

长期施肥后筒育湿润均腐土中磷素形态特征的研究*

林德喜^{1,3} 范晓晖^{2†} 胡 锋¹ 杨林章² 韩晓增⁴

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(3 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(4 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘 要 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分析研究。结果表明:土壤中积累的 Al-P、Ca₂-P 量与施磷量成正相关;只施 NK 能促进植物对 Ca₈-P 的吸收;闭蓄态磷(Oc-P)含量均较低。施磷肥能增加黑土 Fe-P 含量,却未能增加 Ca₁₀-P 含量。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 > Oc-P。施磷能增加土壤有机磷(O-P)的含量,但不能增加土壤有机质含量。土壤有机质含量均有不同程度的下降。本试验黑土中施入 N 112.5 kg hm⁻² a⁻¹ 和 P 20 kg hm⁻² a⁻¹ 能保持土壤中无机磷(FP)平衡。

关键词 长期施肥;黑土;磷素形态

中图分类号 S158 **文献标识码** A

磷是植物生长必须的大量营养元素之一,磷对植物细胞分裂和植物各器官组织的分化发育特别是作物开花结实以及产量和品质方面是不可缺少的元素^[1]。许多土壤中磷是限制植物生长的一个主要因子,它们在多数情况下是通过施肥来得以补充。关于化学磷肥,我国的使用量增长迅速,10 年中(1990~2000 年)磷肥使用量增长 79.3%,平均年增长 6.8%^[2]。我国是世界上少有的高施肥水平的国家,磷肥消费量居世界首位,约占世界磷肥消费量的 25%^[3],高施肥水平会导致低的肥料利用率,并且引起环境的污染。据统计,磷肥当年利用率仅有 10%~20%^[4~6];有关农业生产中持续大量使用化肥对生态环境的影响,与农药一样正受到人们越来越多的关注^[7]。黑土(筒育湿润均腐土)是我国重要的商品粮的生产基地。自 1980 年以来,黑土上大量施用进口高浓度磷肥(磷酸二铵、重过磷酸钙),使化肥氮磷比例发生了很大变化。如 1995 年黑龙江省化肥氮磷比例为 1:1,致使有相当一部分土壤大量施用过量的磷肥,造成肥料利用率下降和化肥资源的浪费^[9]。黑土主要分布于东北松嫩平原上,总

面积约 5 × 10⁶ hm²,其中耕地面积为 4 × 10⁶ hm²,以盛产粮、豆而著名。试验地为典型黑土农田,黑土层厚 30~60 cm,发育自第四纪黄土状母质。

对黑土理化性状的研究已有较多报道^[8~14],但对黑土在长期定位不同施肥处理下其磷素形态的变化状况少有报道。因此,深入探讨作为中国主要农业产区之一的黑土其磷素形态的变化规律,对于土壤肥力的培育,促进区域农业持续发展有着重要的生态意义和社会意义。无机磷(FP)分级测定方法有多种形式^[15],1957 年 Chang 和 Jackson^[16]提出土壤 FP 系统的分级测定方法,后来 Bowman 和 Cole^[17]于 1978 年首先提出土壤有机磷(O-P)分组法,再后出现了 Hedley 等^[18]1982 年、Guppy 等^[19]2000 年的磷素分级测定方法。

顾益初和蒋柏藩 1990 年^[20]针对石灰性土壤磷酸钙盐所占比重较大的特点,在 Chang 和 Jackson 的基础上提出了新的土壤 FP 分级体系,其特点是:(1)将土壤 FP 部分的磷酸钙盐分为三级,即 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 型;(2)用混合型浸提剂提取磷酸铁盐。该法是目前石灰性土壤 FP 分组的最常用的测

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413-3)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB121108)和国家自然科学基金重大项目(30390080)资助

† 通讯作者

作者简介:林德喜(1964~),男,福建省莆田人,副教授,博士。主要从事土壤生态和土壤氮磷素教学与研究

收稿日期:2005-04-11;收到修改稿日期:2005-12-26

定方法。该分级方法能很好地地将各形态的无机磷分离开,可更好地反应石灰性土壤 F-P 状况。

1 材料与方法

1.1 试验设计

长期定位试验地设在中国科学院黑龙江海伦农

业生态实验站内,土壤基本理化性状如表 1。试验设 7 个处理:CK(对照)、 NP_2K 、 NPK_2 、 NP 、 NK 、 PK 、 NPK 。其肥料用量为(kg hm^{-2}): N 112.5、 P 20、 K 50; P_2 和 K_2 分别为 2 倍 P 和 2 倍 K ,试验小区采用随机排列,重复 4 次,小区面积为 63 m^2 ($15 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$)。

1.2 分析方法

供试土壤样品有效磷采用 Olsen 法。测定 6 种

表 1 试验地土壤(0~20 cm)基本理化性状(1990 年)

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil in the experiment (0~20 cm) (1990)

有机质 OM(g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	全磷 Total P (g kg^{-1})	全钾 Total K (g kg^{-1})	水解性氮 Hydrolysable N (mg kg^{-1})	有效磷 Available P (mg kg^{-1})	速率钾 Available K (mg kg^{-1})	pH (H_2O)
48.2	2.2	0.7	25.2	239.7	17.9	190.8	7.02

形态 F-P 分组采用顾益初和蒋柏藩 1990 年提出的石灰性土壤 F-P 分级方法: $0.25 \text{ mol L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 浸提 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (磷酸二钙型), $1 \text{ mol L}^{-1} \text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提 $\text{Ca}_8\text{-P}$ (磷酸八钙型), $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{NH}_4\text{F}$ 浸提 Al-P (磷酸铝型), $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{NaOH} \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$ 浸提 Fe-P (磷酸铁型), 0.3 mol L^{-1} 柠檬酸三钠- Na_2SO_4 - NaOH 浸提 Oc-P (闭蓄态磷), $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ 浸提 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (磷灰石)。统计分析用 SPSS 10.0 进行。

2 结果与分析

2.1 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Oc-P 的变化

图 1 表示不同施肥处理 15 年后,黑土中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 、 Oc-P 的变化。 Al-P 作为植物的一种缓效磷源^[22],在不同处理中,其从高到低的顺序如下: $\text{NP}_2\text{K} > \text{PK} > \text{NPK}_2 > \text{NPK} > \text{NP} > \text{NK} > \text{CK}$ 。施磷处理 Al-P 含量均高于对照。施磷与对照 CK 的差异

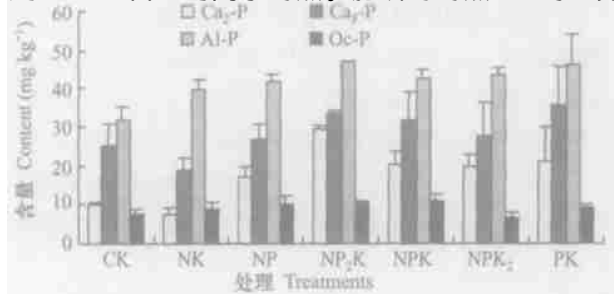


图 1 不同施肥方式下 15 年后黑土中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Oc-P 的特征

Fig. 1 Changes in $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P , and Oc-P in Hapl-Udic Isohurmsols after a 15-year fertilization experiment

达显著水平($p < 0.05$)。 NP_2K 处理与 NK 处理的差异性也达到显著水平($p < 0.05$),说明长期施磷肥能增加土壤中 Al-P 含量。而 N K 处理的土壤中 Al-P 含量较对照 CK 的高,差异达到显著水平。从图 1 中还可以看出,除了 CK 和 NK 处理外,其他施肥处理 Al-P 含量均高于 40 mg kg^{-1} ,表明施入土壤中的水溶性磷会向 Al-P 转化^[23]。

作为植物的另一种缓效磷源 $\text{Ca}_8\text{-P}$ ^[22],其含量从高到低的顺序为: $\text{PK} > \text{NP}_2\text{K} > \text{NPK} > \text{NPK}_2 > \text{NP} > \text{CK} > \text{NK}$,表明连续施磷肥能增加土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量;而且 PK 处理中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量明显高于其它处理。经相关性分析,只有 NP_2K 、 NPK 和 PK 与 NK 处理差异性达显著水平($p < 0.05$)。说明只施 NK 能促进植物对 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的吸收,该处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量较低。 NK 、 NP 、 NPK_2 和 CK 各处理之间差异不显著。

$\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量从高到低的顺序如下: $\text{NP}_2\text{K} > \text{PK} > \text{NPK} > \text{NPK}_2 > \text{NP} > \text{CK} > \text{NK}$,表明连续施磷肥能增加土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量,施磷肥量最多的处理 NP_2K 最高。相关分析表明, NP_2K 处理其 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量与其它处理相关性达显著水平。 NP 、 PK 、 NPK 、 NPK_2 的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量与 CK 和 NK 差异性达显著水平,但这 4 种处理之间没有显著性差异。 NK 和 CK 之间也无显著性差异,这表明在黑土中只施 NK 处理对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量的影响与对照 CK 的相当。

闭蓄态磷(Oc-P)是以氧化铁胶膜包被的磷酸盐,其溶解度小,在没有除去其外层铁质包膜前,很难发挥其效用^[22]。各处理中 Oc-P 含量从高到低的顺序如下: $\text{NPK} > \text{NP}_2\text{K} > \text{NP} > \text{PK} > \text{NK} > \text{CK} > \text{NPK}_2$ 。几种施肥处理中, Oc-P 含量均较低,含量最多的

NPK处理也仅有 10.9 mg kg^{-1} , 最低的 NPK_2 处理为 6.7 mg kg^{-1} 。经相关性分析, 只有 NPK 处理与 CK 以及 NPK 与 NPK_2 之间差异达显著水平, 其它处理之间差异均不显著。

2.2 Al-P、Fe-P 和 Ca_{10} -P 的变化

图 2 表明各处理中除了 NK 处理为 Ca_{10} -P > Fe-P > Al-P, 其它处理均为 Fe-P > Ca_{10} -P > Al-P, 且 Ca_{10} -P 和 Fe-P 的含量明显高于 Al-P 含量。但是 Ca_{10} -P 和 Fe-P 的含量在不同处理间差异不大。不同施肥处理土壤中 Fe-P 含量的大小顺序为: $\text{NP} > \text{NPK} > \text{NP}_2\text{K} > \text{PK} > \text{NPK}_2 > \text{CK} > \text{NK}$, 经相关分析, NP 处理和 NPK 处理高于 NK 处理, 且差异达显著水平, 其它处理间差异不显著; Ca_{10} -P 含量在各处理间大小顺序为: $\text{NPK} > \text{NP} > \text{PK} > \text{NK} > \text{CK} > \text{NP}_2\text{K} > \text{NPK}_2$, 但相关分析表明各处理间差异均不显著。表明作为植物迟效磷源的磷灰石矿物, 在相当长的时间内不可能被植物吸收的, 施入土壤中的磷肥也不可能在短期内转化为磷灰石^[22]。

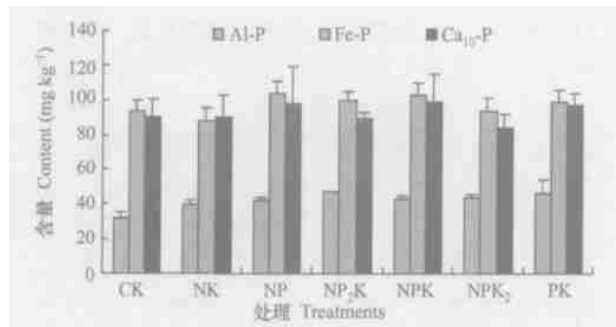


图 2 不同施肥方式下 15 年后黑土中 Al-P、Fe-P 和 Ca_{10} -P 的特征

Fig. 2 Changes in Ca_{10} -P, Al-P, and Fe-P in Hapli-Udic Isohumusols after a 15-year fertilization experiment

2.3 全磷(TP)、无机磷(F-P)和有机磷(O-P)的变化

土壤全磷(TP)标示土壤磷素的总储量, 是衡量磷素营养水平的参考指标^[23]。图 3 为黑土 TP、F-P 和 O-P 的含量。从中可以看出, 不同施肥处理 15 年后土壤 $\text{O-P} > \text{F-P}$ 。连续施磷肥能增加土壤中 TP 含量^[1, 2, 24], 各处理 TP 次序为: $\text{NP}_2\text{K} > \text{PK} > \text{NPK}_2 > \text{NPK} > \text{NP} > \text{NK} > \text{CK}$ 。经相关分析, 5 种施磷处理的 TP 均与对照(CK)和 NK 处理之间差异达显著水平 ($p < 0.05$), 而 5 种施磷处理之间差异不显著 ($p > 0.05$)。CK 和 NK 处理之间差异也不显著。

施磷肥处理 F-P 含量较对照和只施 NK 的高, 其大小顺序为: $\text{NP}_2\text{K} > \text{PK} > \text{NPK} > \text{NP} > \text{NPK}_2 > \text{CK} > \text{NK}$ 。相关分析表明, 5 种施磷 NP_2K 、PK、NPK、NP

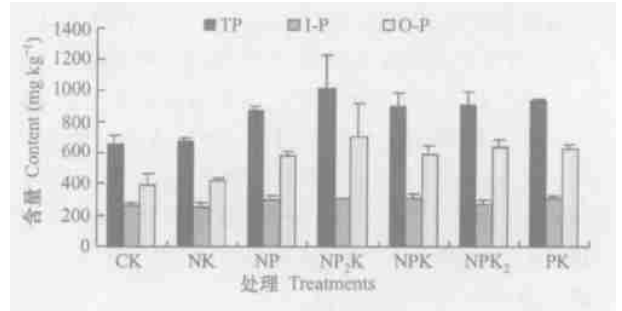


图 3 不同施肥方式下 15 年后黑土中 TP、F-P 和 O-P 的特征
Fig. 3 Changes in total P(TP), inorganic P(F-P) and organic P(O-P) in Hapli-Udic Isohumusols after a 15-year fertilization experiment

和 NPK_2 处理彼此之间差异不显著 ($p > 0.05$)。而 CK、NK、NP 和 NPK_2 彼此之间也无显著性差异。只有 NP_2K 、NPK 和 PK 处理与 CK 和 NK 处理差异性达显著水平 ($p < 0.05$)。O-P 含量大小次序为: $\text{NP}_2\text{K} > \text{NPK}_2 > \text{PK} > \text{NPK} > \text{NP} > \text{NK} > \text{CK}$ 。相关分析表明, 5 种施磷处理中的 O-P 含量与对照(CK)之间差异达显著水平 ($p < 0.05$), 但 NK、NP 以及 NPK 处理彼此间差异不显著 ($p > 0.05$)。NK 和 CK 之间差异也不显著。这表明长期施用磷肥能使土壤中的全磷、无机磷、有机磷有不同程度的累积, 有效磷状况也有所提高, 与其它研究结果一致^[25~32]。

2.4 各级磷占全磷的百分比

图 4 表示不同施肥方式 15 年后, 土壤中 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、 Ca_{10} -P 占 TP 的百分数的变化。从图 4 可看出, 不同施肥方式下黑土中的钙磷主要以 Ca_{10} -P 为主, 占 TP 的比例远大于 Ca_2 -P、 Ca_8 -P 占 TP 的百分比。不同施肥方式下 Ca_2 -P 占全磷的百分比大小顺序为: $\text{NP}_2\text{K} > \text{NPK} > \text{PK} > \text{NPK}_2 > \text{NP} > \text{CK} > \text{NK}$, 最大值为 NP_2K 处理(占 2.89%), 最小值为 NK 处理占(1.1%), 说明

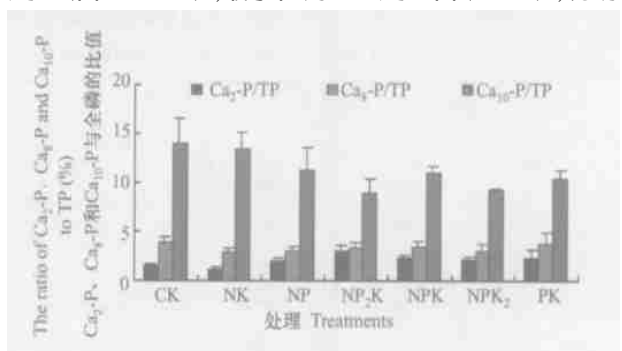


图 4 不同施肥方式下 15 年后黑土中 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、 Ca_{10} -P 与全磷的比值

Fig. 4 Changes in ratios of Ca_2 -P/TP, Ca_8 -P/TP, and Ca_{10} -P/TP in Hapli-Udic Isohumusols after a 15-year fertilization experiment

长期施磷肥能提高黑土中 $Ca_2\text{-P}$ 占全磷的百分比。 $Ca_8\text{-P}$ 占全磷的百分比变化很小,均在 5% 左右。

图 5 表示不同施肥方式下 15 年后黑土中 $Al\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 、 $Oc\text{-P}$ 占 TP 的百分比。表明不同施肥方式下黑土中的 $Al\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 、 $Oc\text{-P}$ 占 TP 的比例顺序为 $Fe\text{-P} > Al\text{-P} > Oc\text{-P}$ 。施磷黑土中 $Fe\text{-P}$ 占全磷的比均较对照 CK 处理的低 4.44% ~ 8.88%,说明在黑土中施磷肥不能提高土壤中的 $Fe\text{-P}$ 占全磷的比例。

不同施肥方式下黑土中 $Oc\text{-P}$ 占全磷的比例很小,仅在 1.29% ~ 0.73% 之间,大小顺序为: $NK > NPK > CK > NP > NP_2K > PK > NPK_2$,其中最大值为 NPK 处理(占 1.29%),与对照 CK (1.18%) 相比仅差 0.11%。

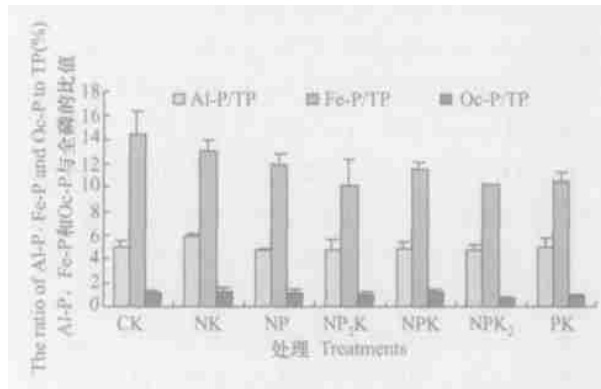


图 5 不同施肥方式下 15 年后黑土中 $Al\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 、 $Oc\text{-P}$ 与全磷的比值

Fig. 5 Changes in ratio of $Al\text{-P}/TP$, $Fe\text{-P}/TP$, and $Oc\text{-P}/TP$ in Hapl-Udic Isohumusols after a 15-year fertilization experiment

2.5 黑土中 $O\text{-P}/TP$ 和 $I\text{-P}/TP$ 的变化

图 6 表示不同施肥方式下 15 年后,黑土中 $O\text{-P}/TP$ 、 $I\text{-P}/TP$ 比值的变化。所有处理中, $O\text{-P}/TP$ 的比值在 65% ~ 72% 之间,其顺序为: $NPK_2 > NP_2K > PK$

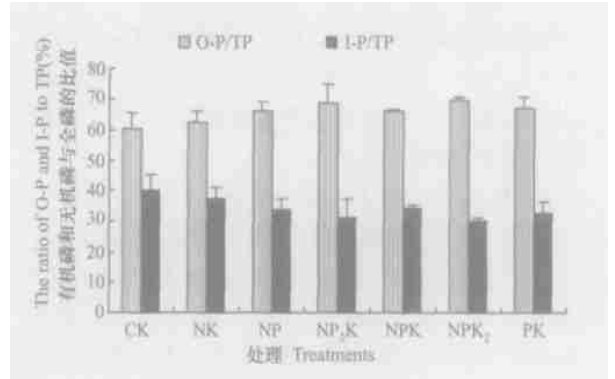


图 6 不同施肥方式下 15 年后黑土中 $O\text{-P}$ 和 $I\text{-P}$ 与全磷的比值

Fig. 6 Changes in ratios of organic-P/TP and inorganic-P/TP in Hapl-Udic Isohumusols after a 15-year fertilization experiment

$> NP > NPK > NK > CK$,表明施无机磷肥会提高黑土中 $O\text{-P}/TP$ 的比; $I\text{-P}/TP$ 的比值均低于 40%,其顺序为: $CK > NK > NPK > NP > PK > NP_2K > NPK_2$ 。

2.6 不同施肥处理黑土的有机质、速效磷和 $Ca_2\text{-P}$ 的变化

表 2 表示不同施肥处理黑土的有机质、有效磷和 $Ca_2\text{-P}$ 的含量。从表 2 可以看出,不同施肥处理 15 年后,与本底值相比,除 NPK 处理上升 0.4%,其他处理土壤有机质含量均存在不同程度的下降。说明施磷肥能增加土壤中有有机磷的含量,但未能增加土壤有机质。对于土壤有效磷,施磷肥后均较本底值有不同程度的提高,除 NPK 处理下降了 9.5% 外,增幅最大的是 NP_2K 和 PK 处理,分别增加 53.6% 和 28.5%,表明施磷肥大多数能增加黑土中有效磷的含量。从表 2 中还可以看出, $Ca_2\text{-P}$ 的含量基本上与速效磷的含量相当。土壤 pH 值在不同施肥处理之间基本上相近,pH 值均在 6.13 ~ 6.38 之间。

表 2 不同施肥处理黑土的有机质、速效磷和 $Ca_2\text{-P}$ 的变化

Table 2 Changes in OM, available P, $Ca_2\text{-P}$ and pH in Hapl-Udic Isohumusols in different treatments

处理 Treatments	有机质			速效磷			$Ca_2\text{-P}$ ($mg\ kg^{-1}$)	pH
	OM ($g\ kg^{-1}$)		A % ¹⁾	Available P ($mg\ kg^{-1}$)		B % ²⁾		
	1990 年	2004 年		1990 年	2004 年			
CK	48.2	47.3	- 1.9	17.9	10.4	- 41.9	10.2	6.38
NK	48.2	48.0	- 0.4	17.9	10.0	- 44.1	7.4	6.31
NP	48.2	47.8	- 0.8	17.9	18.9	5.6	17.4	6.35
NP_2K	48.2	47.4	- 1.7	17.9	27.5	53.6	29.5	6.23
NPK	48.2	48.4	0.4	17.9	16.2	- 9.5	20.5	6.21
NPK_2	48.2	47.4	- 1.7	17.9	19.4	8.4	19.7	6.13
PK	48.2	47.2	- 2.1	17.9	23.0	28.5	21.1	6.37

1) A: (2004 年的 OM - 1990 年的 OM) / 1990 年的 OM $\times 100$; 2) B: (2004 年的速效磷 - 1990 年的速效磷) / 1990 年的速效磷 $\times 100$

3 结 论

各处理土壤中的 Al-P、Ca₂-P 量与施磷数量呈正相关,施氮肥能促进植物对 Ca₈-P 的吸收,施磷能增加黑土中的 Fe-P 含量,但对 Ca₁₀-P 含量没有显著影响。黑土中无机态磷的含量大小顺序为:Fe-P > Ca₁₀-P > Al-P > Ca₈-P > Ca₂-P > Oc-P。施磷肥能增加土壤有机磷含量和有效磷数量,但未能增加土壤有机质含量,土壤有机质含量呈下降趋势。黑土上施入 N 112.5 kg hm⁻² a⁻¹、P 20 kg hm⁻² a⁻¹能保持土壤中无机磷的平衡。

参 考 文 献

- [1] 郑春荣,陈怀满,周东美,等. 土壤中积累态磷的化学耗竭. 应用生态学报, 2002, 13(5):559~563. Zheng C R, Chen H M, Zhou D M, *et al.* Chemical depletion of cumulative phosphorus in soils (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5):559~563
- [2] 王光龙,谷守玉,许秀成. 我国化学肥料市场的发展趋势. 化工技术经济, 2003, 21(10):19~22. Wang G L, Gu S Y, Xu X C. Development tendency of chemical fertilizer market in China (In Chinese). Chemical Technology and Economics, 2003, 21(10):19~22
- [3] 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 mineral resources and production and consumption of phosphate fertilizer in China. Phosphate fertilizer consumption and demand predicted (In Chinese). Soils, 2004, 36(2):113~116
- [4] Trenkel M F. Controlled-release and Stabilized Fertilizer in Agriculture. International Fertilizer Industry Association, 1997
- [5] 鲁如坤. 土壤植物营养学原理和施肥. 北京:化学工业出版社, 1998. Lu R K. The Principle and Fertilization of Soil-Plant Nutrition (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 1998
- [6] 林葆,金继运,葛诚. 必须十分重视用好肥料. 磷肥与复肥, 1997, 12(3):1~4. Lin B, Jin J Y, Ge C. Better using fertilizer must be paid more attention on (In Chinese). Phosphorus Fertilizer and Complex Fertilizer, 1997, 12(3):1~4
- [7] 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. The macroscopic visual angle of chemical fertilizer and ecological environment (In Chinese). Phosphorus Fertilizer and Complex Fertilizer, 2002, 17(6):1~4
- [8] 郑铁军. 黑土长期施肥对土壤磷的影响. 土壤肥料, 1998(1):39~41. Zheng T J. The effect of long-term fertilization on black soil phosphorus (In Chinese). Soil and Fertilizer, 1998(1):39~41
- [9] 张瑞英. 黑龙江省农业植物新品种保护的现状、问题及对策. 黑龙江农业科学, 2004(2):27~29. Zhang R Y. The Countermeasure, issue and status of protecting new variety of plant in Heilongjiang Province (In Chinese). Heilongjiang Agricultural Science, 2004(2):27~29
- [10] 王建国,刘鸿翔,王守宇,等. 黑土农田养分平衡与养分消长规律. 土壤学报, 2003, 40(2):246~251. Wang J G, Liu H X, Wang S Y, *et al.* Balance, increase and loss of nutrients in black soils of agricultural fields (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2):246~251
- [11] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 黑土区水田化肥氮去向的研究. 应用生态学报, 2003, 14(11):1859~1862. Han X Z, Wang S Y, Song C Y, *et al.* Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11):1859~1862
- [12] 王建国,何喜云,王守宇,等. 典型黑土农田化肥氮素的优化管理. 土壤, 2000, 32(5):266~273. Wang J G, He X Y, Wang S Y, *et al.* Optimization management of chemical nitrogen of black soil in paddy field (In Chinese). Soils, 2000, 32(5):266~273
- [13] 王建国,刘鸿翔. 黑土农田养分供应能力的变化. 土壤学报, 1997, 34(3):295~231. Wang J G, Liu H X. Study on nutrient supply capacity of black soil and its change (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3):295~231
- [14] 刘建玲,张风华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展. 河北农业大学学报, 2000, 23(3):36~45. Liu J L, Zhang F H. The progress of phosphorus transformation in soil and its influencing factors (In Chinese). Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(3):36~45
- [15] 来璐,郝明德,彭令发. 土壤磷素研究进展. 水土保持研究, 2003, 10(3):65~67. Lai L, Hao M D, Peng L F. Advanced research in soil phosphorus (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(3):65~67
- [16] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci., 1957, 84:133~144
- [17] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soil. Soil Sci., 1978, 125:95~101
- [18] Hedley M J, Steward J W B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practice and by laboratory incubations. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46:970~976
- [19] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, *et al.* A simplified sequential, phosphorus fractionation method. Communication in Soil Science & Plant Analysis, 2000, 31(11):1981~1991
- [20] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的测定方法. 土壤, 1990, 22(2):101~102. Gu Y C, Jiang B F. The measuring method of inorganic phosphorus in calcareous soil (In Chinese). Soils, 1990, 22(2):101~102
- [21] 顾益初,钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性. 土壤, 1997, 29(1):13~17. Gu Y C, Qin S W. The availability, transformation and accumulation of phosphorus in fluvo-aquic soil after long-term applying phosphate fertilizers (In Chinese). Soils, 1997, 29(1):13~17
- [22] Jiang B F, Gu Y C, Li A. Transformation of phosphate fertilizers with different solubility in calcareous. Pedosphere, 1993, 3(2):

- 145 ~ 152
- [23] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化. 磷肥产量效应及土壤总磷库和无机磷库的变化. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360 ~ 364. Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool, effect of P fertilizer on crop yield and dynamics of soil total P and inorganic P in a long-term fertilizing experimental soils of wheat-maize rotation (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 360 ~ 364
- [24] Bolland M D A, Weatherley A J, Gilkes R J. The long-term residual value of rock phosphate and superphosphate fertilizers for various species under field conditions. Fertilizer Research, 1989, 20(2): 89 ~ 100
- [25] 林葆. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化. 北京: 中国农业出版社, 1996. 1 ~ 40. Lin B. The Variation of Soil Fertility and Crop Yield on Long-term Fertilization Experiments (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1996. 1 ~ 40
- [26] Mercik S, Nemeth K. Effects of 60-year N, P, K and Ca fertilization on EUP-nutrient fractions in the soil and yields of rye and potato crops. Plant and Soil, 1985, 83(1): 151 ~ 159
- [27] 林继雄, 林葆, 艾卫. 磷肥后效与利用率的定位试验. 土壤肥料, 1995(6): 1 ~ 5. Lin J X, Lin B, Ai W. The latter effect of phosphorus fertilizer and its utilization efficiency ratio in the fixed experiments (In Chinese). Soil and Fertilizer, 1995(6): 1 ~ 5
- [28] Dai K H, David M B, Vance G F, *et al.* Characterization of phosphorus in a spruce-fir Spodosol by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 1943 ~ 1950
- [29] Cooper P J M, Leakey R R B, Rao M R, *et al.* Agroforestry and the mitigation of land degradation in the humid and sub-humid tropics of Africa. Exp. Agric., 1996, 32: 235 ~ 290
- [30] Cade-Menun B J, Preston C M. A comparison of soil extraction procedures for ³¹P NMR spectroscopy. Soil Sci., 1996, 161: 770 ~ 785
- [31] Turrión M B, Glaser B, Solomon D N A, *et al.* Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. Biol. Fertil. Soils, 2000, 31: 134 ~ 142
- [32] Richardson A E. Prospect for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. Aust. J. Plant Physiol., 2001, 50: 897 ~ 906

FORMS OF PHOSPHORUS IN HAPLI-UDIC ISOHUMOSOLS SOILS AFTER LONG-TERM FERTILIZATION

Lin Dexi^{1,3} Fan Xiaohui^{2†} Hu Feng¹ Yang Linzhang² Han Xiaozeng⁴

(1 College of Natural Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(4 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Changchun 130012, China)

Abstract Change in forms of phosphorus in a typical Hapli-Udic Isohumosols (black soil) under a 15-year long-term fertilization experiment was studied. Results show that accumulation of soil Al-P and Ca₂-P was positively related to P application rate; application of NK stimulated the plant to absorb Ca₈-P; and the concentration of Occluded-P (Oc-P) was decreased. P application did increase the content of Fe-P in the black soil, but did not the content of Ca₁₀-P. In terms of content in the black soil, the various forms of inorganic P were in the order of Fe-P > Ca₁₀-P > Al-P > Ca₈-P > Ca₂-P > O-P. P fertilizer application increased organic P in the soil, but it did not increase the content of organic matter. Instead, the content of organic matter dropped to a varying degree in different treatments. Application of N 112.5 kg hm⁻² a⁻¹ and P 20 kg hm⁻² a⁻¹ could keep P-P in balance in the soil.

Key words Long-term fertilization; Hapli-Udic Isohumosol; Forms of phosphorus