

短枝木麻黄不同种源及家系的水培生根能力差异分析*

魏 龙¹ 周 毅¹ 张 勇² 魏永成² 孟景祥²

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520;

2. 中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520)

摘要 为了研究沿海防护林碳汇优势树种短枝木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 水培生根能力的遗传变异, 以短枝木麻黄 4 个天然分布或引种区 (澳洲天然分布区、亚洲天然分布区、亚洲引种区和非洲引种区) 内 10 个国家的 21 个种源共 70 个家系的种子苗嫩枝为材料, 开展生根能力差异的比较研究。结果表明, 短枝木麻黄嫩枝水培生根能力在区域间、国家间差异显著, 在种源间、家系间差异极显著, 其中生根能力最强的种源为肯尼亚次生种源 18142, 生根率高达 95.2%, 最弱的种源为中国次生种源 18269, 生根率仅为 46.7%。生根率、生根数和根长之间无线性相关性, 短枝木麻黄生根能力评价应以生根率为主要指标。

关键词 短枝木麻黄; 嫩枝水培; 生根能力; 差异分析

中图分类号: S722 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 06-0016-06

Vegetative Twig Rooting Ability Variation of Different Provenances and Families of *Casuarina equisetifolia*

WEI Long¹ ZHOU Yi¹ ZHANG Yong² WEI Yongcheng²
MENG Jingxiang²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract Twigs of 70 families within 21 natural provenances or land races of *Casuarina equisetifolia* originated from 10 countries of 4 intercontinental regions (Oceania natural, Asia natural, Asia introduced, Africa introduced) were sampled for rooting ability comparison using vegetative water-culture propagation technique, aimed to reveal the rooting ability variation of different seed sources of *C. equisetifolia*. Main results were summarized as follows: there were very significant differences at rooting ability between families and between provenances, as the provenance Kenya land race 18142 with strongest rooting ability reached 95.2% rooting rate, but the one China land race 18269 with poorest rooting ability only had 46.7% rooting rate. No correlationship was found among the 3 measurement parameters, namely rooting rate, root number and root length related to rooting ability of *C. equisetifolia*. Therefore, rooting rate should be considered the main property of rooting ability when implementing clone selection and breeding of *C. equisetifolia*.

Key words *Casuarina equisetifolia*; cutting water-culture; rooting ability; variance analysis

* 基金项目: 省级温室气体清单编制项目 (STQH-2021-050), 林业科技创新项目 (2018KJCX011、2017KJCX038), 省级生态公益林效益补偿资金省统筹项目 (2020STC-03)。

第一作者: 魏龙 (1976—), 男, 高级工程师, 主要从事林业碳汇、沿海防护林生态系统研究, E-mail: weilong@sinogaf.cn。

通信作者: 周毅 (1968—), 男, 研究员, 主要从事林沿海防护林生态系统研究, E-mail: zycqr0522@163.com。

全球气候变化是当前被关注的热点,碳达峰碳中和是我国现阶段经济发展和生态建设协调发展国家战略。木麻黄是适合我国华南地区沿海防护林和碳汇林工程的主要树种之一^[1]。木麻黄科植物含有4个属96个种,天然分布于东南亚、澳大利亚北部和太平洋群岛地区。木麻黄植物具有速生、抗风、抗沙埋、耐干旱、耐瘠薄和耐盐碱等优良生物特性,还具有与微生物(内外生菌根菌和 *Frankia* 固氮菌)共生固氮等特点,已广泛引种栽培于世界各地的热带、亚热带地区^[2-5]。在国外和我国华南和东南沿海地区,以短枝木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 和粗枝木麻黄 *C. glauca* 为主的木麻黄属植物被广泛应用于困难立地生态修复和农林复合系统的固氮改土,如海岸带和海岛防护林构建、水土流失区的防风 and 固土、重金属污染土壤治理等用途^[6-11]。目前,我国浙江、福建、广东、海南和广西沿海地区的木麻黄沿海防护林面积已达2.64万hm²,是我国重要的林业生态工程之一^[12]。木麻黄天然分布区域环境的巨大差异是其遗传多样性形成的主要原因,也是其生理生态适应性和生态功能发挥的基础^[13-15]。木麻黄水培生根技术被发明以后,幼枝水培扦插生根技术大大降低了木麻黄无性繁殖的成本,具有速生、抗性和干形好的优良无性系可快速大规模生产和推广,使得我国木麻黄人工林的生产力和抗性得到迅速提高^[16]。但研究表明,木麻黄的水培生根能力在不同种、种源、家系和无性系间的遗传变异很大^[17-18],如短枝木麻黄、粗枝木麻黄和细枝木麻黄 *C. cunninghamiana* 的生根率分别为50%~99.8%、10%~60%和0~40%^[19]。水培生根能力的差异限制了一些种和优良无性系的规模化应用,因此水培生根能力是短枝木麻黄优良无性系选育的关键指标。本研究以短枝木麻黄的不同地理种源为研究对象,开展区域间、国家间、种源间和家系间嫩枝水培生根能力差异的分析,以期为后续的种质资源引进、培育以及海岸带生态修复和碳汇造林等生产应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试的短枝木麻黄21个种源种子由澳大利亚林木种子中心(Australian Tree Seed Centre)提供,来自大洋洲、亚洲和非洲的10个国家,可划分为

大洋洲天然种源、亚洲天然种源、非洲次生种源和亚洲次生种源4个来源区域(表1),每个种源包含3~4个家系,共70个家系。温室育苗于2020年7月开始,芽苗长到10cm左右移栽到宽8cm高15cm的营养杯中培育。每个家系移栽10株,共移栽700株。2021年7月苗高达到1m左右,采集苗木侧枝上半木质化嫩枝用于水培生根试验。

1.2 试验设计和处理

每株苗木采集10根嫩枝,每家系共采集100根。每根嫩枝长约15cm,剥除嫩枝主干中下部的小侧枝,仅留顶部3~4根小侧枝用于水培生根过程中的光合作用。处理好的嫩枝用40mg·kg⁻¹的吲哚丁酸溶液浸泡基部2~3cm12h后,流水冲洗干净后再浸入清水5cm左右,置于50%太阳光照的温室内水培生根,每天更换清水1次。

每家系的100根嫩枝分成4次重复,25根/重复。水培生根40天后,观察到水培的嫩枝已全部生根或已干枯时,测定嫩枝生根的以下数据:

(1)生根率(%),已生根嫩枝数量/参试嫩枝总数×100=生根率。

(2)各种源家系中每根嫩枝长出的根数量。

(3)每根嫩枝上最长的5条根的长度,取平均值作为该嫩枝的根长,如果不足5条根则取所有根长度的平均值。

1.3 数据统计分析

采用SAS 8.1统计软件^[20]对不同区域间、国家间、种源间和家系间4个层次的短枝木麻黄嫩枝水培生根数据进行方差分析,生根率百分数在方差分析前进行反正弦变换,采用Duncan多重比较法对不同区域间、国家间、种源间和家系间短枝木麻黄嫩枝的生根率、生根数和根长均值进行比较。

2 结果与分析

2.1 地理种源间生根率差异

表2表明,生根率在不同种源间和家系间都有极显著差异($P < 0.01$),在区域间和国家间达到了显著差异(分别为 $P=0.044$ 和 $P=0.088$)。在不同区域比较中,亚洲天然种源和非洲次生种源的生根率(分别为89.3%和87.4%)较高,显著高于大洋洲天然种源和亚洲次生种源的生根率(分别为75.4%和72.1%),但亚洲天然种源和非洲次生种源之间,大洋洲天然种源和亚洲次生种

表 1 参试的 21 个短枝木麻黄种源信息

Table 1 Summarized information of 21 provenances of *C. equisetifolia* involved in the study

区域 Region	种源号 Seedlot No.	国家 Country	种源来源 Collected location	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 /m Altitude	降雨 /mm Rainfall
大洋洲天然种源 Oceania natural	17862	澳大利亚	Northern Territory	12°25'S	130°44'E	3	1 740
	18402	所罗门	Kolombangara	08°07'S	157°08'E	2	3 500
	18403	所罗门	Gizo	08°07'S	156°54'E	2	3 500
	18312	瓦努阿图	Efate	17°45'S	168°18'E	30	2 400
	18565	瓦努阿图	Isle, d' Ambre	20°07'S	156°54'E	2	2 400
亚洲天然种源 Asia natural	18244	马来西亚	Bako, Sarawak	01°44'N	110°30'E	50	4 000
	18297	泰国	Ban Kamphuam, Ranong	09°21'N	98°16'E	10	3 000
	18299	泰国	Had Samira, Songkla	07°09'N	100°37'E	1	1 600
	21199	泰国	Kantang Trang	07°09'N	100°37'E	2	1 600
非洲次生种源 Africa introduced	18355	贝宁	Cotonou	06°24'N	02°31'W	8	1 300
	18135	肯尼亚	Malindi	03°15'N	40°09'W	7	900
	18142	肯尼亚	Kilifi	03°38'N	39°95'W	20	1 000
	18144	肯尼亚	Baobab	04°00'N	39°06'W	25	1 000
亚洲次生种源 Asia introduced	18013	印度	Peempur, Kujaug	20°20'N	86°06'E	7	920
	18040	印度	Navutoka E Dis, Ton	21°04'N	175°04'E	1	1 100
	18118	印度	South Arcot, Tamil Nadu	11°42'N	79°44'E	40	1 200
	18119	印度	Remeswaram	9°15'N	79°20'E	5	1 200
	18128	越南	Hai Thinh, Ha NamNinh	20°22'N	106°21'E	2	2 000
	18267	中国	广东阳江	23°00'N	113°03'E	4	1 500
	18268	中国	海南岛东林场	19°58'N	110°59'E	10	1 700
	18269	中国	福建厦门	24°24'N	118°06'E	5	1 543

表 2 短枝木麻黄 4 个遗传水平的嫩枝水培生根能力差异方差分析

Table 2 ANOVA of twig rooting ability of *C. equisetifolia* under four genetic level

类别 Type	变异来源 Source	自由度 DF	平方和 SS	均方 MS	F 值 F value	Pr > F
区域间 Among regions	生根率	3	2 080.86	693.61	2.84	0.044
	根数	3	33.38	11.13	1.48	0.227
	根长	3	0.37	0.12	0.68	0.57
国家间 Among countries	生根率	9	5 064.72	562.75	1.80	0.088
	根数	9	5 008.73	556.53	29.23	< 0.000 1
	根长	9	55.65	6.18	11.69	< 0.000 1
种源间 Among provenances	生根率	20	423 546.64	21 177.33	34.56	< 0.000 1
	根数	20	10 309.67	515.48	29.19	< 0.000 1
	根长	20	1 248 344.26	62 417.21	0.68	0.85
家系间 Among families	生根率	69	875 602.35	12 689.89	48.25	< 0.000 1
	根数	69	20 313.11	294.39	19.45	< 0.000 1
	根长	69	3 017.95	43.74	1.15	0.19

源之间的生根率差异不显著；在不同国家间比较中，以肯尼亚 3 个种源的生根率最高，平均值达到 95.0%，以澳大利亚 1 个种源的平均生根率最低（59.9%），除了澳大利亚外，其他 9 个国家间种源的生根率均达不到统计学上的显著差异；在

种源间的比较中，以肯尼亚的一个次生种源 18142 的生根率最高（95.2%），极显著高于除了 18135（93.6%，肯尼亚次生种源）和 18267（92.8%，中国次生种源）两个种源的其他所有种源。生根率最低的种源为 18269（46.7%，中国次生种源）；在

家系间，生根率也存在着极显著的差异，最高的家系的生根率达到 100%，而最低的家系的生根率为 0。

2.2 地理种源间生根数的差异

由表 2 可知，生根数在不同国家间、种源间和家系间都有极显著差异 ($P < 0.01$)，但在区域

表 3 短枝木麻黄区域间、国家间和种源间嫩枝水培生根能力差异

Table 3 Twig rooting ability variation of *C. equisetifolia* originated from different regions, countries and provenances

类别 Type	种子来源 Seed source	生根率平均值 /% Mean of rooting rate and multiple range test	根数均值 / 根 Mean of root number and multiple range test	根长均值 /cm Mean of root length and multiple range test
区域 Regions	亚洲天然种源	89.3a	6.1 a	1.5 a
	非洲次生种源	87.4 a	7.4 a	1.7 a
	大洋洲天然种源	75.4 b	7.6 a	1.7 a
	亚洲次生种源	72.7 b	6.3 a	1.5 a
国家 Countries	肯尼亚	95.0 a	7.6 b	1.6 abc
	印度	91.4 a	7.9 ab	1.7 ab
	泰国	89.7 a	6.5 cd	1.6 abc
	马来西亚	80.5 ab	4.7 ef	1.1 d
	越南	79.2 ab	5.8 d	1.5 bc
	所罗门	77.6 ab	7.2 bc	1.6 abc
	瓦努阿图	77.5 ab	5.5 de	1.5 c
	中国	75.6 ab	8.6 a	1.5 bc
	贝宁	72.4 ab	4.3 f	1.8 a
	澳大利亚	59.9 b	4.6 ef	1.2 d
	18142	95.2 a	6.6 defghij	1.5 a
	18135	93.6 ab	8.4 bcd	1.8 a
种源 Provenances	18267	92.8 ab	8.6 bc	1.5 a
	21199	90.7 bc	7.6 cdefg	1.4 a
	18299	90.1 bcd	5.9 ghijk	2.0 a
	18268	90.1 bcde	11.3 a	1.4 a
	18244	88.4 bcdef	4.7 ijk	1.1 a
	18013	88.0 cdefg	7.4 cdefgh	1.5 a
	18312	87.8 cdefgh	5.1 ijk	2.0 a
	18297	87.8 defghi	5.7 hijk	1.7 a
	18040	86.0 efghij	6.3 fghij	0.7 a
	18403	80.1 fghij	8.1 bcde	1.6 a
	18128	79.2 ghijk	5.8 ghijk	1.5 a
	18402	75.0 hijkl	6.4 efghij	1.6 a
	18565	74.1 hijkl	5.8 ghijk	1.2 a
	18355	72.4 ijklm	4.2 k	1.8 a
	17862	59.9 lmn	4.6 jk	1.2 a
	18119	50.0 mno	9.6 b	1.7 a
	18118	48.9 mop	7.8 bcdef	2.1 a
	18144	47.9 op	9.6 b	1.7 a
	18269	46.7 p	4.7 ijk	1.7 a

注：同一列中均值后具相同字母表示无显著差异 ($P < 0.05$)。篇幅所限，未列出各家系的生根率、根数和根长均值和多重比较。
 Note: means in the same column followed by the same letter were not significantly different by Duncan's multiple range tests ($P < 0.05$). The means of rooting rate, root number, root length and respective multiple range tests between families were not presented here due to their lengthiness.

间没有显著差异 ($P = 0.227$)。不同国家比较 (表 3), 中国次生种源的生根数最多 (8.6 根), 非洲贝宁次生种源的最少 (4.3 根); 在不同种源比较中, 种源 18268 (11.3 根) 的生根数最多, 极显著高于其他所有种源的生根数。种源 18355 (4.2 根) 的生根数最少; 在不同家系中, 生根数最多的达到 17 根 (种源 18268), 最少的只有 1 根 (种源 18355)。

2.3 地理种源间根长的差异

不同地理种源短枝木麻黄嫩枝水培生根的根长在不同区域间 ($P = 0.57$)、种源间 ($P = 0.85$) 和家系间 ($P = 0.19$) 差异不显著, 仅在不同国家间有极显著差异 ($P < 0.01$)。在不同国家的比较中, 来源于非洲国家贝宁的嫩枝水培生根的根长 (1.8 cm), 显著高于一些国家如马来西亚 (1.1 cm)、澳大利亚 (1.2 cm) 等国家种源的根长; 不同区域间、种源间和家系间的根长达不到统计学意义上的显著程度。

2.4 生根参数间的相关分析

短枝木麻黄嫩枝水培生根的 3 个参数间的相关分析结果表明 (表 4), 生根率、生根数和根长两两之间的相关系数 R 值都很小, 且 P 值都较大, 说明这 3 个参数间都没有呈现出显著的相关关系。

表 4 短枝木麻黄嫩枝水培生根 3 个参数间的相关性

Table 4 Correlation analyses of three rooting parameters of *C. equisetifolia* twigs

因子 Factor	生根数 Root number	根长 Root length
生根率 Rooting rate	$R = -0.013\ 95$ ($P = 0.952\ 1$)	$R = -0.23\ 057$ ($P = 0.314\ 6$)
生根数 Root number		$R = 0.092\ 49$ ($P = 0.690\ 1$)

3 结论与讨论

扦插是林木扩繁中应用最广的一种无性繁殖方法, 它与嫁接、压条等无性繁殖方法相比具有简单易行、繁殖系数高和速度快、成本低廉等优点。木麻黄的嫩枝水培生根是一种无土的扦插繁殖方法, 且其繁殖系数更高, 更有利于优良无性系苗木的大规模生产和推广, 是我国木麻黄苗木的主要生产方法。扦插生根的类型主要分为皮部生根型、愈伤组织生根型和混合生根型 3 种^[21]。本试验中, 我们观察到短枝木麻黄嫩枝经过激素处理并在清水中培养约 15 天后, 白色的根从小枝

下部高 2~4 cm 的节间长出, 虽然嫩枝的切口处也会形成一些愈伤组织, 但未发现这些愈伤组织能长出根系, 因此可以推断短枝木麻黄属于典型的皮部生根型植物。

已有的研究表明, 同种植物的不同种源或家系的扦插生根能力存在着显著差异, 如樟树 *Cinnamomum camphora* 不同种源家系在相同扦插条件下的生根率最高可达 80.7%, 最低的只有 33.3%^[22], 落羽杉 *Taxodium distichum* 不同种源家系在相同条件下的生根率最高为 75.0%, 最低只有 10.0%^[23]。短枝木麻黄水培生根能力的差异主要表现在种源和家系的水平上, 本试验中生根能力最强的种源是肯尼亚次生种源 18142, 生根率高达 95.2%, 最弱的种源是中国次生种源 18267, 生根率仅为 46.7%。在区域和国家水平上差异不显著, 因此在木麻黄新品种选育过程中, 生根能力只需在种源和家系水平上进行选择。

相关性分析表明, 评价短枝木麻黄嫩枝生根能力的 3 个观测指标 (生根率、生根数和根长) 无显著相关性, 间接说明根生长的这 3 个性状可能由不同的基因来调控, 例如拟南芥 *Arabidopsis thaliana*、杨树 *Populus trichocarpa* 等不定根的形成和伸长都各由不同的基因家族来调控^[24-25], 因此生根率作为短枝木麻黄无性系生根能力主要的评价指标, 可以更加便捷高效选育优良无性系。

参考文献

- [1] WANG F, XIN X, ZOU B, et al. Biomass accumulation and carbon sequestration in four different aged *Casuarina equisetifolia* coastal shelterbelt plantations in South China[J]. PLOS ONE, 2013, 8(10): e77449.
- [2] PARROTTA J A, BAKER D D, FRIED M. Application of 15 N-enrichment methodologies to estimate nitrogen fixation in *Casuarina equisetifolia*[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24(2): 201-207.
- [3] 仲崇禄, 白嘉雨, 张勇. 我国木麻黄种质资源引种与保存[J]. 林业科学研究, 2005(3): 345-350.
- [4] KARTHIKEYAN A, CHANDRASEKARAN K, GEETHA M, et al. Growth response of *Casuarina equisetifolia* Forst. rooted stem cuttings to Frankia in nursery and field conditions[J]. Journal of Biosciences, 2013, 38(4): 741-747.
- [5] VEMULAPALLY S, GUERRA T, HAHN D. Localiza-

- tion of typical and atypical Frankia isolates from *Casuarina* sp. in nodules formed on *Casuarina equisetifolia*[J]. Plant and Soil, 2019, 435(1-2): 385-393.
- [6] TUMWEBAZE S B , BEVILACQUA E , BRIGGES R , et al. Allometric biomass equations for tree species used in agroforestry systems in Uganda[J]. Agroforestry Systems, 2013, 87(4): 781-795.
- [7] 靳明华, 丁振华, 周海超, 等. 不同林龄木麻黄防护林对重金属的富集作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(5): 707-712.
- [8] 魏龙, 张方秋, 高常军, 等. 广东湛江沿海木麻黄防护林生态系统的辐射通量特征[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(5): 1-6.
- [9] SALAS-LUEVANO M A , MAURICIO-CASTILLO J A , GONZALEZ-RIVERA M L , et al. Accumulation and phytostabilization of As, Pb and Cd in plants growing inside mine tailings reforested in Zacatecas, Mexico[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(23): 806.
- [10] MENG J , BAI Y , ZENG W , et al. A management tool for reducing the potential risk of windthrow for coastal *Casuarina equisetifolia* L. stands on Hainan Island, China[J]. European Journal of Forest Research, 2017, 136(3): 543-554.
- [11] LIN Y , JIAN L , BAKKER J D , et al. Wind and salt spray alter tree shape and dry mass density in *Casuarina equisetifolia* L.[J]. Trees, 2017, 31(1) : 15-26.
- [12] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告2014-2018[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 365-397.
- [13] 张勇, 聂森, 仲崇禄, 等. 木麻黄不同亲缘间嫁接对嫁接亲和力和花诱导的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(5) : 20-23.
- [14] HUANG G H , ZHONG C L , SU X H , et al. Genetic variation and structure of native and introduced *Casuarina equisetifolia* (L. Johnson) provenances[J]. Silvae Genetica, 2009, 58(1): 79-85.
- [15] ZHANG Y , ZHONG C L , CHEN Y , et al. Improving drought tolerance of *Casuarina equisetifolia* seedlings by arbuscular mycorrhizas under glasshouse conditions[J]. New Forests, 2010, 40(3) : 261-271.
- [16] 梁子超, 岑炳沾. 木麻黄抗青枯病植株小枝水培繁殖法[J]. 林业科学, 1982, 18(2) : 199-202.
- [17] 张勇. 三种木麻黄的遗传改良研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [18] 付甜, 张勇, 仲崇禄, 等. 木麻黄小枝水培生根研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 42-46.
- [19] 柯玉铸, 黄金水, 蔡美仁, 等. 木麻黄小枝水培容器苗培育技术总结[J]. 浙江林业科技, 2000, 20(6) : 39-43.
- [20] 黄少伟, 谢维辉. 实用SAS编程与林业试验数据分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [21] 李焕勇, 刘涛, 张华新, 等. 植物扦插生根机理研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1) : 23-28.
- [22] 金志农, 肖祖飞, 李凤, 等. 不同种源/家系樟树绿枝扦插生根能力及扦插苗生长评价[J]. 南昌工程学院学报, 37(6) : 52-56.
- [23] 黄利斌, 汪企明, 李晓储, 等. 落羽杉属种源研究: 扦插生根能力变异[J]. 江苏林业科技, 2000, 27(1) : 1-6.
- [24] HAECKER A , GROB-HARDT R , GEIGES B , et al. Expression dynamics of WOX genes mark cell fate decisions during early embryonic patterning in *Arabidopsis thaliana*[J]. Development, 2004, 131(3): 657-668.
- [25] TRUPIANO D , YORDANOV Y , REGAN S , et al. Identification, characterization of an AP2/ERF transcription factor that promotes adventitious, lateral root formation in *Populus*[J]. Planta, 2013, 238: 271-282.