014)。当前,对福田红树林红树植物根系生物量的研究仅涉及无瓣海桑、海桑(咎启杰等,2001)和白骨壤群落(林鹏等,1998),缺少对木榄根系生物量的研究。目前,对木榄的研究,已涉及生理生态(黄丽,2013)、生物量(朱可峰等,2011)、生长动态预测

(廖宝文等,1991)、种群年龄结构(梁士楚等,2008)、群落演替(卢群等,2014)和育苗造林技术等多方面。然而,关于木榄地下根系分布特征的研究并不充分,这在一定程度上限制了对红树林生态系统的结构、功能和生产规律的深入理解。

综上,本研究以深圳湾福田红树林保护区木榄人工林为研究对象,利用分层挖掘法研究木榄不同活力和径级根系生物量及其空间分布格局,并阐明了底泥特征及其与根系生物量的交互作用,为进一步研究福田红树林地下碳分配、储量及周转速率提供科学依据和参考。

## 1 试验地、材料及方法

### 1.1 研究区概况

深圳福田红树林自然保护区( $114^{\circ}00' \sim 114^{\circ}02' \text{ E}$ ,  $22^{\circ}30' \sim 22^{\circ}32' \text{ N}$ )位于深圳湾东北岸,东起新洲河口,西至深圳红树林海滨生态公园,呈带状分布,长为9 km,总面积约368  $\text{hm}^2$ ,其中红树林覆盖面积约为111  $\text{hm}^2$ ,与香港米埔红树林保护区隔河相望(图1)。保护区内主要红树植物有秋茄(*Kandelia obovata*)、白骨壤(*Aricennia marina*)、桐花树(*Aegiceras corniculata*)、木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、海漆(*Excoecaria agallocha*)等,引种种类有无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、海桑(*Sonneratia caseolaris*)等。木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)是福田红树林本土种之一,在海滩上多分布在高潮位和淤泥深厚、表土略为坚实、通气较差的

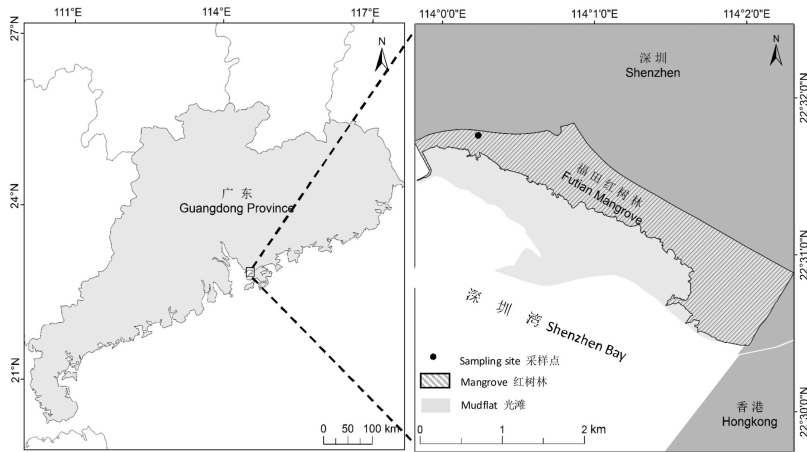


图 1 深圳湾红树林湿地采样地示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling sites in the mangrove wetland of the Shenzhen Bay

地段,具有发达的膝状或马蹄形呼吸根伸露在地面上。

## 1.2 材料与方法

**1.2.1 野外采样** 在深圳湾福田红树林保护区实验区的木榄人工林内,设立 3 个  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  的研究样地。在每个样地中,选择 3 株木榄立木(树龄 13 a, 高约 6.8 m、胸径 7 cm),采用分层挖掘法采样,共计 9 个采样点。在每个采样点的木榄植株基部,以  $120^\circ$  为间隔平均分为三部分,并在三等分线上(即 3 个重复),以林冠垂直投影范围为界,从基部到林冠边缘及连线中部分别采用分层挖掘法依次取样,各样点按 0~20、20~40 和 40~60 cm 分 3 层,样柱面积为  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 。将样柱置于自封袋中,当天运回实验室进行后续处理。样品按从表层到下层的方向平均分为 2 份,一份用于根系生物量的测定和分析,另一份用于底泥性质的测定和分析。将分好的样品及时放入  $4^\circ\text{C}$  冷柜中保存并尽快处理。

**1.2.2 根系生物量测定** 样品用 1 mm 孔径网筛流水(自来水)冲洗去泥,将洗净后的根系依据颜色、外形和质地进行分选,分离出活根(白色,质地较软)和死根(褐色,质地较硬)。根据根系直径大小分级,即活根分为极细根  $<2\text{ mm}$ 、细根  $2\sim 5\text{ mm}$ 、中根  $5\sim 10\text{ mm}$  和粗根  $>10\text{ mm}$ ;死根分为较细死根  $<10\text{ mm}$  和较粗死根  $\geq 10\text{ mm}$ 。所有径级根系用滤纸吸干水分装入信封,用电子天平准确称量鲜重并记录。随后  $85^\circ\text{C}$  烘干至恒重(约 48 h),称量干重,计算木榄活根、死根及各径级根系生物量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。各样柱根系生物量  $M = W_{\text{dry}}/S$ , 式中  $M$  为各样柱根系生

物量( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $W_{\text{dry}}$  为根系样品干重(g),  $S$  为  $1/2$  样柱面积( $\text{cm}^2$ )。木榄林平均根系生物量为各样柱根系生物量的平均值(邓坤枚等, 2005)。

**1.2.3 底泥理化性质测定** 采用烘干法测定底泥质量含水量。

$$\text{底泥质量含水量 } \theta = \frac{(M_{\text{tw}} - M_w) - (M_{\text{td}} - M_d)}{(M_{\text{tw}} - M_w)} \times 100\%$$

式中,  $M_{\text{tw}}$ 、 $M_{\text{td}}$ 、 $M_d$  和  $M_w$  分别为总湿重(g)、总干重(g)、信封重量(g)和烘干后信封重量(g)。以测得的底泥含水量为依据,分别计算出样柱的干质量,再除以样柱体积即为底泥容重。将烘干土样研磨,过 150 目尼龙筛,用 pH 计和电导率仪分别测定 pH 值和电导率(土水比 1:5)。

## 1.3 数据处理

利用 SPSS 16.0 软件进行数据统计与分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同深度、水平距离及不同径级根系生物量的差异显著性,用多因素方差分析法比较影响木榄根系生物量分布格局的主效应和交互效应,用 Pearson 相关分析法评价底泥性质与各水平根系生物量间的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 木榄不同活力根系的分布特征

木榄人工林平均根系生物量为  $61.23\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中活根的生物量占比为 86.42%, 高于死根(13.58%)。木榄活根生物量随深度增加呈先升高

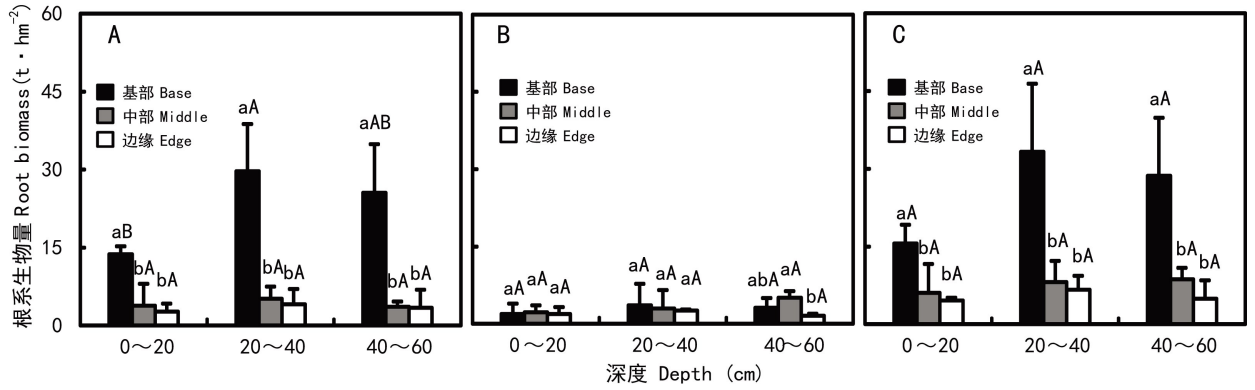


图2 木榄活根、死根及总根系生物量的空间分布 A, B, C. 活根、死根和总根系生物量。不同小写字母表示相同深度不同水平距离间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示相同距离不同深度间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Fig. 2 Spatial distribution of live, dead and total root biomass for *Bruguiera gymnorrhiza* A, B, C. Living root biomass, dead root biomass and total root biomass, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among root biomass under different distances from the tree base in the same layer at 0.05 level. Different capital letters indicate significant differences among root biomass under different depths at 0.05 level. The same below.

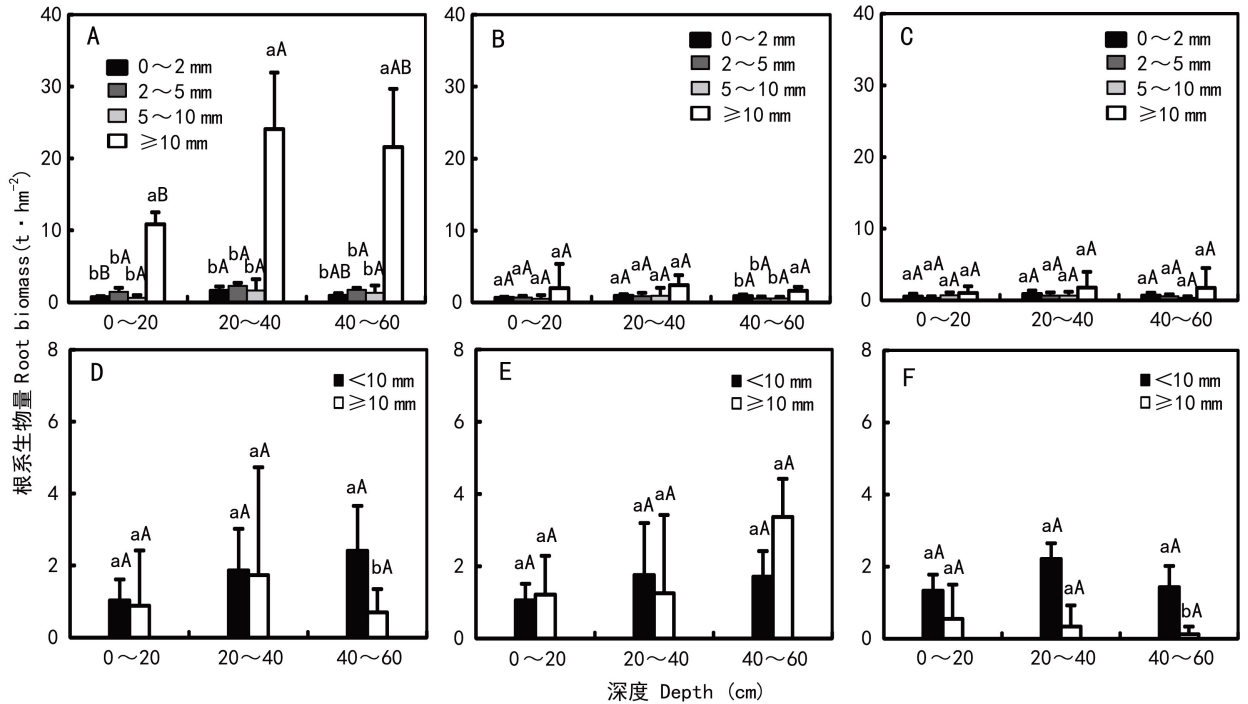


图3 木榄不同径级根系的分布 A, B, C. 基部、中部和边缘的活根生物量; D, E, F. 基部、中部和边缘的死根生物量。

Fig. 3 Spatial distribution of root biomass with different diameters for *Bruguiera gymnorrhiza* A, B, C. Basal living root biomass, middle living root biomass and edge living root biomass, respectively; D, E, F. Basal dead root biomass, middle dead root biomass and edge dead root biomass, respectively.

后降低的趋势; 在相同深度, 基部的活根生物量显著高于中部和边缘活根 ( $P < 0.05$ ) (图 2:A)。在 40~60 cm 土层中, 边缘的死根生物量显著低于中部 ( $P < 0.05$ ) (图 2:B)。总根系生物量在基部、中部和边缘分别为 77.54、22.88 和 16.15  $t \cdot \text{hm}^{-2}$  (0~60 cm) (图 2:C), 基部的总根系生物量显著高于中部和边

缘 ( $P < 0.05$ ); 且垂直分布以中下层 (20~60 cm) 居多, 分别占相应水平距离处总根系生物量的 80.89% (基部)、73.41% (中部) 和 71.76% (边缘)。

## 2.2 木榄不同径级根系的分布特征

在活根中, 不同径级根系生物量的组成为粗根 (直径 > 10 mm, 所占比例为 84.57%) > 细根 (2~5



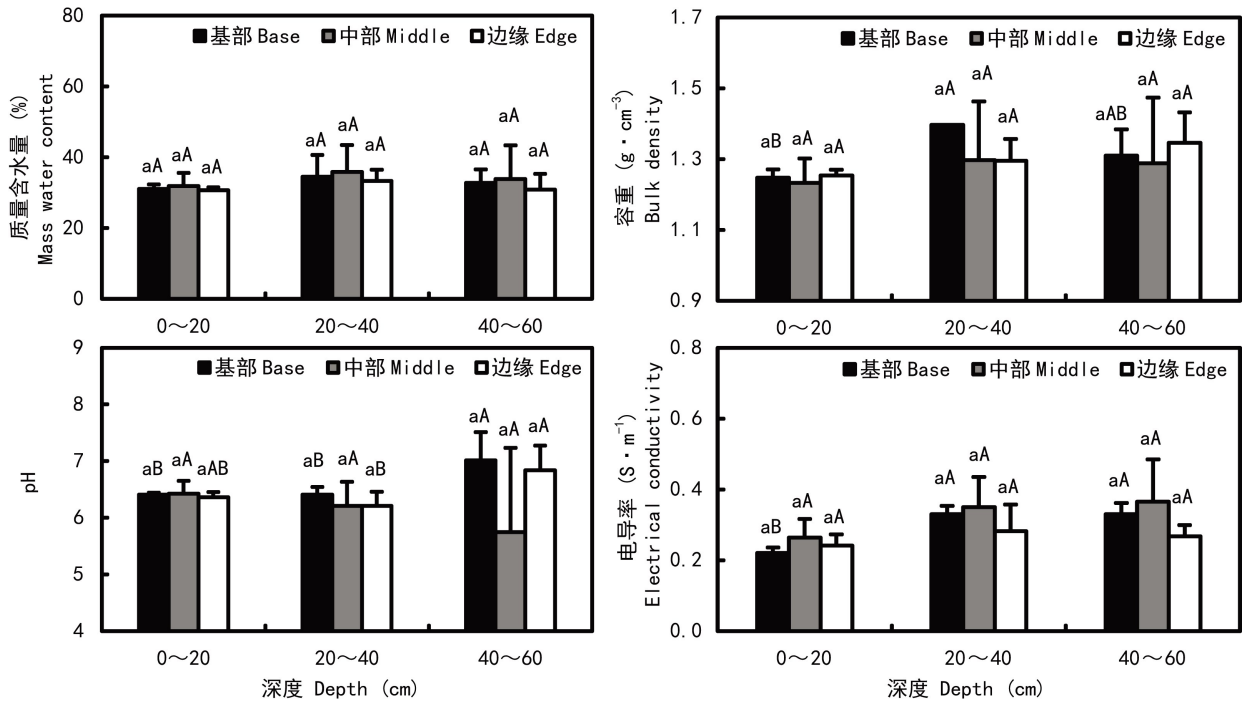


图 4 木榄群落底泥含水量、容重、pH 和电导率的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of water content, bulk density, pH and electrical conductivity in sediment of *Bruguiera gymnorhiza*

mm, 5.84%) > 极细根 (< 2 mm, 4.94%) > 中根 (5 ~ 10 mm, 4.66%)。各径级活根生物量的水平变化趋势为基部 > 中部 > 边缘 (图 3:A, B, C)。其中, 基部直径 > 10 mm 的活根生物量在中部和边缘活根生物量的 5 倍以上; 随着水平距离增加, < 2 mm 根系生物量占相应距离处活根生物量的比例逐步提高, 分别为 5.78%、19.45% 和 20.98%。在基部底泥中, > 10 mm 的根系生物量 ( $56.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 显著高于其它径级的根系 ( $P < 0.05$ ), 且随着深度增加, 呈现先升高后降低的趋势 (图 3:A)。在中部底泥中, 40~60 cm 土层中直径 > 10 mm 活根生物量显著高于其它径级活根生物量 ( $P < 0.05$ ) (图 3:B)。

在死根中, 直径 < 10 mm 死根生物量占死根生物量的比例分别为 61.59% (基部)、43.66% (中部)、83.12% (边缘);  $\geq 10 \text{ mm}$  死根生物量所占比例分别为 38.41% (基部)、56.34% (中部)、16.88% (边缘)。在基部和边缘的 40~60 mm 土层中, 直径 < 10 mm 死根生物量显著高于直径  $\geq 10 \text{ mm}$  的死根 ( $P < 0.05$ ) (图 3:D 和 3:F)。在 40~60 mm 的中部底泥中, 直径  $\geq 10 \text{ mm}$  死根生物量显著高于基部和边缘 ( $P < 0.05$ ) (图 3:E)。

### 2.3 底泥理化特征及其对根系空间分布的影响

底泥含水量、容重、pH 和电导率的变化分别为

( $30.66 \pm 0.88$ )% ~ ( $35.86 \pm 7.59$ )%、( $1.23 \pm 0.07$ ) ~ ( $1.40 \pm 0.00$ )  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $5.75 \pm 1.49$  ~  $7.01 \pm 0.50$  和 ( $0.22 \pm 0.02$ ) ~  $0.37 \pm 0.12 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  (图 4)。基部 0~20 cm 土层的底泥容重显著低于 20~40 cm 土层 ( $P < 0.05$ ), 基部 40~60 cm 土层的 pH 显著高于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 ( $P < 0.05$ ), 基部 0~20 cm 土层电导率显著低于 20~40 和 40~60 cm 土层 ( $P < 0.05$ )。边缘 20~40 cm 土层的 pH 显著低于 40~60 cm 土层 ( $P < 0.05$ )。

从表 1 可以看出, 总根生物量受水平距离的影响显著 ( $P < 0.01$ )。活根生物量受水平距离 ( $P < 0.05$ ) 和深度 ( $P < 0.01$ ) 的影响。直径 2~5 mm ( $P < 0.01$ ) 和直径 > 10 mm ( $P < 0.01$ ) 的活根生物量受水平距离的影响显著; 而直径 < 2 mm 的活根生物量受深度的影响较大 ( $P < 0.05$ )。

从表 2 可以看出, 底泥含水量、pH 和电导率对根系生物量有一定的影响, 但均未达到显著的水平 ( $P > 0.5$ )。底泥容重与总根系生物量和不同活力根系生物量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。在不同径级的根中, 容重与直径 > 10 mm 活根和直径  $\geq 10 \text{ mm}$  死根生物量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。木榄根系对底泥容重变化的响应明显, 底泥容重是影响木榄根系空间分布的主要环境影响因子之一。

表1 底泥深度和水平距离对木榄根系生物量影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of effects of sediment depth, Horizontal distance and their interactions on root biomass of *Bruguiera gymnorhiza*

变异来源 Source of variance	水平距离 Horizontal distance (H)	底泥深度 Sediment depth (S)	H×S
总根系生物量 Total root biomass	26.647 **	3.004	1.574
总活根生物量 Total living root biomass	45.288 **	3.714 *	2.459
<2 mm (LR)	2.537	4.418 *	0.833
2~5 mm (LR)	28.542 **	3.301	0.726
>10 mm (LR)	50.154 **	3.261	2.639

注: 输出结果为双因素方差分析的  $F$  值; **LR**. 活根; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。  
Note: Data were  $F$  values; **LR**. Living root; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ .

表2 底泥理化性质与木榄根系生物量的相关性分析  
Table 2 Correlation analysis between sediment physicochemical properties and root biomass of *Bruguiera gymnorhiza*

底泥性质 Sediment feature	pH	含水量 Water content (%)	容重 Bulk density ( $g \cdot cm^{-3}$ )	电导率 Electrical conductivity ( $S \cdot m^{-1}$ )
总根生物量 Total root biomass	0.155	0.152	-0.477 *	0.184
活根生物量 Total living root biomass	0.197	0.121	-0.424 *	0.141
死根生物量 Total dead root biomass	-0.158	0.223	-0.462 *	0.294
<2 mm (LR)	0	-0.165	-0.156	0.04
2~5 mm (LR)	0.112	-0.004	-0.301	0.019
5~10 mm (LR)	-0.031	0.148	-0.316	0.179
>10 mm (LR)	0.219	0.133	-0.429 *	0.143
<10 mm (DR)	0.113	0.306	-0.375	0.301
≥10 mm (DR)	-0.275	0.133	-0.417 *	0.232

注: **LR**. 活根; **DR**. 死根; \*  $P < 0.05$ 。  
Note: **LR**. Living root; **DR**. Dead root; \*  $P < 0.05$ .

### 3 讨论与结论

#### 3.1 木榄根系的分布特征

树木根系生物量随树龄的增加而增大,在一定时期达到最大值,然后逐渐下降并趋于稳定(林希昊等,2011)。本研究中,福田红树林树龄 13 a 的木榄在 0~60 cm 深度底泥内的根系生物量约为 61.23

$t \cdot hm^{-2}$ , 高于海南树龄 20 a 的木榄根系生物量 ( $25.26 t \cdot hm^{-2}$ ) (廖宝文等,1991) 和广东湛江树龄 10 a 的木榄根系生物量 ( $14.89 t \cdot hm^{-2}$ ) (朱可峰等,2011)。与其它陆生树木相比,本研究中的木榄根系生物量明显高于水曲柳 ( $16.38 t \cdot hm^{-2}$ , 17 a) (梅莉等,2006)、云南松 ( $18.91 t \cdot hm^{-2}$ , 62 a) (邓坤枚等,2005) 和油松 ( $5.36 \sim 36.92 t \cdot hm^{-2}$ , 20 a) (贾全全等,2015)。此外,木榄 <2 mm 的活根生物量占总根系生物量的 4.00%~13.00%,远小于红海榄群落 <2 mm 的根系生物量比例 (48.73%) (林鹏等,1992),说明木榄的地下细根周转速度和向土壤的归还能力小于红海榄,可能与植物种的特异性以及环境的水文特征有关,有待进一步研究。

根系在土壤中的空间结构和分布一定程度上决定了植物获取土壤资源的多寡,以及植物对土壤资源竞争力的大小 (Adame et al, 2014; Cormier et al, 2015; 程瑞梅等, 2012; 高祥, 2014)。根系生物量的垂直分布随着土层的加深而减少,而且表层根系获取水分和养分,下层根系主要吸收水分 (Burton et al, 2000; 杜明新等, 2014; 高祥, 2014)。本研究中,木榄活根生物量在 20~40 cm 深度底泥中较高,0~20 cm 深度分布较少,可能是由于红树林 20~40 cm 深度底泥养分含量最高,使得木榄根系在该层分布较多的营养根来吸收养分 (王文卿和王瑁, 2007)。木榄死根生物量主要分布在中下层,中层的分布与活根生物量主要分布在中层相适应;在下层分布较多可能是由于下层底泥温度偏低,分解速度较慢而导致死根积累 (程瑞梅等, 2012)。

细根生物量随着与树干的水平距离的增加而减小 (杨秀云等, 2008), 另一些研究表明细根生物量分布与水平距离间的关系不大 (Kummerow et al, 1990)。本研究中,木榄总根系生物量水平分布格局表现为从基部到树冠落水线逐渐递减,与 Tamoooh et al (2008) 对肯尼亚 Gazi Bay 的白骨壤、红茄苳和杯萼海桑的水平分布格局的研究结果相似。此外,木榄 <2 mm 活根生物量的水平分布格局表现为随着水平距离的增加而减少,且占相应水平距离处根系生物量的比例随着水平距离的增加而增加。本研究分析了底泥深度和水平距离对木榄根系生物量的影响,结果表明总活根生物量显著受到土层深度 ( $P < 0.05$ ) 和水平距离的影响 ( $P < 0.01$ ); <2 mm 活根生物量主要受土层深度的影响,这一结论与华北落叶松 (杨秀云等, 2008) 和三峡库区马尾松 (程

瑞梅等, 2012; 杨秀云等, 2008) 细根生物量受土层深度影响的研究结果相同; 另外, 2~5 mm 和 >10 mm 的活根均受到深度和水平距离的影响, 在一定程度上说明木榄细根对环境变化敏感。

### 3.2 底泥理化特征对木榄根系空间分布的影响

植物根系受到物种特性、气候条件和土壤条件等多种因素的影响 (Imada et al, 2015; 苏纪帅等, 2013)。盐度是影响植物生长的重要因素之一, 对红树植物根系的生长存在低促高抑的作用 (王文卿和林鹏, 1999), 电导率值可用于表征底泥含盐量的高低。土壤容重和土壤含水量是影响根系分布的关键因素 (刘晚苟等, 2015; 韦兰英等, 2006; 杨丽韞等, 2007)。本研究中, 底泥电导率和含水量的空间分布与木榄根系生物量之间的相关性均不显著, 这可能与木榄长期适应高盐和水淹胁迫有关。底泥容重总体表现为中下层高于上层, 中部低于边缘和基部的分布特点。底泥中下层较大的容重与根系主要分布在中下层相矛盾, 这主要是由木榄群落底泥的质地随着深度的增加, 逐渐由黏土质转变为沙壤质引起的。底泥容重与根系总生物量、活根生物量、死根生物量、>10 mm 活根和  $\geq 10$  mm 死根呈现显著负相关关系, 这与陆生植物群落土层深度增加, 容重变大, 根系生物量变少的特点相一致 (刘晚苟等, 2015; 苏纪帅等, 2013; 张毓涛等, 2013)。可见, 一方面不同水平距离和深度底泥理化性质的异质性, 影响了木榄地下根系的分布; 另一方面, 植物根系趋于疏松肥沃、有机质含量高、孔隙度大的底泥, 能够改善土壤的理化特性和营养状态; 土壤特性的变化与植物根系空间分布的变化相辅相成, 二者始终处在一种相互影响的动态变化中。

### 参考文献:

ADAME MF, KAUFFMAN JB, MEDINA I, et al, 2013. Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican caribbean [J]. *PLoS ONE*, 8(2): e56569.

ADAME MF, TEUTLI C, SANTINI NS, et al, 2014. Root biomass and production of mangroves surrounding a karstic oligotrophic coastal lagoon [J]. *Wetlands*, 34(3): 479-488.

BURTON AJ, PREGITZER KS, HENDRICK RL, 2000. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests [J]. *Oecologia*, 125(3): 389-399.

CHENG RM, WANG RL, XIAO WF, et al, 2012. Spatial distribution of root biomass of *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 32(3): 823-832. [程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等, 2012. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布 [J]. *生态学报*, 32(3): 823-832.]

COMEAU P, KIMMINS J, 1989. Above and below ground biomass and production of lodge pole pine on sites with differing soil moisture regimes [J]. *Can J For Res*, 19: 447-454

CORMIER N, TWILLEY RR, EWEL KC, et al, 2015. Fine root productivity varies along nitrogen and phosphorus gradients in high-rainfall mangrove forests of Micronesia [J]. *Hydrobiologia*, 750(1): 69-87.

DENG KM, LUO TX, ZHANG L, et al, 2005. Root biomass of different stand-age *Pinus yunnanensis* forests and its distribution pattern indifferent soil depths [J]. *Chin J Appl Ecol*, 16(1): 21-24. [邓坤枚, 罗天祥, 张林, 等, 2005. 云南松林的根系生物量及其分布规律的研究 [J]. *应用生态学报*, 16(1): 21-24.]

DU MX, ZHOU XR, ZHOU ZY, et al, 2014. Vertical root distribution characteristics of *Amorpha fruticosa* on southern Mu Us Sandy Land [J]. *Acta Pratac Sin*, 23(2): 125-132. [杜明新, 周向睿, 周志宇, 等, 2014. 毛乌素沙南缘紫穗槐根系垂直分布特征 [J]. *草业学报*, 23(2): 125-132.]

GAO X, 2014. The root biomass and spatial distribution of *Pinus massoniana* in different communities [D]. Guizhou: Guizhou University. [高祥, 2014. 不同马尾松人工林根系生物量及空间分布 [D]. 贵州: 贵州大学.]

HUANG L, 2013. The seasonal dynamics of photosynthesis of *Kandelia candel*, *Avicennia marina*, *Aegiceras corniculatum* and *Bruguiera gymnorrhiza* in Zhangjiang Estuary [J]. *Wet Sci*, 11(1): 82-89. [黄丽, 2013. 福建省漳江口秋茄、桐花树、白骨壤和木榄光合作用季节动态研究 [J]. *湿地科学*, 11(1): 82-89.]

IMADA S, MATSUO N, ACHARYA K, et al, 2015. Effects of salinity on fine root distribution and whole plant biomass of *Tamarix ramosissima* cuttings [J]. *J Arid Environ*, 114: 84-90.

JIA QQ, LUO CW, LIU QJ, et al, 2015. Biomass allocation in relation to stand density in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed*, 39(4): 1-8. [贾全全, 罗春旺, 刘琪璟, 等, 2015. 不同林分密度油松人工林生物量分配模式 [J]. *南京林业大学学报·自然科学版*, 39(4): 1-8.]

KUMMEROW J, CASTILLANOS J, MAAS M, et al, 1990. Production of fine roots and the seasonality of their growth in a Mexican deciduous dry forest [J]. *Vegetation*, 90(1): 73-80.

LEPPÄLAMMI-KUJANSUU J, ARO L, SALEMAA M, et al, 2014. Fine root longevity and carbon input into soil from below- and aboveground litter in climatically contrasting forests [J]. *For Ecol Manag*, 326: 79-90.

LIANG SC, JIANG XX, LI F, 2008. Age structure of *Bruguiera gymnorrhiza* populations at Yingluogang Bay in Guangxi, China [J]. *J Mar Sci*, 26(4): 35-40. [梁士楚, 蒋潇潇, 李峰, 2008. 广西英罗港红树植物木榄种群年龄结构的研究 [J]. *海洋学研究*, 26(4): 35-40.]

LIAO BW, ZHENG DZ, ZHENG SF, et al, 1991. The grey dynamic forecast of the biomass of *Bruguiera gymnorrhiza* stand [J]. *For Res*, 4(4): 360-367. [廖宝文, 郑德璋, 郑松发, et al, 1991. 木榄林生物量的灰色动态预测 [J]. *林业科学研究*, 4(4): 360-367.]

LIN P, HU HY, ZHENG WJ, et al, 1998. A study on the biomass and energy of mangrove communities in Shenzhen Bay [J]. *Sci Silv Sin*, 34(1): 20-26. [林鹏, 胡宏友, 郑文教, 等, 1998. 深圳福田白骨壤红树林生物量和能量研究 [J]. *林业科学*, 34(1): 20-26.]

LIN P, YIN Y, LU CY, 1992. Biomass and productivity of *Rhizo-*



- phora stylosa* community in Yingluo Bay of Guangxi, China [J]. J Xiamen Univ: Nat Sci Ed, 31(2): 199-202. [林鹏, 尹毅, 卢昌义, 1992. 广西红海榄群落的生物量和生产力 [J]. 厦门大学学报·自然科学版, 31(2): 199-202.]
- LIN XH, CHEN QB, HUA YG, et al, 2011. Soil moisture content and fine root biomass of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations at different ages [J]. Chin J Appl Ecol, 22(2): 331-336. [林希昊, 陈秋波, 华元刚, 等, 2011. 不同树龄橡胶林土壤水分和细根生物量 [J]. 应用生态学报, 22(2): 331-336.]
- LIU WG, LI LX, XIE HR, et al, 2015. Effect of soil bulk density on root morphology and biomass of vetiver grass seedlings [J]. Acta Pratac Sin, 24(4): 214-220. [刘晚苟, 李良贤, 谢海容, 等, 2015. 土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响 [J]. 草业学报, 24(4): 214-220.]
- LU Q, ZENG XK, SHI JH, et al, 2014. Succession of a mangrove forest in Futian, Shenzhen Bay [J]. Acta Ecol Sin, 34(16): 4 662-4 671. [卢群, 曾小康, 石俊慧, 等, 2014. 深圳湾福田红树林群落演替 [J]. 生态学报, 34(16): 4 662-4 671.]
- MA HL, DU ZY, LIU FC, et al, 2014. Root distribution and fine root growth in mixed plantation of *Robinia pseudoacacia* and *Fraxinus velutina* in coastal saline-alkali area [J]. Sci Silv Sin, 50(3): 10-15. [马海林, 杜振宇, 刘方春, 等, 2014. 滨海盐碱地人工刺槐绒毛白蜡混交林的根系分布与细根生长 [J]. 林业科学, 50(3): 10-15.]
- MEI L, WANG ZQ, HAN YZ, et al, 2006. Distribution patterns of *Fraxinus mandshurica* root biomass, specific root length and root length density [J]. Chin J Appl Ecol, 17(1): 1-4. [梅莉, 王政权, 韩有志, 等, 2006. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局 [J]. 应用生态学报, 17(1): 1-4.]
- REN H, CHEN H, LI ZA, et al, 2010. Biomass accumulation and carbon storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in Southern China [J]. Plant Soil, 327(1-2): 279-291.
- REN H, WU X, NING T, et al, 2011. Wetland changes and mangrove restoration planning in Shenzhen Bay, Southern China [J]. Landsc Ecol Eng, 7(2): 241-250.
- SU JS, CHENG JM, GAO Y, et al, 2013. Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, Northwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 24(3): 626-632. [苏纪帅, 程积民, 高阳, 等, 2013. 宁夏大罗山 4 种主要植被类型的细根生物量 [J]. 应用生态学报, 24(3): 626-632.]
- SUN T, DONG L, MAO Z, et al, 2015. Fine root dynamics of trees and understory vegetation in a chronosequence of *Betula platyphylla* stands [J]. For Ecol Manag, 346: 1-9.
- TAMOOH F, HUXHAMD M, KARACHI M, et al, 2008. Below-ground root yield and distribution in natural and replanted mangrove forests at Gazi bay, Kenya [J]. For Ecol Manag, 256(6): 1 290-1 297.
- TUE NT, DUNG LV, NHUAN MT, et al, 2014. Carbon storage of a tropical mangrove forest in Mui Ca Mau National Park, Vietnam [J]. Catena, 121: 119-126.
- WANG ST, HAN SJ, ZHANG JH, et al, 2010. Woody plant fine root biomass and its spatial distribution in top soil of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. Chin J Appl Ecol, 21(3): 583-589. [王树堂, 韩士杰, 张军辉, 等, 2010. 长白山阔叶红松林表层土壤木本植物细根生物量及其空间分布 [J]. 应用生态学报, 21(3): 583-589.]
- WANG WQ, LIN P, 1999. Influence of substrate salinity on the growth of mangrove species of *Bruguiera gymnorhiza* seedling [J]. J Xiamen Univ: Nat Sci Ed, 38(2): 121-127. [王文卿, 林鹏, 1999. 盐度对红树植物木榄生长的影响 [J]. 厦门大学学报·自然科学版, 38(2): 121-127.]
- WANG WQ, WANG M, 2007. The mangrove in China [M]. Beijing: Science Press. [王文卿, 王璿, 2007. 中国红树林 [M]. 北京: 科学出版社.]
- XIAO YF, OU GL, XU H, 2013. Tree Fine root biomass distribution and its dynamic research [J]. For Invent Plann, 38(1): 34-38. [肖义发, 欧光龙, 胥辉, 2013. 林木细根生物量分布及其动态研究综述 [J]. 林业调查规划, 38(1): 34-38.]
- YANG LY, LUO TX, WU ST, 2007. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, Northeast China [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 27(9): 3 609-3 617. [杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛, 2007. 长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及其次生林细根生物量与垂直分布特征 [J]. 生态学报, 27(9): 3 609-3 617.]
- YANG XY, HAN YZ, ZHANG YX, 2008. Effects of horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamics in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. Chin J Plant Ecol, 32(6): 1 277-1 284. [杨秀云, 韩有志, 张芸香, 2008. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化 [J]. 植物生态学报, 32(6): 1 277-1 284.]
- ZAN QJ, WANG YJ, LIAO BW, et al, 2001. Biomass and net productivity of *Sonneratia apetala*, *S. caseolaris* mangrove man-made forest [J]. J Bot Res, 19(5): 391-396. [昝启杰, 王勇军, 廖宝文, 等, 2001. 无瓣海桑、海桑人工林的生物量及生产力研究 [J]. 武汉植物学研究, 19(5): 391-396.]
- ZHANG YT, HU SS, LI JM, et al, 2013. Characteristic of root biomass of three main forest types in Xinjiang [J]. Arid Land Geogr, 36(2): 269-276. [张毓涛, 胡莎莎, 李吉玫, 等, 2013. 新疆 3 种主要森林类型根系生物量变化特征研究 [J]. 干旱区地理, 36(2): 269-276.]
- ZHU KF, LIAO BW, ZHANG JE, 2011. Studies on the biomass of mangrove plantation of *Sonneratia apetala* and *Bruguiera gymnorhiza* in the wetland of Nansha in Guangzhou City [J]. For Res, 24(4): 531-536. [朱可峰, 廖宝文, 章家恩, 2011. 广州市南沙红树植物无瓣海桑、木榄人工林生物量的研究 [J]. 林业科学研究, 24(4): 531-536.]
- ZHU YH, LIU L, LIU K, et al, 2014. Progress in researches on plant biomass of mangrove forests [J]. Wetl Sci, 12(4): 515-518. [朱远辉, 柳林, 刘凯, 等, 2014. 红树林植物生物量研究进展 [J]. 湿地科学, 12(4): 515-518.]