

茶树根际土壤磷的解吸特性*

杨 威 周卫军** 包春红 苗霄霖 胡文敏

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要 为了探明茶树根际土壤磷的释放过程与供应机制, 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解吸过程与特性, 并用最小二乘法进行最优函数拟合. 结果表明: 茶树根际土壤与非根际土壤磷的解吸过程有明显的差异. 茶树根际土壤的磷解吸能力极显著高于非根际土壤; 与非根际土壤相比, 根际土壤的平均有效磷含量、平均解吸率和平均 β 值(单位吸附量中的解吸量)分别高出 $5.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、1.7%和24.4%. 不同成土母质发育的茶树根际土壤磷解吸能力为花岗岩风化物>第四纪红色粘土>板页岩风化物. 随着种植年限的延长, 3种母质茶树根际土壤的有效磷与磷解吸能力均有不同程度地提高.

关键词 根际土壤 磷解吸 种植年限 成土母质 茶树

文章编号 1001-9332(2013)07-1843-06 中图分类号 S153.3 文献标识码 A

Desorption characteristics of phosphorus in tea tree rhizosphere soil. YANG Wei, ZHOU Wei-jun, BAO Chun-hong, MIAO Xiao-lin, HU Wen-min (College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(7): 1843-1848.

Abstract: In order to explore the phosphorus (P) release process and its supply mechanism in tea tree rhizosphere soil, an exogenous P adsorption and culture experiment was conducted to study the P desorption process and characters in the tea tree rhizosphere soils having been cultivated for different years and derived from different parent materials. The least squares method was used to fit the isotherms of P desorption kinetics. There was an obvious difference in the P desorption process between the rhizosphere soils and non-rhizosphere soils. The P desorption ability of the rhizosphere soils was significantly higher than that of the non-rhizosphere soils. As compared with non-rhizosphere soils, rhizosphere soils had higher available P content, P desorption rate, and β value (desorbed P of per unit adsorbed P), with the average increment being $5.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1.7%, and 24.4%, respectively. The P desorption ability of the rhizosphere soils derived from different parent materials was in the order of granite > quaternary red clay > slate. The average available P content and P desorption ability of the rhizosphere soils increased with increasing cultivation years.

Key words: rhizosphere soil; phosphorus desorption; cultivation years; soil parent material; tea tree.

茶树具有喜酸聚铝特性, 而酸性土壤中的磷、铝极易发生反应^[1], 导致磷被固定而不易被解吸^[2]. 磷是茶树生长的必需营养元素之一, 参与蛋白质、糖类和单宁等主要成分的合成和转化, 与茶叶的产量和品质密切相关^[3]. 然而, 磷在土壤中的大量累积与其生物有效性低是红壤区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^[4]. 有研究显示, 酸性土壤的活性铝有利于茶树

对磷的吸收和利用, 促进其根系和地上部的生长, 以及茶多酚的合成和茶叶品质的提高^[5]. 然而, 根际作为植物吸收养分微域土区^[6], 土壤养分的形态、运移过程、释放过程与特性等方面决定着植物吸收的养分量^[7]. 茶树根系可以分泌不同的有机酸来改变根际土壤理化性质, 从而提高根际土壤磷酸盐的有效性. 这是其在高铝低磷条件下正常生长的重要机制^[8-11].

目前, 关于根际土壤养分特征、运移过程、循环机制等已成为国内外研究的热点. 虽然人们在茶树耐铝毒机理的研究已有很多报道^[12-13], 但对茶树根

* 国家自然科学基金项目(41071204)资助.

** 通讯作者. E-mail: wjzh0108@163.com

2012-08-13 收稿, 2013-05-03 接受.

际土壤磷的释放与解吸过程还不清楚. 为了弄清这一问题, 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, 采用室内培养方法, 研究了不同种植年限、不同成土母质发育的茶树根际土壤与非根际土壤对外源磷解吸特征的影响, 以及茶树根际土壤磷的解吸过程与生物有效性的机理, 旨在为进一步提高茶树对磷的利用率, 改善茶叶的品质, 提高茶叶的产量提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

2011年3月, 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)的5个茶园采集了15个茶树根际土壤样品和6个非根际茶园土壤样本. 样品采集区域属大陆性亚热带季风湿润气候, 日照时数为1300~1800 h, 年平均气温在16~18℃. 无霜期在280~300 d, 年平均降水量在1200~1700 mm, 土类主要为红壤和黄壤. 根际土壤采用抖落法^[14]收集根表2 mm的土壤; 非根际土壤采用常规采样方法, 在茶园的行间采集自然土壤.

21个样品中包括第四纪红色粘土母质(长沙县、桃源县)、花岗岩风化物母质(长沙县、资兴市)、板页岩风化物母质(石门县、安化县、资兴市); 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的茶园. 土样采集后, 密封低温保存.

1.2 研究方法

1.2.1 茶树根际土壤磷的吸附试验

称取1.50 g 鲜

土样, 放入100 mL离心管中, 分别加入20 mL浓度为0、10、20、30、40、50、60、80、100、120和150 mg·L⁻¹ P的0.1 mol·L⁻¹ NaNO₃溶液, 另加入3滴甲苯以抑制微生物的活动, 在(25±1)℃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 (4000 r·min⁻¹), 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的pH值, 然后用移液管吸取该液10 mL, 用钼锑抗比色法测磷, 并计算出土壤的吸附磷量.

1.2.2 茶树根际土壤磷的解吸试验

在磷的吸附试验中, 倒出上清液后, 再向离心管中补加10 mL无磷的0.1 mol·L⁻¹ NaNO₃溶液, 重新悬浮土样, 在同样条件下振荡60 min, 静置24 h后离心分离, 得到解吸反应的平衡溶液(上清液); 在测定上清液的pH值后, 用钼锑抗比色法测定上清液中的磷, 计算出土壤的解吸磷量.

1.2.3 其他项目测定

pH值采用1:1水土比电位测定法测定; 有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定; 有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃提取, 钼锑抗比色法测定; 全钾采用NaOH熔融-火焰光度法测定. 相同种植年限土壤理化性质的平均值见表1.

1.3 数据处理

本文数据使用Excel 2003软件最小二乘法进行函数拟合与制图, 使用SPSS 16.0软件进行统计分析, 采用配对t检验比较不同数据组间的差异, 显著性水平设定为α=0.05.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical-chemical properties of test soil

成土母质 Parent materials	采样部位 Sampling part	年限 Planting years (a)	质地 Texture	样本数 Sample number	海拔 Elevation	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg·kg ⁻¹)
第四纪红色粘土 Quaternary red clay	I	20~30	粘壤土	1	85	3.91	12.3	30.1	0.20	10.24
		10~20	粘壤土	2	119	3.99	18.8	27.1	0.25	8.81
	II	3~10	粘壤土	2	115	3.98	13.7	31.0	0.19	2.59
		>30	粘壤土	2	110	4.52	7.4	33.0	0.24	8.95
花岗岩风化物 Granite	I	20~30	砂壤土	3	108	4.30	23.5	42.1	0.44	12.04
		10~20	砂壤土	1	213	4.01	23.4	44.0	0.43	6.68
	II	3~10	砂壤土	1	109	4.21	22.4	30.0	0.42	13.69
		>30	砂壤土	1	114	4.21	31.3	34.0	0.18	3.66
板页岩风化物 Slate	I	20~30	砂壤土	2	104	4.02	13.8	28.1	0.30	7.92
		10~20	中壤土	2	1138	3.95	34.1	32.7	0.78	47.58
	II	3~10	中壤土	1	275	4.43	24.0	21.5	0.44	12.46
		>30	中壤土	1	261	4.21	28.1	23.8	0.42	17.07
			中壤土	2	681	4.28	28.1	18.7	0.59	10.24

I: 根际 Rhizosphere; II: 非根际 Non-rhizosphere. 下同 The same below.

2 结果与分析

2.1 茶树土壤磷的解吸特性的变化

2.1.1 根际土壤与非根际土壤磷的解吸特性 在添加同等浓度外源磷条件下, 茶树根际土壤磷的解吸率高于非根际土壤。总体来看, 磷解吸率随外源磷浓度的增加而增加, 外源磷浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根际土壤磷解吸率比非根际土壤高 2.6% (图 1a)。由表 1 可以看出, 根际土壤平均 pH 值低于非根际土壤, 而平均有效磷高于非根际土壤。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根际土壤磷解吸率上升^[15-17]。

2.1.2 不同母质根际土壤磷的解吸特性 由图 1b 可以看出, 不同母质发育的茶树根际土壤磷解吸过程有着明显差异。花岗岩风化物和第四纪红色粘土母质发育的茶树根际土壤磷的解吸量均随外源磷

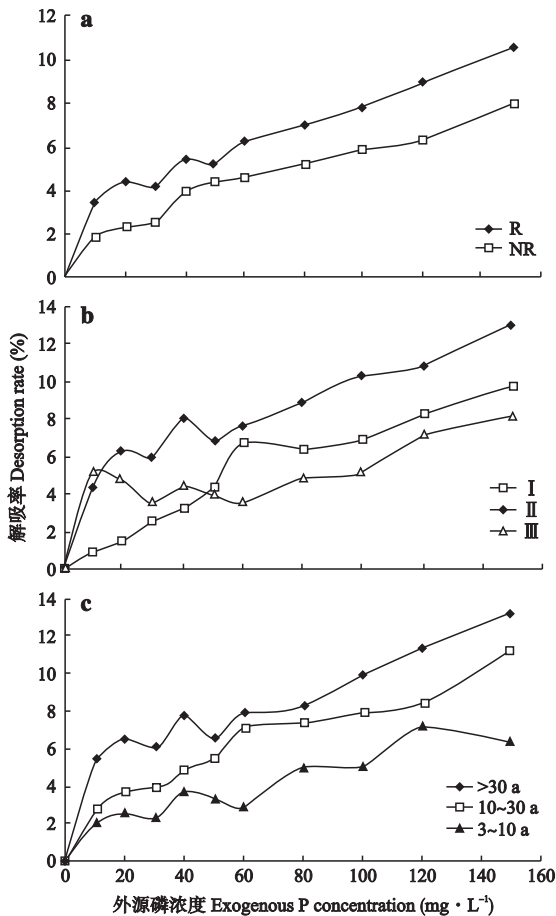


图 1 供试土壤 P 等温解吸曲线

Fig. 1 Isotherms of phosphate desorption in different test soils.

a) 根际土(R)与非根际土(NR) Rhizosphere soil (R) and non-rhizosphere soil (NR); b) 不同母质根际土壤 Rhizosphere soil with different kinds parent material; c) 不同种植年限根际土壤 Rhizosphere soil with different cultivation years. I: 第四纪红色粘土 Quaternary red clay; II: 花岗岩风化物 Granite; III: 板页岩风化物 Slate.

浓度增加呈上升的趋势; 板页岩风化物母质发育的土壤在低浓度外源磷 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 根际土壤磷的解吸率与花岗岩母质发育的根际土壤基本一致; 外源磷浓度为 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 磷的解吸率变化不大, 之后随外源磷浓度的增加有升高的趋势。当外源磷浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 第四纪红色粘土母质发育的茶树根际土壤磷解吸率为 9.7%, 花岗岩风化物为 13.0%, 板页岩风化物为 8.2%。

2.1.3 不同种植年限茶树根际土壤磷的解吸特性 由图 1c 可以看出, 不同种植年限茶树根际土壤磷的平均解吸率总体上随种植年限的延长而升高, 但不同种植年限的磷吸附曲线变化趋势各不相同。3 ~ 10 a 磷解析曲线呈曲折上升趋势; 10 ~ 30 a 及 30 a 以上的磷解吸曲线在外源磷为中低浓度 ($10 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时变化不明显, 之后随外源磷浓度增加呈升高的趋势。在外源磷浓度最大 ($150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 3 ~ 10 a 磷解析率最低 (6.3%), 10 ~ 30 a 次之 (11.3%), >30 a 最高, 达 13.2%。王伯仁等^[18]在对红壤旱地的研究中也发现, 土壤磷解吸能力随种植年限的提高而升高, 但茶树根际土壤的相对磷解吸率更高。这可能是由于酸性土壤中磷含量较低, 诱使茶树根系分泌有机酸, 以提高土壤磷的解吸率、增加根际土壤有效磷含量, 来满足作物的生理需求。如柠檬酸通过螯合作用和酸溶解作用, 可以促进吸附磷的解吸^[19]。

2.2 茶树根际土壤磷的解吸特征

为定量地说明供试土壤对磷的解吸, 对每个样本在 0、10、20、30、40、50、60、80、100、120 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度外源磷的吸附量与解吸量进行了拟合。公式如下:

$$Y = \beta X + \alpha$$

式中: X 为土壤磷吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Y 为土壤磷解吸量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

由表 2 可以看出, 供试土壤磷吸附量与解吸量呈显著正相关, 相关系数为 0.873 ~ 0.969。其中, 斜率 (β) 为单位吸附量中的解吸量, β 值越大, 土壤外源磷的吸附能力越弱, 而解吸作用越强。

2.2.1 茶树根际土壤与非根际土壤磷的等温解吸特征 由表 2 可以看出, 在第四纪红色粘土母质中, 非根际土壤平均 β 值低于根际土壤, 有效磷在 3 ~ 10 a 种植年限低于非根际土壤, 而后呈升高趋势, 20 ~ 30 a 时已高于非根际土壤。在花岗岩风化物发育的土壤中, 非根际土壤 β 值高于种植年限在 30 a 以内的土壤, 根际土壤有效磷含量低于 3 ~ 10 a 非

表 2 土壤磷的解吸方程拟合结果

Table 2 Results of P desorption experiment equation fitting for test soils

成土母质 Parent materials	采样部位 Sampling part	种植年限 Planting years (a)	采样地 Sample site	样本数 Sample number	$Y=\beta X+\alpha$		相关系数 Correlation coefficient
					β	α	
第四纪红色粘土 Quaternary red clay	I	20 ~ 30	桃源县	1	0.0051	32.54	0.962
		10 ~ 20	桃源县	2	0.0047	24.85	0.958
		3 ~ 10	长沙县	2	0.0028	16.46	0.939
花岗岩风化物 Granite	I	>30	长沙县、桃源县	2	0.0026	15.11	0.923
			长沙县	3	0.0068	27.03	0.964
			资兴市	1	0.0030	8.66	0.873
板页岩风化物 Slate	I	10 ~ 20	长沙县	1	0.0034	12.02	0.883
		3 ~ 10	长沙县	1	0.0020	8.11	0.850
			长沙县	2	0.0049	27.53	0.969
		>30	石门县	2	0.0011	4.96	0.828
		10 ~ 20	资兴市	1	0.0031	10.78	0.930
	3 ~ 10	安化县	1	0.0023	9.69	0.874	
	II		安化县、石门县	2	0.0017	7.67	0.941

根际土壤,而后逐年升高,在 20 ~ 30 a 时已与非根际土壤相近,年限>30 a 时高于非根际土壤.在板页岩风化物发育的土壤中,非根际土壤 β 值低于 3 ~ 20 a 的根际土壤,高于 30 a 以上的根际土壤.总体来看,根际土壤磷解吸能力逐年提高,有效磷含量也相应提高.可能是由于茶树根际土壤受根系分泌的有机酸的影响,促进了根际土壤磷的解吸,有利于根际土壤有效磷含量升高,从而提高根际土壤磷的生物有效性^[20].

2.2.2 不同母质茶树根际土壤磷等温解吸特征 不同母质发育的茶树根际土壤的 β 值有明显差异(表 2),以花岗岩风化物发育的根际土壤的 β 值最大,平均为 0.0048,其次为第四纪红色粘土母质,平均为 0.0037.可见,花岗岩风化物母质发育的茶树根际土壤磷的解吸能力最强,磷肥施入后效果最快,但是磷素流失速率也相对较快.

2.2.3 不同种植年限茶树根际土壤磷等温解吸特征 由表 2 可以看出,随种植年限延长,茶树根际土壤的 β 值呈增加趋势,但不同母质的变化趋势各异.板页岩风化物发育的根际土壤 β 值为种植 10 ~ 20 a 比 3 ~ 10 a 增加了 0.0008,而 30 a 以上比 10 ~ 20 a 降低了 0.0020;花岗岩风化物母质的根际土壤 β 值为种植>30 a 以上比 3 ~ 10 a 增加了 0.0048;第四纪红色粘土则增加了 0.0023.

3 讨 论

3.1 茶树根际土壤磷的解吸能力

为了更准确地描述茶树根际土壤与非根际土壤磷解吸能力的差异,笔者选择同一茶园采集的配

对茶树根际土壤与非根际土壤样本 10 个,进行配对 t 检验.结果显示,配对根际与非根际土壤磷 β 值的相关性有极显著差异(表 3),表明根际土壤磷解吸能力极显著高于非根际土壤.

根际土壤磷的解吸率、 β 值和有效磷含量均高于非根际土壤,与陈永亮等^[21]在胡桃林根际土壤中发现的变化趋势相近,且根际土壤 pH 值低于非根际土壤(表 1),说明植物根系分泌大量有机酸以提高土壤磷的解吸能力,致使土壤磷生物有效性提高,但也可能导致土壤磷淋失的风险增大^[22].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显著正相关^[23];而本文中土壤有机质含量差异不明显,可能是由于茶树吸收了根际土壤中大量活性铝,导致活性铝含量降低,土壤吸附固定磷能力减小,从而提高了土壤有效磷含量.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影响的原因之一.^[24]

3.2 不同母质茶树根际土壤磷的解吸能力

有研究表明,土壤对 P 吸附存在化学吸附区和物理吸附区^[25].与无机磷酸盐相比,有机磷化合物更容易被土壤颗粒吸附固定^[26-27],也有数据证实,

表 3 配对样本的相关性及 t 检验结果Table 3 Paired sample correlation and test ($n=5$)

	相关性 Correlation		差异性 Differentiation		
	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Sig.	平均值 Mean	标准差 SD	显著性 Sig. (2-tailed)
根际-非根际 Rhizosphere-non-rhizosphere	0.963	0.009	0.001	0.001	0.007

有机质-金属吸附的磷比铁铝等次生氧化物吸附的磷更容易解吸^[28]。这反映了土壤吸附磷的复杂性和不同土壤吸附磷机制的差异。就磷解吸率和 β 值总体来看,3种母质根际土壤磷解吸能力大小依次为:花岗岩风化物母质>第四纪红色粘土母质>板页岩风化物母质,其中花岗岩风化物的磷解吸能力最强,第四纪红色粘土发育的土壤磷解吸能力最低。这与宋春丽等^[29]在红壤水稻土的研究结论相近。可能是由于水稻土的长期耕作,使土壤粘粒含量增加,土壤化学性质发生变化,导致土壤磷解吸能力降低^[30]。其具体原因还有待于进一步研究。

3.3 不同种植年限茶树根际土壤磷的解吸能力

随着外源磷浓度的增加,根系分泌物对土壤磷吸附的抑制作用逐渐降低^[31]。但是,长期有机物料循环会促进土壤磷的解吸^[17],且不同类型土壤磷的解吸量和解吸速率各异^[32]。土壤磷解吸能力受到多种因素的影响。随着种植年限的延长,茶树根际土壤各成土母质的有效磷及磷解吸能力均有所提高。板页岩风化物母质种植年限30 a以上的根际土壤 β 值特异,可能是该根际土壤样本的海拔比其他供试土壤高800 m;第四纪红色粘土和花岗岩风化物母质发育的根际土壤有效磷含量在30 a内分别增加了7.65和8.38 g·kg⁻¹,随种植年限的延长, β 值和有效磷含量均有所提高。与黄绍敏等^[33]的研究结果相比,本文中根际土壤有效磷的增加量远低于施用肥料耕地土壤磷的增加量,可能是由于磷在土壤中的迁移速度较慢,只能靠降低磷解吸率以提高有效磷含量,进而导致有效磷的积累量较低。

参考文献

- [1] Lu J-L (陆建良), Liang Y-R (梁月荣). Effect of aluminium stress on superoxide dismutase in tea and other plants. *Journal of Tea Science* (茶叶科学), 1997, **17**(2): 197-200 (in Chinese)
- [2] Turrión MB, Gallardo JF, González MI. Relationships between organic and inorganic P fractions with soil Fe and Al forms in forest soils of Sierra de Gata Mountains (Western Spain). *Developments in Soil Science*, 2002, **28**: 297-310
- [3] Liao W-Y (廖万有). Research status and development trend of phosphorus nutrition in tea. *Journal of Tea* (茶叶), 1993, **19**(1): 22-24 (in Chinese)
- [4] Lu W-L (陆文龙), Zhang F-S (张福锁), Cao Y-P (曹一平). Advance in phosphorus behavior in soils. *Tianjin Agricultural Sciences* (天津农业科学), 1998, **4**(4): 1-7 (in Chinese)
- [5] Eva O, Guy JDK, Walter WW, et al. Interactive effects of organic acids in the rhizosphere. *Soil Biology & Bio-*

- chemistry*, 2008, **41**: 1-9
- [6] Bakker MR, Dieffenbach A, Ranger J. Soil solution chemistry in the rhizosphere of roots of sessile oak (*Quercus petraea*) as influenced by lime. *Plant and Soil*, 1999, **209**: 209-216
- [7] Zeng X-F (曾祥福), Ouyang X-R (欧阳西荣). Impact-factors of crop rhizosphere nutrient and its effect on crop growth and development. *Crop Research* (作物研究), 2011, **25**(4): 414-419 (in Chinese)
- [8] Zhou J-J (周举君), Wang X-C (王校常), Wu W-B (吴文彬). Activation of some insoluble phosphorus forms by root exudates. *Journal of Southwest Agricultural University* (西南农业大学学报), 2001, **23**(5): 401-403 (in Chinese)
- [9] Wang Y-L (王艳玲), Zhu H-X (朱红霞), Wang L (王琳), et al. Effect of organic acids on phosphorus adsorption characteristic in red soil. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2011, **42**(3): 685-691 (in Chinese)
- [10] Philippe H, Claude P, Benoît J. Rhizosphere: A new frontier for soil biogeochemistry. *Geochemical Exploration*, 2006, **88**: 210-213
- [11] Wang Y (王彦), Zhang J-Z (张进忠), Wang Z-H (王振华), et al. Adsorption and desorption characteristics of phosphorus on cropland soils in the hilly area of Sichuan Basin, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(10): 2068-2074 (in Chinese)
- [12] Li H-S (李海生), Zhang Z-Q (张志权). The absorption and accumulation of aluminum and mineral nutrient in tea (*Camellia sinensis*) under different Al levels. *Ecology and Environment* (生态环境), 2007, **16**(1): 186-190 (in Chinese)
- [13] Wang X-P (王小平), Luo H (罗虹), Liu P (刘鹏), et al. Effects of phosphate on physiological and biochemical characteristics of tea plants leaves under Al and F interactions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(10): 5434-5441 (in Chinese)
- [14] Ding Y-X (丁应祥), Wang F-S (王福升), Lin S-M (林寿明). Ion and nutrient status in rhizospheres of poplar stands at different ages. *Forest Research* (林业科学研究), 1998, **11**(5): 461-468 (in Chinese)
- [15] Zhang D-H (张鼎华), Lin K-M (林开森), Li B-F (李宝福). Phosphorus characteristics in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana* and their mixed plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(11): 2815-2821 (in Chinese)
- [16] Gao X-M (高秀美), Wang J-D (汪吉东), Zhang Y-C (张永春), et al. Effect of the number of years of vegetable cultivation on soil phosphorus sorption-desorption characteristics. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, **18**(4): 706-710 (in Chinese)
- [17] Zhao Q-L (赵庆雷), Wang K-R (王凯荣), Xie X-L (谢小立). Effects of organic nutrient recycling on phosphorus adsorption-desorption characteristics in a

- reddish paddy rice system. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(1): 355–362 (in Chinese)
- [18] Wang B-R (王伯仁), Xu M-G (徐明岗), Wen S-L (文石林). The effect of long term fertilizer application on phosphorus in red upland soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2005, **21**(9): 255–259 (in Chinese)
- [19] Fang F-L (房福力), Li Y-Z (李玉中), Li Q-Z (李巧珍). Research advance in the interaction of citric acid and phosphorous in soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2012, **28**(18): 26–30 (in Chinese)
- [20] Chen B-L (陈波浪), Sheng J-D (盛建东), Jiang P-A (蒋平安), *et al.* Study on characteristics of phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soil textures. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2010, **41**(2): 303–307 (in Chinese)
- [21] Chen Y-L (陈永亮), Han S-J (韩士杰), Zhou Y-M (周玉梅), *et al.* Characteristics of available P in the rhizosphere soil in pure *Juglans mandshurica* and *Larix gmelinii* and their mixed plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(7): 790–794 (in Chinese)
- [22] Qin S-J (秦胜金), Zhang Y-S (张玉树), Hu X-X (胡晓霞). Phosphorus adsorption and desorption characteristics of soils under different land use types. *Modern Agricultural Sciences and Technology* (现代农业科技), 2011(24): 285–291 (in Chinese)
- [23] Fortune S, Lu J, Addiscott TM, *et al.* Assessment of phosphorus leaching losses from arable land. *Plant and Soil*, 2005, **269**: 99–108
- [24] Chen N (陈娜), Wang X-R (王秀荣), Yan X-L (严小龙), *et al.* Interactive effects of P deficiency and Al toxicity on soybean growth: A pot experiment with acid soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(5): 1301–1307 (in Chinese)
- [25] Zhang X-M (张新明), Li H-X (李华兴), Liu Y-J (刘远金). Phosphate adsorption characteristics of paddy soils derived from main parent materials in Guangdong Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 553–556 (in Chinese)
- [26] Leytem AB, Mikkelsen RL, Gilliam JW. Sorption of organic phosphorus compounds in Atlantic coastal plain soils. *Soil Science*, 1999, **167**: 652–658
- [27] Sah RN, Mikkelsen DS. Effects of anaerobic decomposition of organic matter on sorption and transformations of phosphate in drained soils. I. Effects on phosphate sorption. *Soil Science*, 1986, **142**: 267–274
- [28] Zhou M, Rhue RD, Harris WG. Phosphorus sorption characteristics of Bh and Bt horizons from sandy coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 1364–1369
- [29] Song C-L (宋春丽), Fan J-B (樊剑波), He Y-Q (何园球), *et al.* Phosphorous adsorption characteristics of red paddy soils derived from different parent materials and their influencing factors. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2012, **49**(3): 607–611 (in Chinese)
- [30] Huang C-L (黄承玲), Chen X (陈训), Fan C-W (范成五). Effects of root exudates of maize on the adsorption of phosphorus in soil of Karst area. *Journal of Anhui Agriculture Sciences* (安徽农业科学), 2008, **36**(26): 11453–11455 (in Chinese)
- [31] Zhang J-L (张金龙), Li P (李鹏), Li Y-S (李月松). Studies on characteristics of phosphorus adsorption in rhizosphere soil of poplar. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2006, **21**(2): 104–107 (in Chinese)
- [32] Zheng C-R (郑春荣), Chen H-M (陈怀满), Zhou D-M (周东美). Chemical depletion of cumulative phosphorus in soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(5): 559–563 (in Chinese)
- [33] Huang S-M (黄绍敏), Guo D-D (郭斗斗), Zhang S-Q (张水清). Effects of long-term application of organic fertilizer and superphosphate on accumulation and leaching of Olsen-P in Fluvo-aquic soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(1): 93–98 (in Chinese)

作者简介 杨威,男,1988年生,硕士研究生.主要从事土壤环境过程及其模拟研究. E-mail: 893315780@qq.com

责任编辑 李凤琴
