

不同施肥条件下红壤旱地磷素形态及有效性分析*

杨 芳 何园球 李成亮 徐江兵 林 天

(中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘 要 磷素是红壤地区农业生产的最重要的限制因素,因此红壤磷素形态与转化问题的研究,对红壤地区农业生产具有重要意义。用 Hedley 方法对不同施肥条件下红壤旱地土壤磷素形态进行了研究,结果表明:施磷肥能明显增加红壤各形态无机磷含量和大多数形态有机磷含量;红壤中,对植物最有效的树脂磷和碳酸氢钠磷含量很少,铁铝结合态磷和残留磷含量很多;对有效磷(Bray 磷)贡献最大的磷素形态是碳酸氢钠无机磷、铁铝结合态无机磷和存在于土壤团聚体内表面的有机磷。这对于了解不同施肥条件对红壤旱地磷素有效性的影响、探索磷素消长规律、指导红壤旱地磷素管理等都有一定的理论和实践意义。

关键词 红壤旱地;不同施肥处理;磷素形态;磷素有效性

中图分类号 S158.5 **文献标识码** A

红壤具有优越的生产性质,是我国发展农业的最具潜力的土壤类型之一。但由于强烈的脱硅富铝化作用,红壤酸化严重,肥力水平低下,磷素尤其亏缺^[1]。因此,研究红壤的有效磷库大小和土壤磷素供应状况,对于了解红壤旱地的磷库演变及磷素转化很有意义,对红壤地区施肥制度的建立也有很好的指导作用。

磷素有效性和磷素转化规律是红壤地区磷素研究的关键,而土壤磷素形态对于评价土壤有效磷库和磷素供应状况^[2],研究不同管理措施对土壤磷素分配的影响^[3]等有积极意义。因此对土壤磷素形态及其有效性的研究是红壤磷素研究的重要方面。由于土壤磷素的化学形态很难测定,因此一般采用磷素分级的方法来确定土壤磷素形态。

磷素分级方法经历了从无机磷分级到有机磷分级,再到二者结合的发展过程^[2]。直到 1982 年, Hedley 等提出的磷素分级方法得到了广泛的认同。因为它基本上克服了以往分级方法无法兼顾无机磷和有机磷分级的缺点^[4],而且此方法分出的各形态磷素有比较明确的有效性意义,因而是现今比较合理的磷素分级方法。

土壤磷素的形态和转化的研究在国内的资料文献上,已经有很多记载。例如,张教林等^[5]利用 Hedley 方法研究了定植热带胶的土壤磷素形态,结

果表明:随定植年限的增加,土壤中的无机磷增加,有机磷减少,残留磷无效。Fan 等^[6]的研究表明:pH 3.00 是中稳性有机磷和高稳性有机磷的临界点。但利用不同施肥处理的土壤进行研究的并不多。本文利用 Hedley 方法研究红壤旱地上,长期施用不同肥料的土壤的磷素形态及其有效性,旨在填补国内这方面研究的不足,并为红壤旱地合理施肥提供基础性资料。

1 材料与方法

1.1 试验方案

本实验选择中国科学院江西红壤生态实验站的长期试验土壤(该试验始于 1988 年)进行研究,包括长期无机肥试验:选取 NPK、NPKCa 和 NK 三种处理,其中“Ca”指施用石灰。长期有机肥无机肥配施试验(以下简称有机肥处理):选取绿肥与化肥配施、秸秆(稻草)与化肥配施、花生秆本田还田与化肥配施 3 个处理(以下分别简称为绿肥、秸秆、还田)。每个处理设 3 次重复。本文统一以不施磷的 NK 处理为对照。

供试土壤耕层的理化性质见表 1,不同处理的施磷量分别为:还田 $6.3(P, \text{kg hm}^{-2})$,秸秆 $6.0(P, \text{kg hm}^{-2})$,绿肥 $18.59(P, \text{kg hm}^{-2})$,NPKCa 和 NPK $28.05(P, \text{kg hm}^{-2})$ 。

* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-413, ISSASIP0201)部分资助

作者简介:杨 芳(1978~),女,硕士研究生,从事农业生态学方面的研究。E-mail: yf_lucky2005@163.com

收稿日期:2005-07-12;收到修改稿日期:2005-10-28

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic properties of tested soil

施肥处理 Fertilized treatments	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	活性铝 Available Al (g kg ⁻¹)	活性铁 Available Fe (g kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)
绿肥 Green manure	11.68	1.07	0.92	5.49	42.65	0.51
秸秆 Stem	13.43	1.14	1.18	5.62	40.70	0.50
还田 Return	11.46	1.16	1.06	5.58	39.59	0.50
NPK	12.55	1.30	1.29	6.27	58.75	0.70
NPKCa	11.20	1.22	1.38	7.07	53.2	0.65
NK	8.18	1.52	1.26	4.50	9.27	0.27

1.2 供试土壤

供试土壤为第四纪红色粘土发育的旱地红壤。2003年8月收获花生后采样,每个小区采用蛇形采样法,采15个点,充分混合后,用四分法取土。采样深度为0~10 cm。土样风干后,过2 mm

筛备用。

1.3 实验方法

磷素分级方法^[7]:采用 Hedley 方法将土壤中的磷素分成无机磷(P_i)和有机磷(P_o)两部分。具体流程见图1:

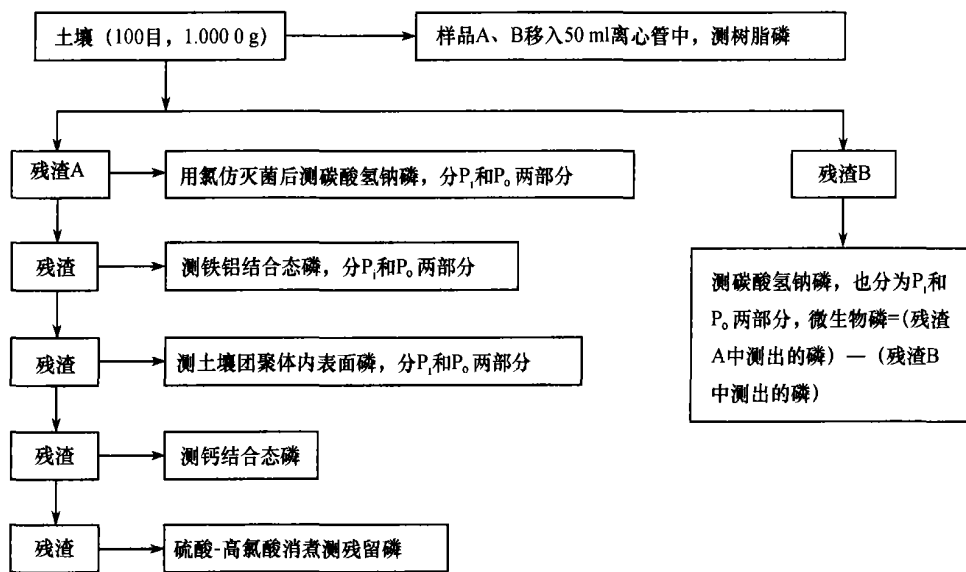


图 1 Hedley 分级方法流程图

Fig. 1 Flow chart of soil phosphorus fractions by Hedley

常规项目测定:有效磷采用 Bray 法测定;全磷用硫酸-高氯酸溶解测定;有机质采用高温加热重铬酸钾氧化-容量法;pH采用电位法(土水比1:5);活性铁铝采用酸性草酸铵提取^[8],ICP测定。

数据处理:差异显著性分析用 SPSS 软件执行, 通径分析用 DPS 软件。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥条件下红壤旱地磷素形态与含量

2.1.1 无机磷形态与含量 各施肥处理土壤的

各种无机磷形态及其含量见表2。

(1) 树脂磷:对作物最有效的磷素形态^[7]。从表2可以看出,所有施磷处理土壤的树脂磷含量都比NK处理高。3个有机肥处理土壤的树脂磷量差异不显著。2个无机肥处理间差异也不显著。施无机肥的处理较有机肥处理树脂磷含量高些。这是因为所用钙镁磷肥是弱酸溶性磷肥,在酸性土壤上做基肥使用时,肥效很高^[9],而有机肥由于还要进行腐解才能被植物吸收,所以肥效比较缓慢。

(2) 碳酸氢钠无机磷:对作物较有效的磷素形态^[7]。从表2可以看出,所有施磷处理的碳酸氢钠无

表 2 各形态无机磷含量

Table 2 Content of inorganic P in different forms

施肥处理 Fertilized treatments	树脂磷 Resin-P (mg kg ⁻¹)	碳酸氢钠无机磷 NaHCO ₃ -P _i (mg kg ⁻¹)	微生物无机磷 Microbial-P _i (mg kg ⁻¹)	铁铝结合态无机磷 Fe-P _i and Al-P _i (mg kg ⁻¹)	团聚体内表面无机磷 P _i existed in soil aggregates (mg kg ⁻¹)	钙结合态无机磷 Ca-P _i (mg kg ⁻¹)	残留磷 Residual-P (mg kg ⁻¹)
绿肥 Green manure	2.23 b	21.48 c	2.71 c	174.7 c	52.78 c	4.16 bc	219.5 c
秸秆 Stem	2.28 b	18.58 d	2.91 c	158.3 d	48.06 c	1.73 d	230.2 c
还田 Return	2.80 b	18.46 d	3.68 c	174.0 c	48.94 c	3.16 c	233.4 c
NPK	4.16 a	36.97 a	6.12 b	250.4 a	69.01 b	4.96 b	297.8 b
NPKCa	4.52 a	31.98 b	9.63 a	208.9 b	75.96 a	9.25 a	354.1 a
NK	1.49 c	3.83 e	0.55 d	58.48 e	20.42 d	0.69 d	175.3 d

注:P_i代表无机磷,数字后的字母代表方差分析结果 Note: P_i represents inorganic phosphorus, the letters behind the data are the result of ANOVA

机磷含量均较不施磷的NK处理高。3个有机肥处理相比,绿肥处理土壤的碳酸氢钠无机磷量较其余两个处理略高,这可能是由于绿肥处理土壤的施磷量大。2个无机肥处理相比较,NPK处理土壤的碳酸氢钠无机磷量较NPKCa处理高,这说明施用石灰并没有有效地增加红壤碳酸氢钠无机磷含量。施无机肥的处理较有机肥处理土壤的碳酸氢钠无机磷量高,其原因与树脂磷相同。

(3) 微生物无机磷:施磷处理的微生物无机磷量较不施磷的NK处理高。有机肥处理间,微生物无机磷量差异不显著。无机肥处理相比,NPKCa处理土壤的微生物无机磷量较NPK处理高,这与其适宜微生物生长的pH值有关。无机肥处理土壤的微生物无机磷量较有机肥处理的多(见表2)。

相关分析表明,土壤微生物无机磷量与pH值的相关系数达到0.97**($r=0.666$,为显著相关; $r=0.798$,为极显著相关)。这主要是由于土壤pH值强烈影响着土壤微生物活动,因此微生物细胞中的无机磷量受土壤pH值控制。

(4) 铁铝结合态无机磷:对植物有一定的有效性^[7]。各施磷处理土壤中铁铝结合态无机磷含量仍然较不施磷的NK处理高。有机肥处理相比,秸秆处理土壤的铁铝结合态无机磷量较其余两个处理低,说明其中的铁铝结合态磷量较少。无机肥处理相比,NPK处理土壤的铁铝结合态无机磷量较NPKCa处理高。说明在酸性土壤中加入石灰,减少了土壤中铁铝结合态无机磷的含量,这是因为在pH值较高的条件下,Fe-P、Al-P相对不易形成^[8]。无机肥处理的铁铝结合态无机磷含量普遍较有机肥处理高(见表2),这与土壤的全磷量密切相关。相关分析结果表明,铁铝结合态无机磷量与土壤全磷量相

关性很好, r 值达到0.99,为极显著正相关。这是因为铁铝结合态磷素含量占红壤全磷量的比例很高,是全磷的主体部分之一。

(5) 土壤团聚体内表面无机磷:存在于土壤团聚体内表面的磷是植物很难利用的磷素形态^[7]。从表2可以看出,各施磷处理土壤中土壤团聚体内表面无机磷含量均较不施磷的NK处理高。有机肥处理相比,土壤中的土壤团聚体内表面无机磷量差异不显著。无机肥处理中,NPKCa处理土壤的土壤团聚体内表面无机磷量较NPK处理高,说明施用石灰使磷素更多地聚集在土壤团聚体内表面。无机肥处理的这种形态磷素含量仍较有机肥处理高。

(6) 钙结合态无机磷:对植物有一定有效性^[10]。施磷处理较NK处理的钙结合态无机磷含量多。有机肥处理相比,绿肥和还田处理土壤的钙结合态无机磷量差异不显著,秸秆处理中含量略少,说明其中的钙磷含量较少。无机肥处理相比,NPKCa处理土壤的钙结合态无机磷量较NPK处理多(表2),这是因为施用的石灰中含有钙离子的缘故。施用无机肥的处理这种形态的磷素含量依然较施有机肥的处理多,这可能与所施无机磷肥是钙镁磷肥有关。

(7) 残留磷:很稳定,很难被提取剂提取,更难被植物吸收利用^[7]。施磷处理土壤的残留磷量较不施磷的NK处理高。有机肥处理相比,处理间差异不显著。无机肥处理相比,NPKCa处理土壤中残留磷量较NPK处理多,说明施用石灰增加了土壤中不能被植物利用的磷素含量。施无机肥的处理,土壤中的残留磷量均较施有机肥的处理高(表2)。

从以上无机磷分级结果可见,无论施用有机磷还是无机磷均能显著增加土壤中各形态无机磷含

量。各有机肥处理相比,差异大多不显著,只有秸秆处理土壤的铁铝结合态和钙结合态磷素含量较其余 2 个处理低。无机肥处理相比,加石灰的 NPKCa 处理土壤中的易被植物利用的磷素形态较 NPK 处理少,难于被植物利用的磷素形态含量较多。说明在红壤上施用石灰时,要充分考虑到钙离

子的固磷作用。有机肥、无机肥处理相比,无机肥处理土壤的各形态磷素含量均较有机肥处理高,可能与施磷量有关,无机肥处理的施磷量均较有机肥处理高。

2.1.2 有机磷形态及含量 各施肥处理土壤的各形态有机磷含量见表 3。

表 3 各形态有机磷含量

Table 3 Content of organic P in different forms

施肥处理 Fertilized treatments	碳酸氢钠有机磷 NaHCO ₃ -P _o (mg kg ⁻¹)	铁铝结合态有机磷 Fe-P _o and Al-P _o (mg kg ⁻¹)	团聚体内表面有机磷 P _o existed in soil aggregates(mg kg ⁻¹)
绿肥 Green manure	30.41 c	27.63 a	11.42 a
秸秆 Stem	29.40 c	23.77 a	8.10 b
还田 Return	24.64 c	26.41 a	9.05 ab
NPK	49.78 a	26.57 a	7.77 b
NPKCa	41.79 b	15.65 b	9.55 ab
NK	2.89 d	16.27 b	7.43 b

注:P_o代表有机磷,数字后的字母代表方差分析结果 Note: P_o represents organic phosphorus, the letters behind the data are the result of ANOVA

(1) 碳酸氢钠有机磷:可溶性有机磷,易于矿化^[7]。施过磷肥的土壤均能增加这部分磷素含量。各有机肥处理土壤的碳酸氢钠有机磷量差异不显著。无机肥处理相比,NPKCa 处理土壤的这部分磷素含量较 NPK 处理少(表 3),说明加石灰不能增加红壤中易被植物直接吸收的有机磷含量。无机肥处理土壤的碳酸氢钠有机磷含量均较有机肥处理高,说明有机肥增加土壤易溶性有机磷的作用很小。这可能是因为有有机肥处理土壤中易矿化的有机磷素矿化率较无机肥处理高。有研究表明,施用有机肥对土壤中有有机磷矿化细菌的促进作用较无机肥大^[11]。

(2) 微生物有机磷:各施肥处理没有显著变化,因此本文中只以微生物无机磷量代表微生物磷量讨论。这与 Brooks 等提出的用微生物无机磷增量作为估计土壤微生物磷量的观点相一致^[12]。

(3) 铁铝结合态有机磷:经磷酸酶作用后,铁铝结合态有机磷对作物有一定有效性^[7]。除 NPKCa 处理外,其余施磷处理土壤的铁铝结合态有机磷量均较不施磷的 NK 处理高。有机肥处理相比,铁铝结合态有机磷量的差异不显著。无机肥处理相比,NPKCa 处理土壤的铁铝结合态有机磷量较 NPK 处理低(表 3),这说明施用石灰的处理土壤中的铁铝结合态有机磷明显减少。

(4) 土壤团聚体内表面有机磷:存在于土壤团聚体内表面的有机磷,作物几乎不能利用^[7]。施磷处理土壤的土壤团聚体内表面有机磷量较不施磷的

NK 处理多。有机肥处理相比,绿肥处理土壤的土壤团聚体内表面有机磷量在数值上具有明显优势,说明绿肥处理土壤中的有机磷素较难被植物利用。无机肥处理相比,差异不显著。NPKCa 处理土壤中的土壤团聚体内表面有机磷较 NPK 处理在数值上更多些(表 3)。说明 NPKCa 处理土壤中,聚集于土壤团聚体内表面的有机磷量更多些。这些与前文中无机磷的变化规律基本一致。

从以上有机磷分级结果可以看出,施用磷肥仍然能增加土壤各形态有机磷含量。有机肥处理相比,绿肥处理土壤中的聚集于土壤团聚体内表面的有机磷量较高。无机肥处理相比,施石灰减少了土壤的铁铝结合态有机磷含量,但增加了植物难利用的土壤团聚体内表面有机磷含量。

2.1.3 各种形态磷素的相对含量 各形态磷素含量分布见表 4。

由表 4 中可以看出,施磷处理中,树脂磷和碳酸氢钠磷总共仅占磷素总量的 8%~12%。在不施磷的 NK 处理中,更是仅占 3%,说明在红壤中,对植物很有效的磷素含量非常少。

微生物磷占总磷的比例也很小,只有 0.5%~3%。所以对微生物之于红壤磷素的作用应该有正确的判断:微生物虽然在土壤有机磷向无机磷转化过程中扮演着重要的角色,但由于在红壤旱地中,含量很少,所以其对红壤供磷能力的调节作用可能并不很强^[13]。

表 4 各级磷素含量占全磷量的比例

Table 4 The percentage of content of different P forms in the total amount (%)

施肥处理 Fertilized treatments	树脂磷 + 碳酸氢钠磷 Resin-P and NaHCO ₃ -P	微生物磷 Microbial-P	铁铝结合态磷 Fe-P and Al-P	团聚体内表面磷 P existed in soil aggregates	钙结合态磷 Ca-P	残留磷 Residual-P
绿肥 Green manure	10.12	1.32	36.55	11.60	0.75	39.66
秸秆 Stem	9.24	1.50	34.39	10.70	0.33	43.85
还田 Return	8.29	1.81	36.40	10.53	0.57	42.40
NPK	11.90	2.16	36.26	10.05	0.65	38.98
NPKCa	11.14	3.36	28.95	10.87	1.19	44.49
NK	2.66	0.50	25.48	9.10	0.23	58.83

在红壤中,铁铝结合态磷含量很多,共占磷素总量的约 25%~37%。

钙结合态磷占磷素总量的百分比可以用于评价土壤发育的相对状态及土壤矿质态磷的转化^[10]。从表 4 看出,在红壤中这部分磷素含量相当少,只占总量的约 0.2%~1%,这说明在红壤中钙磷含量很少,土壤风化程度很高。

积累于土壤团聚体内表面的磷在红壤中含量不多,约占 9%~12%。

即使是施磷处理的土壤,残留磷含量仍很高,一般为 39%~44%,不施磷肥的 NK 处理土壤中,更是高达 59%,这说明红壤中的磷素至少有 1/3 是以植物不可利用的形态存在的。

从以上分析结果可以看出,红壤上的有效磷含量低,风化程度高。红壤磷素的主体部分以铁铝结合态和不能被植物利用的形态存在。

2.2 不同施肥条件下各磷素形态对磷素有效性的贡献

利用 Hedley 方法分级土壤磷素,虽然各形态磷素对作物的有效性意义已经比较清楚,但由于各形态磷素间可能会有不同程度的相关关系,且由于其

在土壤中的含量各不相同,因而在总体上,它们对磷素有效性的贡献大小和贡献方式可能不同。应用通径分析可以较好地解释各形态磷素对有效磷的贡献大小和作用方式。

通径分析不仅能测定出两变数间的相互关系,还能给出自变量对因变量的相对重要性,并将相关关系分解为直接作用和间接作用。通过通径分析得到的主要参数有:a. 通径系数——变量标准化的偏回归系数,表示各个原因对结果的相对重要性。通径系数分为直接通径系数和间接通径系数。直接通径系数表示各个自变量对因变量的直接作用大小;间接通径系数表示一个自变量通过另一个自变量对因变量的间接作用大小。b. 剩余系数 P_e ——通径分析的误差程度,该数值较大,则表示误差较大,或还有重要自变量没有考虑在内。c. 决定系数 R^2 ——通径系数的平方,表示所选自变量对因变量的决定程度^[14,15]。

本文以 NK 处理为对照,以其余各施肥处理土壤的各级磷含量减去 NK 处理的各级磷含量,即各级磷增量为自变量,以土壤有效磷(Bray-P)含量为因变量进行通径分析,分析结果如表 5 所示:

表 5 通径系数矩阵

Table 5 Path coefficient matrix

因子 Factor	直接通径系数 Direct path coefficient	通过 X_2 对有效磷的间接通径系数 Indirect path coefficient of available P by X_2	通过 X_4 对有效磷的间接通径系数 Indirect path coefficient of available P by X_4	通过 X_9 对有效磷的间接通径系数 Indirect path coefficient of available P by X_9	表型相关系数 External correlation coefficient
X_2	0.595		0.438	-0.046	0.988 **
X_4	0.453	0.576		-0.045	0.984 **
X_9	0.103	-0.264	-0.198		-0.359

注:本次分析的剩余系数 $P_e = 0.050$, 决定系数 $R^2 = 0.997$ 。 X_2 :碳酸氢钠无机磷; X_4 :铁铝结合态无机磷; X_9 :土壤团聚体内表面有机磷
Note: In the analysis, residual coefficient P_e is 0.050, determinative coefficient R^2 is 0.997. X_2 represent NaHCO₃-P_i, X_4 represent Fe-P_i and Al-P_i, X_9 represent P existed in soil aggregates

从表5可以看出,经变量剔除后,碳酸氢钠无机磷、铁铝结合态无机磷和土壤团聚体内表面有机磷被保留下来,它们是对土壤有效磷贡献最大的磷素形态(剩余系数 $P_e = 0.050$, 决定系数 $R^2 = 0.997$, 说明所有重要因素都已考虑在内)。碳酸氢钠无机磷通过它本身对有效磷影响的直接途径系数为 0.595;碳酸氢钠无机磷通过铁铝结合态无机磷对有效磷产生影响的间接途径系数为 0.438;碳酸氢钠无机磷通过土壤团聚体内表面有机磷对土壤有效磷贡献的大小表现在数值上是 -0.046;其余依此类推。

碳酸氢钠无机磷对有效磷的直接途径系数虽然没有达到显著相关,但在各直接或间接的途径系数中是最大的,其余各形态磷素通过碳酸氢钠无机磷对有效磷的间接途径系数在所有间接途径系数中也是最大的,且碳酸氢钠无机磷对有效磷的表型相关系数达到了 0.988^{**},说明碳酸氢钠无机磷对有效磷的影响很大。由此也证明了用 NaHCO_3 提取的有效磷与用 Bray 提取剂提取的有效磷相关性很好。

铁铝结合态无机磷虽然对有效磷的直接途径系数只有 0.453,也没有达到显著水平,但其表型相关系数达到 0.984,为极显著正相关。说明铁铝结合态磷素虽然对有效磷的直接影响不大,但通过影响别的磷素形态含量,而间接地影响有效磷量,其总的效果是很明显的。这是因为红壤中的铁铝结合态磷素含量很高,在一定条件下,可以解吸出来,为作物所利用。

存在于土壤团聚体内表面的有机磷,很难被植物利用,因而其对有效磷的影响是负效应。但这种形态的磷素对有效磷的影响没有其余两种大。

从以上分析可以看出,碳酸氢钠无机磷是对土壤有效磷贡献最大的磷素形态。铁铝结合态磷素对有效磷的作用以间接方式为主,但总的效果很明显。土壤团聚体内表面的有机磷对有效磷有一定负作用,但这种作用与其余两种磷素形态相比,并不明显。

3 结论

1) 施磷肥能明显增加土壤各形态无机磷含量和有机磷含量。绿肥、秸秆、还田处理间的差异大多不显著。只有秸秆处理土壤的铁铝结合态磷和钙磷含量较少。绿肥处理土壤的团聚体内表面有机磷量略高。施用石灰使铁铝结合态磷素含量减少,土壤团聚体内表面的磷素含量增加。

2) 在红壤中,能直接被作物吸收的树脂磷和碳

酸氢钠磷含量很少,只约占全磷量的 3%~12%。铁、铝结合态磷和残留磷含量很多,合计约占全磷量的 2/3。所以说红壤中磷素有效性低。

3) 碳酸氢钠无机磷、铁铝结合态无机磷和土壤团聚体内表面有机磷是影响有效磷的主要成分,其中土壤团聚体内表面有机磷对其有负影响。但它们对有效磷的直接作用都很小,各直接和间接的作用加起来,才对有效磷产生明显影响。

参考文献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所主编. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978. 50. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Soil of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1978. 50
- [2] Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, et al. A simplified sequential phosphorus fractionation method. Commun. Soil Sci. Plant Annual, 2000, 31(14): 1981~1991
- [3] Paniagua A, Mazzarino MJ, Kass D, et al. Soil phosphorus fractions under five tropical agr-ecosystems on a volcanic soil. Aust. J. Soil Res., 1995, 33: 311~320
- [4] 贺铁. 土壤有机磷研究的新进展. 土壤通报, 1986, 17(3): 141~143. He T. The current advance on soil organic phosphorus (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1986, 17(3): 141~143
- [5] 张教林, 陈爱国, 刘志秋. 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. 土壤, 2000, 32(6): 319~322. Zhang J L, Chen A G, Liu Z Q. Research about changes and availability of phosphorus forms in tropic rubber garden that was reclaimed for 3, 13 or 34 years (In Chinese). Soils, 2000, 32(6): 319~322
- [6] Fan Y, Li S. Fractionation of moderately and highly stable organic phosphorus in acid soil. Pedosphere, 1998, 8(3): 261~266
- [7] Hedley MJ, Steward J WB, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 970~976
- [8] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 181~182. Lu R K. ed. Methods of Agricultural Chemical Analysis in Soil (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999. 181~182
- [9] 何念祖, 孟赐福, 等著. 植物营养原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 134~145. He N Z, Meng C F, et al. eds. Theory of Plant Nutrition (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987. 134~145
- [10] Walker TW, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis. Geoderma, 1976, 15: 1~19
- [11] 罗安程, 孙羲. 施肥对红壤中微生物区系和无机磷溶解及有机磷矿化的影响. 土壤通报, 1995, 26(2): 73~75. Luo A C, Sun Y. Effect of fertilization on microbial community and inorganic P dissolution and organic P mineralization in red soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(2): 73~75

- [12] Brookes D S, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, 14: 319 ~ 329
- [13] 吴金水,肖和艾,陈桂秋. 旱地红壤微生物磷测定方法研究. *土壤学报*, 2003, 40(1): 70 ~ 77. Wu J S, Xiao H A, Chen G Q. Research on the determinating method about microbial phosphorus in upland red soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 70 ~ 77
- [14] 迟凤琴. 通径分析在土壤微团聚体研究中的应用. *农业系统科学与综合研究*, 1997, 13(1): 58 ~ 60. Chi F Q. Application of path analysis on research of soil micro-aggregation (In Chinese). *System Science and Comprehensive Studies in Agriculture*, 1997, 13(1): 58 ~ 60
- [15] 刘广深,徐冬梅,许中坚,等. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系. *土壤学报*, 2003, 40(5): 756 ~ 762. Liu G S, Xu D M, Xu Z J, *et al.* Research on relationship between hydrolase activity in soils and soil properties by path-analysis (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 756 ~ 762

EFFECT OF FERTILIZATION ON PHOSPHORUS FORMS AND ITS AVAILABILITY IN UPLAND RED SOIL

Yang Fang He Yuanqiu Li Chengliang Xu Jiangbing Lin Tian
(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract Phosphorus (P) is the limiting factor for agricultural production in red soil regions, so the study about P forms and transports can be meaningful to agricultural production in red soil regions. The forms and contents of phosphorus by upland red soils different in fertilization were studied with the P fractionation method proposed by Hedley. The results show: 1) All the inorganic P and most of the organic P are always lower in soil not fertilized with inorganic or organic phosphorus than in soil fertilized with phosphorus. 2) Resin-P and $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ that can be utilized by plant easily are tiny, but P combined with ferric and aluminium and Residual-P are the greatest parts in upland red soil. So the P availability in red soil is low. 3) $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, P_i combined with ferric and aluminium, P_o existed in soil aggregates are the most contributive forms to available P (Bray-P). In a word, these results guide us to research on P availability and transformation of phosphorus by upland red soils different in fertilization. And then, they can be theoretical and practical guidance for phosphorus management in upland red soil.

Key words Upland red soil; Different fertilization treatment; Phosphorus forms; Availability of phosphorus