

网络出版时间:2013-03-27 15:50

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130327.1550.032.html>

不同磷源对酸性红壤养分及油茶幼苗生长的影响

袁 军¹, 谭晓风², 叶思诚², 周乃富²

(1 北京林业大学 研究生院, 北京 100083; 2 中南林业科技大学 经济林培育与保护教育部重点实验室, 湖南 长沙 410004)

[摘 要] **【目的】**研究不同磷源对酸性红壤养分及油茶生长的影响, 为油茶施肥提供参考。**【方法】**以油茶‘湘林 4 号’为试材, 以不施外源磷为对照, 通过盆栽试验, 研究无机难溶磷(Ca-P、Al-P 和 Fe-P)和有机磷源(O-P)对酸性红壤养分、油茶幼苗生长及树体营养水平的影响。**【结果】**不同磷源对酸性红壤养分含量的影响有差异, 其中 Fe-P 显著提高土壤全磷含量, 而 Ca-P 和 Al-P 则显著提高土壤有效磷含量; 在根际土壤中, Ca-P 和 Al-P 处理的有效磷含量较对照分别提高 120 倍和 125 倍。油茶根际与非根际土壤中的养分含量具有明显差异。Ca-P 和 Al-P 明显提高了油茶苗高、地上部干质量和根系鲜质量, 降低根冠比, 而 Fe-P 和 O-P 的作用不明显。在土壤中添加不同磷源显著提高了油茶老叶、新叶以及根系中的磷含量, 并明显影响植株中的氮和钾含量。**【结论】**无机难溶磷和有机磷可提升酸性红壤肥力并促进油茶生长, 其中以 Ca-P 和 Al-P 作用最明显; 对于长期不施肥的油茶林地, Al-P 和其他难溶磷能被油茶有效利用。

[关键词] 油茶; 难溶磷; 酸性红壤; 营养; 生长

[中图分类号] S714.83; S794.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)04-0155-06

Effects of phosphates from different sources on the growth of *Camellia oleifera* seedlings and content of nutrients in acidic soil

YUAN Jun¹, TAN Xiao-feng², YE Si-cheng², ZHOU Nai-fu²

(1 Graduate School, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Key Lab of Non-wood Forest Nurturing and Protection of the National Ministry of Education, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: **【Objective】**This study aimed to improve phosphorus use efficiency when applied to oil-tea. **【Method】**The growth of *Camellia oleifera* ‘Xianglin 4’ and nutrients content in acidic soils were tested in pot experiment with sparingly soluble and organic phosphates in compared with no exogenous phosphorus applied. **【Result】**The application of sparingly soluble and organic phosphates had distinct impact on the nutrients levels in acidic soil. Total phosphorus content was accumulated by Fe-P while the content of available phosphorus content was increased by Ca-P and Al-P significantly and the values were 120 times and 125 times in rhizosphere soil as compared with CK. Meanwhile, there were significant differences between contents of rhizosphere and non-rhizosphere soil. The Ca-P and Al-P increased the seedling height, fresh weight of shoot, dried weight of root while decreased root/shoot ratio significantly. The effects were not significant when treated with Fe-P and O-P. The application of sparingly soluble and organic phosphates increased the P content of old leaves, tender leaves and roots and affected their N and K contents as well. **【Conclusion】**In conclusion, the sparingly soluble and organic phosphates increased fertility of acidic soils

[收稿日期] 2012-11-28

[基金项目] 国家林业局科技成果推广计划项目([2010]44 号)

[作者简介] 袁 军(1984—), 男, 四川彭州人, 博士, 主要从事经济林栽培育种研究。E-mail: yuanjun158@yahoo.com.cn

[通信作者] 谭晓风(1956—), 男, 湖南茶陵人, 教授, 主要从事经济林栽培育种与林业生物技术研究。

E-mail: tanxiaofengcn@126.com

and growth of oil-tea, of which the most significant effects were obtained by Al-P and Ca-P. Al-P and other sparingly soluble phosphates may be the main source of plant P in unfertilized soil.

Key words: *Camellia oleifera*; sparingly soluble phosphate; acidic soil; nutrient; growth

磷是植物生长发育必需的大量元素之一,但在具有高度淋融作用的酸性红壤地区,磷主要以铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)和钙磷(Ca-P)等难溶磷形式存在,难以被植物吸收^[1],使得磷成为红壤地区作物产量提升的主要限制因子^[2]。为了保证作物产量,农业上主要通过重复施肥来提高土壤中有效磷的含量,但磷施用后容易被土壤固定而转化成难溶磷^[3-4]。研究表明,生长在红壤地区的植物对难溶磷环境具有一定的适应性,可以通过根系分泌有机酸、酸性磷酸酶等来促进土壤难溶磷的释放,从而保证自身对养分的需求^[5],因此,在很多植物中发现根际土壤有效磷等养分含量均显著高于非根际土壤^[6-7]。同时,由于不同物种或品种对不同难溶磷形式活化能力和利用效率的差异性,因此在一些重要农作物中,可以利用这种特性对耐低磷品种或无性系进行鉴定和筛选^[8]。

油茶(*Camellia oleifera*)是我国重要的木本食用油料树种^[9],全国油茶栽培面积达 366.6 万 hm^2 ,年产茶油 30 万 t 左右,茶油平均产量仅为 45~90 kg/hm^2 ,油茶低产低效严重限制了油茶产业的发展^[10],其中林地养分缺乏是油茶低产的主要原因之一。油茶主要分布在南方酸性红壤地区^[11],磷缺乏是油茶增产的主要限制因子^[12-13]。目前,对油茶缺磷和施磷等开展了一系列研究^[14-15],但油茶能否利用酸性红壤中的难溶磷及其主要利用种类仍未见报道。本研究以油茶‘湘林 4 号’(*Camellia oleifera* ‘Xianglin4’)为试材,通过盆栽试验,研究铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、钙磷(Ca-P)和有机磷(O-P)对酸性红壤养分水平、油茶生长状况及其养分水平的影响,以期阐明油茶适应低磷的机制、施肥以及磷高效品种筛选提供参考。

1 材料与方法

1.1 土壤制备及苗木培育

从湖南长沙中南林业科技大学校园内(28°08′14″N, 112°59′32″E, 海拔 149 m)采集红壤,混匀风干后过孔径 2 mm 筛备用。试验设 5 个处理:Al-P、Fe-P、Ca-P、O-P 和 CK,为使各处理土壤全磷含量一致,除 CK 外,每处理添加等量外源磷(全磷含量均为 0.01 mmol/kg),其中 Al-P 施用 1.22 g/kg

AlPO_4 ; Fe-P 施用 2.23 g/kg $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Ca-P 施用 1.54 g/kg $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; O-P 施用 1.54 g/kg $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_{24}\text{P}_6\text{Na}_{12}$ 。将土壤和磷剂按比例混匀后装入塑料盆(12 cm×18 cm),每盆装试验用土 3.2 kg,浇透水待用。于 2011-09-15 选择生长一致的 1 年生芽苗砧嫁接油茶苗(*Camellia oleifera* ‘Xianglin4’)种植于塑料盆中,每盆 3 株,重复 5 次,露天培养,天气炎热时每天傍晚浇水 200 mL 补充土壤水分。分别于 2012-03-05 和 05-10 每盆浇 50 g/L 的尿素 100 mL。

1.2 植株形态和干鲜质量测定

2012-07-04 用游标卡尺测定苗木的苗高和地径,然后将幼苗收获,并分为地上部和地下部(根系),测定鲜质量后置于 65 °C 干燥箱中干燥 24 h,测定干质量并计算根冠比(根冠比=根系干质量/地上部干质量),随后按处理将新叶、老叶(完全展开)和根系分别混合粉碎后进行氮、磷和钾含量测定。

1.3 土壤和植株养分含量测定

采集土壤时,轻轻振动塑料盆,待苗木松动后轻轻提起苗木小心抖动,仍粘在根上的土壤为根际土壤,散落和残留在盆中的土壤为非根际土壤,按处理将根际和非根际土壤分别混合,然后按照四分法取样和标记,随后将土壤中的根系清理干净置于阴凉处风干,研磨后供分析用。

土壤全氮、全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消化;全钾采用 NaOH 熔融消解;铵态氮采用 2 mol/L KCl 浸提;硝态氮用 0.01 mol/L $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 浸提;有效磷用 0.03 mol/L $\text{NH}_4\text{F}+0.025$ mol/L HCl 浸提;有效钾用 1 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 浸提^[16]。植物样品采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮。土壤总氮、全磷、铵态氮、硝态氮、有效磷和植物样品氮磷含量采用全自动间断化学分析仪测定(Smartchem 200, Westco Scientific Instruments, Italy);测定土壤全钾、有效钾和植物样品钾含量时,将样品稀释后用原子吸收分光光度计(TAS-990, 普析通用, 中国)测定。

1.4 数据处理与分析

所有分析均为 3 次重复,图表分别采用 Origin8.6 和 Excel 2003 软件制作,统计分析用 SPSS17.0 软件进行。用单因素方差分析法 one-way ANOVA 分析数据的差异显著性,采用 paired

t-test 检验根际和非根际土壤养分的差异性,采用 Pearson 系数检验养分与生长指标的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同磷源对油茶幼苗形态及干鲜质量的影响

由表 1 可知,Ca-P 显著提高了油茶苗高、地径、根系干质量以及地上部鲜质量和干质量;Al-P 对苗

高、地上部干质量以及根系鲜质量的促进作用仅次于 Ca-P,而 Fe-P 对地径和地上部鲜质量的促进作用仅次于 Ca-P;虽然 O-P 处理与无机难溶磷处理油茶的根系干质量并无显著差异,但由于其地上部干质量较低,因此其幼苗根冠比显著高于各无机难溶磷处理,达到了 1.1 以上,与后者相比提高了 88.1%~113.5%。

表 1 不同磷源对油茶幼苗形态和干鲜质量的影响

Table 1 Effects of different phosphates sources on the growth and root/shoot ratio of oil-tea seedlings

处理 Treatment	苗高/cm Seedling height	地径/mm Ground diameter	地上部鲜质量/g Shoot FW	地上部干质量/g Shoot DW	根系鲜质量/g Root FW	根系干质量/g Root DW	根冠比 Root/Shoot
CK	17.42±4.89 c	4.13±1.04 b	3.85±1.33 b	0.99±0.13 b	4.07±0.92 a	0.76±0.29 b	1.16±0.14 a
O-P	20.78±6.84 bc	4.54±0.88 ab	3.80±1.35 b	1.18±0.50 b	4.17±0.27 a	1.20±0.19 ab	1.11±0.37 a
Fe-P	20.66±4.73 bc	4.96±1.36 ab	5.19±1.90 b	1.31±0.64 b	3.38±2.23 a	0.76±0.35 b	0.59±0.09 b
Al-P	26.42±4.04 ab	4.49±1.35 ab	4.78±2.07 b	2.21±0.88 ab	4.63±2.36 a	1.15±0.50 ab	0.52±0.03 b
Ca-P	31.30±7.29 a	5.93±1.24 a	8.44±2.54 a	3.37±0.92 a	5.98±1.98 a	1.72±0.41 a	0.52±0.03 b

注:数据以“平均值±标准差”表示,同列数据后标不同字母者表示差异显著($P<0.05$)。
Note:Data presented as“mean±SD”,different letters indicate significant difference at $P<0.05$.

2.2 不同磷源对油茶根际和非根际土壤养分的影响

由表 2 可知,不同磷源对酸性红壤的养分含量具有显著影响。添加不同磷源对总氮和非根际土壤铵态氮的含量影响不显著;非根际土壤硝态氮含量除 Ca-P 处理较低外(81.6 mg/kg),其他处理间无显著差异;但根际土壤铵态氮和硝态氮含量存在显著差异。不同磷源显著提高了酸性红壤中的全磷和

有效磷含量,其中以 Fe-P 处理对全磷含量的提高作用最显著;而 Ca-P 和 Al-P 处理对有效磷含量的提高作用最显著,在根际土壤中 Ca-P 和 Al-P 处理的有效磷含量较 CK 分别提高了 120 倍和 125 倍。同时,paired t-test 检验显示,根际土壤有效磷和有效钾含量显著高于非根际土壤($P=0.002$, $P=0.000$),而根际与非根际土壤的全磷和全钾含量并无显著差异($P=0.637$, $P=0.523$)。

表 2 不同磷源对油茶根际和非根际土壤养分的影响

Table 2 Effects of different phosphates sources on the nutrient levels of rhizosphere and non-rhizosphere soil of oil-tea

指标 Index	土样 Soil sample	CK	O-P	Fe-P	Al-P	Ca-P
总氮含量/(g·kg ⁻¹) Content of total	根际土壤 R soil	0.39±0.12 a	0.50±0.10 a	0.44±0.10 a	0.40±0.10 a	0.36±0.16 a
	非根际土壤 NR soil	0.44±0.07 a	0.45±0.03 a	0.40±0.03 a	0.40±0.05 a	0.43±0.03 a
铵态氮含量/(mg·kg ⁻¹) Content of ammonium N	根际土壤 R soil	2.94±0.51 b	3.00±0.14 b	1.85±0.51 c	1.73±0.46 c	3.80±0.55 a
	非根际土壤 NR soil	2.22±0.40 a	3.22±0.92 a	2.25±0.14 a	3.12±0.93 a	2.62±0.71 a
硝态氮含量/(mg·kg ⁻¹) Content of nitrate N	根际土壤 R soil	134.7±0.6 a	126.0±3.2 b	96.3±1.0 c	88.0±1.1 d	123.5±0.7 b
	非根际土壤 NR soil	142.9±3.0 a	130.3±1.5 a	120.4±3.4 a	120.8±3.5 a	81.6±2.7 b
全磷含量/(g·kg ⁻¹) Content of total P	根际土壤 R soil	0.20±0.02 c	0.41±0.03 b	0.96±0.18 a	0.55±0.08 b	0.48±0.06 b
	非根际土壤 NR soil	0.17±0.04 c	0.38±0.01 b	1.09±0.12 a	0.42±0.01 b	0.48±0.05 b
有效磷含量/(mg·kg ⁻¹) Content of available P	根际土壤 R soil	0.29±0.13 c	29.94±0.77 b	15.92±0.71 b	36.58±0.70 a	35.14±1.53 a
	非根际土壤 NR soil	0.25±0.01 e	27.56±0.93 c	14.15±0.32 d	29.27±1.24 b	33.52±0.38 a
全钾含量/(g·kg ⁻¹) Content of total K	根际土壤 R soil	9.3±0.1 ab	9.5±0.1 a	9.2±0.2 ab	9.2±0.1 c	9.4±0.1 ab
	非根际土壤 NR soil	9.6±0.3 a	9.3±0.1 ab	9.7±0.2 a	9.2±0.1 ab	9.0±0.4 c
有效钾含量/(mg·kg ⁻¹) Content of available K	根际土壤 R soil	88±10 bc	100±3 a	92±2 ab	81±4 c	71±8 d
	非根际土壤 NR soil	112±5 a	115±10 a	97±2 b	94±1 b	111±11 a

注:数据以“平均值±标准差”表示,同行数据后标不同字母表示差异显著($P<0.05$);R soil:Rhizosphere soil;NR soil:Non-rhizosphere soil。
Note:Data presented as“mean±SD”,different letters indicated significant difference at $P<0.05$;R soil:Rhizosphere soil;NR soil:Non-rhizosphere soil.

2.3 不同磷源对油茶幼苗营养水平的影响

图 1 显示,在土壤中添加不同磷源对油茶老叶、新叶以及根系中的大量元素含量具有显著影响。其中,油茶幼苗老叶氮含量在 Al-P 处理下最高(17.78 g/kg),而新叶和根系的氮含量分别在 Fe-P 处理和对照中最高,分别达到 18.84 g/kg 和 14.50 g/kg。Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P 处理油茶各个器官中的磷

含量都显著高于对照,其中 Al-P 处理老叶磷含量最高(0.83 g/kg),Fe-P 处理油茶新叶磷含量最高,达 1.78 g/kg,而 Ca-P 处理油茶根系磷含量最高,达 0.82 g/kg。在 Fe-P 处理下,油茶老叶和新叶钾含量最高,分别为 10.32 g/kg 和 16.23 g/kg,而根系钾含量在 O-P 下最高(24.56 g/kg)。

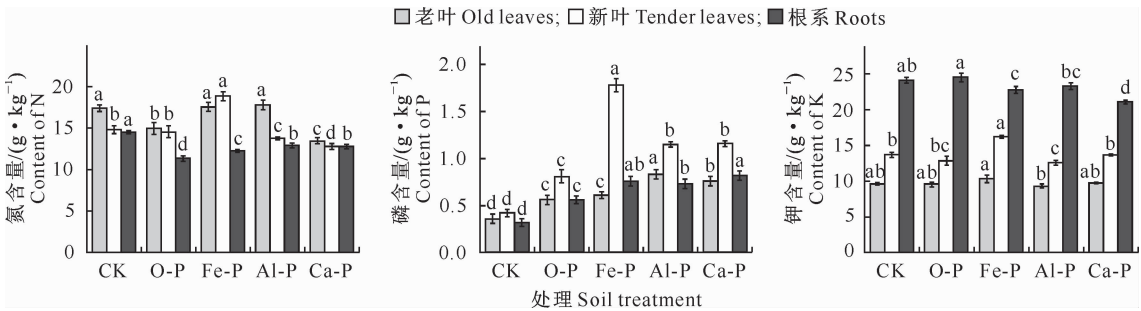


图 1 不同磷源对油茶幼苗氮、磷、钾含量的影响

Fig. 1 Effects of phosphates on N,P,K contents of oil-tea

2.4 根际土壤有效养分与油茶幼苗生长指标的相关分析

由表 2 可知,添加不同磷源对油茶根际土壤有效养分含量具有显著影响,故选用根际土壤养分含量与油茶幼苗生长指标进行相关分析,结果见表 3。由表 3 可知,根际土壤有效养分与油茶幼苗生长指标具有显著相关性。有效磷含量与有效钾、硝态氮含量呈负相关,与铵态氮含量相关性不大,而铵态氮

与硝态氮之间呈极显著相关。有效磷含量与苗高、总干质量以及地径呈正相关,其中与苗高的相关性达极显著水平,而与根冠比呈负相关。铵态氮与苗高、总干质量、地径和根冠比也呈正相关。而硝态氮与根冠比的相关性达显著水平,可能因为铵态氮是油茶吸收的主要氮形式。有效钾与苗高、总干质量和地径 3 个生长指标均呈负相关,说明其不是供试油茶生长的限制因子。

表 3 油茶根际土壤有效养分与油茶幼苗生长指标的相关分析

Table 3 Correlation analysis of available nutrients and growth indexes

指标 Index	有效磷 Available P	铵态氮 Ammonium N	硝态氮 Nitrate N	有效钾 Available K	苗高 Seedling height	总干质量 Dried weight	地径 Ground diameter	根冠比 Root/ Shoot
有效磷 Available P	1.000							
铵态氮 Ammonium N	0.006	1.000						
硝态氮 Nitrate N	-0.399	0.775 **	1.000					
有效钾 Available K	-0.200	-0.424	0.000	1.000				
苗高 Seedling height	0.686 **	0.297	-0.288	-0.580 *	1.000			
总干质量 Dried weight	0.284	0.502	0.106	-0.363	0.740 **	1.000		
地径 Ground diameter	0.476	0.281	-0.154	-0.511	0.836 **	0.787 **	1.000	
根冠比 Root/Shoot	-0.458	0.205	0.629 *	0.333	-0.614 *	-0.431	-0.422	1.000

注: ** 表示相关性极显著 $P<0.01$; * 表示相关性显著 $P<0.05$ 。
Note: ** indicates significant correlation between characters at $P<0.01$; * indicates significant correlation between characters at $P<0.05$.

3 结论与讨论

磷是植物必需的大量元素,参与植物的众多生理代谢过程。然而,由于磷在土壤中迁移能力有限以及土壤的固磷作用,植物主要依靠拓展根系提高

与土壤的接触面积、激活高亲和磷酸转运系统和分泌有机酸及酸性磷酸酶等来促进闭蓄态磷(如 Fe-P、Al-P 等)的释放^[17-18]。油茶长期生长在富含铝铁氧化物的酸性红壤中,土壤固有的磷和施用的磷更易被其固定,油茶磷的来源必然是土壤中的难溶磷。

本试验在红壤中施入的难溶磷和有机磷一部分以 Fe-P 等形式被土壤固定^[2],另一部分磷随着水体流失,因此虽然各施磷处理的土壤全磷含量均显著提高,但由于不同磷源被固定和溶解性的不同,各处理间全磷含量仍存在差异。在本研究中,根际土壤有效磷水平显著高于非根际土壤,这是由于植株可能通过根系分泌小分子有机酸和调节根际 pH 值等方式促进根际难溶磷向有效磷转化所致^[17]。同时,无机难溶磷及有机磷的添加能明显提高地径、苗高等生长指标,其中 Ca-P 和 Al-P 能通过提高油茶根际土壤有效磷含量而显著促进油茶生长。Ca-P 和 Al-P 处理下油茶幼苗的养分水平并不高,是由于植株生长迅速而引起的稀释效应^[19];而 Fe-P 处理的幼苗由于树体和叶片矮小,养分含量较高。

本研究结果表明,油茶能够利用土壤中的难溶磷和有机磷,特别是 Ca-P 和 Al-P,因此对于长期不施肥的林地,Al-P 和其他难溶磷可能是油茶主要的磷来源。此外,本研究也发现,O-P 虽然能提高土壤中全磷和有效磷的含量,但是促进植物生长的作用并不明显,可能与油茶品种的选择有关^[8]。本研究还发现,即使添加了 Al-P,酸性红壤普遍存在的铝毒也并未出现,这与前人的研究结果^[20]并不一致,这是否是由于供磷提高了油茶的铝耐受性^[21],还有待进一步验证,但可以推测铝毒在南方油茶产区大面积发生的几率较小。

[参考文献]

- [1] Zheng S. Crop production on acidic soils: Overcoming aluminium toxicity and phosphorus deficiency [J]. *Annals of Botany*, 2010(106): 183-184.
- [2] Hu H, Tan C, Cai C, et al. Availability and residual effects of phosphate rocks and inorganic P fractionation in a red soil of Central China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001(59): 251-258.
- [3] Mendoza R E. Phosphorus effectiveness in fertilized soils evaluated by chemical solutions and residual value for wheat growth [J]. *Fertilizer Research*, 1992(32): 185-194.
- [4] Chen R, Jia P. Transformation and bioavailability of phosphorus in neutral and acidic soils [J]. *Trop Sub-trop Soil Sci*, 1998(7): 6-10.
- [5] Shen J, Yuan L, Zhang J, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant [J]. *Plant Physiology*, 2011, 156: 997-1005.
- [6] 方 红,王震洪,陈谋会,等.岩溶地区常绿阔叶林树种根际与非根际土壤的养分特征 [J]. *贵州农业科学*, 2012, 40(5): 95-100.
- Fang H, Wang Z H, Chen M H, et al. Nutrient characteristic in rhizosphere and bulk soil of evergreen broad-leaved forest in karst regions [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, 40(5): 95-100. (in Chinese)
- [7] 卢 鑫,张丽静,王 瑞,等.玛曲高寒沙化草地 3 种灌木根际土壤磷素含量特征 [J]. *草业科学*, 2012, 29(2): 167-173.
- Lu X, Zhang L J, Wang R, et al. Characteristic of phosphorus contents in the rhizosphere soil of different shrubs on sandy grassland in Maqu [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(2): 167-173. (in Chinese)
- [8] Du Y, Tian J, Liao H, et al. Aluminium tolerance and high phosphorus efficiency helps *Stylosanthes* better adapt to low-P acid soils [J]. *Annals of Botany*, 2009(103): 1239-1247.
- [9] 庄瑞林.中国油茶 [M]. 2 版.北京:中国林业出版社,2008:3.
- Zhuang R L. *Oiltea in China* [M]. 2nd ed. Beijing: Chinese Forestry Press, 2008: 3. (in Chinese)
- [10] 国家林业局.全国油茶发展规划(2009—2020) [M]. 北京:中国林业出版社,2009:3.
- Forestry Administration of China. Development program of oil tea in China(2009—2020) [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2009: 3. (in Chinese)
- [11] 何 方,何 柏.油茶栽培分布与立地分类的研究 [J]. *林业科学*, 2002, 38(5): 64-72.
- He F, He B. Cultural distribution and site classification for *Camellia oleifera* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(5): 64-72. (in Chinese)
- [12] 袁 军.普通油茶营养诊断及施肥研究 [D]. 长沙:中南林业科技大学,2010:22-28.
- Yuan J. Studies on nutrition diagnosis and fertilization in *Camellia oleifera* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2010: 22-28. (in Chinese)
- [13] 丁 锐,邓小梅,奚如春,等.广东省油茶林地不同母岩红壤养分限制因子研究 [J]. *经济林研究*, 2012, 30(2): 61-67.
- Ding R, Deng X M, Xi R C, et al. Nutrient limiting factors in red soil from different parent rocks at oil-tea forest land of Guangdong Province [J]. *Nonwood Forest Research*, 2012, 30(2): 61-67. (in Chinese)
- [14] 陈永忠,彭邵锋,王湘南,等.油茶高产栽培系列技术研究:配方施肥试验 [J]. *林业科学研究*, 2007, 20(5): 650-655.
- Chen Y Z, Peng S F, Wang X N, et al. Study of high yield cultivation technologies of oil-tea *Camellia (Camellia oleifera)*: Formulate fertilization [J]. *Forest Research*, 2007, 20(5): 650-655. (in Chinese)
- [15] 张雪洁,谭晓风,袁 军,等.低磷胁迫对油茶叶绿素荧光参数的影响 [J]. *经济林研究*, 2012, 30(2): 48-51.
- Zhang X J, Tan X F, Yuan J, et al. Effects of low phosphorus stress on chlorophyll fluorescence parameters in *Camellia oleifera* [J]. *Nonwood Forest Research*, 2012, 30(2): 48-51. (in Chinese)
- [16] 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,2006:42-68.
- Agricultural Technology Extension and Service Center of China. Soil analysis technical specifications [M]. 2nd ed. Beijing: Agriculture Press of China, 2006: 42-68. (in Chinese)

[17] Neumann G, Römheld V. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants [J]. Plant and Soil, 1999(211): 121-130.

[18] 张海伟, 黄宇, 叶祥盛, 等. 低磷胁迫下甘蓝型油菜酸性磷酸酶对磷效率的贡献分析 [J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(5): 418-427.

Zhang H W, Huang Y, Ye X S, et al. Analysis of the contribution of acid phosphatase to P efficiency in *Brassica napus* under low phosphorus conditions [J]. Science China: Life Sciences, 2010, 40(5): 418-427. (in Chinese)

[19] Havilin J L, Beaton J D, Tisdale S L, et al. Soil fertility and fertilizers; An introduction to nutrient management [M]. 7th ed. London: Pearson Education, Inc, 2005: 68-72.

[20] He G, Zhang J, Hu X, et al. Effect of aluminum toxicity and phosphorus deficiency on the growth and photosynthesis of oil tea (*Camellia oleifera* Abel.) seedlings in acidic red soils [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 33(4): 1285-1292.

[21] Liao H, Wan H, Shaff J, et al. Phosphorus and aluminum interactions in soybean in relation to Al tolerance; Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system [J]. Plant Physiology, 2006, 141(2): 674-684.

.....

(上接第 154 页)

[22] 沈国航. 森林培育学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.

Shen G F. Forestry silviculture [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009. (in Chinese)

[23] Bell D T. Ecological response syndromes in the flora of southwestern Western Australia; Fire resprouters versus reseederers [J]. Bot Rev, 2001, 67: 417-440.

[24] Standiford R B, McCreary D, Barry S. Blue oak stump sprouting evaluated after firewood harvest in northern Sacramento Valley [J]. California Agriculture, 2011, 65(3): 148-154.

[25] 赵睿, 周学峰, 徐娜娜, 等. 米心水青冈种群萌条更新与高度生长 [J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3665-3669.

Zhao R, Zhou X F, Xu N N, et al. Sprouting and height in a *Fagus engleriana* population [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3665-3669. (in Chinese)

[26] 刘日林, 叶春林, 斯金平, 等. 厚朴矮林经营技术的初步研究 [J]. 浙江林业科技, 2002, 22(2): 29-31.

Liu R L, Ye C L, Si J P, et al. Preliminary study on management technique of magnolia coppice [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2002, 22(2): 29-31. (in Chinese)

[27] Fuchsa M A, Krannitzb P G, Harested A S. Factors affecting emergence and First-year survival of seedlings of Garry oaks (*Quercus garryana*) in British Columbia [J]. Canada Forest Ecology and Management, 2000, 137: 209-219.

[28] Jyrki H, Anna S. Long-term biomass production and nutrient uptake of birch, alder and willow plantations on cut-away peatland [J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33: 1197-1211.

[29] 朱万泽, 王金锡, 罗成荣, 等. 森林萌生更新研究进展 [J]. 林业科学, 2007, 43(9): 74-81.

Zhu W Z, Wang J X, Luo C R, et al. Progresses of studies on forest sprout regeneration [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(9): 74-81. (in Chinese)

[30] Luostarinen K, Kauppi A. Effects of coppicing on the root and stump carbohydrate dynamics in birches [J]. New Forests, 2005, 29: 289-303.

[31] Midgley J J. Why the world vegetation is not totally dominated by resprouting plants; Because resprouters are shorter than reseederers [J]. Ecography, 1996, 19: 92-94.

[32] Tord Johansson. Sprouting ability and biomass production of downy and silver birch stumps of different diameters [J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32: 944-951.

[33] Negreros C P, Hall R B. Sprouting capability of 17 tropical tree species after overstory removal in Quintana Roo, Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 126: 399-403.

[34] Wan X C, Landhausser S M, Lieffers V J, et al. Signals controlling root suckering and adventitious shoot formation in aspen (*Populus tremuloides*) [J]. Tree Physiology, 2006, 26: 681-687.