

# 定植 3, 13, 34 年热带胶园的土壤磷素形态变化和有效性研究<sup>①</sup>

张教林 陈爱国 刘志秋

(中国科学院西双版纳热带植物园 云南勐腊 666300)

**摘 要** 采用 Hedley 磷素分级方法研究了定植 3, 13, 34 年热带胶园 0~20cm 深的土壤磷素形态, 结果表明: 在不施肥条件下, 随着定植年限的增加, 土壤磷素总量( $\Sigma P$ )基本保持不变, 但土壤中的无机磷( $\Sigma Pi$ )增加了 273%, 有机磷( $\Sigma Po$ )降低了 55%。并且发现, 残留磷(Residual P)在长期耕作条件下是无效的。由于土壤有机磷的矿化, 使土壤磷素有效性水平降低。

**关键词** 热带土壤; 磷素形态; 磷素分级

Guo 等人指出, 在高度风化的土壤中, 土壤磷素可以分为有效态( $NaHCO_3-Pi$ )、交换态( $NaHCO_3-PO$ 、 $NaOH-Pi$ 、 $NaOH-Po$ 、 $HCl-Pi$ )和缓效态(Residual P)3 种, 并且指出, 在短期内, 作物生长所需的磷是由前 2 种形态提供的。而在长期内, 缓效态的磷素也是有效的<sup>[1]</sup>。Hedley 等人发现, 在长期耕作条件下,  $NaOH-Po$  和 Residual P 是两种最重要的有效磷源<sup>[2]</sup>。还有人报道, 在连作系统中, 土壤全磷的损失主要是由于有机磷的矿化引起的, 有一半以上有机磷损失发生在耕作的前 3 年<sup>[3]</sup>。我国陈兹峻等人还指出, 在热带地区, 有机磷是热带土壤有效磷的潜在性给源<sup>[4, 5]</sup>。

本文以定植 3, 13, 34 年热带胶园 0~20cm 深的土壤为研究对象, 采用 Hedley 磷素分级方法研究连作过程中不施肥条件下热带胶园土壤的磷素形态和有效变化<sup>[2]</sup>, 探讨热带胶园磷素转化规律和机制, 为热带胶园的管理和持续发展提供理论依据。

## 1 研究区域自然概况

研究样地位于西双版纳傣族自治州勐腊县勐仑镇所属的大卡老寨, 地处  $21^{\circ}41'N$ ,  $105^{\circ}25'E$ , 海拔 720m, 年平均气温  $21.5^{\circ}C$ , 年平均降雨量 1500mm。对试样地为刀耕火种的热带山地, 坡度为  $10^{\circ}$ , 土壤覆盖物为飞机草、3~5m 高的灌木、小乔木等。土壤母质为紫色砂页岩, 质地为轻壤土, 土壤类型为砖红壤。所有样地在管理中均不施肥。研究样地土壤基本性质见表 1。

表 1 研究样地土壤基本性质

	pH	有机质 g/kg	全氮 g/kg	有效氮 mg/kg
对 照	4.45	20.56	1.19	126.94
3 龄胶园	4.95	17.50	1.31	142.92
13 龄胶园	4.62	22.00	1.20	121.72
34 龄胶园	5.20	20.95	1.24	137.89

## 2 材料和方法

分别选取橡胶定植年限为 3 年、13 年、34 年和对试样地 0~20cm 深的胶园土壤 5~6

① 国家自然科学基金项目资助(批准号 39870646)。

点混合样, 风干, 过 2mm 的筛。根据 Hedley (1982) 磷素分级方法把土壤磷素分为:  $\text{NaHCO}_3$ -Pi (有效磷)、 $\text{NaOH}$ -Pi (吸附于 Fe、Al 表面的无机磷)、 $\text{HCl}$ -Pi (磷灰石型磷)、 $\text{NaHCO}_3$ -Po (吸附于土壤表面的有机磷)、 $\text{NaOH}$ -Po (吸附于 Fe、Al 表面的有机磷)、Residual P (残留磷)、Microbial P (微生物细胞磷) 7 种形态<sup>[2]</sup>。各级土壤磷素特征可参照 Han 和鲁如坤等人文章<sup>[6, 7]</sup>。其它元素含量采用常规方法测定<sup>[8]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 磷库构成的变化

从表 2 中可以看出, 前 13 年, 土壤磷库主要由 Residual P 和  $\text{NaOH}$ -Po 构成, 两者合计占磷素总量的 84% 以上, 其它磷素形态含量均不超过 7%。13 年后, 随着  $\text{NaOH}$ -Pi 含量的增加, 土壤磷库主要由 Residual P 和  $\text{NaOH}$ -Pi 构成, 两者合计占磷素总量的 78% 以上, 但  $\text{NaOH}$ -Po 仍占很大比例, 占磷素总量的 13%, 其它磷素形态含量不超过磷素总量的 5%。

表 2 土壤磷库的变化

磷素形态	对照		3 龄胶园土壤		13 龄胶园土壤		34 龄胶园土壤	
	含量 mg/kg	比例 %	含量 mg/kg	比例 %	含量 mg/kg	比例 %	含量 mg/kg	比例 %
$\text{NaHCO}_3$ -Pi	6.19	2	8.91	3	5.02	2	7.22	2
$\text{NaOH}$ -Pi	10.70	4	13.04	4	20.84	7	73.25	23
$\text{HCl}$ -Pi	5.76	2	7.69	2	10.93	4	4.03	1
无机磷( $\Sigma$ Pi)	22.65	8	29.64	9	36.79	12	84.50	27
$\text{NaHCO}_3$ -Po	0.73	< 1	13.34	4	11.17	4	15.34	5
$\text{NaOH}$ -Po	125.94	42	100.76	32	71.81	24	41.92	13
有机磷( $\Sigma$ Po)	126.67	43	114.10	36	82.98	27	57.26	18
Residual P	137.95	46	169.83	54	181.59	60	173.03	55
Microbial P	9.92	3	0.11	< 1	3.43	1	0.52	< 1
磷素总量( $\Sigma$ P)	297.19		313.68		304.79		315.31	

#### 3.2 磷素形态的变化规律

从表 3 中可以看出, 不同磷素形态随时间的变化规律是不同的, 根据其变化趋势把磷素形态的变化类型分为以下 3 种:

**积累型:** 主要包括  $\text{NaOH}$ -Pi、 $\text{NaHCO}_3$ -Po、Residual P 3 种磷素形态。 $\text{NaOH}$ -Pi 的含量是逐年增加的, 从 10.70 mg/kg 增加到 34 年后的 73.25mg/kg, 增加了 585%。 $\text{NaHCO}_3$ -Po、Residual P 的增加主要发生在前 3 年期间, 3 年内  $\text{NaHCO}_3$ -Po 增加了 12.61mg/kg, Residual P 增加了 31.88mg/kg, 分别增加了 1727% 和 23%, 3 年后其含量基本保持不变。

**稳定型:** 主要包括  $\text{NaHCO}_3$ -Pi、 $\text{HCl}$ -Pi 2 种磷素形态。磷素含量随定植年限的延长保持在一定的水平上, 在整个连作过程中  $\text{NaCO}_3$ -Pi 的变化量介于 1.17 ~ 2.72mg/kg 之间,  $\text{HCl}$ -Pi 的变化量介于 1.73 ~ 5.17mg/kg 之间。

**消耗型:** 包括  $\text{NaOH}$ -Po、Microbial P 2 种磷素形态。 $\text{NaOH}$ -Po 含量逐渐降低, 从最初的 125.94 mg/kg 下降为 34 年后的 41.91mg/kg, 减少了 67%; Microbial P 在前 3 年迅速降低, 含量从最初的 9.92mg/kg 下降为 0.11mg/kg, 3 年减少了 99%, 虽然 13 年后有所提高, 但仍保持在很低的水平上。

#### 3.3 无机磷、有机磷、磷素总量的变化

土壤中的无机磷含量随时间的增长逐年增加(见表 3), 34 年后增加了 273%, 其中主要

是 NaOH-Pi 的增加引起的;有机磷随时间的增长逐年降低,34年后减少了 55%,其中主要是 NaOH-Po 的降低造成的;而磷素总量基本保持不变,增幅不超过 6%。

表 3 不同定值年限热带胶园土壤磷素形态的变化量(mg/kg)和变化率(%)

磷素形态	3 龄胶园土壤		13 龄胶园土壤		34 龄胶园土壤	
	变化量	变化率	变化量	变化率	变化量	变化率
NaHCO <sub>3</sub> -Pi	2.72	44	-1.17	19	1.03	17
NaOH-Pi	2.34	22	10.14	95	62.55	585
HCl-Pi	1.93	34	5.17	90	-1.73	30
无机磷(∑Pi)	6.99	31	14.14	62	61.85	273
NaHCO <sub>3</sub> -Po	12.61	1727	10.44	1430	14.61	2001
NaOH-Po	-25.18	20	-54.13	43	-84.02	67
有机磷(∑Po)	-12.57	10	-43.69	34	-69.41	55
Residual P	31.88	23	43.64	32	35.08	25
Microbial P	-9.81	99	-6.49	65	-9.40	95
磷素总量(∑P)	16.49	6	7.60	3	18.12	6

注:变化量=×龄胶园土壤磷素含量-对照土壤磷素含量(×=3,13,34);变化率=变化量/对照磷素含量

## 4 讨论

Zhang 等人指出,玉米连作 5 年后,土壤无机磷无明显变化,而有机磷下降了 14%,其中主要是 NaOH-Po 的下降引起的<sup>[9]</sup>。Beck 等人还指出,连作 13 年后,在不施肥条件下,土壤全磷没有降低反而有所增加,但有机磷却降低了 42%;施入的大量磷肥主要被固定于 NaOH-Pi 组分中<sup>[10]</sup>。大量的结果表明,土壤有机磷的矿化是土壤有效磷的重要来源<sup>[11~14]</sup>。在热带胶园土壤中,随着种植年限的增加,土壤磷素总量基本保持不变,而土壤中的有机磷降低了 55%。有机磷矿化后形成的磷酸根离子与热带砖红壤中丰富的 Fe、Al 离子能很快形成溶解度很低的稳定磷酸盐。这些新形成的磷酸盐很难再次被作物吸收利用<sup>[15]</sup>,从而引起土壤磷素的固定。

研究表明,残留磷在长期种植条件可以为作物提供大量可利用的磷<sup>[2]</sup>,但作物利用有效磷的同时,还会引起残留磷的固定<sup>[1]</sup>。在热带胶园土壤中,残留磷含量随着定植年限的增加没有被利用反而逐渐增加,可以看出,在长期种植条件下热带胶园土壤中的残留磷是无效的。

微生物在磷素循环和磷素形态分配中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>,虽然微生物细胞磷(Microbial P)在土壤中含量不高,但可以体现土壤中微生物的种群数量和活性。微生物可以通过对磷素的合成和矿化作用,改变磷的固定和释放,控制土壤中磷的浓度,影响磷的有效性<sup>[16]</sup>。在热带胶园土壤中,微生物磷在前三年降低了 99%,这充分说明,微生物活动减弱后,会引起磷素循环减慢,使大量易矿化的磷素形态向稳定的磷素形态转化,引起植物可利用的有效磷源减少,最终导致磷素有效性水平的降低。

根据本文作者的研究,热带土壤的磷素损失主要发生在热带雨林植被遭到破坏的前期,并且是一次性的流失,一旦流失则很难恢复。其中,主要是有机磷和残留磷的损失,分别占全磷损失的 16%和 52%<sup>[17]</sup>。而后的长期耕作主要改变各级土壤磷素在土壤中的存在形态和分配,引起无机磷、残留磷的大量积累,从而使土壤磷素有效性降低。

## 参 考 文 献

- 1 Fengmao Guo Russell S Yost. *Soil Sc.*, 1998, 163 (10): 822 ~ 833
- 2 Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 970 ~ 976
- 3 Bowman R A, Reeder J D, Lober R W. *Soil Sci.*, 1990, 150(6): 851 ~ 857
- 4 陈竑竣, 李贻铨, 陈道东等. 杉木人工林土壤磷素形态极其有效磷研究. *林业科学研究*, 1996, 9(2): 121 ~ 126
- 5 陈竑竣, 巫流民, 纪律书等. 施用磷肥对杉木幼林土壤养分和磷组分的影响. *林业科学研究*, 1998, 11(4): 451 ~ 454
- 6 Han Xingguo *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(20): 97 ~ 112
- 7 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 土壤积累态磷研究. III. 几种典型土壤中积累态磷的形态特征及其有效性. *土壤*, 1997 (2): 57 ~ 62
- 8 中国科学院南京土壤研究所编. *土壤理化分析*. 上海科学技术出版社, 1978
- 9 Zhang T Q, Mackenzie A F. *Plant and Soil*, 1997, 192: 133 ~ 139
- 10 Beck M A, Sanchez P A. *Plant and Soil*, 1996, 184: 21 ~ 31
- 11 Tatek R. *Plant and soil*, 1984, 76: 245 ~ 256
- 12 Mattingly G E G, Charter M. *J. Sc. Food agric.*, 1982, 33: 732 ~ 733
- 13 Tiessen H, Stewart J W B, Bettany J R. *Agron. J.*, 1982, 74: 831 ~ 835
- 14 Sharpley A N. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 905 ~ 911
- 15 王庆仁, 李季云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 417 ~ 421
- 16 Dorn Seeling, Robert Zasoski. *Plant and Soil*, 1993, 148: 277 ~ 284
- 17 张教林, 陈爱国. 热带胶园土壤磷素形态和生物有效性. *土壤与环境*, 1999, 8(4): 284 ~ 286



(上接第 318 页)

## 参 考 文 献

- 1 信乃谄, 王立祥主编. *中国北方干旱区农业*. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1998, 83 ~ 93
- 2 王小彬, 高绪科, 蔡典雄. 旱地农田水肥相互作用的研究. *干旱地区农业研究*, 1993, 11(3): 6 ~ 12
- 3 金钊, 汪德水, 蔡典雄等. 水肥耦合效应研究 ~ 不同降雨年型对 N、P 水配合效应的影响. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(3) 1 ~ 7
- 4 金钊, 汪德水, 蔡典雄等. 水肥耦合效应研究 ~ 不同 N、P 水配合对旱地冬小麦产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(3) 8 ~ 13
- 5 王殿武, 刘树庆, 文宏达等. 高寒干旱区春小麦田施肥及水肥耦合效应研究. *中国农业科学*, 1999, 32(5): 62 ~ 68
- 6 李瑛, 吕殿青, 李旭辉. 冬小麦水肥效应研究. *西北农业学报*, 1999, 8(6): 48 ~ 50
- 7 汪德水主编. *旱地农田水肥协同效应与耦合模式*. 北京: 气象出版社, 1999, 44 ~ 49
- 8 樊军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 23 ~ 26
- 9 张玉革, 姜勇, 依艳丽. 长期施肥对土壤水分特性影响的研究. *土壤*, 1999, (3): 120 ~ 131
- 10 鲁如坤等著. *土壤 ~ 植物营养学原理与施肥*. 北京: 化学工业出版社, 1999, 18 ~ 31.
- 11 许旭旦, 诸涵素. 植物根部的水分倒流现象. *植物生理学通讯*, 1995, 31(4): 241 ~ 245
- 12 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对棉花产量效应的研究. *土壤学报*, 1981, 18(4): 383 ~ 388
- 13 王仕新, 崔剑波, 庄季屏. 辽西半干旱地区农田水分循环特征的研究 ~ 农田供水状况研究. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 603 ~ 607
- 14 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(3): 221 ~ 226