

西双版纳橡胶林土壤磷的分布及与橡胶生长的关系

陈永川,许木果,黎小清,刘忠妹,陈桂良,杨春霞,李春丽

(云南省热带作物科学研究所,云南 景洪 666100)

摘要:为了研究西双版纳植胶区不同品系橡胶树生长对土壤磷的影响、了解土壤磷变化与橡胶生长的关系,分别在西双版纳不同植胶区(景洪、勐腊、勐海)采集了不同品系、不同割龄橡胶林土壤和橡胶树叶片,分析了土壤全磷、速效磷和橡胶树叶片磷空间变化特征,探讨了土壤磷与橡胶树叶片磷的关系。结果表明,西双版纳不同植胶区、不同品系橡胶林土壤中磷的变化差异较大,橡胶林土壤中全磷以景洪植胶区最高,勐腊、勐海植胶区相对较低,并随橡胶种植品系而变化。RRIM600、GT1 品系橡胶林土壤中全磷含量较高、云研-774 相对较低,10~20 割龄较高、0~10 割龄和 20~30 割龄较低。土壤速效磷含量较低、变异最大;橡胶树叶全磷含量表现为勐腊、景洪>勐海,RRIM600 和云研-774 最高、GT1 较低,低割龄和老割龄磷相对较高。土壤速效磷与橡胶树叶片磷成极显著的正相关,土壤速效氮磷比与对橡胶树叶氮磷比成显著的正相关。橡胶树及土壤磷含量随橡胶树品系、割龄、生长环境而变化;不同割龄、不同品系橡胶树生长对土壤磷含量具有显著的影响。

关键词:橡胶树;品系;割龄;土壤;磷;分布

中图分类号:S714 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)04-0064-06

Distribution of Soil Phosphorus of Rubber Tree Plantation and Its Relationship with the Rubber Tree Growth in Xishuangbanna

CHEN Yong-chuan, XU Mu-guo, LI Xiao-qing, LIU Zhong-mei, CHEN Gui-liang, YANG Chun-xia, LI Chun-li
(Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, Yunnan, China)

Abstract: In order to understand the influence of the growth of different rubber tree (*Hevea brasiliensis*) varieties on soil phosphorus in rubber plantations occurring in different ecological regions in Xishuangbanna, and to reveal the relationship between soil phosphorus change and the rubber growth, samples of the soils and the rubber tree leaves of different varieties and ages were collected from different growing areas in Xishuangbanna (i. e., Jinghong, Mengla and Menghai). Total and available phosphorus in the soils and the leaves were measured to examine the spatial variation characteristics and the relationship between the soil and leaf phosphorus. Significant differences in soil phosphorus were found between different growing regions and rubber tree varieties. Soil total phosphorus in Jinghong was higher than in Mengla and Menghai, and varied among different varieties. Soil total phosphorus of RRIM600 and GT1 rubber forest was high, while yunan-774 was relatively low. For different tapping ages, soils of the 10-20th rubber tapping year trees demonstrated higher soil total phosphorus, but lower in the soils of the 0-10th and 20-30th rubber tapping year trees. Compared with soil total phosphorus, soil available phosphorus was low, and exhibited significant variations. The content of total phosphorus in rubber tree leaves was in the order of Mengla, Jinghong > Menghai, RRIM600 and yunyan-774 were high, GT1 was low, and the phosphorus was relatively high at young and old rubber tapping age trees. There was a significant positive correlation between soil available

phosphorus and rubber trees leaf phosphorus, and the ratio of soil available nitrogen to phosphorus also showed significantly positive correlation with the ratio of nitrogen to phosphorus in rubber tree leaves. Phosphorus content of rubber tree leaves and soil varied with varieties, rubber tapping ages and growth environments. Soil phosphorus content was significantly affected by rubber tree varieties with different rubber tapping ages.

Key words: rubber tree; rubber tree variety; rubber tapping age; soil; phosphorus; distribution

磷是影响橡胶树(*Hevea brasiliensis*)生长的主要营养元素,土壤中的磷素形态及其含量直接影响橡胶树的生长及胶乳产量^[1-4]。磷在热带亚热带土壤中的有效性较低,常被认为是林业生态系统生产力的限制因子之一^[5-7]。在橡胶林生态系统中土壤有效磷的供应能力主要决定于磷素的矿化、解吸和释放作用,而橡胶林土壤中磷素的化学行为和有效性与橡胶生长环境密切相关、并可能受橡胶种植品系和种植年限的影响^[8-11]。目前橡胶树都是单一种植、地表覆盖相对较少,而橡胶宜林地又是热带雨林的分布地带,因此土壤中的磷更易在高温、高湿、高降雨量环境下流失、转化和固定,以致磷的有效性和利用率较低。随着橡胶割胶刺激强度和割胶频率的增加,胶乳中磷的流失在增加,橡胶树-土壤系统中磷养分不平衡加剧^[4-5,10-11]。目前对橡胶林土壤中的养分研究仅局限于某一生态区某一品系橡胶树的研究,而不同生态区不同品系、不同割龄橡胶林土壤磷的空间变化特征及其对橡胶树生长的影响并不清楚,不同品系、不割龄橡胶树生长对土壤中磷的影响更未有研究报道。

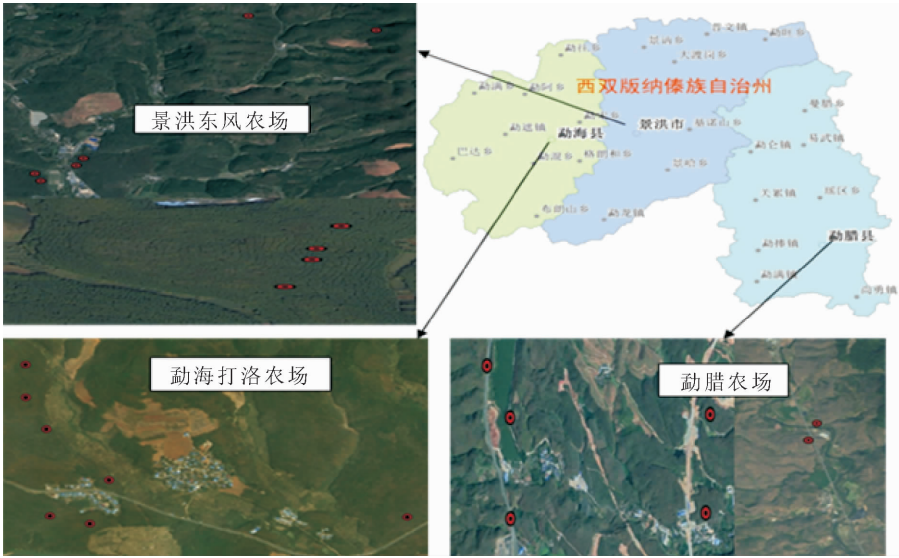
因此在对橡胶林土壤磷动态特征研究的基础

上^[1],通过对西双版纳不同植胶区橡胶树主栽品系 RRIM600、GT1、云研-774 橡胶林土壤全磷、有效磷和叶片中磷进行研究,并比较不同割龄橡胶林土壤磷和橡胶叶片磷的变化,探讨土壤和橡胶叶片氮磷比关系,弄清不同品系橡胶树对土壤磷的影响及其相互作用,以期为提高橡胶林土壤肥力和橡胶林管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于云南西双版纳景洪(21°45'N,100°41'E)、勐腊(21°27'N,101°32'E)、勐海(22°42'N,100°6'E)3 个橡胶林生态区,属于亚热带雨林气候,景洪年均气温 21.7℃,年降雨量 1 202.3 mm,橡胶林土壤类型以砖红壤为主;勐腊年均气温20.5℃,年降雨量 1 525.4 mm,橡胶林土壤类型以红壤和沙壤土为主;勐海年均气温 18℃,年降雨量 1 420.2 mm,橡胶林土壤类型以红壤为主,3 个地区降雨主要集中在 5—10 月,试验地属于国营农场橡胶林,施肥和管理相对一致,其橡胶树种植密度约 450 棵·hm⁻²,种植带宽 1 m,株距2 m,保护带宽 6 m。



注:○为研究位点。

图 1 采样分布

Fig. 1 Distribution map for sampling sites

1.2 研究方法

在景洪、勐腊、勐海植胶区分别选择 3 个具有代表性的橡胶树主栽品系 GT1、RRIM600、云研 77-4，并于 2014 年 8 月在每个植胶区对不同品系橡胶林分别采集 0~10、10~20、20~30 割龄具有代表性的橡胶树生长保护带和种植带 0~20 cm 土壤和橡胶树叶片，每一处理选橡胶树粗细大小一致的 10 棵树为研究对象，采集距离每棵胶树基部 10 cm 种植带和 3 m 保护带处 0~20 cm 土壤、多点混和采集作 1 复合样品，3 次重复，采集土壤避开施肥沟。一部分土样风干磨细过 0.25 mm 筛用于全磷的测定，磨细过 1 mm 筛用于速效磷的测定。并采集相对应的每颗橡胶树中下部成熟混合叶片，叶片样品经杀青、烘干、粉碎用于全磷含量测定。

1.3 分析项目及测定方法

土壤全磷测定，浓硫酸消煮、钼蓝比色法测定；速效磷测定，0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提(液土比为 5:1)、钼蓝比色法测定；橡胶树叶片全氮磷测定，浓硫酸-过氧化氢消煮、流动分析仪测定^[12]。

1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS19.0 软件进行统计分析，Duncan 检验方法进行多重比较差异显著性为 α=0.05 水平。

2 结果与分析

2.1 不同品系橡胶林土壤磷的区域变化

由表 1 可见，西双版纳橡胶林土壤磷形态含量随橡胶树品系、区域而变化，呈现大的空间变化差异

表 1 不同植胶区、不同品系橡胶林土壤磷的空间变化特征

Table 1 Variations of soil phosphorus in different varieties in different regions

土壤磷类型	区域	RRIM600	GT1	云研-774	平均
全磷/(g·kg ⁻¹)	景洪	0.55±0.36a	0.47±0.27a	0.21±0.01a	0.45a
	勐腊	0.22±0.04b	0.18±0.03c	0.22±0.03a	0.20b
	勐海	0.22±0.08b	0.25±0.05b	0.17±0.03b	0.22b
	平均	0.36±0.29	0.33±0.22	0.21±0.03	
	变异	80%	69%	15%	
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	景洪	2.18±0.72a	16.27±36.60a	1.47±0.47b	7.73b
	勐腊	6.06±6.53a	9.93±11.91b	18.86±26.07a	10.62a
	勐海	10.84±8.53a	10.02±9.33ab	9.07±4.03a	10.16a
	平均	5.32±6.30	12.77±25.42	12.06±19.43	
	变异	119%	199%	161%	

注：采用 SPSS 软件分析，同一列不同区域差异用不同小写字母表示，P<0.05。

2.3 不同品系橡胶树叶片全磷的区域、割龄变化

由表 3 可见，西双版纳橡胶树叶全磷与土壤速效磷具有类似特征，橡胶树叶全磷含量随橡胶树品系、割龄、区域而变化，橡胶林土壤速效磷含量高、其橡胶树叶片中全磷含量也高。RRIM600 和云研-

特征。橡胶林土壤全磷含量呈现景洪种植区较高、勐腊和勐海种植区相对较低的分布特征，并表现为 RRIM600 和 GT1 品系橡胶林相对较高、云研-774 较低的趋势。不同品系橡胶林土壤中全磷随区域而变化：景洪 RRIM600 > GT1 > 云研-774，勐腊 RRIM600 和云研-774 > GT1，勐海 GT1 > RRIM600 > 云研-774。与土壤全磷相比，西双版纳橡胶林土壤速效磷含量较低、变异较大，呈现以勐腊和勐海生态区相对较高、景洪随橡胶品系变化较大的分布特征；表现为 GT1 和云研-774 较高、RRIM600 较低的趋势；与全磷类似，不同品系橡胶林土壤中速效磷随区域而变化：景洪 GT1 > RRIM600 > 云研-774，勐腊云研-774 > GT1 > RRIM600，勐海地区随橡胶品系变化差异较小。以上结果表明，橡胶林土壤中磷形态分布与环境效应密切相关，并影响着橡胶树叶片中磷的含量(表 1、图 2)，而生态区域和不同品系橡胶生长对磷素的有效性影响较大(注：表中研究点为不同割龄土壤磷平均含量)。

2.2 不同品系橡胶林土壤磷的割龄变化

由表 2 可见，西双版纳橡胶林土壤全磷和速效磷含量呈现随不同割龄、不同品系而变化的特征。不同品系橡胶林土壤全磷总体趋势呈现 10~20 割龄较高、0~10 割龄和 20~30 割龄相对较低的分布特征。由于速效磷受环境的影响较为敏感，其不同品系橡胶林土壤中速效磷呈现随割龄变化：具体表现为 RRIM600 品系橡胶林土壤速效磷含量随割龄增加而增加，GT1 和云研-774 橡胶林土壤速效磷含量随割龄的增大而减小。

774 橡胶树叶全磷含量呈现勐腊 > 勐海 > 景洪，GT1 橡胶树叶全磷含量呈现景洪 > 勐腊 > 勐海，RRIM600 和 GT1 橡胶树叶全磷含量低割龄和老割龄较高，云研-774 中割龄较高。总体趋势橡胶树叶全磷含量表现为：勐腊、景洪 > 勐海；RRIM600 和云

研-774 较高、GT1 较低,并随区域而变化;低割龄和老割龄相对较高(云研-774 除外)。以上结果表明橡胶树叶片磷含量受橡胶品系、割龄、种植环境的影响,并与地理分布、土壤特性密切相关(表 1、表 3)。

表 2 不同割龄橡胶林土壤磷的变化特征

Table 2 Variation of soil phosphorus in different rubber tapping age plantations

土壤磷类型	割龄	RRIM600	GT1	云研-774	平均
全磷/(g·kg ⁻¹)	0~10	0.32±0.16b	0.28±0.15b	0.21±0.03a	0.27b
	10~20	0.48±0.46a	0.42±0.35a	0.23±0.02a	0.42a
	20~30	0.29±0.09b	0.28±0.07b	——	0.28b
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	0~10	2.51±0.73 c	18.64±31.62a	4.46±2.96b	11.92a
	10~20	3.96±2.50b	13.30±29.96a	4.43±2.74b	8.03a
	20~30	9.48±9.49a	6.37±8.73c	——	7.93a

注:采用 SPSS 软件分析,同一列差异用不同小写字母表示,P<0.05。表 3 同。

表 3 不同品系橡胶树叶片全磷变化特征

Table 3 Variation of total phosphorus in the leaves of different varieties / (g·kg⁻¹)

项目	品系	RRIM600	GT1	云研-774	平均
区域	景洪	2.35±0.18b	2.50±0.12a	2.39±0.12b	2.42a
	勐腊	2.57±0.52a	2.35±0.23a	2.55±0.25a	2.48a
	勐海	2.41±0.18a	2.13±0.57b	2.53±0.35a	2.32b
割龄	0~10	2.44±0.13a	2.49±0.12a	2.43±0.19b	2.45a
	10~20	2.37±0.17c	2.17±0.41b	2.72±0.25a	2.33b
	20~30	2.59±0.59a	2.40±0.27a	——	2.50a
平均		2.44±0.33	2.37±0.31	2.51±0.23	

2.4 橡胶林土壤速效磷与橡胶树叶全磷的关系

由图 2 可见,土壤速效磷与橡胶树叶片全磷成极显著的正相关关系,土壤速效磷含量高、其叶片中全磷含量也高。结果显示了土壤速效磷是影响橡胶树生长的主要磷形态、对橡胶树磷的吸收具有大的缓冲作用,但是由于不同品系其遗传特性及种植区域差异,其橡胶树叶磷的含量同。

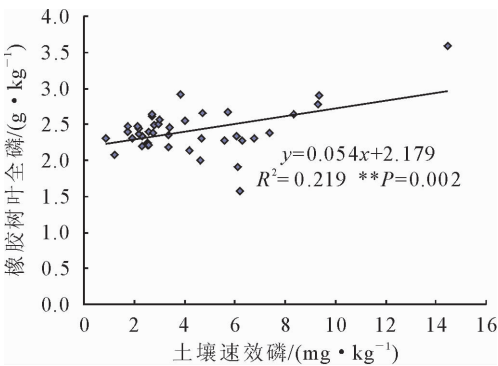


图 2 橡胶林土壤速效磷与橡胶树叶片全磷的关系
Fig. 2 Relationships between soil available-P of rubber plantation and leaf total phosphorus of rubber trees

2.5 土壤氮磷比与橡胶树叶氮磷比关系

由图 3 可见,土壤碱解氮、硝态氮、铵态氮与速效磷比与橡胶树叶氮磷比成显著的正相关关系,表明土壤中不同形态氮与速效磷比变化显著影响橡胶树叶氮磷比、并影响着橡胶树生长,土壤中的氮磷相互作用影响着橡胶树叶氮磷的含量。

3 结论与讨论

研究结果表明,橡胶林土壤磷和橡胶树叶片磷含量受橡胶种植品系、割龄和种植区域影响而变化。有研究认为环境条件变化对土壤养分总量和有效养分含量影响最为强烈^[1,2,6],本研究结果显示,西双版纳不同植胶区土壤全磷和速效磷呈现较大的空间变化,并随橡胶种植品系、割龄而呈现一定的分布规律。橡胶林土壤全磷呈现景洪植胶区最高、勐腊和勐海植胶区相对较低,RRIM600 和 GT1 品系橡胶林相对较高、云研-774 品系橡胶林相对较低,10~20 割龄较高、0~10 割龄和 20~30 割龄相对较低的分布特征。橡胶林土壤速效磷呈现含量较低、空间变异最大的特点,具体表现为:勐腊和勐海植胶区相对较高、景洪植胶区较低,GT1 和云研-774 品系橡胶林相对较高、RRIM600 橡胶林相对较低,RRIM600 橡胶林随割龄增加而增加、GT1 和云研-774 橡胶林随割龄的增大而减小的分布特征。

西双版纳橡胶林土壤全磷含量较高,速效磷含量较低,可能与磷容易被固定、不容易释放有关,尤其以景洪生态区 RRIM600、GT1 品系橡胶林土壤全磷含量高、速效磷含量低的特征表现最为明显。不同品系橡胶林土壤速效磷含量较低、变异较大,可能与橡胶树对磷的吸收影响有关。橡胶树根系主要集中在浅表层、且须根系较多,因此对表层土壤速效磷的活化、吸收影响变化较大。

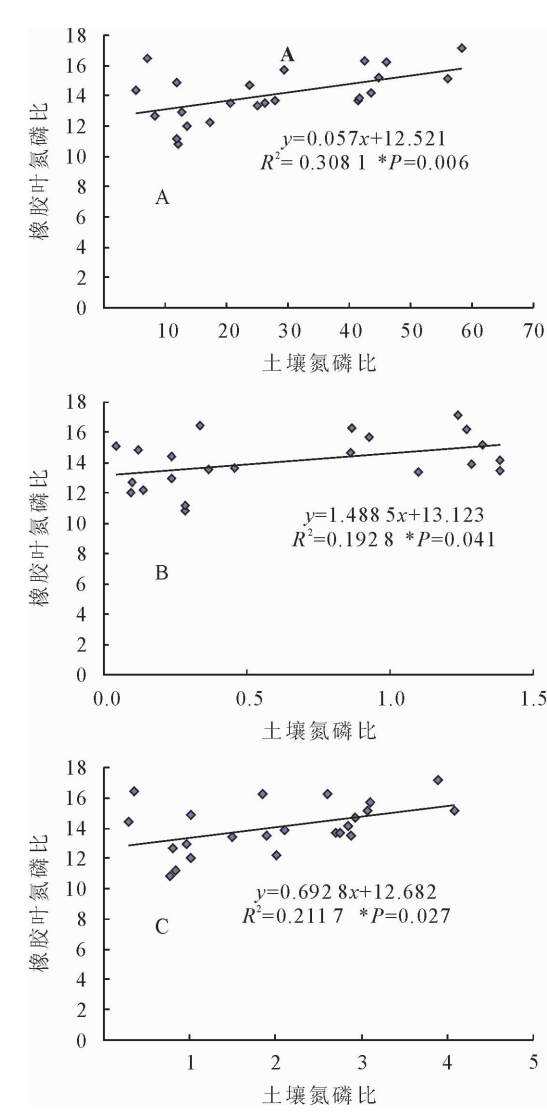


图3 橡胶林土壤氮磷比与橡胶树叶片氮磷比的关系

Fig. 3 Relationships between soil N/P and leaves N/P of rubber trees

土壤类型和气候差异也可能是影响西双版纳橡胶园土壤磷形态含量高低的因素之一。景洪植胶区土壤全磷含量较高、速效磷含量低,可能与景洪植胶区土壤以砖红壤为主、发育良好、土层相对较深、土壤相对肥沃、土壤本底磷含量较高有关。景洪年均气温比勐腊、勐海相对较高,降雨量相对较少,土壤中磷容易被固定、流失相对较小。勐腊、勐海以红壤和部分沙壤土居多,保水保肥相对较差,降雨相对较多,因此磷的流失相对较多。有研究认为土壤化学特性的差异对土壤养分的释放及有效性会产生较大的影响,同一种母质的土壤其有效磷(P)含量随土壤活性硅(Si)和交换性钙(Ca)、镁(Mg)的提高而增加,土壤中活性铁(Fe)、铝(Al)、锰(Mn)含量越高,土壤对磷的固定作用越强、土壤有效磷含量越低^[9,13-16]而不同割龄胶园的土壤中交换性钙镁含量也不同^[17]。景洪植胶区橡胶林土壤全磷含量高、速

效磷含量低,可能也与土壤中Fe、Al、Mn含量高,大量的交换性Ca、Mg被橡胶吸收有关。与热带雨林相比,橡胶园土壤中速效磷含量相对较低^[18],表明橡胶生长和割胶可能带走了土壤中大量的磷,而本研究结果也显示橡胶种植年限越长土壤全磷含量越低。

不同植胶区不同品系橡胶树根系可能对磷的活化、吸收影响不同,因此表现了不同品系橡胶林土壤全磷和速效磷区域差异特征。景洪植胶区土壤全磷含量呈现RRIM600>GT1>云研-774、速效磷含量呈现GT1>云研-774>RRIM600这一显著特征。勐腊和勐海植胶区土壤磷含量随橡胶种植品系而变化,但是差异并不显著。也有研究认为,有效磷变化是引起耕作层土壤全磷变化的主要原因^[1],本研究结果也显示不同品系橡胶林土壤中全磷的含量不同,且20~30割龄橡胶林土壤全磷含量较低,表明橡胶树种植年限越长对磷的消耗越多。西双版纳0~10割龄橡胶林土壤全磷含量低,与0~10割龄橡胶林大部分属于二代胶园、其磷含量被前期橡胶带走较多有关。

不同植胶区、不同品系橡胶树叶磷含量高低不同,可能与橡胶品系、橡胶种植年限、生长环境有关。景洪、勐腊属于一类植胶区,勐海属于三类植胶区,因此景洪、勐腊橡胶树叶中磷的平均含量相对较高。但是由于不同品系橡胶树在不同地区适应不同,RRIM600和云研-774品系橡胶树叶全磷含量呈现勐腊>勐海>景洪,GT1橡胶树叶全磷含量呈现景洪>勐腊>勐海。橡胶树叶片全磷平均含量总体趋势以0~10割龄和20~30割龄相对较高,10~20割龄较低,这可能与10~20割龄橡胶树是生长旺盛期和产胶高峰期,叶片中较多磷转移到胶乳中有关。土壤速效磷与橡胶树叶片全磷成显著正相关关系,土壤速效氮磷比与橡胶树叶氮磷比成显著的正相关关系,表明速效磷是影响橡胶树生长主要磷形态,土壤中的氮磷相互作用也将会影响着橡胶树中磷的含量。速效磷含量高的植胶区其橡胶树叶片中磷的含量也相对较高,而以景洪RRIM600品系橡胶林土壤中速效磷低和橡胶树叶片磷低的关系最为明显。

不同品系、不同种植年限橡胶树体磷的吸收利用累积特征、及对土壤中氮磷的相互作用对橡胶树生长的影响还需进一步研究。

参考文献:

[1] 陈永川,杨春霞,李春丽,等.橡胶林土壤中磷的动态变化特征规律研究[J].土壤通报,2012,43(5):1201-1206.
CHEN Y C, YANG C X, LI C L, et al. Variations of phosphor-

us in rubber forest soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012,43(5):1201-1206. (in Chinese)

[2] LIU C, JIN Y, LIU C, *et al.* Phosphorous fractions in soils of rubber-based agroforestry systems; influence of season, management and stand age[J]. Science of the Total Environment, 2018,616(X):1576-1588.

[3] 华元刚,陈秋波,林钊沐,等. 水肥耦合对橡胶树产胶量的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1211-1216.
HUA Y G, CHEN Q B, LIN Z M, *et al.* Coupling effects of water and chemical fertilizers on hevea brasiliensis latex yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1211-1216. (in Chinese)

[4] 罗雪华,刘云清,蔡秀娟,等. 刺激割胶与 RRIM600 矿质养分流失的关系[J]. 热带农业科学,2006,26(1):1-4, 24.
LUO X H, LIU Y Q, CAI X J, *et al.* Relationship between loss of mineral nutrient elements of total solids in latex and different tapping systems[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2006, 26(1): 1-4, 24. (in Chinese)

[5] 陈建会,邹晓明,杨效东. 热带亚热带常绿阔叶林维持酸性土壤有效磷水平的磷转化过程[J]. 生态学报,2006,26(7):2294-2300.
CHEN J H, ZOU X M, YANG X D, *et al.* Retention of plant available P in acid soils of tropical and subtropical evergreen broad-leaved forests[J]. Acta Ecologica Sinica 2006, 26(7): 2294-2300. (in Chinese)

[6] HOU E, TANG S, CHEN C, *et al.* Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties[J]. Geoderma, 2018, 313: 172-180.

[7] 刘洁,李茗,吴立潮. 南方红壤区油茶林土壤肥力质量指标及评价[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):73-80.
LIU J, LI M, WU L C. Soil fertility quality indicators and evaluation of the soil of camellia oleifera in Southern China red regions[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4):73-80. (in Chinese)

[8] MAHARJAN M, MARANGUIT D, KUZYAKOV Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use[J]. European Journal of Soil Biology, 2018, 87: 17-24.

[9] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.

[10] 何晶,冯成天,郭秀丽,等. 高浓度乙烯利刺激诱导橡胶树死皮发生过程中的胶乳生理研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):123-128
HE J, FENG C T, GUO X L, *et al.* Latex physiological characteristics during tapping panel dryness (TPD) occurrence induced by high-concentration ethrel stimulation in hevea brasiliensis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 123-128. (in Chinese)

[11] 曹建华,蒋菊生,杨怀,等. 不同割制对橡胶树胶乳矿质养分流失的影响[J]. 生态学报,2008,28(6):2563-2570.
CAO J H, JIANG J S, YANG H, *et al.* Loss of mineral elements due to latex export under five tapping systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2563-2570. (in Chinese)

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis [M]. Third Edition. Beijing :China Agricultural Press. (in Chinese)

[13] 鲍雅静,李政海,马云花,等. 橡胶种植对纳板河流域热带雨林生态系统的影响[J]. 生态环境, 2008,17(2):734-739.
BAO Y J, LI Z H, MA Y H, *et al.* Effects of rubber plantation on tropic rainforest ecosystem in Nabanhe river basin[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 734-739. (in Chinese)

[14] 刘世亮,介晓磊,李有田,等. 土壤-植物根际磷的生物有效性研究进展[J]. 土壤与环境,2002,11(2):178-182.
LIU S L, JIE X L, LI Y T, *et al.* Advance of study on phosphorus bioavailability in the soil-plant rhizosphere [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 178-182. (in Chinese)

[15] 赵琼,曾德慧,陈伏生,等. 沙地樟子松人工林土壤磷库及其有效性初步研究[J]. 生态学杂志,2004,23(5):224- 227. (in Chinese)
ZHAO Q, ZENG D H, CHEN F S, *et al.* Soil phosphorus pools and availability on *Pinus sylvestris* var. mongolica plantation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 224-227. (in Chinese)

[16] 李淑仪,蓝佩玲,廖新荣,等. 砖红壤磷的有效性研究[J]. 生态环境,2003,12(2):170-171.
LI S Y, LAN P L, LIAO X R, *et al.* Study on phosphorus availability in latosols[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 170-171. (in Chinese)

[17] 孙海东,刘备,吴炳孙,等. 橡胶树人工林地土壤酸度特征及酸化原因分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):49-54.
SUN H D, LIU B, WU B S, *et al.* Characteristics and causes of soil acidification in the rubber plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 49-54. (in Chinese)

[18] 秦胜金,刘景双,王国平. 影响土壤磷有效性变化作用机理[J]. 土壤通报,2006,37(5):1012-1016.
QIN S J, LIU J S, WANG G P. Mechanism of phosphorus availability change in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5): 1012-1016. (in Chinese)