

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.019

浙江苍南沿浦湾秋茄人工林 早期生长特征研究

来洪运¹, 王咏雪², 章翊涵¹, 梁海³, 俞松立⁴,
章凯¹, 张丽源¹, 水柏年^{1*}

(1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316000; 2. 台州市海洋环境监测中心, 浙江 台州 318000;
3. 台州市污染防治工程技术中心, 浙江 台州 318000; 4. 浙江省第十一地质大队, 浙江 温州 325000)

摘要: [目的] 比较福建九龙江、云霄和广东深圳 3 个种源 7 个样地秋茄的生长差异, 凝练种苗采购和宜林地选择技术。[方法] 基于 7 个样地的数据, 采用方差分析、多重比较及回归分析研究秋茄株高与地径、叶片数量之间的关系。[结果] 7 个样地的秋茄生长存在一定的差异, 向陆林区样地 A 的秋茄平均株高、地径和叶片数比向海样地 D 的大, 非潮沟边样地 C 的秋茄较比邻潮沟中间样地 B 的生长好, 互花米草区样地 E 的秋茄比向陆样地 A 的生长差; 秋茄株高与地径、叶片的二元线性回归模型为 $Y = -2.941 + 26.785X_1 + 0.047X_2$ ($R^2 = 0.872, P < 0.01$), 二元非线性回归模型为 $Y = -356.815 + 26.396X_1 + 340.407X_2^{0.01}$ ($MS = 0.875, P < 0.01$); 株高与地径的一元线性回归模型为 $Y = -48.961 + 89.203X_1 - 23.88X_1^2 + 2.548X_1^3$ ($R^2 = 0.941, P < 0.01$), 一元非线性模型为 $Y = 289.888X_1 / (X_1 + 8.913)$ ($MS = 3.626, P < 0.01$); 福建云霄种源秋茄比九龙江和广东深圳的更适宜引种在沿浦湾。[结论] 秋茄宜林地应选在水动力较弱的滩涂区, 潮沟边缘栽种前应适当改造生境, 以减小潮流的冲击; 互花米草区需在清除后较长时间方可栽种秋茄; 向海林区边缘造林时应采取措施减小潮水和藤壶等污损生物的胁迫影响; 种苗采购应选择与拟栽种区气候较接近的种源地。

关键词: 沿浦湾; 种源; 秋茄; 回归模型; 生长差异

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)04-0156-10

红树林是生长在沿海潮间带的木本植物群落, 是陆海生态过渡带特有的湿地生态系统, 在维持海湾河口生态系统的稳定和平衡中起着不可替代的作用^[1], 具有重要的生态服务功能和生态特性, 在保障沿海生态安全和生物多样性保护等方面有着举足轻重的地位^[2]。多去的 50 年, 大规模的围海造田、乱砍滥伐、围塘养殖使中国红树林面积锐减、林分退化、质量下降^[3-4]。尽管国家采取了一定措施, 城市化进程、港口码头及开发区的建设, 使中国的红树林又一次遭到破坏^[5], 近 30 年来, 随着人们对红树林重视程度的提高, 直接的破坏已鲜有

发生, 但红树林依旧受到不同程度的威胁^[4], 保护和恢复红树林刻不容缓。特别是近年来, 各级政府日益重视红树林湿地, 将其纳入沿海防护林体系, 有力地促进了我国红树林的恢复和科学管理^[4]。保护红树林需要了解红树植株的形态特征和生长规律, 其物理参数, 如株高和地径是红树植物的生长、物候和死亡必不可少的重要特征^[6]。株高和地径间有很高的相关性, 简单、准确的株高地径模型有利于株高的准确估算, 根据林分直径和株高的频率分布构建林分直径和株高的概率分布模型十分必要^[7-8]。

收稿日期: 2020-11-10 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LQ21C030006); 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604902); 浙江省基础公益研究计划项目 (LGN18D060001)

* 通讯作者: 水柏年, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋生物资源和生态方面的教学与科研。电话: 05802550050. Email: shuibonian@163.com

目前, 国外许多学者对红树林研究多集中在红树林恢复问题^[9-11]、红树林系统结构和相关的生态学问题^[12-13]、红树林中的动物^[14]、红树林植被对养分沉积的影响^[15]; McMillan^[16]评估了环境因素对德克萨斯州中部海岸红树林幼苗生长的影响, 结果表明, 盐度不是限制幼苗生长的主要因素, 潮流均会抑制根和幼苗的发育, 一定的水深可以促进根系的扩展, 高温对无茎幼苗具有致命性。国内研究者对热带地区的红树林研究较多, 主要有廖宝文等^[17]对红树植物海桑 (*Sonneratia caseolaris* (L.) Engler) 采种期、播种与育苗技术、幼苗生长规律及其与主要环境因子的关系进行研究; 王佳燕^[18]研究了海南东寨港 5 种红树植物主要生长特征因子间的关系, 建立了 5 种树种的株高与地径的多元线性回归模型; 梁士楚^[19]研究了广西英罗湾红树植物幼苗的生长, 拟合了幼苗主要形态因子的回归模型; 李娜等^[20]研究了广东省常见红树植物株高与胸径 (或地径) 之间的相关关系, 建立了适用于广东省内的红树林株高与胸径 (或地径) 关系模型; 钟晓青等^[21]对福田红树林桐花树 (*Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco) 和秋茄 (*Kandelia candel* (L.) Druce) 的生长特征研究显示, 2 树种有很长的成熟和衰老期。国内对北缘区秋茄的生长特征研究相对较少, 主要包括秋茄的抗寒性能和秋茄林营建关键技术等, 郭菊兰等^[22]研究了低温胁迫对秋茄幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响及秋茄幼苗对低温胁迫的防御机制, 为抗寒性红树植物种的选育、引种提供了参考; 许加意^[23]在温州市苍南县鳌江口滩涂地进行了秋茄造林试验, 探讨了浙南地区秋茄红树林的营建技术; 国内对北缘红树林株高与地径关系模式的研究还未见报道。

多年来, 沿浦湾滩涂湿地生态系统因过度开发利用而呈退化趋势, 物种多样性下降, 大型底栖动物的密度和生物量下降, 养殖病害频发, 效益下降。国家海洋局“十三五”规划把沿浦湾纳入规划修复的 50 个小海湾之一。鉴于此, 苍南县人民政府从 2014 年开始规划建设沿浦湾秋茄林, 到 2019 年已经建成秋茄林 0.67 km², 长势良好。沿浦湾省级海洋公园选划在即, 开展北缘区人工栽培秋茄生长特征研究, 以期为沿浦湾及其附近滩涂秋茄林建设、保护和经营管理提供技术指导。

1 研究区域概况

沿浦湾位于温州市苍南县最南端沿浦镇

(27.20° N、120.45° E), 湾口东起霞关镇, 西至虎头鼻, 宽约 3 000 m, 内延伸 6 000 m, 面积 19.235 km², 平均水深 2 m; 亚热带海洋性季风气候区, 根据查询苍南县气象台多年统计资料, 该区多年平均气温 18.2℃, 历史最冷月 (1 月) 平均气温 7.9℃, 累年极端最低气温 -2.2℃ (1973 年 12 月 25 日)。下在河、沿浦河和岭尾河淡水注入, 底质以软泥粉砂为主, 年日照时数 1 672.9~1 866.8 h, 年平均无霜期 274 d^[24]。

2 研究方法

2.1 调查方法

研究对象为栽培于浙江苍南沿浦湾的人工秋茄树, 分别引种自福建九龙江、云霄和广东深圳 3 个种源的秋茄幼苗, 种源地概况见表 1。根据沿浦湾的实际情况将秋茄林区分为 4 个区域, 依次为向陆林区、中间林区、向海林区和互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel.) 区, 共布设 7 块样地 (A~G) (图 1), 其中, A、B、C、D、E 为福建九龙江红树林保护区种源, 以下简称“九龙江”; F 样地为福建云霄种源, 以下简称“云霄”; G 样地种源来自广东深圳福田国家红树林保护区, 以下简称“深圳”。

表 1 3 个秋茄种源地位置、气候与日照概况

Table 1 Basic conditions of location, climate and sunshine of 3 *Kandelia candel* provenances

项目 Items	种源 Provenance		
	福建云霄 Yunxiao, Fujian	福建九龙江 Jiulongjiang, Fujian	广东深圳 Shenzhen, Guangdong
纬度 Latitude (N)	23°55'	24°26'	22°31'
经度 Longitude (E)	117°24'	117°54'	114°00'
1月平均温度 Lowest temperature/℃	13.4	13.5	14.1
7月平均温度 Maximum temperature/℃	28.2	28.9	28.2
年均温 Annual mean temperature/℃	21.2	21.5	22.5
年降水量 Annual total precipitation/mm	1714	1563	1926
无霜期 Frostless period/d	347.4	337	/
年积温 ≥ 10℃ Annual accumulated temperature ≥ 10℃/℃	7 548.8	/	/
平均日照时数 Average sunshine hours/h	1 835.8	2 000.8	2 200

注: 表中“/”表示数据缺失。

Note: In the table“/” means data is missing.

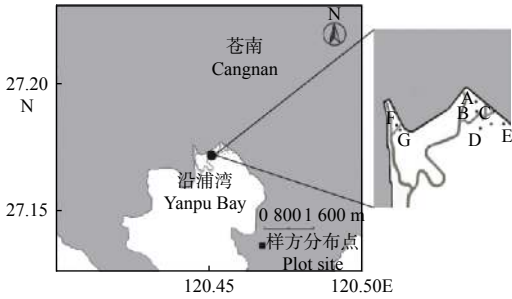


图1 沿浦湾秋茄调查样地分布
Fig. 1 Distribution of survey plots of *Kandelia candel* in Yanpu Bay

A、F、G样地离堤岸约50 m，作为向陆林区样地；B样地离堤岸约150 m处，作为比邻潮沟的中间林区样地；C样地离堤岸约150 m处，作为中间林区样地；D样地离秋茄林区外缘约50 m处，作为向海林区的样地；E样地离岸约50 m处，作为原互花米草清除后种植秋茄的样地。苍南县沿浦湾红树林种植采用国家标准《红树林建设技术规程》^[25]、《困难立地红树林造林技术规程》^[26]和浙江省地方标准《红树林造林技术规程》^[27]，基于数据统计和沿浦湾秋茄的栽种密度要求设置样地

为3 m × 3 m，采用标志桩法^[28]分别在每个样地的4个角垂直插入4根长约2.0 m的标志毛竹桩框定样地位置，监测冲淤动态以修正株高和地径的生长量。

从2017年秋季至2019年秋季定期定点监测冲淤动态和秋茄的株高、地径和叶片数量；现场测定标志桩暴露在滩面以上的高度，统计4个标志桩露滩高度平均值(M_0)，之后再同样测定并计算4个标志桩顶端距滩面垂直距离的平均值(Mx)， M_0 与 Mx 的差值即为该时段的冲淤变化值，正值为淤积，负值表示冲刷^[29]。株高和地径用皮尺实测，精确到0.1 cm。

2.2 数据处理

2.2.1 株高与地径还原计算 以滩涂淤积为例(图2)，树干自上而下沿中心线剖开后拟看成一个三角形， Y_1 和 X_1 表示试验开始第1次即2017年秋季测量的株高和地径， Y_2 和 X_2 表示后次即2017年冬季、2018年春夏秋冬4季和2019年春季2季测量的株高和地径， h 表示季节间段的淤积量， Y 和 X 表示后次实际株高和地径，其计算公式如下：

$$X = Y \times X_2 / Y_2$$

$$Y = Y_2 + h$$

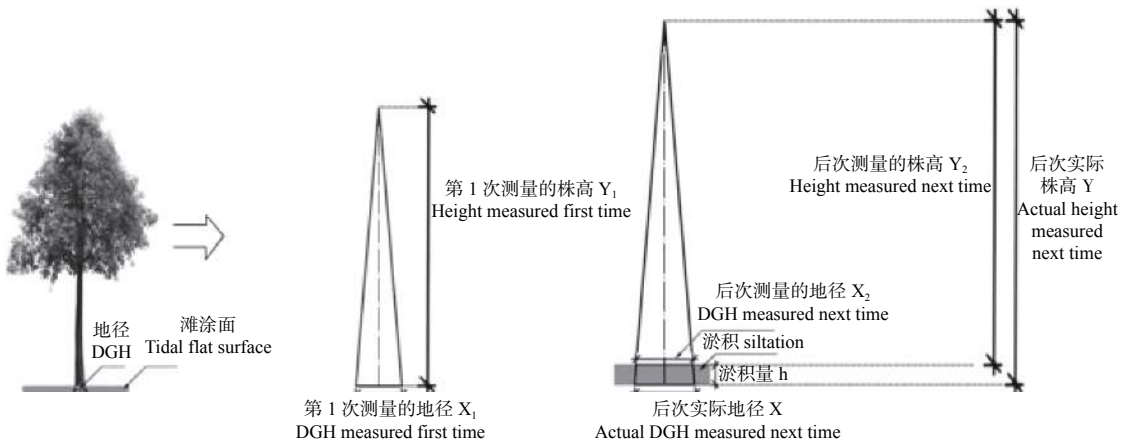


图2 秋茄株高、地径及剖面图

Fig. 2 The height, ground diameter of *Kandelia candel* and its profile

2.2.2 回归分析 通过Excel 2019作出株高与地径的散点图，其次参照表2中的模型，利用IBM SPSS 24.0软件进行株高与地径、叶片数的二元线性和非线性回归分析及株高与地径的一元线性和非线性回归分析，得到各模型的参数 a 、 b 、 c 、 d ，根据模型的置信度(P 值)、决定系数(R^2)或均方(MS)来判断得出最佳生长模型。

调查所得数据采用Excel 2019和IBM SPSS24.0

表2 回归模型统计表

Table 2 Regression model statistics

线性回归模型 Linear regression model	参考文献 Reference	非线性回归模型 Non-linear regression model	参考文献 Reference
$Y = a + bX + cX^2$	[30]	$Y = aX/(X + b)$	[17]
$Y = a + bX$	[31]	$Y = ae^{-bX^c}$	[17]
$Y = a + bX + cX^2 + dX^3$	[31]	$Y = a(1 - e^{-bX^c})$	[17]
$Y = aX^b$	[32]	$Y = a(1 - e^{-bX})$	[17]
$Y = ae^{bX}$	[32]	$Y = a(1 + be^{-cX})$	[31]

软件进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 冲淤特征

由表3可知: 2017—2019年8个季节时段的7个样地季节间段呈现冲刷或淤积特征, 总体上淤积重于冲刷; 2017年秋季至冬季, 7个样地中只

有D、E 2个样地处于冲刷状态, 其余5个样地均处于淤积状态; 2018年夏季至秋季, 7个样地中只有F、G 2个样地处于冲刷状态, 其余5个样地均处于淤积状态, 且A样地淤积最严重(10.53 cm); 2019年春季至秋季, 7个样地中只有B样地处于冲刷状态, 其余6个样地均处于淤积状态。

表3 沿浦湾2017至2019年7个样地在8个季节间段的冲淤情况

Table 3 Erosion and deposition of seven plots during the eight seasons in Yanpu Bay from 2017 to 2019

样地 Plot	2017年				2018年				2019年				总和 Total		
	秋季 Aut.	→	冬季 Win.	→	春季 Spr.	→	夏季 Sum.	→	秋季 Aut.	→	冬季 Win.	→		春季 Spr.	→
A	1.62 ± 0.32↑		2.23 ± 0.93↑		-2.03 ± 0.46↓		10.53 ± 0.35↑		-7.50 ± 0.91↓		-2.60 ± 0.42↓		3.04 ± 0.35↑		5.29 ± 0.85↑
B	0.87 ± 0.43↑		-3.95 ± 0.57↓		4.41 ± 0.46↑		5.67 ± 0.94↑		-4.13 ± 0.47↓		4.56 ± 0.58↑		-5.68 ± 0.46↓		1.75 ± 0.93↑
C	1.22 ± 0.80↑		-1.87 ± 0.51↓		-3.67 ± 0.27↓		6.17 ± 0.25↑		-6.12 ± 0.85↓		4.27 ± 0.50↑		3.22 ± 0.22↑		3.22 ± 0.22↑
D	-0.80 ± 0.50↓		-1.40 ± 0.63↓		-7.55 ± 0.61↓		1.95 ± 0.31↑		5.55 ± 0.50↑		-5.02 ± 0.63↓		5.27 ± 0.66↑		-2.00 ± 0.32↓
E	-2.13 ± 0.24↓		4.08 ± 0.03↑		-1.95 ± 0.93↓		2.17 ± 0.63↑		-0.17 ± 0.20↓		-4.45 ± 0.38↓		3.25 ± 0.97↑		0.80 ± 0.60↑
F	2.95 ± 0.20↑		2.90 ± 0.57↑		4.25 ± 0.45↑		-5.08 ± 0.83↓		-6.55 ± 0.27↓		4.42 ± 0.54↑		1.94 ± 0.43↑		4.83 ± 0.85↑
G	3.33 ± 0.86↑		-4.40 ± 0.54↓		6.60 ± 0.38↑		-4.04 ± 0.20↓		-4.29 ± 0.22↓		3.15 ± 0.59↑		3.12 ± 0.31↑		3.47 ± 0.81↑

注: “↑”表示淤积, “↓”表示冲刷, “→”表示季节间段。下同。

Notes: “↑” means deposition, “↓” means erosion and “→” means the period of season. The same below.

3.2 秋茄株高和地径增长量变化

由表4、5可知: 2017年秋至2019年秋, 株高、地径的增量变化趋势一致, 秋茄株高在秋冬季节间生长较缓, 春夏季生长最快; 在7个样地中, 除A、E样地外, F样地的株高和地径的总增长量最大, C样地次之。

3.3 秋茄株高与地径、叶片数回归模型

以福建九龙江5个样地调查的秋茄株高(Y)、

地径(X_1)、叶片数(X_2)数据进行回归模型分析, 株高(Y)与地径(X_1)、叶片数(X_2)的二元线性回归模型为 $Y = a + bX_1 + cX_2$, 二元非线性回归模型为 $Y = a + bX_1 + cX_2^d$ 。由表6可知: 建立的秋茄二元线性回归模型为 $Y = -2.941 + 26.785X_1 + 0.047X_2$, 拟合度最高($R^2 = 0.872$), 置信水平达极显著($P < 0.01$), 用于计算秋茄株高的结果较可靠; 二元非线性模型为 $Y = -356.815 + 26.396X_1 + 340.407X_2^{0.01}$, 均方为

表4 2017年秋季至2019年秋季7个样地秋茄株高季节间段增长量

Table 4 Seasonal growth of *Kandelia candel* height in seven plots from autumn 2017 to autumn 2019

样地 Plot	2017年				2018年				2019年				总和 Total		
	秋季 Aut.	→	冬季 Win.	→	春季 Spr.	→	夏季 Sum.	→	秋季 Aut.	→	冬季 Win.	→		春季 Spr.	→
A	2.92 ± 0.14		4.70 ± 0.22		-		-		-		-		-		7.62 ± 0.19
B	2.82 ± 0.25		4.48 ± 0.57		9.84 ± 0.41		7.14 ± 0.29		2.88 ± 0.22		4.91 ± 0.56		10.92 ± 0.44		42.99 ± 0.39
C	3.71 ± 0.46		5.41 ± 0.26		6.60 ± 0.35		8.73 ± 0.27		3.27 ± 0.40		4.68 ± 0.28		12.82 ± 0.37		45.22 ± 0.4
D	2.51 ± 0.62		4.55 ± 0.65		3.09 ± 0.55		5.00 ± 0.86		3.66 ± 0.31		3.73 ± 0.65		9.63 ± 0.66		32.17 ± 0.61
E	2.21 ± 0.57		2.54 ± 0.45		3.13 ± 0.31		3.23 ± 0.38		2.15 ± 0.78		-		-		13.26 ± 0.36
F	3.18 ± 0.59		5.89 ± 0.57		7.80 ± 0.79		6.16 ± 0.63		5.23 ± 0.71		4.38 ± 0.86		13.54 ± 0.67		46.18 ± 0.69
G	3.82 ± 0.29		4.94 ± 0.81		7.61 ± 0.58		5.85 ± 0.59		5.99 ± 0.57		5.41 ± 0.65		10.44 ± 0.68		44.06 ± 0.60

注: “-”表示受到2018年玛利亚台风影响秋茄消失或补种而未测。下同。

Notes: “-” means that *Kandelia candel* disappeared due to replanted or Typhoon Maria in 2018 and has not been measured. The same below.

表5 2017年秋季至2019年秋季7个样地秋茄地径季节间段增长量

Table 5 Seasonal growth of ground diameter of *Kandelia candel* in seven plots from autumn of 2017 to autumn of 2019

样地 Plot	2017年				2018年				2019年		总和 Total				
	秋季 Aut.	→	冬季 Win.	→	春季 Spr.	→	夏季 Sum.	→	秋季 Aut.	→		冬季 Win.	→	春季 Spr.	→
A	0.24 ± 0.31		0.39 ± 0.07		-		-		-		-		-		0.63 ± 0.19
B	0.20 ± 0.10		0.29 ± 0.01		0.34 ± 0.32		0.38 ± 0.05		0.23 ± 0.14		0.21 ± 0.02		0.61 ± 0.40		2.26 ± 0.15
C	0.22 ± 0.05		0.26 ± 0.14		0.50 ± 0.02		0.47 ± 0.30		0.35 ± 0.03		0.41 ± 0.07		0.63 ± 0.01		2.84 ± 0.09
D	0.22 ± 0.26		0.28 ± 0.03		0.32 ± 0.06		0.35 ± 0.01		0.24 ± 0.42		0.31 ± 0.09		0.44 ± 0.24		2.16 ± 0.16
E	0.21 ± 0.42		0.27 ± 0.09		0.32 ± 0.24		0.33 ± 0.06		0.21 ± 0.37		-		-		1.34 ± 0.24
F	0.27 ± 0.07		0.33 ± 0.19		0.55 ± 0.04		0.36 ± 0.29		0.23 ± 0.49		0.30 ± 0.42		0.92 ± 0.59		2.96 ± 0.34
G	0.20 ± 0.17		0.39 ± 0.35		0.50 ± 0.32		0.35 ± 0.28		0.20 ± 0.38		0.26 ± 0.37		0.74 ± 0.27		2.64 ± 0.31

表6 回归模型方差分析及参数拟合结果

Table 6 Regression model analysis of variance and parameter fitting results

回归模型 Regression model	参数 Parameter				决定系数R ² Coefficient of determination	置信水平P Confidence level	均方MS Mean square
	a	b	c	d			
二元线性回归模型 Binary linear regression model	-2.941	26.785	0.047	/	0.872	< 0.000 1	/
二元非线性回归模型 Binary nonlinear regression model	-356.815	26.396	340.407	0.01	/	< 0.000 1	0.875

0.875, 此模型估算秋茄株高结果较可靠。

3.4 秋茄株高与地径回归模型

由图3可知:秋茄生长早期,在一定地径(5 cm)范围内,秋茄株高随着地径的增大而增高。由表7可知:5种线性回归模型中,模型 $Y = -48.961 + 89.203X_1 - 23.88X_1^2 + 2.548X_1^3$ ($R^2 = 0.941$, $P < 0.01$)对秋茄株高(Y)与地径(X_1)的关系拟合效果最佳,可采用该模型揭示株高与地径的关系。由表8可知:5种非线性回归模型中,只有模型 $Y = 289.888X_1/(X_1 + 8.913)$ 置信水平达极显著($P < 0.0001$),拟合程度较高,可揭示株高与地径的

关系。

3.5 回归模型的精度检验

对秋茄株高、地径和叶片数数据进行分析,得到株高(Y)与地径(X_1)、叶片数(X_2)的二元线性回归模型 $Y = -2.941 + 26.785X_1 + 0.047X_2$ 、二元非线性回归模型 $Y = -356.815 + 26.396X_1 + 340.407X_2^{0.01}$;株高(Y)与地径(X_1)的一元线性回归模型 $Y = -48.961 + 89.203X_1 - 23.88X_1^2 + 2.548X_1^3$ 、非线性回归模型 $Y = 289.888X_1/(X_1 + 8.913)$ 。为了检验各回归模型的精度,另随机抽取了各个样地20株秋茄的株高、地径和叶片数,并代入各回归模型,计算各回归模型的精度。由表9可知:沿浦湾秋茄株高与地径、叶片数的二元非线性回归模型的精度低于90%,其他3个回归模型的精度均大于95%,估计精度较高。

3.6 7个样地的秋茄生长差异性

由表10~12可知:样地F的平均株高、平均地径、平均叶片数最大,依次为79.90 cm、4.39 cm、84.38片。样地A的平均株高、平均地径、平均叶片数与样地D、E、F、G的均差异显著,与样地B、C的均差异不显著;样地B的平均株高、平均叶片数与样地C、E、F、G的均差异显著,与样

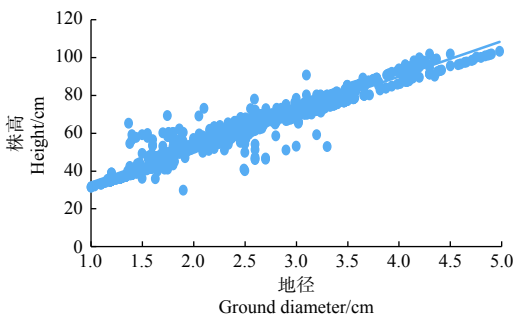


图3 福建九龙江种源秋茄的株高与地径散点图

Fig. 3 Scatter plot of height and ground diameter of *Kandelia candel* from Jiulongjiang, Fujian

表7 福建九龙江种源秋茄株高与地径各线性模型拟合结果

Table 7 Fitting results of linear models for height and ground diameter height of *Kandelia candel* from Jiulongjiang, Fujian

回归模型 Regression model	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F值 Computed value of F test	置信水平P Confidence level	参数Parameter			
				a	b	c	d
$Y = a + bX_1$	0.927	22.06	< 0.000 1	18.657	15.316		
$Y = a + bX_1 + cX_1^2$	0.932	12.34	< 0.000 1	-0.049	30.714	-2.085	
$Y = a + bX_1 + cX_1^2 + dX_1^3$	0.941	95.43	< 0.000 1	-48.961	89.203	-23.88	2.548
$Y = aX_1^b$	0.913	18.97	< 0.000 1	29.826	0.814		
$Y = ae^{bX_1}$	0.865	11.56	< 0.000 1	27.327	0.319		

表8 福建九龙江种源秋茄株高与地径各非线性模型拟合结果

Table 8 Fitting results of non-linear models for height and ground diameter height of *Kandelia candel* from Jiulongjiang, Fujian

回归模型 Regression model	置信水平P Confidence level	均方MS Mean square	参数 Parameter		
			a	b	c
$Y = aX_1 / (X_1 + b)$	< 0.000 1	3.626	289.888	8.913	
$Y = a(1 - e^{-bX_1})$	> 0.05	3.434	61.432	24.862	
$Y = a(1 + be^{-cX_1})$	> 0.05	2.289	61.432	-125.279	156.207
$Y = ae^{-bX_1^c}$	> 0.05	2.289	61.432	-58.577	-171.495
$Y = a(1 - e^{-bX_1^c})$	> 0.05	9.378	51.52	-41.263	82.465

表9 回归模型的估计精度

Table 9 Estimation accuracy of regression model

回归模型 Regression model	株高实测值 Actual height	株高估计值 Estimated height	精度 Precision/ %
二元线性回归模型 Binary linear regression model	66.5	63.51	95.50
二元非线性回归性模型 Binary nonlinear regression model	66.5	48.11	72.34
一元线性回归模型 Unary linear regression model	66.5	64.19	96.52
一元非线性回归性模型 Univariate nonlinear regression model	66.5	63.18	95.01

地D差异不显著, 平均地径与样地C的差异极显著, 与样地E、F、G的均差异显著, 与样地D的差异不显著; 样地C的平均株高、平均地径、平均叶片数与样地E、F、G的均差异显著, 与样地D差异不显著; 样地D的平均株高、平均地径、平均叶片数与E、F、G的均差异显著; 样地E的平均株高与样地F的差异极显著, 与样地G的差

异显著, 平均地径、平均叶片数与样地F、G的均差异极显著; 样地F的平均株高、平均地径与样地G的差异极显著, 平均叶片数与样地G的差异显著。

4 讨论

4.1 林区湿地冲淤特征

研究证明, 长有红树植被附近的岸滩泥沙在稳定常规的波浪潮汐作用下, 成淤积状况^[33]。2017

表10 7个样地秋茄株高多重比较

Table 10 Multiple comparison of *Kandelia candel* height in 7 plots

样地 Plot	平均值 Average/cm	A	B	C	D	E	F	G
A	76.21 ± 1.49	1						
B	63.54 ± 0.90	0.113	1					
C	78.32 ± 1.00	0.211	0.224*	1				
D	70.44 ± 1.16	0.103*	0.043	-0.024	1			
E	47.29 ± 0.77	0.001*	0.174*	0.230*	0.022*	1		
F	79.90 ± 0.73	0.225*	0.237*	0.249*	0.153*	0.245**	1	
G	77.06 ± 1.26	0.253*	0.185*	0.216*	0.228*	0.190*	0.478**	1

注: **代表极显著相关 ($P < 0.01$) (双尾检验); *代表显著相关 ($P < 0.05$) (双尾检验)。下同。

Notes: **means the correlation is extremely significant at the significance level of 0.01 (two-tailed test); *means the correlation is significant at the significance level of 0.05 (two-tailed test). The same below.

表 11 7 个样地秋茄各样地地径多重比较

Table 11 Multiple comparison of *Kandelia candel* ground diameter in 7 plots

样地 Plot	平均值 Average/cm	A	B	C	D	E	F	G
A	4.05 ± 0.05	1						
B	3.49 ± 0.06	0.108	1					
C	4.28 ± 0.07	0.182	0.360**	1				
D	3.71 ± 0.05	0.120*	-0.066	-0.170	1			
E	2.66 ± 0.02	-0.060*	0.100*	0.018*	0.096*	1		
F	4.39 ± 0.02	0.131*	0.145*	0.192*	0.143*	0.278**	1	
G	4.10 ± 0.04	0.246*	0.069*	0.113*	0.180*	0.243**	0.477**	1

表 12 7 个样地秋茄各样地叶片数多重比较

Table 12 Multiple comparison of *Kandelia candel* leaf number in 7 plots

样地 Plot	平均值 Average/片	A	B	C	D	E	F	G
A	58.12 ± 1.59	1						
B	68.01 ± 1.22	0.045	1					
C	68.98 ± 1.30	-0.050	0.081*	1				
D	48.31 ± 1.83	-0.096*	0.044	0.063	1			
E	44.82 ± 0.59	0.088*	0.195*	0.126*	0.202*	1		
F	84.38 ± 0.49	0.085*	0.033*	-0.017*	0.096*	0.136**	1	
G	64.13 ± 0.79	0.041*	-0.031*	-0.035*	0.063*	-0.019**	0.121*	1

年秋季至 2019 年秋季沿浦湾秋茄林区 7 个样地及附近区块总体呈冲刷与淤积交替变化的特征, 冲淤不稳定但总体仍然呈淤积重于冲刷状态。2017 年秋季至冬季, 7 个样地中只有样地 D、E 2 个样地呈冲刷状态, 其余 5 个样地均呈淤积状态。究其原因, 这可能是秋茄尚处于早期生长阶段, 林区各区块湿地冲淤不平衡所致。2018 年夏季至秋季, 7 个样地呈冲淤显著不平衡特征, 即样地 F、G 2 个样地呈冲刷状态, 其余 5 个样地均呈淤积状态, 尤其是 A 样地淤积高达 10.53 cm, 这可能是 2018 年“玛利亚”台风在福建霞浦登陆, 严重影响苍南沿浦湾, 强台风引发的强大水动力搬运淤泥及流场分布特征导致的极端不平衡分布, 因为台风期间, 动力作用加强, 可在短时间内引起大量泥沙运动, 在局部产生冲刷或淤积^[34-36]。

4.2 秋茄生长模型

本研究以引种福建九龙江的 5 个样地秋茄植株为例, 研究得出株高 (Y) 与地径 (X_1)、叶片数 (X_2) 的二元线性回归模型为 $Y = -2.941 + 26.785X_1 + 0.047X_2$, 非线性回归模型为 $Y = -356.815 + 26.396X_1 + 340.407X_2^{0.01}$; 株高 (Y) 与地径 (X_1)

的一元线性回归模型 ($Y = -48.961 + 89.203X_1 - 23.88X_1^2 + 2.548X_1^3$) 比非线性回归模型 ($Y = 289.888X_1/(X_1 + 8.913)$) 拟合效果好, 这与李娜等^[24]对广东省沿岸 8 个红树林代表性区域的 11 种红树植物生长因子之间的关系研究结果相同。显著性检验的 P 值均小于 0.01, 说明模型的统计学意义非常显著; 精度检验中二元非线性回归模型的精度低于 90%, 其他 3 个回归模型的精度均大于 95%, 说明模型估计精度较高, 表明回归模型是可信的, 适于估测其株高。因此, 本文采用的株高和地径还原计算方法是可信的; 浙江苍南的亚热带气候差异对秋茄株高与地径、叶片数关系回归的影响很小, 以往学者提出株高回归模型对浙南地区秋茄依然适用, 也一定程度表明在温州引种福建九龙江的秋茄是可行的。

4.3 不同样地秋茄生长差异

云霄种源样地的秋茄平均株高、地径和叶片数均比深圳的大, 表明云霄种源较适合引种在沿浦湾, 这可能是云霄地理位置及气候比深圳更接近沿浦湾所致。

向陆样地 A 的平均株高、地径和叶片数比向

海样地 D 的大,且 2 个样地间的株高、地径和叶片数均差异显著,这可能是样地 D 受到潮水胁迫和藤壶等污损生物的影响较大,秋茄生长受较大影响所致,这与郭欣等^[37]的研究结论一致;非潮沟边的样地 C 较比邻潮沟的中间林区样地 B 的秋茄生长好,2 个样地的地径差异极显著,这可能由于生境不同,即样地 B 比邻潮沟受到波浪的影响比样地 C 的大,这与成家隆等^[38]研究水东湾红树林不同生长位置生长存在差异的结论相似;互花米草区的样地 E 比向陆林区样地 A 的秋茄生长差,与样地 A 的株高、地径和叶片数均差异显著,虽然这 2 个样地离岸距离几乎相同,但样地 E 部分互花米草发达的根系尚未完全腐烂,生境较干硬,从而影响秋茄扎根生长,而样地 A 秋茄栽种前不存在互花米草,生境比样地 E 差异大,这导致了 2 个样地秋茄生长的显著差异;另外,样地 E 秋茄存活生长的同时部分互花米草依然复活入侵,与秋茄争夺生存空间、养分等,从而影响秋茄的存活生长。池方河等^[39]研究得出,不割除互花米草的试验地,秋茄保存率为 0;另有研究发现,互花米草的浸提液具有化感作用,可以使其在入侵过程中更有竞争力^[40-41],这也可能影响样地 E 秋茄的存活生长。

5 结论

秋茄宜林地选划应选择在水动力较弱的滩涂,潮沟边缘造林需适当生境改造,减小潮流的冲击;互花米草区栽种前除多轮清除互花米草外,还应考虑其浸提液具有的化感作用,以清除互花米草较长时间后再栽种秋茄为宜;在向海林区边缘造林时做好防护设施,减小潮水胁迫和藤壶等污损生物的影响;种苗采购应选择与拟栽种秋茄气候较接近的种源地;在秋茄管护过程中要及时清除互花米草等杂草与各种垃圾,做好大潮汛、台风、寒害及病虫害的监测和管理。

参考文献:

- [1] 郭菊兰,朱耀军,武高洁,等.海南省清澜港红树林湿地健康评价[J].林业科学,2015,51(10):17-25.
- [2] 于凌云,林绅辉,焦学尧,等.粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策[J].北京大学学报:自然科学版,2019,55(4):782-790.
- [3] 林鹏.中国红树林湿地与生态工程的几个问题[J].中国工程科学,2003,5(6):33-38.
- [4] 杨盛昌,陆文勋,邹祯,等.中国红树林湿地:分布、种类组成及其保护[J].亚热带植物科学,2017,46(4):301-310.
- [5] 麦少芝,徐颂军.广东红树林资源的保护与开发[J].海洋开发与管理,2005,22(1):44-48.
- [6] Yin D M, Wang L. Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: Possibilities and challenges[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 223: 34-49.
- [7] 汪少华,杨婷.荒漠梭梭地径-株高分布参数估计及其与林分因子模型研究[J].西北林学院学报,2018,33(4):1-9.
- [8] 卢春英.人工福建柏胸径与株高关系的研究[J].现代农业科技,2017,45(4):135-136,143.
- [9] Minchinton T E. Canopy and substratum heterogeneity influence recruitment of the mangrove *Avicennia marina*[J]. Journal of Ecology, 2001, 89(5): 888-902.
- [10] Day S, Streever W J, Watts J J. An experimental assessment of slag as a substrate for mangrove rehabilitation[J]. Restoration Ecology, 1999, 7(2): 139-144.
- [11] Imbert D, Rousteau A, Scherrer P. Ecology of mangrove growth and recovery in the lesser antilles: State of knowledge and basis for restoration projects[J]. Restoration Ecology, 2000, 8(3): 230-236.
- [12] Lovelock C E, Feller I C, Mckee K L, et al. The effect of nutrient enrichment on growth, photosynthesis and hydraulic conductance of dwarf mangroves in Panamá[J]. Functional Ecology, 2004, 18(1): 25-33.
- [13] Verheyden A, Helle G, Schleser G H, et al. Annual cyclicity in high-resolution stable carbon and oxygen isotope ratios in the wood of the mangrove tree *Rhizophora mucronata*[J]. Plant, Cell & Environment, 2004, 27(12): 1525-1536.
- [14] Meades L, Rodgeron L, York A, et al. Assessment of the diversity and abundance of terrestrial mangrove arthropods in southern New South Wales, Australia[J]. Austral Ecology, 2002, 27(4): 451-458.
- [15] Rygel M C, Gibling M R, Calder J H. Vegetation-induced sedimentary structures from fossil forests in the pennsylvanian Joggins Formation, Nova Scotia[J]. Sedimentology, 2004, 51(3): 531-552.
- [16] McMillan C. Environmental factors affecting seedling establishment of the black mangrove on the central texas coast[J]. Ecology, 1971, 52(5): 927-930.
- [17] 廖宝文,郑德璋,郑松发,等.海桑育苗技术及其幼苗生长规律的研究[J].林业科学研究,1997,10(3):73-79.
- [18] 王佳燕.海南东寨港几种红树植物主要生长特征因子间的关系研究[D].儋州:华南热带农业大学,2007.
- [19] 梁士楚.广西英罗湾红树植物幼苗生长关系的研究[J].广西科学院学报,1995,14(Z1):48-53.
- [20] 李娜,陈丕茂,秦传新.广东省常见红树植物生长因子之间的关系及生物量研究[J].广东农业科学,2014,41(9):63-68.
- [21] 钟晓青,蓝崇钰,李明顺,等.福田红树林桐花树和秋茄的生长过程

- 研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1996, 42 (4): 81-86.
- [22] 郭菊兰, 朱耀军, 文苑玉, 等. 秋茄幼苗光合特性对寒害的响应[J]. 林业科学研究, 2018, 31 (6): 63-68.
- [23] 许加意. 浙南地区秋茄红树林营建技术探讨[J]. 浙江林业科技, 2009, 29 (6): 57-60.
- [24] 苍南县海洋与渔业局. 苍南县海洋与渔业志[M]. 北京: 海洋出版社, 2007: 55.
- [25] LY/T 1938—2011, 红树林建设技术规程[S].
- [26] LY/T 2972—2018, 困难立地红树林造林技术规程[S].
- [27] DB33T 920—2014, 红树林造林技术规程[S].
- [28] 李 蕙, 袁 琳, 张利权, 等. 长江口滨海湿地潮间带生态系统的多稳态特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (1): 327-336.
- [29] 赵志远, 袁 琳, 李 伟, 等. 生境异质性及源株密度对互花米草入侵力的影响[J]. 生态学报, 2018, 38 (18): 6632-6641.
- [30] 王明亮, 李希菲. 非线性株高曲线模型的研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13 (1): 78-82.
- [31] 王 利, 李建华, 乔勇进, 等. 药乡林场赤松株高与胸径相关关系的研究[J]. 山东林业科技, 2002, 32 (1): 9-10.
- [32] 陈立莉. 树种株高曲线模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [33] 焦 雯. 台风条件下红树林岸滩沉积形态分析[D]. 广州: 广东海洋大学, 2015.
- [34] 蒋昌波, 伍志元, 陈 杰, 等. 风暴潮作用下泥沙运动和岸滩演变研究综述[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2014, 11 (1): 1-9.
- [35] 殷 锴. 风暴潮作用下横门东出海航道泥沙冲淤研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [36] 郑 舒, 舒懿俊. 大亚湾海域典型和可能最大台风冲淤数值模拟研究[J]. 人民珠江, 2020, 41 (1): 39-47.
- [37] 郭 欣, 潘伟生, 陈粤超, 等. 广东湛江红树林自然保护区及附近海岸互花米草入侵与红树林保护[J]. 林业与环境科学, 2018, 34 (4): 58-63.
- [38] 成家隆, 吕瑜良, 陈玉军, 等. 水东湾红树林不同生长位置生长差异性研究[J]. 生态科学, 2015, 34 (6): 30-35.
- [39] 池方河, 王发力, 陈秋夏. 茅埏岛滩涂红树植物引种栽培与成本分析[J]. 林业实用技术, 2014 (10): 28-29.
- [40] Wu J R, Chen Z Q, Peng S L. Allelopathic potential of invasive weeds: *Alternanthera philoxeroides*, *Ipomoea cairica* and *Spartina alterniflora*[J]. Allelopathy Journal, 2006, 17(2): 279-286.
- [41] Zhou T, Liu S C, Feng Z L, et al. Use of exotic plants to control *Spartina alterniflora* invasion and promote mangrove restoration[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 322-330.

Study on the Early Growth Characteristics of *Kandelia candel* Plantation in Yanpu Bay, Cangnan, Zhejiang Province

LAI Hong-yun¹, WANG Yong-xue², ZHANG Yi-han¹, LIANG Hai³, YU Song-li⁴,
ZHANG Kai¹, ZHANG Li-yuan¹, SHUI Bo-nian¹

(1. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, Zhejiang, China; 2. Taizhou Marine Environment Monitoring Center, Taizhou 318000, Zhejiang, China; 3. Taizhou Pollution Control Engineering Technology Center, Taizhou 318000, Zhejiang, China; 4. The 11th Geological Team of Zhejiang Province, Wenzhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To compare the growth differences of *Kandelia candel* from the three provenances of Jilulongjiang and Yunxiao of Fujian Province and Shenzhen of Guangdong Province, and improve the seedling procurement and selection techniques of suitable forest land. [Method] Based on data from 7 sample plots, analysis of variance, multiple comparison and regression analysis were used to study the relationship between the height of *Kandelia candel* and the ground diameter and number of leaves. [Result] There were some differences in the growth of *Kandelia candel* in 7 sample plots, the average plant height, ground diameter and number of leaves of plot A (the landward forest land) were larger than those in plot D (the seaward forest land); the growth of plot C (the non-tidal gully forest land) was better than that in plot B (the middle landward forest land adjacent to tidal gully); and the growth of *Kandelia candel* in plot E (in the *Spartina alterniflora* region) was worse than that in plot A. The binary linear regression model of plant height, ground diameter and leaf number was proved to be $Y = -2.941 + 26.785X_1 + 0.047X_2$ ($R^2 = 0.872$, $P < 0.01$), the binary nonlinear regression model was proved to be $Y = -356.815 + 26.396X_1 + 340.407X_2^{0.01}$ ($MS = 0.875$, $P < 0.01$), and the unary linear regression model of plant height and ground diameter was proved to be $Y = -48.961 + 89.203X_1 - 23.88X_1^2 + 2.548X_1^3$ ($R^2 = 0.941$, $P < 0.01$), the unitary nonlinear model was proved to be $Y = 289.888X_1/(X_1 + 8.913)$ ($MS = 3.626$, $P < 0.01$). The *Kandelia candel* provenance from Yunxiao was more suitable for introduction in Yanpu Bay than the other two provenances. [Conclusion] It is suggested that *Kandelia candel* forest land should be selected in the tidal zone with weak hydrodynamic force, and the habitat should be properly modified before planting in tidal ditch edge to reduce the impact of tidal current. It will take a long time to plant *Kandelia candel* after the *Spartina alterniflora* areas are cleared. Measures should be taken to reduce the stress of defaced organisms such as tide and barnacle when afforestation is carried out at the margin of marine forest. It is advisable to purchase seedlings from provenances whose climate is similar to that of the proposed planting area.

Keywords: Yanpu Bay; provenance; *Kandelia candel*; regression analysis; growth difference

(责任编辑: 徐玉秀)