

文章编号: 1008 - 2786 - (2015) 1 - 25 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000004

# 茶树根际土壤磷吸附动力学研究

杨威,周卫军\*,胡文敏,包春红,杨君

(湖南农业大学资源环境学院,湖南长沙 410128)

**摘 要:** 茶树具有喜酸聚铝特性,而酸性条件下土壤中的磷很容易被固定。为了弄清茶树根际土壤磷的吸附过程与作用机理,采用外源磷吸附培养方法,研究了不同母质、不同种植年限茶树根际土壤磷的吸附过程与动力学,并用最小二乘法进行 Langmuir 等温吸附方程拟合磷吸附动力学曲线,探讨了茶树根际土壤的磷吸附特征。结果表明:茶树根际土壤与非根际土壤磷的吸附过程与动力学有明显的差异。与非根际土壤的相比,茶树根际土壤最大吸附量( $X_m$ ) 值低 56 mg/kg,但是最大缓冲容量(MBC) 高 2.60,磷吸附饱和度(DPS) 高 1.44,表明根际土壤磷吸附力显著低于非根际土壤,而磷生物有效性高于非根际土壤。3种成土母质发育的茶园根际土壤磷吸附能力强弱依次为第四纪红色粘土>花岗岩风化物>板页岩风化物。随着种植年限的延长,根际土壤磷吸附能力特征值 $X_m$ 和 MBC 有所降低,而 DPS 有所增加。第四纪红色粘土、花岗岩风化和板页岩风化物3种母质发育的茶树根际土壤 DPS 值依次提高了 0.83、2.83 和 3.51,而 $X_m$ 依次降低了 91 mg/kg、131 mg/kg 和 61 mg/kg。

**关键词:** 根际土壤;磷吸附;种植年限;母质;动力学;茶树

中图分类号: S153.3

文献标志码: A

磷是茶树生长的必需营养元素之一,是核酸、核蛋白、磷脂的主要成分,与蛋白质合成、细胞的分裂和生长关系密切,参与光合作用、呼吸作用和能量代谢,与其产量和品质密切相关<sup>[1]</sup>。根际是指受植物根系活动的影响,在物理、化学和生物学性质上不同于土体的那部分微域土区<sup>[2]</sup>,且根际微域内的有效养分为“实际有效”养分,能直接为根系吸收,决定着作物实际吸收的养分量<sup>[3]</sup>。然而,磷在土壤中的大量累积与其生物有效性低是红壤旱地土壤磷养分的基本特征,高铝低磷是酸性土壤限制作物生长的主要因子之一,肥料磷与土壤磷常与铝作用形成不溶性的 Al-P<sup>[4]</sup>。有研究显示,酸性土壤的活性铝对茶树不但没有毒害,反而有利于茶树对磷的吸收和利用,促进根系和地上部的生长,有利于茶多酚的合成和茶叶品质的提高<sup>[5]</sup>。茶树根系以分泌不同的有机酸改变根际土壤理化性质,使根际土壤磷酸

盐有效性提高并更易被植物吸收,是其能在高铝低磷胁迫条件下正常生长的重要机制<sup>[6-9]</sup>。

本文针对茶树具有聚铝的特征以及南方红壤中磷容易被固定和利用率较低的问题,通过拟合 langmuir 吸附等温式所取得的特征值,分析不同种植年限、不同成土母质的根际土壤与非根际土壤对外源磷吸附特征的变化,探讨根际土壤吸磷特性与茶树根际分泌物的关系,试图探明施用根际土壤中磷的有效性的主要机理,为增强茶树根际土壤磷的有效性,提高茶树对磷的利用率,改善茶的品质和提高茶叶的产量提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

根际土壤的采集,采用林业上研究根际土常采

收稿日期(Received date): 2014-04-15; 改回日期(Accepted): 2014-07-25。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(编号: 41071204)。[The National Natural Science Fundation of China( No. 41071204. ]

作者简介(Biography): 杨威(1988-),男,硕士研究生,四川宜宾人,主要从事土壤环境过程及其模拟方面的研究。[Yang Wei(1988-), male, Postgraduates, born in Yibin lity Sichuan province, engaged in the process of soil environment and its simulation. ] E-mail: simon881011@yahoo.com.cn

\* 通信作者(Corresponding author): 周卫军,男,教授(博导),湖南常德人。[Zhou WeiJun, male, Professor( doctoral supervisor) born in Chang de City Hunan provinu. ] E-mail: wjzh0108@163.com

用抖落法<sup>[10]</sup>收集根表土壤作为根际土壤;非根际土壤用常规采样方法,在离收集根际土壤茶树1 m的茶园行间采集自然土壤。分别在湖南省安化县、长沙县、石门县、桃源县、资兴市(县级市)等5个县市采集了19个茶树根际土壤样品和5个非根际茶园土壤样本,密封低温保存。

24个样品分属3种不同母质,分别为第四纪红色粘土母质、花岗岩风化物母质、板页岩风化物母质;依据茶树种植年限分为:新垦茶园3~10 a、10~20 a、20~30 a和30 a以上茶树根际土壤。

## 1.2 实验与分析方法

### 1.2.1 其他项目测定

pH值:1:1水土比电位测定法;有机质:重铬酸钾容量法-外加热法;全磷:NaOH熔融,钼锑抗比色法;有效磷:0.5 mol/LNaHCO<sub>3</sub>提取,钼锑抗比色法;全钾:NaOH熔融,火焰光度法。

### 1.2.2 根际土壤磷的吸附实验

称1.50 g鲜样,放入100 mL离心管中,分别加入20.00 mL浓度为0 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L、40 mg/L、50 mg/L、60 mg/L、80 mg/L、100 mg/L、120 mg/L、150 mg/L的P和0.1 mol/L NaNO<sub>3</sub>溶液,另加入3滴甲苯以抑制微生物的活动,在25 ± 1 °C的恒温水浴条件下往复振荡,开始振荡30

min,间歇8 h后再振荡30 min,静置24 h后离心分离15 min(4 000 r/min),得到吸附反应的平衡溶液(上清液),用复合玻璃电极测定上清液pH后,用移液管吸取10.00 ml上清液,采用钼锑抗比色法测磷,并计算出土壤的吸附磷量,每个土样重复一次,差异5%以上重测,然后取平均值为其吸附量。

### 1.3 数据处理与分析

数据整理使用Excel 2003软件进行最小二乘法进行函数拟合与制图,使用DPS数据处理系统和SPSS16.0进行统计分析,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤磷吸附特性的变化

#### 2.1.1 根际土壤与非根际土壤磷吸附特性的变化

图1为5组配对茶树根际土壤与非根际土壤磷平均吸附量曲线,其显示非根际土壤在同等外源磷浓度下磷吸附量高于根际土壤。当外源浓度达150 mg/L时,磷吸附量差值达最大为77 mg/kg。根际土壤pH值低于非根际土壤,而有效磷高于非根际土壤(表1)。此结果和张鼎华、林开森等人在混交林根际土壤所得结论一致<sup>[11]</sup>。可能是由于茶树根系分泌有机酸及根系与根际土壤的物质循环导致

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Some basic physical-chemical properties of test soil

母质 Soil parent material	采样部位 Sampling location	种植年限 Cultivation years	土壤质地 Soil texture	样本个数 Sample number	有机质 Organic matter /(g/kg)	pH	全钾 Total K /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	有效磷 Olsen-P /(mg/kg)
板页岩风化物	根际	>30 a	砂壤土	2	29.46 bc	4.03 b	32.06 a	0.62 a	35.25 a
		20~30 a	砂壤土	2	29.13 b	4.19 ab	29.04 bc	0.54 a	31.81 c
		10~20 a	砂壤土	2	32.21 a	4.26 ab	29.05 c	0.50 a	12.10 d
		3~10 a	砂壤土	2	29.44 c	4.32 ab	30.08 b	0.65 a	33.40 b
第四纪红色粘土	非根际	>30 a	砂壤土	3	18.67 d	4.28 a	28.05 c	0.59 a	10.24 e
		20~30 a	粘壤土	1	12.29 d	3.91 b	30.07 c	0.20 b	10.24 a
		10~20 a	粘壤土	2	18.76 a	3.99 b	27.05 d	0.25 a	8.81 b
		3~10 a	粘壤土	3	13.67 c	3.98 b	31.04 b	0.19 b	2.59 d
花岗岩风化物	非根际	>30 a	粘壤土	2	15.79 b	4.24 a	34.04 a	0.20 b	6.24 c
		20~30 a	中壤土	2	19.41 b	4.11 a	50.18 a	0.45 a	9.88 b
		10~20 a	中壤土	1	20.56 b	4.14 a	41.03 c	0.45 a	16.09 a
		3~10 a	中壤土	1	22.35 a	4.04 a	43.08 b	0.17 b	3.44 c
			中壤土	2	13.19 c	3.84 b	41.12 c	0.17 b	16.80 a

注:不同字母代表0.05水平上存在显著差异,下同。

根际土壤磷吸附量降低<sup>[12-13]</sup>。

### 2.1.2 不同母质根际土壤土壤磷吸附特性的变化

由图 2 显示的不同母质茶树根际土壤的磷平均吸附量曲线可知,不同母质茶树根际土壤所有处理的磷吸附量均随着外源磷浓度的增加而逐渐升高,所不同的是土壤对磷的吸附能力因供试土壤成土母质类型的不同而呈现出不同特点。在外源磷浓度达最大 150 mg/L 时,第四纪红土母质磷吸附量最高,为 848 mg/kg,花岗岩风化物次之,为 283 mg/kg,板页岩风化物最低,为 247 mg/kg。这和陈波浪、蒋平安等人的不同质地土壤磷吸附量结论一致<sup>[14]</sup>。

### 2.1.3 不同种植年限茶树根际土壤土壤磷吸附特性的变化

由图 3 可见,不同种植年限茶树根际土壤磷平均吸附量总体呈现随种植年限延长而降低的趋势,当外源磷浓度达 150 mg/L 时,3~10 a 根际土壤磷吸附量为 536 mg/kg,10~20 a 为 346 mg/kg,20~30 a 为 319 mg/kg 和 30 a 以上为 394 mg/kg,表现为当种植年限超过 30 a 之后,磷吸附量有所提高。

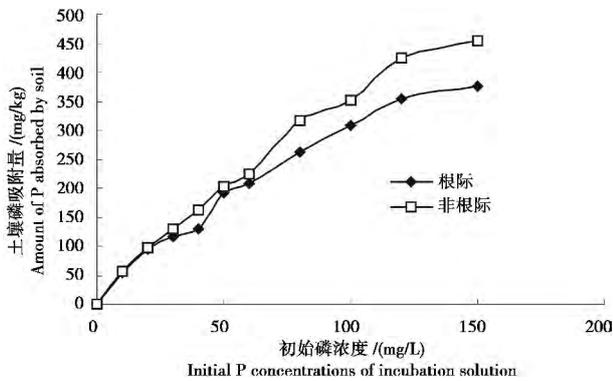


图 1 根际土壤与非根际土壤等温吸附曲线

Fig.1 The isotherms of rhizosphere soil and soil phosphate sorption

### 2.2 Langmuir 方程拟合

为了定量地说明供试土壤对磷的吸附机制,用 Langmuir 方程对磷的等温吸附试验结果进行了拟合。Langmuir 式有几种表达方式,本文采用的是

$$C/X = (C/X_m) + [1/(KX_m)]$$

式中  $X$ : 土壤磷吸附量 (mg/kg);  $C$ : 平衡液浓度 (mg/L);  $X_m$ : 土壤磷最大吸附量 (mg/kg);  $K$ : 与结合能有关的常数。

用  $C/X$  和  $C$  作图可得一直线,线的斜率为  $b = 1/X_m$  为已知,从而求出  $X_m$  数值。直线在  $y$  轴上的截距  $= 1/(KX_m)$ , 因为  $X_m$  已求出从而即可求  $K$  的数

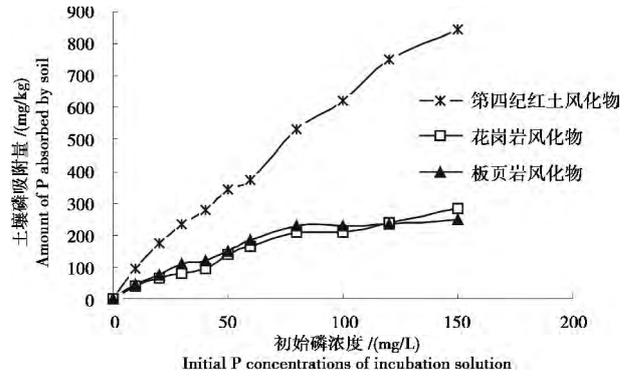


图 2 不同母质根际土壤等温吸附曲线

Fig.2 The isotherms of different kind parent material rhizosphere soil phosphate sorption

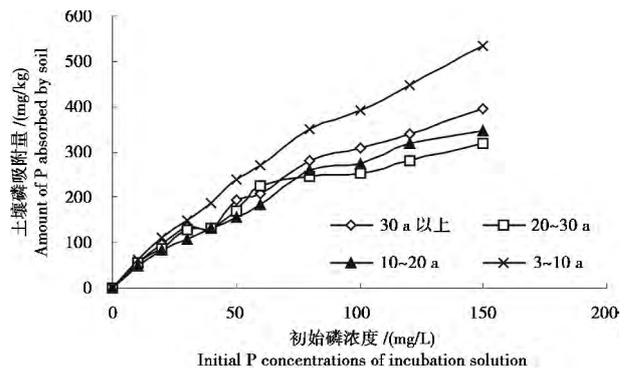


图 3 不同种植年限根际土壤等温吸附曲线

Fig.3 The isotherms of different cultivation years rhizosphere soil phosphate sorption

值。由表 2 可以看出,供试土壤磷的吸附曲线与 Langmuir 方程吻合性较好,相关系数可达 0.773 ~ 0.941。

### 2.3 土壤磷等温吸附特征

Langmuir 等温吸附机理是假定吸附分子在固相表面形成单分子层为理论依据推导出来的。即在固相表面有一定数量的吸附点,而一个吸附点可以吸附一个分子,当所有的吸附点都被磷酸分子所占满时,吸附终止,这时的吸附量认为是最大吸附量  $X_m$ 。因此,最大吸附量可以用来衡量土壤磷库的大小,也可作为判断土壤对磷的吸持容量。 $K$  值是根据 Langmuir 方程式计算出土壤磷的结合能常数, $K$  与磷对土壤的亲合力有关, $K$  值越大,表明磷与土壤结合得越牢固,吸附的磷就越难释放<sup>[11]</sup>。最大缓冲容量 (Maximum Buffering Capacity, 简称  $MBC$ ,  $K$  与  $X_m$  的乘积) 为土壤对磷的吸附特性值,它可以作为土壤对磷的吸持性的特征参数,综合反映土壤吸持磷的强度因素和容量因素,故可作为一项判断土壤供

表 2 供试土壤磷的吸附实验值对 Langmuir 方程的适合性

Table 2 Aptness of phosphate sorption values in tested soils for Langmuir equation

母质 Soil parent material	采样部位 Sampling location	种植年限 Cultivation years	$C/X = (C/X_m) + [1/(KX_m)]$	相关系数 Correlation coefficient
板页岩风化物	根际	>30 a	$C/X = 0.0043 C + 0.1113$	0.941
		20~30 a	$C/X = 0.0027 C + 0.0812$	0.924
		10~20 a	$C/X = 0.0029 C + 0.0767$	0.926
		3~10 a	$C/X = 0.0033 C + 0.1137$	0.919
第四纪红色粘土	非根际	>30 a	$C/X = 0.0022 C + 0.0846$	0.880
		20~30 a	$C/X = 0.0011 C + 0.0203$	0.773
	根际	10~20 a	$C/X = 0.0012 C + 0.0318$	0.869
		3~10 a	$C/X = 0.0010 C + 0.0137$	0.915
花岗岩风化物	非根际	>30 a	$C/X = 0.0010 C + 0.0190$	0.899
		20~30 a	$C/X = 0.0037 C + 0.2305$	0.841
	根际	10~20 a	$C/X = 0.0029 C + 0.1026$	0.892
		3~10 a	$C/X = 0.0028 C + 0.1715$	0.774
	非根际	>30 a	$C/X = 0.0025 C + 0.1408$	0.789

磷特性的综合指标。 $MBC$  值大的土壤,要维持相同供磷强度所需的磷肥量或土壤有效磷贮量也相应大些;当土壤间吸附磷量相近, $MBC$  值大时,其吸附磷所处能态较低,吸附的磷较易被作物吸收利用。

### 2.3.1 根际土壤与非根际土壤磷等温吸附特征

由表 3 知,非根际土壤平均  $X_m$  为 540 mg/kg,  $K$  值平均为 0.029,  $MBC$  平均为 15.61, 而根际土壤平均  $X_m$  平均为 484 mg/kg,  $K$  值平均为 0.038, 平均  $MBC$  为 18.20。土壤非根际土壤磷  $X_m$  高于茶树根际土壤,而  $K$  值,  $MBC$  低于茶树根际土壤,表明根际土壤磷库较小,但磷生物有效性更高。这与张鼎华和黄承玲等人结论一致<sup>[11,15]</sup>。

### 2.3.2 不同母质根际土壤磷等温吸附特征

从表 3 可得出,第四纪红色粘土母质根际土壤  $X_m$ ,  $K$  值和  $MBC$  在 3 种土壤中均为最大,分别为 933 mg/kg, 0.054 和 50.83。表明其对根际土壤中磷的吸附能力最强,最易固定土壤磷,磷肥施入后效果最差。板页岩风化物  $MBC$  值和  $X_m$  高于花岗岩风化物,表明板页岩风化物母质根际土壤比花岗岩风化物磷库更大,表明其供磷量相对更多。

### 2.3.3 不同种植年限茶树根际土壤磷等温吸附特征

从表 3 可看出,随种植年限的变化各母质吸附特征值变化各异:板页岩风化物根际土壤  $X_m$  总体减少了 30.77%;第四纪红色粘土母质和花岗岩风化物母质根际土壤则随着种植年限延长而减少,

花岗岩风化物母质根际土壤的  $X_m$  减少 32.93%,第四纪红色粘土母质增加幅度较小,仅有 8.76%。在 3 种母质中  $K$  值是以第四纪红色粘土母质的变化最大,其  $K$  值由 0.071 降至 0.052,而在板页岩风化和花岗岩风化物母质中  $K$  值变化较小,板页岩风化物增加 0.013,花岗岩风化物减少 0.001(见表 3)。板页岩风化物的  $MBC$  先前 20 a 有所增加,20 a 以后逐年减少;花岗岩风化物就总体来看则是逐年递增,但 10~20 a 间极高;而第四纪红色粘土 10~20 a 期间极低,其他年份是逐年减少。

### 2.4 土壤磷吸附饱和度变化特征

土壤有效磷并不是指土壤中某一特定形态的磷,它不具有真正“数量”的概念,但它可以相对地说明土壤的供磷水平,  $X_m$  表征了土壤磷的最大吸持容量,而有效磷(Olsen-P)占  $X_m$  的百分比可以用来表征土壤磷的吸附饱和度(Degree of P saturation, DPS),其计算公式如下:

$$DPS = \text{土壤可提取磷/磷最大吸附量} \times 100 \\ = (\Delta \text{Olsen-P}) / 100X_m$$

土壤磷饱和度的增大意味着土壤中可提取磷的量增多,即磷的生物有效性提高了。前面的讨论中发现,根际土壤与非根际土壤,不同母质上发育的土壤,不同种植年限根际土壤的  $X_m$  和  $K$  值有所差异。为此,我们分析了土壤 Olsen-P 与  $X_m$  的关系,对此进一步加以探讨(表 4)。

表 3 根际土壤磷吸附特征值的变化

Table 3 Change of P adsorption characteristic values for rhizosphere soils

母质 Soil parent material	采样部位 Sampling location	种植年限 Cultivation years	$X_m$ (mg/kg)	$K$	最大缓冲容量( $KX_m$ ) Maximum buffering capacity
板页岩风化物	根际	> 30 a	243	0.042	10.27 d
		20 ~ 30 a	366	0.034	12.37 b
		10 ~ 20 a	351	0.039	13.61 a
		3 ~ 10 a	304	0.029	8.93 e
第四纪红色粘土	根际	20 ~ 30 a	948	0.052	49.34 b
		10 ~ 20 a	820	0.039	31.71 c
	非根际	3 ~ 10 a	1039	0.071	74.27 a
			981	0.054	52.69 b
花岗岩风化物	根际	> 30 a	268	0.016	4.34 d
		10 ~ 20 a	348	0.030	10.58 a
		3 ~ 10 a	399	0.017	6.82 c
	非根际	401	0.019	7.60 b	

表 4 显示,非根际土壤  $DPS$  明显低于根际土壤,其中非根际土壤平均  $DPS$  为 2.28,而根际土壤为 3.72,进一步表明根际土壤磷有效性更高。3 种成土母质平均  $DPS$  平均值分别为:板页岩风化物最高为 9.40,花岗岩风化物为 2.78,第四纪红色粘土最低为 0.71。

磷的吸附饱和度反映了土壤有效磷与最大吸附量之间的比例关系,由表 4 可以看出,3 种母质根际土壤在不同种植年限中  $DPS$  的均有所增加,但板页岩风化物母质根际土壤中最初的 3 ~ 10 a  $DPS$  较

高,最初的 10 a 中有所降低,但 10 a 后  $DPS$  有极大增幅,由 3.45 升至 14.51,增幅达 320%;第四纪红色粘土母质根际土壤有较大增幅,从 0.25 增至 1.08,增幅达 333%;花岗岩风化物根际土壤在总体有较大提高。

### 3 讨论

土壤固液相之间磷的转化速率取决于磷酸根在固相表面的固定、释放机制,并制约着土壤的供磷能

表 4 根际土壤磷饱和度变化

Table 4 Change of Soil P saturation characteristic values for rhizosphere soils

母质 Soil parent material	采样部位 Sampling location	种植年限 Cultivation years	磷吸附饱和度 Pabsorption saturation
板页岩风化物	根际	> 30 a	14.51 a
		20 ~ 30 a	8.69 c
		10 ~ 20 a	3.45 d
		3 ~ 10 a	11.01 b
第四纪红色粘土	根际	20 ~ 30 a	1.08 a
		10 ~ 20 a	1.07 a
	非根际	3 ~ 10 a	0.25 c
			0.64 b
花岗岩风化物	根际	> 30 a	3.69 c
		10 ~ 20 a	4.62 a
		3 ~ 10 a	0.86 d
	非根际	4.34 b	

力,进而影响到植物对磷的吸收与利用<sup>[12]</sup>。影响土壤磷吸附解吸特性的因素很多,国内外均有相关研究<sup>[13-15]</sup>。本研究针对不同种植年限不同母质的茶树根际土壤与茶园非根际土壤磷吸附结果进行了langmuir拟合,并进行以下讨论。

### 3.1 茶园根际土壤磷吸附动力学特征

为了更准确的描述茶树根际土壤与非根际土壤磷解吸能力的差异性,我们选择同一茶园内采集的配对茶树根际土壤与非根际土壤样本,进行配对样本  $T$  检验。结果显示,配对根际土壤与非根际土壤的  $K$  值和  $X_m$  值有显著相关性(表3),且存在有显著差异(表4),证明非根际土壤对磷吸附能力显著高于根际土壤。而有效磷相关性与差异性均不显著,表明非根际土壤磷含量高并不一定茶树根际土壤磷含量就高。

根际土壤 pH 值与非根际土壤有显著差异(表1)表明茶树根系分泌大量有机酸。根系分泌物中的有机酸如有柠檬酸、酒石酸、草酸等,会降低土壤磷吸附特征值,提高土壤磷有效性<sup>[6]</sup>,但也可能导致土壤磷淋失的风险增大<sup>[16]</sup>。有研究表明,土壤磷素淋失临界值与土壤有机质和活性铝的含量有显著的正相关<sup>[17]</sup>。由于茶树是富铝植物,会降低土壤中活性铝含量,使得土壤磷吸附能力降低,以提高土壤磷含量。这可能是茶树在酸性土壤中不会受到缺磷和铝毒交互作用的影响原因之一<sup>[18]</sup>。但具体原因还有待进一步研究。

### 3.2 不同母质茶园根际土壤磷吸附动力学变化特征

根据上文磷吸附动力学特征值  $K$  值与  $X_m$  表明3种母质根际土壤磷吸附能力大小依次为第四纪红色粘土母质 > 花岗岩风化物母质 > 板页岩风化物母质。而其  $DPS$  为:板页岩风化物最高 9.40,花岗岩风化物次之为 2.78,第四纪红色粘土母质根际

土壤最少仅为 0.71,表明其生物有效性与土壤磷吸附能力呈反比。土壤需磷量是研究磷肥生物有效性的关键指标。土壤平衡溶液中磷浓度保持在 0.2 mg/L 时,一般旱地作物的生长量即可达到最高生长量的 92% ~ 98%。故可把平衡溶液中磷浓度保持在 0.2 mg/L 时,土壤对磷的吸附量称为“标准需磷量”<sup>[19]</sup>。土壤需磷量越大,土壤需施用磷肥越多,而土壤需磷量与最大吸附量呈负相关<sup>[14]</sup>,表明板页岩风化物母质发育的茶园土壤施用磷肥效果会更好。

### 3.3 不同种植年限茶园根际土壤磷吸附动力学变化特征

根际土壤随着种植年限的延长,就总体来看3种母质土壤  $X_m$  和  $MBC$  随着种植年限的增加而降低,该变化趋势与赵庆雷等人的结论相一致<sup>[9]</sup>。而根际土壤随着种植年限延长,土壤固  $P$  能力增强<sup>[20]</sup>。各母质土壤磷吸附能力变化趋势各不相同,其中花岗岩风化物母质根际土壤  $MBC$  值由 6.82 降低到 4.34;第四纪红色粘土母质  $MBC$  值由 74.27 降低到 49.34,且  $X_m$  由 1 039 mg/kg 降低为 948 mg/kg;板页岩风化物母质  $X_m$  和  $MBC$  在前 10 a 有所提高,而后则逐年降低。而  $K$  值各母质变化各不相同,第四纪红色粘土母质有所降低,而板页岩风化物母质和花岗岩变化不明显(表5)。总体来看, $DPS$  呈现出的磷生物有效性变化趋势与磷吸附能力相反,3种母质所发育土壤均符合这一趋势,其中仅花岗岩风化物在 10 ~ 20 a 间异常,这个可能是由于不同施肥和管理措施等人为因素导致这个期间的有效磷含量偏高。

茶树根际土壤磷吸附能力随着种植年限延长而降低,而磷生物有效性提高这一现象,可能是由于在酸性土壤中磷含量较低,不能够满足茶树磷需求量,从而诱使茶树根系加大有机酸分泌使土壤不断酸化,pH 值快速降低(表1),并降低根际土壤  $X_m$  值,

表 5 配对本  $t$  检验  
Table 5 Paired Sample Test

特征值 Eigenvalue	配对样本的相关性分析 Table 4 Paired Sample Correlation		配对样本 $t$ 检验 Table 4 Paired Sample Test		
	相关性 Correlation	显著性水平 Sig.	标准差 Std. Deviation	标准误 Std. Error Mean	双侧检验的显著性水平 Sig. (2-tailed)
$X_m / (\text{mg}/\text{kg})$	0.967	0.007	75.899 28	33.943 19	0.046
$K$	0.937	0.019	0.007 33	0.003 28	0.008
有效磷 Olsen - P / ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	0.317	0.603	18.289 01	8.179 09	0.467

提高了土壤有效磷含量。由于土壤中磷素不能从非根际土壤快速转移到根际土壤,而根际土壤中有效磷又迅速被茶树吸收,致使茶树根系持续分泌有机酸,最终导致茶树根际土壤磷吸附能力逐年降低,但有效磷含量和磷生物有效性却逐年提高。但不同成土母质磷吸附能力变化程度与趋势不同这一现象可能是由于不同的土壤母质类型及土壤环境诱导茶树根系分泌不同的有机酸导致,如段立珍和王艳玲等人发现柠檬酸、苹果酸会导致土壤  $X_m$  降低,而酒石酸和草酸会导致  $X_m$  增加,但苹果酸对土壤  $K$  值没有明显影响,而柠檬酸、酒石酸和草酸会导致  $K$  降低<sup>[2,21]</sup>。

综上所述,茶树根际土壤可能存在的茶树根际土壤磷补偿机制是茶树根系通过分泌有机酸类物质酸化土壤并降低根际土壤磷吸附能力,使根际土壤吸附态磷活化进入到土壤溶液中,进而导致茶树根际土壤有效磷处在含量较高的状态。

## 4 结论

1. 茶树根系通过分泌有机酸等物质,降低土壤磷吸附能力,使根际土壤磷吸附力显著低于非根际土壤,但根际土壤有效磷含量与非根际土壤相关性不显著。

2. 上述3种成土母质上发育的土壤中,根际土壤磷吸附能力依次为第四纪红色粘土母质 > 花岗岩风化物母质 > 板页岩风化物母质,且磷生物有效性和土壤需磷量与之成反比。

3. 随着种植年限的延长,茶树根系分泌有机酸使根际土壤磷吸附能力逐年降低,并逐年提高根际土壤磷生物有效性。但不同成土母质所发育的土壤环境会导致根系分泌不同种类的有机酸,变化程度及趋势会有所变化。

## 参考文献(References)

- [1] Cai Baiyan, Ge Jingping, Zu Wei. The effect of phosphorus level on nitrogen uptake of different soybean varieties [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2006, 28(2): 156 - 161 [蔡柏岩,葛菁萍,祖伟. 磷素水平对不同大豆品种氮素营养的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(2): 156 - 161]
- [2] M R Bakker, A Dieffenbach, J Ranger. Soil solution chemistry in the rhizosphere of roots of sessile oak (*Quercus petraea*) as influenced by lime [J]. Plant and Soil, 1999, 2: 209 - 216
- [3] Zeng Xiangfu, Ouyang Xirong. Impact-factors of crop rhizosphere Nutrient and its effect on crop growth and development [J]. Crop

- Research, 2011, 25(2): 414 - 419 [曾祥福, 欧阳西荣. 作物根际养分的影响因子及对作物生长发育的影响[J]. 作物研究, 2011, 25(2): 414 - 419]
- [4] Li Feng, Qu Xueyan, Pan Xiaohua, et al. Preliminary study on the utilization ability of insoluble Phosphate in various rice cultivars [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 420 - 42 [李锋, 曲雪艳, 潘晓华, 等. 不同水稻品种对难溶性磷利用能力的初步研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 420 - 42]
- [5] Eva O, Guy J D K, Walter W W, et al. Interactive effects of organic acids in the rhizosphere [J]. Soil Biol Biochem, 2008, 41: 1 - 9
- [6] Zhou Jianjun, Wang Xiaochang, Wu Wenbin. Activation of Insoluble phosphorus forms by root exudates [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001, 23(5): 401 - 403 [周建军, 王校常, 吴文彬. 根系分泌物对几种难溶磷活化作用的研究[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(5): 401 - 403]
- [7] Wang Yanling, Zhu Hongxia, Wang Lin, et al. Effect of organic acids on Phosphorus adsorption characteristic in red soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 685 - 691 [王艳玲, 朱红霞, 王琳, 等. 有机酸对红壤磷素吸附特性的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 685 - 691]
- [8] Philippe H, Claude P, Benoît J. Rhizosphere: a new frontier for soil biogeochemistry [J]. Geochemical Exploration, 2006, 88: 210 - 213
- [9] Wang Yan, Zhang Jinzhong, Wang Zhenhua, et al. Adsorption and desorption characteristics of Phosphorus on cropland soils in the hilly area of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Agro - Environment Science, 2011, 30(10): 2068 - 2074 [王彦, 张进忠, 王振华, 等. 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2068 - 2074]
- [10] Ding Yingxiang, Wang Fusheng, Lin Shouming. Ion and nutrient status in rhizospheres of poplar stands at different ages [J]. Forest Research, 1998, 11(5): 461 - 468 [丁应祥, 王福升, 林寿明. 不同林龄 1 - 69 杨根际土壤离子浓度和养分状况[J]. 林业科学研究, 1998, 11(5): 461 - 468]
- [11] Zhang Dinghua, Lin Kaimiao, Li Baofu. Phosphorus characteristics in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana* and their mixed plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2815 - 2821 [张鼎华, 林开淼, 李宝福. 杉木、马尾松及其混交林根际土壤磷素特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2815 - 2821]
- [12] Gao Xiumei, Wang Jidong, Zhang Yongchun, et al. Effect of the number of years of vegetable cultivation on soil phosphorus sorption-desorption characteristics [J]. Chinese Journal of Eco - Agriculture, 2010, 18(4): 706 - 710 [高秀美, 汪吉东, 张永春, 等. 蔬菜种植年限对土壤磷素吸附解吸特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 706 - 710]
- [13] Zhao Qinglei, Wang Kairong, Xie Xiaoli. Effects of organic Nutrient recycling on phosphorus adsorption-desorption characteristics in a reddish paddy rice system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 355 - 362 [赵庆雷, 王凯荣, 谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 355 - 362]

- [14] Chen Bolang , Jiang Pingan , Sheng Jiandong. Study on characteristics of Phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soil textures [J]. Chinese Journal of soil Science , 2010 41 ( 2 ) : 303 - 307 [陈波浪 蒋平安 刘永刚. 不同质地棉田土壤对磷吸附与解吸研究 [J]. 土壤通报 2010 41( 2 ) : 303 - 307 ]
- [15] Huang Chengling , Cheng Xun , Fan Chengwu. Effects of root exudates of maize on the adsorption of Phosphorus in soil of karst area [J]. Journal of Anhui Agri Sc. i 2008 36( 26 ) : 11453 - 11455 [黄承玲 陈训 范成五. 玉米根分泌物对喀斯特地区土壤吸附磷的影响 [J]. 安徽农业科学 2008 36( 26 ) : 11453 - 11455 ]
- [16] Qin Shengjin , Zhang Yushu , Hu Xiaoxia , et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of soils under different land use types [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology , 2011 24 : 285 - 291 [秦胜金 张玉树 胡晓霞 等. 不同利用方式下土壤对磷的吸附—解吸特征 [J]. 现代农业科技 2011 24 : 285 - 291 ]
- [17] Fortune S , Lu J , Addiscott TM , et al. Assessment of phosphorus leaching losses from arable land [J]. Plant and Soil , 2005 269 ( 1 ) : 99 - 108
- [18] Chen Na , Wang Xiurong , Yan Xiaolong , et al. Interactive effects of P deficiency and Al toxicity on soybean growth: a pot experiment with acid soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology , 2010 21 ( 5 ) : 1301 - 1307 [陈娜 王秀荣 严小龙 等. 酸性土壤上缺磷和铝毒对大豆生长的交互作用 [J]. 应用生态学报 2010 21 ( 5 ) : 1301 - 1307 ]
- [19] 刘树堂 姚源喜 赵永厚 等. 用 FOX 法对长期定位施肥土壤磷素状况的研究 [J]. 土壤通报 2003 34( 4 ) : 299 - 301
- [20] Liu Hui , Liu Zhongzhen , Yang Shaohai , et al. Mechanism and characteristics of Phosphorus adsorption dynamics of foreshore reclamation paddy soils [J]. Soils , 2011 43( 2 ) : 197 - 202 [刘辉 刘忠珍 杨少海 等. 围海造田水稻土磷吸附动力学特征及其机理 [J]. 土壤 2011 43( 2 ) : 197 - 202 ]
- [21] Duan Lizhen , Wang Jianfei , Zhao Jianrong , et al. Effects of malic acid on the release and absorption of Phosphorus in greenhouse soil [J]. Chinese Journal of soil Science , 2007 38( 1 ) : 81 - 84 [段立珍 汪建飞 赵建荣 等. 苹果酸对温室土壤磷释放与吸附的影响 [J]. 土壤通报 2007 38( 1 ) : 81 - 84 ]

## Kinetics Study on Phosphorus Adsorption of Rhizosphere Soils in Tea Garden

YANG Wei ZHOU Weijun BAO Chunhong YANG Jun

( College of Resources and Environment , Hunan Agricultural University , Changsha 410128 , China )

**Abstract:** Characteristics of tea tree favor with accumulation aluminum and acid environment , and phosphorus is very easy to be fixed in acidic soil. In order to explore the phosphorus adsorption processes and reaction mechanism in tea rhizosphere soil , the culture experiment of adding phosphorus was carried out collecting tea rhizosphere soil of different parent materials and planting time in 2011. The phosphorus adsorption processes and its kinetics were studied , the characteristics of adsorption was discussed using the methods of the Langmuir isotherm adsorption curve which was simulated with the least squares method. The results showed that the clear differences of phosphorus adsorption process and dynamics were observed between tea tree rhizosphere soil and non-rhizosphere soil. Compared to non-rhizosphere soil , the maximum phosphate adsorption ( $X_m$ ) decreased by 56 mg/kg , while the increment of both the maximum buffer capacity ( $MBC$ ) and the Degree of phosphorus saturation ( $DPS$ ) was 2.60 and 1.44 in tea rhizosphere soil , respectively. These results suggested that the phosphorus adsorption ability was lower and the phosphorus bioavailability is higher in tea rhizosphere soil than the non-rhizosphere soil. The order of the phosphorus adsorption ability was Quaternary red clay > Granite > the Slate in tea rhizosphere soil which derived different parent material. The  $DPS$  of rhizosphere soil was increased , but the  $MBC$  and  $X_m$  were decrease. with the increase of the planting years. The increment of  $DPS$  in turn ware 0.83 2.83 and 3.51 , while the  $X_m$  decreased by 91 mg/kg 131 mg/kg and 61 mg/kg in three kind parent material rhizosphere soil that were Quaternary red clay , Granite and the Slate.

**Key words:** Rhizosphere soil; phosphorus adsorption; cultivation years; soil parent material; Kinetics