

不同地区柚木人工林生长及土壤理化性质的研究

杜 健, 梁坤南*, 周树平, 李碧均, 周再知

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520)

摘要: [目的]通过对不同地区 13 年生柚木人工林的标准地调查,研究柚木人工林的生长状况与土壤理化性质,以期对柚木人工林的立地选择和经营管理提供科学依据。[方法]在云南勐腊、广东揭阳、海南中南部设置 48 个 20 m × 20 m 临时标准地,调查标准地内柚木生长,分层采集土壤样品测定土壤理化性质,研究不同地区柚木生长和土壤理化性质的差异及相关关系。[结果]表明:13 年生勐腊柚木人工林标准地的平均树高、胸径、单株材积和蓄积量分别为 14.4 m、16.82 cm、0.226 m³、192.0 m³ · hm⁻²,显著优于海南、揭阳的;勐腊土壤粉砂粒含量高,pH 值高,盐基饱和度高,柚木生长好;揭阳的土壤黏粒含量高,pH 值低,全 N 和全 K 含量低,交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量极低,因而,柚木生长比其它两地差。柚木生长与土壤粉砂粒含量、pH 值、全 K、有效 Zn²⁺、有效 Fe²⁺、Fe³⁺、交换性 Al³⁺、交换性 Ca²⁺、交换性 Mg²⁺ 和盐基饱和度等紧密相关。[结论]柚木在通气透水性较好的粉砂质壤土的生长比砂壤土、重壤土好;土壤的酸度对柚木生长影响显著,在强酸性、交换性 Al³⁺ 和有效 Fe 含量高的立地,柚木生长极差;在全 N、全 K、有效 Zn²⁺、交换性 Ca²⁺、交换性 Mg²⁺ 和盐基饱和度含量均较高的立地上,柚木生长最好。

关键词: 柚木人工林生长;土壤理化性质;相关性

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

Research on the Growth of Teak (*Tectona grandis*) Plantation and Soil Physicochemical Properties in Different Regions

DU Jian, LIANG Kun-nan, ZHOU Shu-ping, LI Bi-jun, ZHOU Zai-zhi

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To study the growth of teak (*Tectona grandis* L. f.) plantation and the soil physicochemical properties in different regions, so as to provide references for site selection and management of teak plantation. [Methods] A total of 48 sample plots with size of 20 m × 20 m in 13 year-old teak plantations were set up in Mengla of Yunnan Province, Jieyang of Guangdong Province and Sanya and Wuzhishan of Hainan Province for surveying the growth of teak and analyzing soil chemical and physical properties. [Results] The growth of teak in Mengla, with the average height, diameter at breast height, individual volume, stand volume of 14.4 m, 16.82 cm, 0.226 m³, and 192.0 m³ · hm⁻² respectively was significantly better than that in Jieyang and Hainan Province. The soil of Mengla has more silt content, higher pH, and higher base saturation than the other two sites. However, the growth of teak in Jieyang was worse than those in the other two sites due to more clay, low pH and low content of total N, total K, exchangeable Ca²⁺, and exchangeable Mg²⁺. The growth of teak has high correlation with the silt content, pH, total K, available Zn²⁺, available Fe²⁺、Fe³⁺, exchangeable Al³⁺, exchangeable Ca²⁺, exchangeable Mg²⁺ and base saturation on soils. [Conclusion] Teak grows better in silty loam with good drainage system than in sandy loam or heavy loam. The soil acidity has significant influence on the growth of teak. Teak would grows very poor on

收稿日期:2016-05-25

基金项目:“十二·五”国家科技支撑课题“柚木和西南桦珍贵用材林定向培育技术研究与示范”(2102BAD21B01)。

作者简介:杜 健(1989—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事柚木培育研究。E-mail:dujian917@163.com

* 通讯作者:梁坤南,男,研究员,主要从事柚木遗传育种与培育技术研究。E-mail:chinateak@163.net

strong acid soil with high concentration of soil exchangeable aluminum and available iron. However, teak grows best on sites that moderately acid with high levels of total N, total K, available Zn^{2+} , exchangeable Ca^{2+} , exchangeable Mg^{2+} and base saturation.

Keywords: growth of teak; soil physicochemical properties; correlation analysis

柚木 (*Tectona grandis* L. f.) 属马鞭草科柚木属的落叶半落叶性大乔木, 树高可达 35 ~ 45 m, 胸径可达 0.9 ~ 2.5 m, 材质优良, 是国际上最重要的热带珍贵用材树种之一, 可用做高级家具及装饰材料、乐器及车船等^[1]。我国无柚木天然分布, 引种历史可追溯到 1820 年, 1960 年后开始一定规模发展, 现已引种至南方 10 省(区)60 多个县(市)^[2]。近几十年来, 缅甸、印度和老挝等国柚木天然林急剧减少, 传统出口国相继减少甚至停止原木出口, 国际市场上柚木原木与锯材价格逐年攀升; 随着国内经济的发展和人民生活水平的提高, 珍贵实木家具和室内装饰的需求量也越来越大, 国内柚木人工林种植拥有广阔的前景。在国外, 如印度、缅甸、尼日利亚等国家柚木人工林发展时间长, 对其研究历史悠久, 在与柚木人工林生长密切相关的土壤研究颇多^[3-10]。我国引种柚木接近 200 年, 与土壤有关的柚木研究也有许多报道, 卢俊培^[11]以地形因子和土壤肥力对海南柚木人工林进行立地分类; 陶国祥^[12]采用地形因子、土壤厚度和质地划分云南柚木人工林立地类型; 张树芬等^[13]研究柚木适生立地的海拔、坡位、土层厚和植被等; 周再知^[14]研究了广东揭阳柚木早期材积生长与土壤特性的关系; 还有一些学者^[15-18]对柚木人工林立地做初步分析; 但柚木在不同省区生长与土壤理化性质差异及相关关系的研究尚无报道。本研究拟通过对云南省勐腊县、广东省揭阳市、海南省三亚和五指山市 13 年生柚木人工林的生长与土壤因子调查, 分析土壤理化性质对柚木人工林生长的影响, 旨在为柚木人工林种植立地选择及合理的经营方式等提供科学依据, 对促进我国柚木人工林的栽培具有重要意义。

1 研究区概况

勐腊县位于云南省南端的西双版纳傣族自治州 (21°09' ~ 22°24' N, 101°05' ~ 101°50' E), 属北回归线以南的热带北缘区, 受印度洋季风气候控制。年气温 18 ~ 22℃, 最冷月均温 8.8 ~ 15.6℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温 5 062 ~ 8 000℃, 海拔 800 m 以下地区 2013 年活动积温皆在 7 500℃ 以上; 年降水量

1 100 ~ 1 900 mm, 雨季 5—10 月, 气候温暖、湿润, 长夏无冬, 夏热多雨, 秋春相连且为期较短。海拔 1 500 m 以下的低山丘陵和低中山地以砖红壤和赤红壤为主, 林下植被以华南毛蕨 (*Cyclosorus parasiticus* (L.) Farwell)、蔓生莠竹 (*Microstegium vagans* (Nees ex Steud.) A. Camus)、海金沙 (*Lygodium japonicum* (Thunb.) Sw.) 和飞机草 (*Eupatorium odoratum* L.) 居多。

揭阳市地处广东省东南部 (22°53' ~ 23°46' N, 115°36' ~ 116°37' E), 属亚热带季风海洋气候, 无严寒酷暑, 高温多雨, 年降水量 1 720 ~ 2 100 mm, 雨季 5—9 月, 多暴雨, 冬季有明显干季; 年均温 21.4℃, 最热月 (7 月) 平均气温 28℃, 最冷月 (1 月) 平均气温 14.1℃, 极端最低温 2.1℃, 0℃ 以下极端低温出现频率极低, 自有气象记录以来仅出现 1 次 -2.7℃; 年日照时数 2 000 h, 日照充足, 雨量充沛, 终年无雪少霜。种植区内原属南亚热带常绿阔叶林与季雨林, 土壤类型主要有 2 种, 酸性赤红壤 (海拔 600 m 以下的丘陵山地) 和水稻土 (山谷地)。林下植被主要有铁芒箕 (*Dicranopteris linearis* (Burm.) Underw.)、阔叶丰花草 (*Borreria latifolia* (Aubl.) K. Schum.)、弓果黍 (*Cyrtococcum patens* (L.) A. Camus)、薇甘菊 (*Mikania micrantha* Kunth) 和蔓生莠竹等植被。

三亚市地处海南岛最南端 (18°09' ~ 18°37' N, 108°56' ~ 109°48' E), 属热带海洋季风性气候, 干湿季节明显, 年降水量 1 800 ~ 2 000 mm, 雨季 5—10 月, 降水量占全年 90.2%, 旱季 11 月至翌年 4 月; 年均温 25.7℃, 最热月 (6 月) 平均气温 28.7℃, 最冷月 (1 月) 平均气温 21.4℃, 总日照时数 2 534 h。从山地最高点至滨海低点, 土壤可分为: 山地黄壤 - 赤红壤 - 湖沙泥土 - 滨海砂土。林下植被主要有飞机草、岭南山竹子 (*Garcinia oblongifolia* Champ. ex Benth.) 和粗糠柴 (*Mallotus philippensis* (Lam.) Muell. -Arg.) 等。

五指山市位于海南岛中部山区 (18°49' ~ 18°59' N, 109°39' ~ 109°48' E), 属热带雨林季风气候, 年均降水量 1 771.8 mm, 年均气温 22.7℃, 年平均日照

2 122.6 h,无严寒、酷暑,高山处偶有霜寒,雨旱季节分明,偶有台风。土壤类型多样,垂直分布规律以海拔400 m和750 m为界,海拔从低到高分布为砖红壤、赤红壤和山地黄壤。林下植被主要有淡竹叶(*Lophatherum gracile* Brongn.)、银柴(*Aporosa dioica* (Roxb.) Muell. Arg.)、牛筋果(*Harrisonia perforata* (Blanco) Merr.)和鸡矢藤(*Paederia scandens* (Lour.) Merr.)等植物。

2 研究方法

2.1 林地调查及取样方法

2014—2015年对调查地区13年生柚木人工林采用典型样地调查方法,设置48个20 m×20 m临时标准地,其中:勐腊22个、揭阳13个、三亚和五指山共13个,记录每个标准地的地貌、坡位、坡度、坡向等地形因子,使用GPS仪确定每个样地的经纬度和海拔高度;对标准地内每木调查树高、胸径和枝下高,选取5株优势木测定冠幅;从样地左下角到右上角方向按上中下3个点挖土壤剖面,分0~20、20~40 cm 2层,按层取3点混合土样96个进行土壤化学性质分析,并用环刀在每点每层取原状土进行土壤物理性质分析。

2.2 室内分析

电位法测定土壤pH值(水溶液浸提);烘干法、环刀法测定土壤水分含量、密度、田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度;比重法测定土壤机械组成。重铬酸钾氧化-外加加热法测定有机质;凯氏消煮法测全N;硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗分光光度计法测全P;高氯酸-氢氟酸消煮-火焰光度法测全K;盐酸和硫酸溶液浸提法测有效P;0.1 mol·L⁻¹盐酸浸提原子吸收光谱法测定有效Zn²⁺、

Fe(Fe²⁺、Fe³⁺);1 mol·L⁻¹乙酸铵浸提-火焰光度法测有效K;乙酸铵交换-原子吸收分光光度法测交换性Ca²⁺、Mg²⁺;1 mol·L⁻¹氯化钾-中和滴定法测交换性酸、交换性Al³⁺;采用中华人民共和国林业行业标准LY/T1225-1999测定阳离子交换量和盐基饱和度。

2.3 数据处理

数据处理在Excel 2010和SPSS 19中进行。

3 结果与分析

3.1 不同地区13年生柚木生长差异分析

3个地区13年生柚木标准地林木调查与多重比较结果(表1)表明:勐腊地区柚木的密度(874株·hm⁻²)显著低于揭阳(1 067株·hm⁻²)和海南(1 044株·hm⁻²)的密度,其柚木生长与海南、揭阳的差异显著;勐腊地区13年生柚木人工林平均树高(14.4 m)、胸径(16.8 cm)、单株材积(0.226 m³)和蓄积量(192.0 m³·hm⁻²)分别为海南和揭阳的1.19和1.33倍、1.11和1.42倍、1.42和2.69倍、1.28和2.20倍;而海南柚木人工林的平均胸径、单株材积、蓄积量显著优于揭阳的,树高生长与揭阳的差异不显著。

表1还表明:勐腊标准地优势木的平均树高、胸径和单株材积生长最佳,分别为17.9 m、20.7 cm和0.383 m³,显著优于海南和揭阳的;海南的胸径和单株材积显著优于揭阳的,但两地的树高生长差异不显著。由于勐腊的密度比其它两地少,其优势木平均冠幅为4.92 m,显著大于海南和揭阳,海南和揭阳间冠幅差异不显著;但海南优势木的枝下高最大,可达5.9 m,其次为勐腊,均显著优于揭阳。

表1 不同地区13年生柚木人工林生长分析

地区	标准地				标准地优势木					
	树高/ m	胸径/ cm	单株材积/ m ³	蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	密度/ (株·hm ⁻²)	树高/ m	胸径/ cm	单株材积/ m ³	冠幅/ m	枝下高/ m
揭阳	10.8±1.9b	11.8±1.7c	0.084±0.04c	87.2±30.9c	1 067±215a	13.8±2.4b	14.7±2.6c	0.157±0.08c	3.98±0.91b	4.34±1.73b
海南	12.1±1.4b	15.1±3.1b	0.159±0.07b	150.1±46.2b	1 044±313a	15.5±1.7b	18.6±2.9b	0.271±0.11b	4.19±0.77b	5.90±0.94a
勐腊	14.4±2.6a	16.8±1.9a	0.226±0.09a	192.0±57.9a	874±147b	17.9±3.1a	20.7±1.8a	0.383±0.12a	4.92±0.45a	5.66±1.43a

注:表中同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

由于3个地区的地理位置、气候条件和立地条件不一,影响了柚木的生长。揭阳纬度略高于其它2个地区,柚木生长期相对较短,受寒害或冻害影响的几率增大,最主要的是林下植被以酸性指示植物

铁芒箕为主,生长旺盛,土壤酸性较强,导致柚木生长差。海南纬度较低,但部分地区土层浅薄,台风多,旱季长,常有虫害发生,这些是影响柚木生长的主要原因。勐腊与柚木的原产地缅甸、老挝接壤,它

们的气候条件和土壤条件相仿,且台风影响少,静风条件利于柚木生长,因此,勐腊的柚木生长比海南和广东揭阳的更有优势。

3.2 不同地区柚木人工林土壤理化性质差异分析

3.2.1 柚木人工林土壤物理性质 对3个地区的土壤理化性质分析结果(表2)表明:上、下层土壤的总孔隙度和田间持水量地区间差异显著,均为勐腊>海南>揭阳;揭阳和海南的土壤密度显著大于勐腊的;砂粒和粉砂粒含量地区间差异显著,其中,砂粒为海南>揭阳>勐腊,粉砂粒为勐腊>揭阳>海南;揭阳和勐腊上层土壤的黏粒含量显著大于海南的,而下层土壤的黏粒含量3地区间差异不显著。

3.2.2 柚木人工林土壤化学性质 对3个地区柚木人工林土壤化学性质分析结果(表2)表明:上层土壤pH值、有机质、全N、全P地区间差异显著,其中,pH值为勐腊>海南>揭阳,有机质和全N为海南>揭阳>勐腊,全P为揭阳>勐腊>海南;勐腊下层土壤pH值显著大于揭阳和海南的,有机质和全N地区间差异不显著,全P为揭阳>勐腊>海南。上

层土壤全K为勐腊和海南的显著大于揭阳的,下层土壤全K为勐腊的显著大于海南和揭阳的。

土壤有效P和有效K⁺含量地区间差异显著,其中,有效P为揭阳>勐腊>海南,有效K⁺为海南>揭阳>勐腊;揭阳上层土壤的有效Zn²⁺显著高于勐腊和海南的,揭阳下层土壤的有效Zn²⁺显著低于勐腊和海南的;上层土壤的有效Fe²⁺、Fe³⁺差异显著,且海南>揭阳>勐腊,海南下层土壤的有效Fe²⁺、Fe³⁺显著大于揭阳和勐腊的。

土壤交换性Al³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、酸及阳离子均为海南的最高。海南上层土壤的交换性Al³⁺显著高于揭阳的,而下层土壤的Al³⁺显著高于揭阳和勐腊的;上、下层土壤的交换性Mg²⁺和上层土壤的交换性Ca²⁺地区间差异显著,均为海南>勐腊>揭阳,下层土壤的交换性Ca²⁺为海南和勐腊的显著高于揭阳的;海南上、下层土壤的交换性酸均显著高于勐腊和揭阳的;3地区间上、下层土壤的阳离子交换量差异显著,均为海南>勐腊>揭阳;勐腊的土壤盐基饱和度最高,揭阳的显著低于勐腊和海南的。

表2 柚木人工林土壤理化性质及多重比较

土壤性质	上层土壤(0~20 cm)			下层土壤(20~40 cm)		
	勐腊	揭阳	海南	勐腊	揭阳	海南
土壤密度/(g·cm ⁻³)	0.98±0.1b	1.15±0.1a	1.10±0.1a	0.99±0.1b	1.16±0.1a	1.13±0.1a
砂粒/%	32±7.2c	46±11.6b	61±5.1a	32±7.2c	46±12.1b	58±9.8a
粉砂粒/%	41±7.6a	25±8.0b	18±3.4c	40±6.5a	24±8.6b	16±3.5c
黏粒/%	27±5.5a	29±5.9a	21±4.4b	28±6.1a	30±6.7a	25±9.6a
总孔隙度/%	48±2.7a	40±5.9c	45±2.7b	48±4.0a	39±5.5c	43±3.5b
田间持水量/%	38±4.9a	24±4.5c	32±3.7b	37±6.1a	23±3.9c	30±3.7b
pH值	5.40±0.46a	4.60±0.19c	5.03±0.32b	5.30±0.51a	4.45±0.12b	4.71±0.27b
有机质/(g·kg ⁻¹)	21.8±4.7c	26.6±7.9b	33.7±6.4a	16.9±3.1a	19.9±5.7a	21.3±4.1a
全N/(g·kg ⁻¹)	1.4±0.2c	1.0±0.2b	1.9±0.5a	1.7±2.2a	0.6±0.2a	1.5±0.2a
全P/(g·kg ⁻¹)	0.6±0.3b	1.9±0.3a	0.4±0.1c	0.5±0.2b	1.7±0.3a	0.3±0.1c
全K/(g·kg ⁻¹)	11.1±3.1a	8.4±1.8b	10.3±2.5a	12.4±3.9a	8.9±1.7b	8.7±2.8b
有效P/(mg·kg ⁻¹)	11.26±11.2b	27.16±7.9a	2.40±1.2c	6.95±1.8b	30.65±10.7a	1.49±1.3c
有效K ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	5.61±1.3c	40.97±8.3b	174.52±38.1a	4.23±0.9c	35.95±14.0b	114.62±35.3a
有效Zn ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	1.72±0.69b	2.49±0.81a	1.52±0.62b	1.22±0.46a	0.43±0.25b	0.97±0.48a
有效Fe ²⁺ 、Fe ³⁺ /(mg·kg ⁻¹)	33.40±17.2c	57.09±21.4b	112.03±41.5a	36.93±15.7b	34.64±11.7b	116.64±47.6a
交换性Al ³⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	3.85±2.67ab	2.45±1.17b	4.53±2.83a	4.52±2.96b	2.55±1.21b	9.88±8.0a
交换性Ca ²⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	2.7±2.17b	0.31±0.12c	4.57±2.69a	2.43±2.11a	0.31±0.1b	3.61±2.64a
交换性Mg ²⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	1.55±0.94b	0.11±0.05c	2.18±0.73a	1.41±0.93b	0.07±0.03c	2.16±1.0a
交换性酸/(cmol·kg ⁻¹)	4.67±2.86b	2.92±1.30b	6.82±3.06a	5.57±3.13b	3.08±1.39b	12.17±8.21a
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	9.62±2.17b	3.53±1.30c	14.08±2.72a	9.97±2.35b	3.64±1.46c	18.29±7.47a
盐基饱和度/%	52.16±25.1a	20.11±10.0b	52.08±15.8a	45.35±25.7a	17.46±7.9b	36.98±19.0a

注:表中同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.3 柚木人工林生长与土壤理化性质的关系

3.3.1 柚木人工林生长与土壤物理性质的关系

柚木人工林生长与土壤物理性质相关性分析结果(表3)表明:在测定的6个土壤物理性质指标中,粉

砂粒含量与柚木人工林生长的相关性最紧密,上、下层土壤的粉砂粒含量均与各项生长指标达显著或极显著正相关,其次是上层土壤总孔隙度与胸径、蓄积量和单株材积呈显著正相关,而砂粒和黏粒含量与柚木生长呈负相关,与个别生长指标达显著负相关,这些反映了柚木生长对土壤质地的要求。粉砂粒含量多的土壤,通气透水性好,柚木生长好;反之,砂粒

或者黏粒含量高的土壤,因砂粒保水保肥能力差或黏粒通气透水性能差,柚木生长较差。虽然柚木胸径和材积生长与上层土壤的田间持水量显著正相关,但柚木对土壤的水分情况非常敏感,在通气透水性较好且排水性能好的立地生长良好^[7],而在湿低洼地和排水状况较差的平地容易造成顶梢枯死和叶黄化^[3,10]。

表3 柚木人工林生长与土壤理化性质的相关性分析

土壤理化性质	上层土壤(0~20 cm)				下层土壤(20~40 cm)			
	树高	胸径	蓄积量	单株材积	树高	胸径	蓄积量	单株材积
土壤密度	-0.075	-0.200	-0.198	-0.272	0.160	0.062	0.021	0.046
砂粒	-0.259	-0.166	-0.214	-0.320*	-0.180	-0.075	-0.154	-0.236
粉砂粒	0.413**	0.351*	0.395*	0.503**	0.285*	0.268*	0.285*	0.385**
黏粒	-0.206	-0.304*	-0.275	-0.238	-0.121	-0.291*	-0.170	0.177
总孔隙度	0.182	0.311*	0.306*	0.342*	-0.016	0.108	0.107	0.093
田间持水量	0.093	0.282*	0.263	0.312*	-0.075	0.085	0.085	0.065
pH值	0.632**	0.536**	0.646**	0.707**	0.625**	0.545**	0.625**	0.726**
有机质	-0.177	-0.064	-0.165	-0.079	0.299*	0.155	0.245	0.292*
全N	0.197	0.355*	0.306*	0.326*	0.053	0.060	0.100	0.034
全P	-0.106	-0.323*	-0.330*	-0.276	-0.115	-0.293*	-0.345*	-0.263
全K	0.423**	0.296*	0.489**	0.411*	0.605**	0.429**	0.554**	0.591**
有效P	0.185	-0.088	-0.018	0.035	-0.107	-0.320*	-0.332*	-0.310*
有效K ⁺	-0.154	-0.104	-0.092	-0.181	-0.169	-0.105	-0.102	-0.186
有效Zn ²⁺	0.342*	0.126	0.102	0.213	0.507**	0.556**	0.558**	0.620**
有效Fe ²⁺ 、Fe ³⁺	-0.375**	-0.348*	-0.350*	-0.385**	-0.252	-0.157	-0.169	-0.198
交换性Al ³⁺	-0.441**	-0.296*	-0.258	-0.339*	-0.295*	-0.214	-0.149	-0.250
交换性Ca ²⁺	0.278	0.401**	0.379**	0.399**	0.291*	0.405**	0.377**	0.416**
交换性Mg ²⁺	0.436**	0.345*	0.502**	0.465**	0.382**	0.268	0.432**	0.389**
交换性酸	-0.409**	-0.234	-0.208	-0.290*	-0.274	-0.178	-0.119	-0.217
阳离子交换量	0.012	0.181	0.229	0.176	-0.068	0.036	0.107	0.027
盐基饱和度	0.624**	0.587**	0.632**	0.681**	0.614**	0.569**	0.596**	0.685**

注: *表示在0.05水平显著相关; **表示在0.01水平极显著相关。

3.3.2 柚木人工林生长与土壤化学性质的关系

从表3可看出:在测定的15个土壤化学性质中,pH值是影响柚木生长最重要的因素之一,其与柚木生长的各项指标达极显著正相关,说明pH值在4.2~6.5范围内,随着pH值的升高,柚木生长越好,因此,pH值的高低是判断柚木生长好坏的重要指标,这与柚木天然分布对pH值要求的特点和前人的研究一致^[5-7,19]。

盐基饱和度是影响柚木生长的另一重要因素,与柚木生长的各项指标均达极显著正相关,盐基饱和度越大,柚木生长越好。盐基饱和度是判断土壤肥力的重要指标,且其值大小对pH值的影响显著,通常盐基饱和度>80%的土壤肥力高,50%~80%的土壤肥力中等,而<50%的土壤不肥沃^[20]。盐基

饱和的土壤,交换性Ca²⁺、Mg²⁺等盐基离子较多,而交换性Al³⁺、交换性酸的含量较低。揭阳土壤的盐基饱和度最低,上、下层土壤的分别只有20.11%和17.46%,其柚木生长也最差,勐腊和海南立地上层土壤的盐基饱和度>52%,肥力中等。

此外,全K也是与柚木生长正相关程度较高的因素,与柚木生长的各项指标均达显著或极显著正相关。上、下层土壤的交换性Ca²⁺、Mg²⁺与柚木生长的绝大部分指标也呈显著或极显著正相关。下层土壤的有效Zn²⁺与柚木的各项生长指标呈极显著正相关,而上层土壤的全N与柚木的胸径、蓄积量及单株材积呈显著正相关。

从表3还看出:与柚木生长呈紧密负向相关的土壤化学性质中,上层土壤的有效Fe²⁺、Fe³⁺、交换

性 Al^{3+} 与柚木生长达显著或极显著负相关,说明其浓度增加对柚木生长具有负面影响。与 pH 值密切相关的交换性酸与柚木生长呈负相关,尤其是上层土壤的交换性酸与单株材积和树高生长分别达显著和极显著负相关。此外,土壤中含全 P 含量与柚木生长呈负相关,尤其是上、下层土壤的全 P 与胸径和蓄积量呈显著负相关,而下层土壤的有效 P 与柚木的胸径、蓄积量和单株材积生长呈显著负相关。

4 讨论

我国华南和西南地区普遍存在酸性土壤,本研究调查发现,3 个地区柚木林土壤的 pH 值,揭阳的为 4.2~5.0,海南的为 4.3~5.7,而云南版纳地区的为 4.3~6.5。国外报道,柚木最适宜的 pH 值为 6.5~7.5^[19,21-22]。上述地区最高的 pH 值仅处于柚木生长最适范围的下限,但从生长量看,云南版纳地区许多立地仍达到可期待的柚木生长量。酸性土壤地区降水充沛,淋溶作用强烈,盐基饱和度较低,酸度较高,出现高浓度的 H^+ 、 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 等,土壤中含有效 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、交换性 Al^{3+} 浓度过高抑制了柚木根系的生长发育^[23],这是在强酸性土壤上柚木生长不良的原因。虽然通过对酸性土壤施石灰等碱性肥料,中和土壤酸性,减轻铝毒危害,促进柚木的生长^[24],但即使通过改良,酸性土壤仍是限制柚木生长的主要因素。

本研究的其它土壤化学性质中,不管上层或下层土壤的盐基饱和度、全 K、全 N、交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和有效 Zn^{2+} 等浓度或含量,与柚木树高、胸径、蓄积量和单株材积等指标,或单个或多个呈显著或极显著正相关,而上层土壤的有效 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、交换性 Al^{3+} 与柚木生长达显著或极显著负相关,上层土壤的交换性酸与单株材积和树高生长分别达显著和极显著负相关,上、下层土壤的全 P 与胸径和蓄积量呈显著负相关,而下层土壤的有效 P 与柚木的胸径、蓄积量和单株材积呈显著负相关;这些土壤化学性质中除全 P 和有效 P 外,其它结果与周再知^[14]的研究结果一致。全 P 和有效 P 与柚木生长呈负相关,与 3 个地点土壤中全 P 和有效 P 含量差异较大有关。调查发现,揭阳土壤中含有效 P 含量是海南的 2.4 倍(上层)和 4.4 倍(下层),是勐腊的 11.3 倍(上层)和 20.6 倍(下层),因此,揭阳柚木生长除受强酸性土壤(pH 值 4.45~4.60)和铝毒影响外,磷素含量过高,可能影响了柚木对其它元素的吸收。柚

木在生长过程中对 P 营养需求并不是最大的,尼日利亚对 15 年生柚木林地上的生物量进行测定,计算出 N、P、K、Ca 和 Mg 的最低营养需求分别为 328、76、556、357、62 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[25],虽然本研究的土壤条件与尼日利亚的有所不同,但由此可知,在一定范围内 P 素的供给可满足柚木的正常生长。

从 3 个地区柚木生长差异看,在揭阳等沿海地区,降雨量多且强,土壤及其母质淋溶作用非常强烈,土壤中盐基离子易随水下渗,从而导致土壤中易溶成分减少,土壤胶体吸附更多的 H^+ 和 Al^{3+} 等致酸离子,盐基饱和度低,土壤酸性强,土壤 pH 值 4.60(上层)和 4.45(下层),柚木生长最差;与揭阳相比,版纳降雨量更少,淋溶较弱,土壤酸度较低,土壤 pH 值为 5.4(上层)和 5.3(下层),且由于淋溶弱,粉砂粒残留土层更多,土壤通气透水较好,土壤 K 淋失较少,交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子保存较多,因而盐基饱和度高,从而柚木生长较好。

5 结论

研究表明,不同立地条件下 3 个地区 13 年生柚木人工林生长差异极显著,勐腊人工林平均树高、胸径、单株材积和蓄积量分别为 14.4 m、16.82 cm、0.226 m^3 和 192.0 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,显著优于海南、揭阳;海南柚木人工林平均胸径、单株材积、蓄积量生长显著优于揭阳,而树高生长与揭阳的差异不显著。3 个地区的土壤理化性质差异较大,勐腊土壤的粉砂粒含量高,pH 值高,盐基饱和度高;揭阳黏粒含量高,pH 值低,全 N 和全 K 含量低,交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量极低;海南土壤砂粒含量高,有效 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 含量高,交换性 Al^{3+} 和交换性总酸含量高。与柚木生长相关性较高的土壤因子分别是粉砂粒含量、pH 值、盐基饱和度、全 K、有效 Zn^{2+} 、有效 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、交换性 Al^{3+} 、交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 。因此,柚木在通气透水性较好的粉砂质壤土上的生长比砂壤土、重壤土上的好;土壤的酸度对柚木生长影响显著,在强酸性、交换性 Al^{3+} 和有效 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 含量高的立地,柚木生长极差;在全 N、全 K、有效 Zn^{2+} 、交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 和盐基饱和度含量较高的立地,柚木生长最好。

柚木材质优良、用途广泛且速生,其人工林在未来势必发展迅速。适宜的立地选择将是柚木人工林成功发展的关键一步,在选择合适立地种植时,需特别注意土壤酸度,尽量选择微酸至中性的土壤,并综

合考虑土壤质地、全 N、全 K、交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、盐基饱和度和有效 Zn^{2+} 等因子,采取适宜的经营管理措施,培育出经济效益较高的柚木人工林。

参考文献:

- [1] 马华明, 梁坤南, 周再知. 我国柚木的研究与发展[J]. 林业科学研究, 2003, 16(6): 768-773.
- [2] 周铁锋. 中国热带主要经济树木栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 288-291.
- [3] Zech W, Drechsel P. Relationships between growth, mineral nutrition and site factors of teak (*Tectona grandis*) plantations in the rainforest zone of Liberia [J]. Forest Ecology and Management, 1991, 41(3): 221-235.
- [4] Drechsel P, Zech W. DRIS evaluation of teak (*Tectona grandis* L. f) mineral nutrition and effects of nutrition and site quality on teak growth in West Africa [J]. Forest Ecology and Management, 1994, 70(1): 121-133.
- [5] Amonsah I, Meyer W. Soil characteristics in teak plantations and natural forests in Ashanti region, Ghana [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(3-4): 355-373.
- [6] Rugmini P, Balagopalan M, Jayaraman K. Modelling the growth of teak in relation to soil conditions in the Kerala part of the Western Ghats [R]. KFRI Research Report, 2007: 1-46.
- [7] Watanabe Y, Owusu-Sekyere E, Masunaga T, et al. Teak (*Tectona grandis*) growth as influenced by soil physicochemical properties and other site conditions in Ashanti region, Ghana [J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2010, 8(2): 1040-1045.
- [8] Samndi A M, Jibrin J M. Pedogenesis and Classification of Soils Under Teak (*Tectona grandis* Linn. f) Plantation of Various Ages in the Southern Guinea Savanna of Nigeria [J]. Asian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 4(1): 16-25.
- [9] Ziblim A, Damian T, Kingsley A. Assessment of soil quality improvement under Teak and Albizia [J]. Journal of Soil Science and Environmental Management, 2012, 3(4): 91-96.
- [10] Tanaka N, Hamazaki T, Vacharangkura T. Distribution, growth and site requirements of teak [J]. JARQ Japan agricultural research quarterly, 1998, 32(1): 65-77.
- [11] 卢俊培. 海南柚木立地类型及评价[J]. 林业科学研究, 1994, 7(6): 677-684.
- [12] 陶国祥. 柚木人工林地位指数表的编制[J]. 云南林业调查规划设计, 1997(2): 27-31.
- [13] 张树芬, 张荣贵. 河口县立地条件对柚木生长影响的调查研究 [J]. 林业调查规划, 2005, 30(3): 111-114.
- [14] 周再知. 酸性土壤柚木钙素营养研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究所, 2009.
- [15] 热带林业研究所柚木调查组. 柚木生长与立地条件 [J]. 热带林业科技, 1977(Z1): 4-12.
- [16] 郭华北. 柚木人工林对土壤质量的反馈研究 [J]. 现代农业科技, 2009(22): 195-196.
- [17] 顾永顺, 孙吉慧, 刘 晓, 等. 贵州省柚木适生区域研究 [J]. 林业调查规划, 2011, 36(3): 26-28.
- [18] 施荣达. 闽南沿海山地小地形对柚木人工林生长的影响 [J]. 科技致富向导, 2013(23): 176-177.
- [19] Kaosa-ard A. Teak (*Tectona grandis* Linn. f) its natural distribution and related factors [J]. Nat His Bulletin Siam Soc, 1981(29): 55-74.
- [20] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [21] Seth S K, Yadav J S P. Teak soil [J]. Indian Forester, 1959, 85(1): 2-16.
- [22] Tewari D N. A monograph on teak (*Tectona grandis* Linn. f.) [M]. Dehra Dun: International Book Distributors, 1992.
- [23] 潘一峰, 邝炳朝, 刘文明. 柚木无性系耐酸性和耐铝(A1)毒性的测定 [J]. 林业科学研究, 1999, 12(2): 152-159.
- [24] 潘一峰, 刘文明. 酸性土壤改良对不同种源的柚木生长的影响 [J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(1): 9-14.
- [25] Ugalde A L. TEAK: new trends in Silviculture, commercialization and wood utilization [M]. Cartago, Costa Rica: International Forestry and Agroforestry, 2013.

(责任编辑:徐玉秀)