

长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响^{*}

史 静¹ 张誉方¹ 张乃明^{1†} 张淑香²

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

(2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要 通过 33 年施肥试验研究了不同施磷处理对山原红壤中磷素形态转化及含量的影响。结果表明, 长期施用磷肥增加了红壤中全磷和速效磷的含量; 施磷处理下土壤表层无机磷、有机磷显著积累。不同施肥处理下土壤无机磷组分均以 Fe-P 为主, 占总量的 50% 左右; 相关分析表明无机磷组分中的 Fe-P、Al-P 与速效磷分别呈极显著正相关 ($r = 0.908$)、显著正相关 ($r = 0.706$), 表明 Fe-P、Al-P 为山原红壤的有效磷源。对于土壤有机磷而言, 所有施肥处理的土壤中稳性有机磷比例最高, 其次为中等活性有机磷, 再次为高稳性有机磷, 活性有机磷最低, 前二者占有机磷总量的 90% 左右。有机磷组分与速效磷的相关性分析结果表明, 中等活性有机磷、中稳性有机磷分别与土壤速效磷呈极显著正相关 ($r = 0.861$)、显著正相关 ($r = 0.840$)。说明中等活性有机磷和中稳性有机磷是土壤速效磷的主要来源。增施磷肥尤其是氮、磷、钾肥与农家肥配施后, 可促进其他形态有机磷向有利于作物吸收的中等活性有机磷、中稳性有机磷转变。

关键词 长期施肥; 山原红壤; 有机磷; 无机磷

中图分类号 S158.5 **文献标识码** A

磷(P)是植物生长发育必需的三大营养元素之一, 植物体所需的磷主要来自土壤磷库和磷肥施用。我国是世界上少有的高施肥水平国家, 磷肥消费量位居世界首位, 约占世界磷肥消费量的 25%^[1], 高施肥水平会导致低的肥料利用率, 并且引起环境污染。据统计, 我国磷肥当年利用率仅有 10% ~ 20%^[2-3]。因此, 施肥后土壤中磷的形态转化及其有效性问题一直被国内外学者所关注^[4-7]。土壤中的磷主要以有机态和无机态存在, 无机磷主要分为磷酸钙、镁类化合物, 磷酸铁、铝类化合物和闭蓄态磷三大类。不同组分无机磷的溶解性和有效性不同, 而且它们在不同土壤中的比例不同。土壤有机磷按其不同浓度酸碱溶液中的水解量, 分成活性有机磷(AOP)、中等活性有机磷(MAOP)、稳定性有机磷(MSOP)和高稳性有机磷(HSOP) 4 种^[8-9]。不同组分磷素对植物有效性不同, 因此不同施肥处理对磷素组成的影响就显得尤为重要。

由于磷素在土壤中移动性差, 未被植物利用的磷则以不同形态残留于土壤之中, 并不断累积。目

前我国有 2/3 的土壤不同程度的缺磷。红壤约占全国土地面积的 21%, 占云南省土地面积的 32.7%。山原红壤缺磷尤为突出, 施用磷肥效果极为显著。据云南曲靖越州山原红壤(低肥力旱地)13 年定位监测试验资料显示, 农家肥加磷肥区较对照区玉米增产 6 420 kg hm⁻², 单施磷肥或农家肥玉米产量上升缓慢^[10]。磷肥的长期过量施用不仅会造成磷素在土壤中累积^[11-12], 也可能导致农田径流中磷浓度增高, 加速水体富营养化过程^[13-15]。因此, 如何提高累积磷的有效性一直被国内外学者所关注。国内目前关于长期施肥对土壤磷素形态的研究主要集中于棕壤、潮棕壤、黑土和水稻土, 关于山原红壤的研究较少; 且多集中于无机磷形态和组分^[5, 16-20], 对于长期定位施肥下磷素有机磷形态、组分的研究报道较少。本研究分别采用 Chang 和 Jackson^[21] 提出的无机磷形态分级体系和 Bowman 等^[8-9] 提出的有机磷分组法分析了云南曲靖越州山原红壤长期定位试验站(1978 年)、连续施肥 33 年的耕层土壤中无机磷和有机磷总量及各形态组成特征。旨在

* 云南省基础研究重点项目(2009CC006)、云南省科技计划项目(社会事业发展计划)(2009CA026)资助

† 通讯作者, E-mail: zhangnaiming@sina.com

作者简介: 史 静(1980—), 女, 山西临汾人, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境保护方面的研究。E-mail: shijingxwb@163.com

收稿日期: 2013-02-07; 收到修改稿日期: 2013-12-26

利用“长期定位”这一特定条件来探讨红壤磷库的组成以及施磷对土壤磷素形态及有效性的影响,为磷肥的合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于云南省曲靖市麒麟区越州镇

表 1 试验地耕层土壤(0~20cm)基本理化性状(1978年)

Table 1 Basic physical and chemical properties of the topsoil(0~20cm) in the experiment (1978)

土壤 Soil	pH (H ₂ O)	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalytic N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
山原红壤 Mountain red soil	6.1	20.6	1.0	71.0	痕量 Trace	67.0

1.2 试验设计

试验始于 1978 年,设计 6 种施肥处理:(1) NF,氮肥与农家肥配施;(2) NPF,氮、磷肥与农家肥配施。(3) N,单施氮肥;(4) NP,施氮磷肥;(5) NKF,氮、钾肥与农家肥配施;(6) NPKF,氮、磷、钾肥与农家肥配施。每个处理设 3 次重复,施肥量见表 2。肥料施用方法为氮肥 30% 作苗期追肥,70% 作穗肥;磷肥与农家肥作底肥穴施。

玉米(*Zea mays*)品种为当地大面积推广的杂交种(1978—1984 为水口黄、1985—1988 年为京杂 6 号、1989—1991 年为罗单 1 号、1992—2007 年为会单 4 号)。小区面积为 66.67 m²,种植密度为 67 200 株 hm⁻²。

表 2 不同施肥处理施肥量(1978 年至今)

Table 2 Amounts of fertilizer applied in the different treatments

处理 Treatments	施肥量 Fertilizer amount(kg hm ⁻²)
NF	N 276;农家肥 ^① 30 000
NPF	N 276;P ₂ O ₅ 120;农家肥 30 000
N	N 276
NP	N 276;P ₂ O ₅ 120
NKF	N 276;K ₂ O 112.5;农家肥 30 000
NPKF	N 276;P ₂ O ₅ 120;K ₂ O 112.5;农家肥 30 000

①农家肥为草皮、秸秆垫厩后堆沤的土杂肥 Barnyard manure was composed of sod, and composted straw bedding

(N25°18'6.8",E103°53'55.4"),海拔 1 906 m,属低纬高原季风气候。年均温 13~15℃,≥10℃积温 3 500~4 000℃,年降水量 900~1 000 mm,年蒸发量 2 000~2 200 mm,相对湿度 70%~74%,无霜期 245 d。供试土壤为老冲积母质发育的山原红壤。试验前(1978 年)耕层土壤基本理化性状如表 1。种植作物春玉米,一年一熟,冬休闲。

1.3 测定方法

土壤有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定。土壤 pH(土:水比为 1:2.5)采用 pH 计测定。土壤全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮—钼锑抗比色法测定。土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定^[22]。

土壤无机磷分级:参照 Chang 和 Jackson^[21]方法,采用连续浸提测定,连续浸提步骤如下:(1) Al-P,氯化铵溶液(1 mol L⁻¹ NH₄Cl)浸提,再用 pH 8.2 的氟化铵溶液(0.5 mol L⁻¹ NH₄F)浸提;(2) Fe-P,氢氧化钠溶液(0.1 mol L⁻¹ NaOH)浸提;(3) O-P,柠檬酸钠溶液(0.3 mol L⁻¹ Na₃C₆H₅O₇)与连二亚硫酸钠(Na₂S₂O₄)水浴,氢氧化钠溶液浸提,三酸混合液消煮;(4) Ca-P,硫酸溶液(0.5 mol L⁻¹ H₂SO₄)浸提^[22]。

土壤有机磷分级:参照 Bowman-Cole 法^[8-9],根据化学浸提剂进行土壤有机磷组分测定。(1)活性有机磷,pH 8.5 的碳酸氢钠溶液(0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃)浸提;(2)中等活性有机磷,硫酸溶液(1.0 mol L⁻¹ H₂SO₄)和氢氧化钠溶液(0.5 mol L⁻¹ NaOH)浸提;(3)中稳性有机磷,即富里酸态有机磷,为前述浸提液不能被酸所沉淀的部分;(4)高稳性有机磷,即胡敏酸态有机磷,为前述浸提液被酸所沉淀的部分。具体操作参见文献[22]。

1.4 数据统计与分析

所有数据均采用 Excel 2003 软件进行整理;运用 SPSS11.0 统计分析软件进行方差分析。

2 结 果

2.1 长期施磷对全磷、速效磷的影响

不同施肥处理下全磷含量介于 $635.0 \pm 28.9 \sim 1181 \pm 76 \text{ mg kg}^{-1}$;速效磷含量介于 $6.95 \pm 1.15 \sim$

$45.84 \pm 1.97 \text{ mg kg}^{-1}$;长期施肥 33 年后 NPF、NP、NPKF 处理土壤全磷含量均显著高于 NF、N、NKF 处理,分别增加 70.07%、23.30%、24.52%;NPF、NP、NPKF 处理速效磷含量分别为 NF、N、NKF 处理的 3.50 倍、6.07 倍、1.27 倍。说明长期施用磷肥会增加土壤中全磷和速效磷含量(表 3)。

表 3 不同施肥处理对红壤不同形态磷素含量的影响

Table 3 Effect of different treatments on phosphorus components in red soil (mg kg^{-1})

处理 Treatments	全磷 Total P	速效磷 Available P	有机磷总量 Total organic P	无机磷总量 Total inorganic P
NF	$635.0 \pm 28.9\text{a}$	$6.95 \pm 1.15\text{a}$	$302.1 \pm 26.4\text{a}$	$352.1 \pm 7.5\text{a}$
NPF	$1080 \pm 78.6\text{c}$	$24.30 \pm 2.40\text{c}$	$592.0 \pm 18.5\text{d}$	$588.1 \pm 43.0\text{d}$
N	$882.9 \pm 34.6\text{b}$	$7.55 \pm 1.13\text{a}$	$481.0 \pm 19.8\text{b}$	$401.8 \pm 20.2\text{b}$
NP	$1088.4 \pm 79.0\text{c}$	$45.84 \pm 1.97\text{d}$	$563.3 \pm 41.3\text{cd}$	$625.3 \pm 44.0\text{de}$
NKF	$948.6 \pm 64.4\text{bc}$	$16.44 \pm 1.78\text{b}$	$553.2 \pm 13.6\text{cd}$	$495.3 \pm 7.1\text{c}$
NPKF	$1181 \pm 75.9\text{d}$	$20.95 \pm 1.51\text{c}$	$538.2 \pm 45.5\text{bc}$	$643.0 \pm 15.8\text{e}$

注:表中同列不同字母表示差异显著 $p < 0.01$ Note: Different letters in the same column signify significant difference $p < 0.01$

2.2 长期施磷对无机磷库组成及其有效性的影响

不同施肥处理下无机磷总量介于 $352.1 \pm 7.5 \sim 643.0 \pm 15.8 \text{ mg kg}^{-1}$ (表 3),与 NF、N、NKF 处理相比,NPF、NP、NPKF 处理无机磷含量显著提高 67.01%、55.62%、29.81%,表明长期施磷导致耕层土壤无机磷积累。

不同施肥处理下红壤无机磷各组分含量表现不同(图 1)。所有处理中,土壤中的 Fe-P 含量均显著高于其他三个组分的含量。所有施肥处理中单施氮肥土壤中 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量最低。增施磷肥后,即 NP 处理土壤的 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量均有不同程度地增加,增加幅度分别为 52.46%、65.35% 和 46.50%。与 NF 处理相比,NPF 处理土壤中 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量分别增加 12.52%、114.66 和 9.77%。施 NPKF 的土壤 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量高于 NKF 处理,增加幅度为 63.01%、26.78% 和 9.9%。总体而言,施磷肥 NP、NPF 和 NPKF 处理土壤无机磷各组分含量之和较不施磷的 N、NF 和 NKF 处理增加,增加幅度分别为 55.57%、67.01% 和 29.81%。可见,增施磷肥对云南山原红壤无机磷组分有很大贡献。

长期施磷下,山原红壤无机磷各组分百分比情况见图 2。从图 2 中可以看出,所有处理土壤无机磷组分均以 Fe-P 为主,占总量的 50% 左右。单施氮肥处理的土壤 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 比例依次为 24.06%、55.82%、5.90% 和 14.22%,施 NP 处理

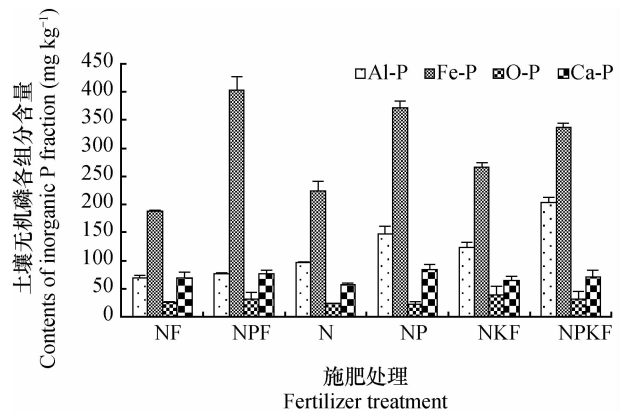


图 1 不同施肥处理土壤无机磷各组分含量
Fig. 1 Contents of inorganic fractions of P in soils different in fertilization treatment

土壤 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 比例依次为 23.57%、59.32%、3.70% 和 13.40%,可以看出增施磷肥后土壤中 Fe-P 比例增加,其他三种形态无机磷均有不同程度的降低,其中 O-P 比例降低幅度大于 Al-P 和 Ca-P。例如 NF 处理增施磷肥后,土壤中 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 比例由 19.56%、53.33%、7.29% 和 19.81% 转变为 13.14%、68.55%、5.3% 和 13.02%。NPKF 处理与 NKF 处理相比,各组分无机磷比例变化情况为:Al-P 比例增加,Fe-P、O-P 和 Ca-P 比例由 53.72%、8.06%、13.15% 降低为 52.47%、4.91%、11.13%,其中 O-P 比例降低幅度最大。

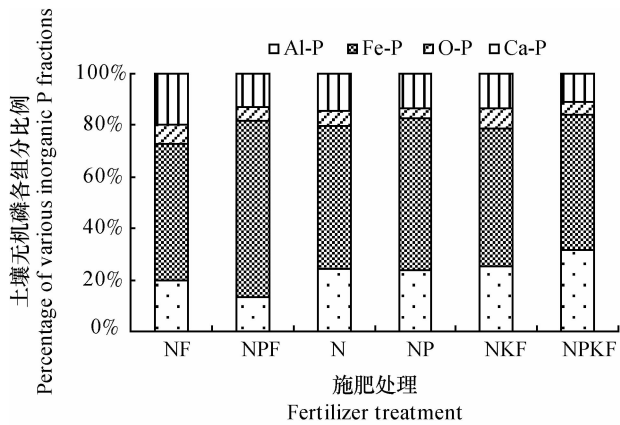


图2 不同施肥处理土壤无机磷各组分所占比例

Fig. 2 Proportions of various inorganic fractions of P in soils different in fertilization treatment

2.3 长期施磷对有机磷库组成及其有效性的影响

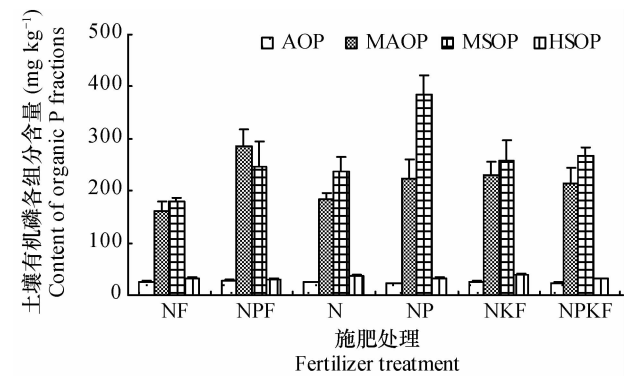
不同施肥处理下有机磷总量介于 $302.1 \pm 26.4 \sim 592.0 \pm 18.5 \text{ mg kg}^{-1}$ (表3), NF、N处理与 NPF、NP处理相比,有机磷含量显著提高 95.93% 和 17.11%; NPKF与 NPK处理有机磷含量无显著差异。对应于前文所述施磷引起无机磷增加,则可能是因为配施农家肥会促进土壤有机磷向无机磷转化。Lee等^[23]也得到类似的研究结果,连续施用堆肥提高了土壤无机磷组分含量而有机磷组分含量增加不显著。杨丽娟等^[6]对塑料大棚内长期施肥对土壤磷素组成的研究也指出长期施用有机肥或者化学磷肥导致 0~20cm 土层土壤大量无机磷积累而非有机磷积累。

土壤有机磷是土壤全磷的重要组成部分。与无机磷相比,有机磷在土壤中具有较大的移动性,被土壤无机矿物固定的程度低,即使是难溶于水的有机磷经矿化后可持续释放出无机磷,对作物生长极为有利。根据前人对有机磷组分的研究表明,在有机磷各形态之间,中等活性有机磷和中稳性有机磷是土壤有机磷中最活跃而且数量相对较大的组分。此外,还有研究表明,活性有机磷与速效磷之间有密切关系^[8-9]。因此,本文重点研究不同施肥处理下,有机磷组分即土壤的活性有机磷、中等活性有机磷和中稳性有机磷、高稳性有机磷的变化。

从图3可以看出,山原红壤所有施肥处理(除 NPF处理外)均是中稳性有机磷含量最高,中等活性有机磷含量居中,高稳性有机磷次之,活性有机磷含量最低。单施氮肥,土壤的活性有机磷、中等活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷含量分别为 24.45、184.28、236.43 和 37.32 mg kg^{-1} 。NP

处理较单施氮肥处理相比,土壤中等活性有机磷和中稳性有机磷含量均有不同程度的增加,增加幅度为 20.67% 和 62.78%,但土壤活性有机磷和高稳性有机磷含量降低,减小幅度为 7.53% 和 12.67%。NPF处理与 NF处理相比,土壤活性有机磷、中等活性有机磷和中稳性有机磷含量均增加,增加幅度分别为 6.30%、10.95% 和 37.20%;但高稳性有机磷降低,降低幅度为 8.56%。

NPKF处理与 NKF处理相比,施加磷肥后土壤中活性、中稳性有机磷未有显著差异,而土壤活性有机磷及高稳性有机磷含量均降低,降低幅度分别为 6.73% 和 21.15%。



注: AOP:活性有机磷 Active organic P; MAOP:中等活性有机磷 Moderately active organic P; MSOP:中稳性有机磷 Moderately stable organic P; HSOP:高稳性有机磷 Highly stable organic P.下同, The same below

图3 不同施肥处理土壤有机磷各组分含量

Fig. 3 Contents of organic fractions of P in soils different in fertilization treatment

长期施肥条件下土壤有机磷各组分比例如图4所示。所有施肥处理的土壤中稳性有机磷比例最高,其次为中等活性有机磷,再次为高稳性有机磷,活性有机磷最低。单施氮肥的土壤,活性、中活性、中稳性和高稳性有机磷比例分别为 5.07%、38.20%、49.00% 和 7.74%,增施磷肥后的比例分别为 3.41%、33.57%、58.10% 和 4.92%,可以看出只有中稳性有机磷比例增加,而其他有机磷比例均降低,这说明增施磷肥后,部分活性有机磷、中等活性有机磷和高稳性有机磷向中稳性有机磷转变。说明 NP配施可以增加土壤中稳性有机磷比例,有利于该组分的提高与积累。NPF处理与 NF处理相比,土壤中等活性有机磷比例有所增加,活性有机磷比例、中稳性有机磷和高稳性有机磷比例均降低,说明氮、磷肥与农家肥配施可以促进其他形态的有机磷向有利于作物利用的中等活性有机磷转

变,促进作物产量提高。NPKF 处理与 NKF 处理相比,除了土壤的中稳性有机磷比例有所增加,提高幅度为 3.11%,其他三种形态的有机磷即活性、中等活性和高稳性有机磷比例均略有降低,幅度分别为 0.17%、1.62%、和 1.32%。

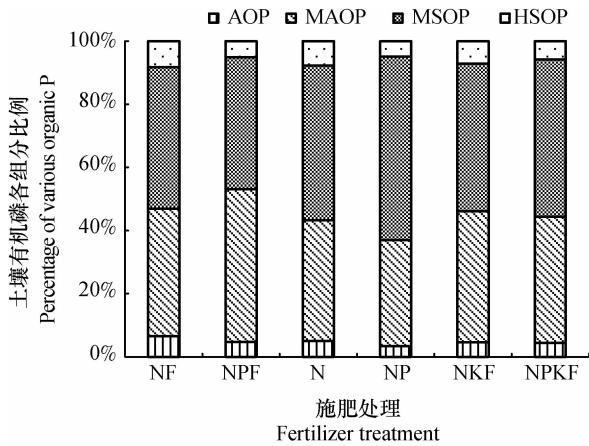


图 4 不同施肥处理土壤有机磷各组分所占比例

Fig. 4 Proportions of various organic fractions of P in soils different in fertilization treatment

2.4 土壤磷组分与速效磷的关系

表 4 为土壤有机磷、无机磷组分与速效磷的相关性分析结果。可以看出中等活性有机磷与土壤速效磷呈极显著正相关($r=0.861$),中稳性有机磷与土壤速效磷呈显著正相关($r=0.840$)。其他两组分的相关性大小顺序为高稳性有机磷 > 活性有机磷。本试验表明,中等活性有机磷和中稳性有机磷是土壤速效磷的缓冲库。这与冯跃华和张杨珠^[24]的研究结果相一致,土壤中的中等活性有机磷是土壤速效磷的主要来源,活性有机磷因其含量低,对土壤速效磷的贡献小,只有通过中等活性有机磷的不断补充,才能满足作物对磷素营养的需求。无机磷组分中的 Fe-P、Al-P 与速效磷分别呈极显著正相关($r=0.908$)、显著正相关($r=0.706$),O-P 与速效磷的相关性最弱。结果表明,Fe-P、Al-P 为云南山原红壤的速效磷源,而 O-P 的有效性较低。可见,随着试验时间的延长,特别在后效试验阶段,无机磷各组分处于动态变化中,它们之间的转化与再分配必然影响土壤速效磷水平的高低。

表 4 土壤磷组分与速效磷的相关性

Table 4 Correlative coefficient of organic and inorganic P fractions and available P in soil

	有机磷组分 Organic P				无机磷组分 Inorganic P			
	AOP ¹⁾	MAOP ²⁾	MSOP ³⁾	HSOP ⁴⁾	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P
速效磷 Available	0.636	0.861 **	0.840 *	0.705	0.706 *	0.908 **	0.365	0.448

1) 活性有机磷 Active organic P; 2) 中等活性有机磷 Moderately active organic P; 3) 中稳性有机磷 Moderately stable organic P; 4) 高稳性有机磷 Highly stable organic P. * * $p < 0.01$; * $p < 0.05$

3 讨论

目前我国农田土壤速效磷水平约为 19 mg kg^{-1} ,从农业需求和环境保护角度确定的土壤速效磷最适范围应在 $30 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间^[12]。在长期投入磷肥的情况下,磷肥施入土壤后会很快地被吸附到土壤颗粒表面或与土壤中的某些物质(Fe、Al、Ca)结合生成难溶的磷酸盐,这在很大程度上影响磷的释放及其生物有效性。本研究长期施肥 33 年后土壤全磷得到很大提升,但速效磷不高,仅为 $6.95 \pm 1.15 \sim 45.84 \pm 1.97 \text{ mg kg}^{-1}$,可见土壤磷组分与速效磷之间的关系对研究肥料使用有效性极为重要。本文重点研究对不同施肥处理下长期施磷对山原红壤无机磷、有机磷组分的影响。

3.1 长期施磷对山原红壤无机磷组分的影响

长期施肥后土壤中无机磷的形态转化及其有效性问题已被广泛关注。本研究结果表明,所有施肥处理土壤的无机磷组分均以 Fe-P 为主,占总量的 50% 左右,无机磷组分中的 Fe-P、Al-P 与速效磷分别呈极显著、显著正相关。磷肥施入土壤后首先转化为各种形态无机磷,土壤中的无机磷在一定条件下也发生相互转化。磷肥的投入能增加土壤无机磷含量,化学磷肥和有机肥配施通过改变土壤无机磷组分的含量和比例提高了土壤速效磷含量,但在不同的土类上存在较大差异。

此结果和碱性土壤的研究结果不同,如林德喜等^[18]对黑土(筒育湿润均腐土)长期定位施肥 15 年后土壤磷素形态进行研究表明:长期施肥下黑土各形态无机磷的含量大小顺序为:Fe-P > Ca₁₀-P > Al-P > Ca₈-P > Ca₂-P > O-P。韩晓日等^[19]对棕壤

26 年长期定位试验的无机磷分级表明:长期施入有机肥或化学磷肥,除了 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在耕层减少外,其他各形态无机磷含量均有所增加;仅施氮肥或不施肥, Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量均减少, Fe-P 、 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占无机磷总量的比例增加,而 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 则下降。刘文革^[25]在石灰性土壤上的研究表明: $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的供磷能力最强,其他几种形态磷的供磷能力由大到小依次为 $\text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{FA}$ (氟磷灰石)。王艳玲等^[26]利用相关分析和通径分析相结合的方法,比较了黑土中各组分无机磷对速效磷的相对重要性,顺序依次为: $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{O-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。而同样在酸性土壤红壤性水稻土的研究结果表明 Fe-P 成为主要成分,黄庆海等^[27]的研究结果表明,红壤性水稻土中各组分无机磷的含量以 Fe-P 和 O-P 为主,其次是 Al-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$,而 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 只有当土壤无机磷达到一定丰度和供磷强度时才存在,对水稻磷素营养的贡献无实际意义。以上均证实酸性土壤和碱性土壤有效态磷源有显著差异, Fe-P 、 Al-P 为云南高原红壤的有效态磷源。

本研究表明长期施磷也影响土壤各无机态磷所占比例,单施氮肥的土壤 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 和 Ca-P 比例依次为 24.06%、55.82%、5.90% 和 14.22%,施加磷肥后土壤中 Fe-P 比例增加,其他三种形态无机磷均有不同程度的降低,其中 O-P 降低幅度大于 Al-P 和 Ca-P 。NF 处理增施磷肥的效果也提高了 Fe-P 含量。NKF 增施磷肥后的情况与上述情况不同,各组分无机磷比例变化情况为 Al-P 比例增加, Fe-P 、 O-P 和 Ca-P 比例降低,其中 O-P 比例降低幅度最大。其他研究也表明增施磷肥尤其是在 N、P、K 养分平衡及配施有机肥处理下可促进有效态磷的增加。如李莉等^[28]研究表明,长期不施磷肥处理褐潮土的全磷、速效磷、无机磷总量以及各组分含量较长期休闲处理明显降低;但施用磷肥处理则相应提高,施肥对土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量影响最大,其次为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P ;磷肥与有机肥配施更利于土壤中积累磷素的有效性转化。王伯仁等^[29]对 12 年红壤长期肥力定位监测试验表明,连续施用化学磷肥以及化肥与有机肥配施,均可提高红壤全磷、有机磷、无机磷含量;化学磷肥的施用能够提高红壤的全磷含量,并以 Al-P 增幅为最大,施用有机肥料(猪粪)土壤中的磷则以 Ca-P 和 Al-P 积累为主,在所有处理中均表现为土壤 O-P 含量相对稳定。Song 等^[30]研究指出,化学磷肥与有机肥配施可以降低积累态磷向

O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 转化的比率。

3.2 长期施磷对山原红壤有机磷组分的影响

土壤有机磷的有效性是一个复杂问题,它与土壤供磷能力密切相关。本试验中山原红壤长期施磷 33 年后,所有施肥处理的土壤中稳性有机磷比例最高,其次为中等活性有机磷,再次为高稳性有机磷,活性有机磷最低。根据土壤有机磷组分与速效磷的相关性分析结果表明:中等活性有机磷与土壤速效磷呈极显著正相关,中稳性有机磷与土壤速效磷呈显著正相关。说明山原红壤中活性、中稳性有机磷和土壤磷有效性之间关系密切。而关于有机磷组分与速效磷之间的关系目前尚无定论,在不同土壤类型上表现有差异,如刘小虎等^[31]研究了长期施肥对棕壤有机磷组分的影响,结果表明,与土壤磷素营养供应关系较为密切的活性有机磷和中等活性有机磷约占 60%。如不同施磷下灰漠土有机磷组分均以中等活性有机磷为主,四种有机磷含量次序为中等活性有机磷 > 中稳性有机磷 > 活性有机磷 > 高稳性有机磷^[29]。蔬菜长期施肥定位试验田土壤磷素组分的研究结果表明有机肥各处理中土壤活性、中等活性有机磷含量均显著高于稳定性和高稳定性有机磷含量^[6]。这种差异可能是诸多因素相互作用的结果:一是土壤总磷库的变化;二是施肥种类差异;三是不同环境条件有机物质的循环转化特点。

本研究结果还表明氮、磷、钾肥与农家肥配施可以促进其他形态有机磷向有利于作物利用的中等活性有机磷、中稳性有机磷转变,促进作物产量提高。如 NPF 处理与 NF 处理相比,土壤的中等活性有机磷比例有所增加,活性有机磷比例、中稳性有机磷和高稳性有机磷比例均降低;NPKF 处理与 NKF 处理相比,除了土壤的中稳性有机磷比例有所增加,其他三种形态的有机磷均降低。这一点与前人研究结果相似。程艳丽等^[16]也认为长期连续施肥条件下,无论是单施有机肥还是其同化肥配合施用,均能提高土壤中有机磷的含量,且能够促进有机磷组分中的稳定性有机磷和中稳定性有机磷向活性有机磷转化。卢志红等^[17]通过长期定位施肥试验研究了 21 年不同施肥处理水稻土中磷素形态及含量的变化。结果表明,长期配施有机-无机肥的土壤有机磷含量增加,并且有利于活性和中等活性有机磷含量的提高。杨丽娟等^[6]对塑料大棚内自 1988 年开始的蔬菜施肥长期定位试验田土壤磷素组分的研究结果表明,施用有机肥可以显著提高土

壤有机磷总量,赵吴琼等^[32]对灰漠土 16 年长期不同施肥条件下的研究表明,不施磷肥处理土壤有机磷组分有下降趋势,施磷肥处理可以提高有机磷各组分的含量,在氮磷钾配合有机肥施用下有机磷总量提高了 60% 左右。

4 结 论

中原红壤长期施用磷肥 33 年后会增加土壤中全磷和速效磷含量;施磷处理下土壤耕层无机磷积累,而有机磷变化不显著。中原红壤长期施磷条件下,尤其在氮、磷、钾养分平衡增施磷肥后,尤其是氮、磷、钾肥与农家肥配施后,可以促进其他形态的有机磷向有利于作物利用的中等活性有机磷、中稳性有机磷转变;各施肥处理下土壤无机磷组分均以 Fe-P 为主,占总量 50% 左右,除 NKF 增施磷肥后 Al-P 比例增加外,其他处理的 Fe-P 比例均为增加,其余三种形态磷比例降低。各施肥处理下土壤有机磷各组分比例为稳性有机磷比例最高,其次为中等活性有机磷,再次为高稳性有机磷,活性有机磷最低。相关分析结果表明中等活性有机磷和中稳性有机磷是土壤速效磷的主要来源。

参 考 文 献

- [1] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费:磷肥消费和需求. 土壤,2004,36(2):113—116. Lu R K. Phosphorus resources and phosphate fertilizer production and consumption and predicted of China II. Phosphate fertilizer consumption and predicted demand (In Chinese). Soils,2004,36(2):113—116
- [2] Sims J T, Edwards A C, Schoumans O F, et al. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1):60—71
- [3] 奚振邦. 化肥与生态环境的宏观视角. 磷肥与复肥,2002, 17(6):1—4. Xi Z B. Macroscopic view of fertilizers and ecological study (In Chinese). Phosphate & Compound Fertilizer,2002, 17(6):1—4
- [4] Zvomuya F, Helgason B L, Larney F J, et al. Predicting phosphorus availability from soil-applied composted and non-composted cattle feedlot manure. Journal of Environmental Quality,2006,35: 928—937
- [5] 周宝库,张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究. 植物营养与肥科学报,2005,11(2): 143—147. Zhou B K, Zhang X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science,2005,11(2):143—147
- [6] 杨丽娟,李天来,周崇峻. 塑料大棚内长期施肥对菜田土壤

磷素组成及其含量影响. 水土保持学报,2009,23(5):205—208. Yang L J, Li T L, Zhou C J. Long-term fertilization effect on fraction and content of phosphorus in vegetable soil in plastic film house (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):205—208

- [7] 王艳玲,何园球,吴洪生,等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析. 土壤学报,2010,47(5):880—887. Wang Y L, He Y Q, Wu H S, et al. Environmental risk analysis of accumulated phosphorus in red soil under long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2010,47(5):880—887
- [8] Bowman A, Cole C V. An exploratory method for fraction of organic phosphorus grassland. Soil Science,1978,125(1):49—54
- [9] Bowman A, Cole C V. An exploratory method for fraction of organic phosphorus grassland. Soil Science,1978,125(2):95—102
- [10] 张誉方. 长期施肥条件下红壤磷形态及吸附解析特性研究,昆明:云南农业大学资源与环境学院,2012. Zhang Y F. The forms of phosphorus and the properties of phosphorus adsorption and desorption in long-term location experiment (In Chinese). Kunming: College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University,2012
- [11] Saleque M A, Timsina J, Panaullah G M, et al. Nutrient uptake and apparent balances for rice-wheat sequences:II. Phosphorus. Journal of Plant Nutrition,2006,29(1):157—172
- [12] Singh B R, Krogstad T K, Shivay Y S, et al. Phosphorus fraction and sorption in P-enriched soils of Norway. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2005,73(2/3):245—256
- [13] Sharpley A N, Weld J L, Beegle D B, et al. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the in the United States. Journal of Soil and Water Conservation. 2003,58(3):137—152
- [14] Lee C H, Kang U G, Dopark K, et al. Long-term fertilization effects on rice productivity and nutrient in Korean paddy. Journal of Plant Nutrition,2008,31(8):1496—1506
- [15] Kuo S, Huang B, Bembek R. Effect of long-term phosphorus fertilization and winter cropping on soil phosphorus transformation in less weathered soil. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41(2):116—123
- [16] 程艳丽,程希雷,邹德乙. 棕壤长期定位施肥 15 年后磷素形态及有效性. 土壤通报,2009,40(6):1362—1366. Cheng Y L, Cheng X L, Zou D Y. Long-term located fertilizer experiments after 15-years in brown soil forms and availability of phosphate nutrient (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6):1362—1366
- [17] 卢志红,稽素霞,张美良,等. 长期定位施肥对水稻土磷素形态的影响. 植物营养与肥科学报,2009,15(5):1065—1071. Lu Z H, Ji S X, Zhang M L, et al. Influence of long-term localized fertilization on phosphorus forms in paddy soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1065—1071
- [18] 林德喜,范晓辉,胡锋,等. 长期施肥后简育湿润均腐土中磷素形态特征的研究. 土壤学报,2006,43(4):605—610. Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Forms of phosphorus in haplyudic isohumolsols soils after long-term fertilization (In Chinese). Acta

- Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 605—610
- [19] 韩晓日, 马玲玲, 王晔青, 等. 长期定位施肥对棕壤无机磷形态及剖面分布的影响. 水土保持学报, 2007, 21(4): 51—55, 144. Han X R, Ma L L, Wang Y Q, et al. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus forms and profile distribution in brown soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 51—55, 144
- [20] 丁怀香, 宇万太. 长期施肥对潮棕壤无机磷形态的影响. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 824—829. Ding H X, Yu W T. Impact of long term fertilization on different forms of inorganic phosphorus in aquatic brown-soil (In Chinese). Chinese Journal of Eco-agriculture, 2008, 16(4): 824—829
- [21] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science, 1957, 84: 133—144
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [23] Lee C H, Park C Y, Park K D. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. Chemosphere, 2004, 56: 299—304
- [24] 冯跃华, 张杨珠. 土壤有机磷分级研究研究进展. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2002, 28(3): 259—264. Feng Y H, Zhang Y Z. Research progress on the fractionation of soil organic phosphorus (In Chinese). Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2002, 28(3): 259—264
- [25] 刘文革. 磷肥在石灰性土壤中的形态转化及施用时间及其肥效的影响. 土壤通报, 1993, 24(4): 154—157. Liu W G. Effects of phosphate fertilizer employs on form changes in lime soil and its fertilizer efficiency (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1993, 24(4): 154—157
- [26] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 等. 黑土无机磷形态及其有效性研究. 水土保持学报, 2004, 18(3): 85—89. Wang Y L, Wang J, Zhao L P, et al. Study on forms of inorganic phosphates and their usefulness in black soils in Jilin Province (In Chinese). Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(3): 85—89
- [27] 黄庆海, 赖涛, 吴强, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 63—66. Huang Q H, Lai T, Wu Q, et al. Effect of long-term fertilization on the forms of organic phosphorus in paddy soil derived from red earth (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(1): 63—66
- [28] 李莉, 李絮花, 李秀英, 等. 长期施肥对褐潮土磷素积累、形态转化及其有效性的影响. 土壤肥料, 2005(3): 32—35. Li L, Li X H, Li X Y, et al. Effect of long-term fertilization on accumulation, transformation and availability of phosphorus in Fluvo-aquic soil (In Chinese). Soils and Fertilizers, 2005(3): 32—35
- [29] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响. 水土保持学报, 2005, 19(1): 97—100, 144. Wang B R, Xu M G, Wen S L. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 97—100, 144
- [30] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems. Biology and Fertilizer of Soils, 2007, 44(1): 37—47
- [31] 刘小虎, 邹德乙, 刘新华, 等. 长期轮作施肥对棕壤有机磷组分及其动态变化的影响. 土壤通报, 1999, 30(4): 2. Liu X H, Zou D Y, Liu X H, et al. Effects of long-term crop rotation fertilization on organic phosphorus and development changes of brown soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4): 2
- [32] 赵吴琼, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下灰漠土有机磷组分的变化. 生态环境, 2007, 16(2): 569—572. Zhao W Q, Li J M, Xu M G, et al. Changes of organic phosphorus components in grey desert soil under long-term different fertilization (In Chinese). Ecology and Environment, 2007, 16(2): 569—572

EFFECTS OF LONG-TERM FERTILIZATION ON FORMS AND AVAILABILITY OF PHOSPHORUS IN MOUNTAIN RED SOIL

Shi Jing¹ Zhang Yufang¹ Zhang Naiming^{1†} Zhang Shuxiang²

(1 College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract Based on a long-term (33 years) fertilization experiment, changes in form and content of phosphorus in mountain red soil were investigated. Results show that the long-term P fertilization increased both Total P and readily available P in content in the soil, leading to significant accumulation of inorganic and organic P in the surface soil layer. In soils under P treatment inorganic fraction of P was composed mainly of Fe-P, which accounted for about 50%. Correlation analysis shows that readily available P was significantly related to Fe-P and Al-P with correlation coefficient being 0.908** and 0.706*, respectively, which means that Fe-P and Al-P are the sources of readily available P in the soil. The results also show that Fe-P increased with phosphate fertilization, but Al-P reduced, which somewhat affected the content of soil

available P. Soil organic P in the mountain red soil under long-term fertilization can sorted into four forms, that is, active organic P, moderately active organic P, moderately stable organic P and highly stable organic P. Soil organic P decreased somewhat in the soils without P fertilization and increased in the soils with P fertilization. In the soils with P fertilization the four soil organic P followed a decreasing order of moderately stable organic P > moderately active organic P > highly stable organic P > active organic P, of which the first two accounted for 90% or so. Correlation analysis of organic fractions of P and readily available P shows that readily available P was significantly and positively related to moderately active organic P and moderately stable organic P, with correlation coefficient being 0.861** and 0.840*, respectively, which demonstrates that moderately active organic P and moderately stable organic P are the major sources of readily available P in the soil. It was also found that a higher application rate of P coupled with N, K and barnyard manure can promote transformation of other forms of organic P into moderately active organic P and moderately stable organic P that are easily absorbed by crops.

Key words Long-term fertilization; Mountain Red soil; Organic phosphorous; Inorganic phosphorous

(责任编辑:檀满枝)