

# 土壤磷素研究进展

来 璐<sup>1,2</sup>, 郝明德<sup>1</sup>, 彭令发<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院 水土保持研究所; 2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)  
水利部

摘 要: 从土壤磷素分级研究、土壤磷各组分所占的比例、土壤磷的植物有效性、长期施肥对土壤磷的影响、不同轮作方式对土壤磷的影响几个方面综述了土壤磷素研究进展及现状, 以期综合已有的经验和成果, 促进土壤磷素今后的研究。

关键词: 土壤磷; 研究进展; 分级

中图分类号: S 158.3 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003)01-0065-03

## Development of Researches on Soil Phosphorus

LAI Lu<sup>1,2</sup>, HAO Ming-de<sup>1</sup>, PENG Ling-fa<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** The study is mainly on the development of researches about soil P fractions, the proportion of each fraction in total soil P, and the availability of P, the effect of long-term fertilization on soil P and different rotation on P. The purpose is to sum up the results of the study and accelerate the study of soil phosphorus.

**Key words:** soil P; development of researches; soil fractions

磷是植物生长发育的必需营养元素之一, 参与组成植物体内许多重要化合物, 是植物体生长代谢过程不可缺少的。植物所利用的磷素, 主要来源于土壤, 土壤中磷的总含量在 0.02% ~ 0.2% ( $P_2O_5$  0.05% ~ 0.46%), 与其它大量营养元素相比较低。据全国土壤普查资料估算, 我国有 2/3 的土壤缺磷<sup>[1]</sup>。缺磷的主要原因是由于土壤有效磷含量不足, 施入土壤的大量磷素在土壤中以无效态储备起来。磷肥的当季利用率一般只有 10% ~ 25%<sup>[2]</sup>, 不能满足一般作物的生理需求。土壤磷素的研究 20 世纪七八十年代主要侧重于测定技术方面, 90 年代以来, 对磷的形态、剖面分布及固定、解吸机理方面的研究全面展开, 有机磷方面的研究也有所发展。

### 1 土壤磷分级研究进展

#### 1.1 土壤有机磷分级研究

Dean 在 1938 年指出, 磷的化合物可大体上分为某些等级。Bowman-Cole 于 1978 年首先提出的土壤有机磷分组法是目前关于土壤有机磷组分与土壤供磷能力关系的一种常用方法, 为人们全面认识土壤磷素提供依据, Bowman-Cole 把土壤有机磷分为四组: (1) 活性有机磷, 指能溶于 0.5 M  $NaHCO_3$  而易矿化易为植物吸收的组分。(2) 中度活性有机磷, 指能溶于 1 M  $H_2SO_4$  而易矿化又较易为植物吸收的组

分。(3) 中稳性有机磷, 指能溶于 0.5 M  $NaOH$ , 在  $pH=1-1.5$  条件下而不发生沉淀而较难矿化又较难为植物吸收的组分。(4) 高稳性有机磷, 指能溶于 0.5 M  $NaOH$ , 在  $pH=1-1.5$  条件下产生沉淀而很难矿化又很难为植物吸收的组分。贺铁、李世俊、任怡等对 Bowman-Cole 法的基本原理和操作要点进行了探讨, 确认了该法的可靠性和可行性。熊恒等人就 Bowman-Cole 法应用在酸性水稻土上存在一些问题, 对其进行了一些改进, 主要改进点为: A、对土样用氯仿进行预处理。B、中稳性有机磷的浸提液改为 0.1 M  $NaOH$ 。C、对土样采用超声波处理以缩短震荡时间。D、采用先碱后酸的浸提顺序。改进法比 Bowman-Cole 法提高了活性有机磷的数量, 增加了稳定性应有的数量。范业宽等人在 Bowman-Cole 法提取石灰性土壤稳定性与中度有机磷方法进行的改进点: (1) 采用先碱后酸的浸提顺序。(2) 超声液处理土壤。(3) 中稳性有机磷的浸提液改为 0.5 M  $NaOH$ 。

#### 1.2 土壤无机磷分级研究

土壤无机磷分级的研究, 始于本世纪 30 年代, 1957 年张守敬等提出土壤无机磷系统的分级测定方法, 将土壤无机磷分成以下几种主要形态:  $Al-P$  (磷酸铝盐)、 $Fe-P$  (磷酸铁盐)、 $Ca-P$  (磷酸钙盐) 和  $O-P$  (闭蓄态磷)。这个方法的

\* 收稿日期: 2002-11-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-413); 国家“十五”科技攻关项目 (2001BA508B18)。

作者简介: 来 璐 (1973-), 女, 陕西兴平人, 硕士, 主要从事土壤肥力与生态环境建设方面的研究。

提出对推进的土壤化学领域的研究有很大的作用,尤其适用于中性和酸性土壤。Syers 等人(1972年)对张守敬分级方法提出修订方法,将石灰性土壤中的磷酸铁和磷酸铝合为一级。苏联的根兹布勒革于1971年在张守敬等方法的基础上,提出了其分级方法,按照无机磷溶解度大小、结晶度及对作物有效性的差异,将土壤无机磷分为五级,即  $\text{Ca}-\text{P}$ 、 $\text{Ca}-\text{P}$ 、 $\text{Ca}-\text{P}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}$  及  $\text{Al}-\text{P}$ , 主要用  $1\%(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4+0.25\%(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  浸提  $\text{Ca}-\text{P}$ ;  $0.5\text{NHOAC}+0.25\%(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  浸提  $\text{Ca}^-\text{P}$ ;  $0.5\text{N NH}_4\text{F}(\text{pH}8.5)$  浸提  $\text{Al}-\text{P}$ ;  $0.1\text{NaOH}$  浸提  $\text{Fe}-\text{P}$ ,  $0.5\text{N H}_2\text{SO}_4$  浸提  $\text{Ca}-\text{P}$ 。该法适用于石灰性土壤。安卫红、张淑民等人应用其分级方法在北京地区石灰性土壤上进行研究,认为该法是石灰性土壤无机磷分级较为适用的方法,较 Chang S. C. - Jackson 法及其系列修改法优越。

蒋柏藩、顾益初1990年针对石灰性土壤磷酸钙盐所占比重较大的特点,提出了新的土壤无机磷分级体系,其特点是:(1)将土壤无机磷部分的磷酸钙盐分为三级,即  $\text{Ca}_2-\text{P}$ 、 $\text{Ca}_8-\text{P}$  和  $\text{Ca}_{10}-\text{P}$  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无机磷分组的最常用的测定方法。

Hedley(1982)年提出一种新的磷素分级方法,将土壤磷素主要分为7大类,其中一部分又区分为有机磷和无机磷两部分(1)树脂交换态磷:是用阳离子交换树脂代出的磷,这一部分磷是指与土壤溶液磷处于平衡状态的土壤固相无机磷,是充分有效的,可补充土壤溶液磷,这部分磷构成了土壤活性磷(Labile P)的大部分。(2)  $\text{NaHCO}_3$  提取态磷:这部分磷包括无机态  $\text{P}_i$  和有机态  $\text{P}_o$  两部分,无机部分主要是吸附在土壤表面的磷,这一部分磷也是有效的;有机部分主要是可溶性的有机磷,它易于矿化。(3)微生物细胞磷:主要是溶解的微生物细胞磷。(4)  $\text{NaOH}$  溶性磷:也包括无机和有机两部分。(5)土壤团聚体内磷。(6)磷灰石型磷。(7)残留磷(Residual-p)。

## 2 土壤磷各组分所占的比例

土壤中的含磷物质就其化合物属性而言可分为有机磷化合物和无机磷化合物两大类。土壤中有有机磷含量在表土中占全磷量的20%~80%,在灰化土中最低只有4%,在某些腐殖质含量较高的土壤中可占到90%,在未开垦的泥炭土中,最高可达全磷量的95%。土壤无机磷对大多数耕地而言,占土壤总磷量的60%~80%,是植物所需磷的主要来源,石灰性土壤以无机磷为主,占全磷量的70%左右<sup>[3]</sup>。

采用蒋柏藩、顾益初无机磷分组法<sup>[4]</sup>,石灰性土壤无机磷以  $\text{Ca}-\text{P}$  为主,其中  $\text{Ca}_{10}-\text{P}$  占绝对优势<sup>[5,6]</sup>,对于酸性土壤而言,无机磷以  $\text{Fe}-\text{P}$ 、 $\text{O}-\text{P}$  为主体,其次是  $\text{Al}-\text{P}$  和  $\text{Ca}_{10}-\text{P}$ ,  $\text{Ca}_8-\text{P}$  只有在土壤无机磷达到一定强度时才存在<sup>[7]</sup>。有机磷各组分比例随土壤剖面层次不同发生变化。王旭东(1997)研究表明,土中随剖面深度增大,活性、中活性有机磷数量以及占有有机磷总量比例逐渐减少,中稳性有机磷数量有减少趋势,所占比例明显增加,高稳性有机磷数量变化不大,所占比例明显增加<sup>[8]</sup>。但目前这方面的研究还不够

深入。

## 3 土壤磷的植物有效性

### 3.1 无机磷

应用不同的分组方法,在不同地区所得出的研究结果是有差异的。采用苏联根兹布勒革-列别捷夫法的研究结果表明, $\text{Al}-\text{P}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}$  是作物吸收的主要磷源, $\text{Ca}-\text{P}$  虽有效性好,但其含量较低, $\text{Ca}-\text{P}$  是土壤的贮备磷源, $\text{Ca}-\text{P}$  对作物无效<sup>[9]</sup>。应用蒋柏藩、顾益初分组法,对石灰性土壤无机磷有效性进行研究,目前一般认为  $\text{Ca}_2-\text{P}$  是作物的有效磷源, $\text{Al}-\text{P}$ 、 $\text{Ca}_8-\text{P}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}$  是缓效磷源, $\text{O}-\text{P}$  在理论上不能作为作物的有效磷源<sup>[10]</sup>。沈善敏(1997)报道,土壤无机磷组分中  $\text{Ca}_2-\text{P}$ 、 $\text{Al}-\text{P}$  对植物是高度有效的, $\text{Ca}_8-\text{P}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}$  也有相当高的有效性, $\text{Ca}_{10}-\text{P}$  和  $\text{O}-\text{P}$  有效性很低,是植物的潜在磷源, $\text{O}-\text{P}$  在酸性土壤上通过淹水还原的活化作用,也可以显著提高其有效性。

### 3.2 有机磷

有机磷对植物的有效性的研究结果是有矛盾的。一般认为,有机磷大多在矿化为无机磷以后,或者被根系附近的磷酸酶脱磷酸后,才对作物有效,但通过对土壤溶液中有有机磷的研究,许多研究者已经证明,通常发现的土壤中的有机磷化合物,是可以被植物所吸收利用的<sup>[11]</sup>。由于有机磷可以矿化成为速效磷,其供磷作用还是不容忽视的,根据 Bowman-Cole 有机磷分组法进行有机磷分组,其各组分有效性:活性有机磷>中等活性有机磷>中等稳定性有机磷>高度稳定性有机磷,活性、中等活性有机磷含量与速效磷呈显著正相关,中稳性、高稳性有机磷与速效磷不相关。

## 4 长期施肥对土壤磷的影响

### 4.1 长期施肥对土壤全磷及磷的植物有效性的影响

长期施用磷肥、氮磷钾或与有机肥料混施均有不同程度的全磷、无机磷、有机磷的累积,有效磷状况也有所提高<sup>[12,13]</sup>。Merik 等(1985)<sup>[14]</sup>的长期肥料试验,黄庆海(2000)<sup>[15]</sup>在红壤性水稻土、郑铁军(1998)在黑土、张淑茗(1992)<sup>[5]</sup>等在石灰性土壤上的长期肥料试验都证实了这一点。

### 4.2 长期施肥对土壤磷形态的影响

4.2.1 无机磷 长期施肥,各形态无机磷均有不同程度的积累,但主要是  $\text{Ca}-\text{P}$  的变化。林治安等(1997)对黄淮海平原鲁西北地区土壤的研究表明,化学磷肥施入土壤后,主要以  $\text{Ca}_8-\text{P}$ 、 $\text{Fe}-\text{P}$ 、 $\text{Al}-\text{P}$  等缓效态保存于土壤中,施肥对土壤有效态和缓效态磷均有不同程度的影响,而与无效态磷关系不大。郑铁军(1998)报道,经过15年长期施肥试验,土壤无机磷组分中,闭蓄态磷降低,而  $\text{Ca}-\text{P}$ 、 $\text{Al}-\text{P}$  增加。刘建玲(2000)以北方耕地土壤为试样,研究发现施入土壤中的磷肥除被作物吸收外,主要以  $\text{Ca}_2-\text{P}$ 、 $\text{Ca}_8-\text{P}$  形态累积,其次为  $\text{Al}-\text{P}$  和  $\text{Fe}-\text{P}$ 。张淑茗等(1992)在石灰性土壤上的试验则认为施化学磷肥能提高  $\text{Ca}_2-\text{P}$ 、 $\text{Ca}_8-\text{P}$  和  $\text{Al}-\text{P}$  的数量,但  $\text{Fe}-\text{P}$  相对稳定,受施肥影响小。顾益初等(1997)对潮

土的试验结果也表明, 施入的磷肥在短期内主要向  $C_{a2}-P$  转化, 继而再向  $C_{a8}-P$  和  $Al-P$ 、 $Fe-P$  转化。

4.2.2 有机磷 长期施肥对土壤有机磷的影响目前还未达到一个统一的认识。孟昭鹏研究发现, 连续施用无机肥, 土壤有机磷含量不会增加, 只有在有机无机配合的情况下, 才能使土壤有机磷增加。曹翠玉等(1998)在黄潮土上的试验结果表明, 在施用化肥的基础上, 连年施用有机肥, 土壤有机磷各组分均有不同程度的提高, 其中活性、中活性及中稳性有机磷提高的较多, 而高稳性有机磷提高的幅度较小。刘小虎(1999)研究发现, 化肥有利于土壤活性有机磷的提高和积累, 有机肥配施氮磷钾, 有利于中等活性有机磷的积累, 而不利于中稳性有机磷的积累, 他认为, 有机肥的施入可增加有机磷各组分的含量, 而化肥的作用主要是促进土壤有机磷各组分在原有含量基础上的相互转化。张为政(1988)报道, 多年施用有机肥后, 土壤有机磷总量增加, 活性、中稳性有机磷下降, 中活性和高稳性有机磷增加。Sharpley(1985)在美国俄克拉马州和得克萨斯州的试验指出, 施肥后土壤有机磷的变化主要是中度活性有机磷的变化, 而活性和非活性有机磷保持不变。同时, 国外的一些长期轮作试验表明, 施用有机肥可明显增加土壤无机磷, 但对土壤有机磷影响不大。

#### 4.3 长期施肥对土壤磷剖面分布的影响

由于磷在土壤中极小的扩散系数, 一般认为施肥对磷剖面分布的影响是微乎其微的<sup>[3]</sup>。Cooke(1979)报道, 黏质土壤连续施肥 100 年, 绝大部分残留肥料仍积聚在耕层, 而磷下移至 15~25 cm 深度的数量很少。长期施用有机肥的土壤磷的移动性有所增加。姚源喜(1989)认为连续施用猪圈肥使耕层土壤的有效磷含量显著上升, 但耕层以下土层中有效磷几乎没有变化。然而, 刘建玲(2000)研究发现, 长期施肥可影响土壤磷的垂直分布, 长期定位施肥的表层土壤磷素不同程度地向下运移, 这种运移在高磷量、沙质土壤上表现尤为明显。

#### 参考文献:

- [1] 程宪国, 王维敏. 麦秸翻压对土壤磷组分的影响[J]. 土壤通报, 1991, 22(6): 254-256.
- [2] 寇长林, 王秋杰, 任丽轩, 等. 小麦和花生利用磷形态差异的研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(4).
- [3] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [4] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.
- [5] 张漱茗, 于淑芳. 石灰性土壤中磷形态和有效性的研究[J]. 土壤肥料, 1992, (3): 1-4.
- [6] 郭小冬, 杨玲, 张雪琴. 甘肃省主要耕地土壤磷形态及其有效性研究[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 119-122.
- [7] 龚子同, 等. 华中亚热带土壤[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1983.
- [8] 王旭东, 张一平, 李祖荫. 有机磷在土中组成差异的研究[J]. 土壤肥料, 1997, (5): 16-18.
- [9] 安卫红, 张淑民. 石灰性土壤无机磷的分级及其有效性的研究[J]. 土壤通报, 1991, 22(1): 34-37.
- [10] 蒋柏藩, 顾益初, 鲁如坤. 风化对土壤粒级中磷素形态、转化及有效性的影响[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 134-143.
- [11] R C Dalal. Soil Organic Phosphorus[J]. Advances in Agronomy, 1977, 29: 83-117.
- [12] 林继雄, 林葆, 艾卫. 磷肥后效与利用率定位试验[J]. 土壤肥料, 1995, (6): 1-5.
- [13] Bolland, M D A, Weatherley, A J, Gilkes, R J, The long-term residual value of rock phosphate and super phosphate fertilizers for various species under field conditions[J]. Fertilizer Research, 1989, 20(2): 89-100.
- [14] Mercik, S, Nemeth, K. Effects of 60-year N, P, K and Ca fertilization on EUF-nutrient fractions in the soil and yields of rye and potato crops[J]. Plant and Soil, 1985, 83(1): 151-159.
- [15] 黄庆海, 李茶苟, 赖涛. 长期施肥对红壤性水稻土磷素积累与形态分异的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 290-293.

周建斌(1993)报道, 在土上连续 7 年施用磷肥后, 耕层土壤以下土层的土壤有效磷含量有微弱增长, 而配合施用有机肥处理此增长尤为显著, 说明耕层土壤中磷已发生明显下移。Chardon 等(1997)研究表明, 有机肥中磷的移动性较大, 有机肥中淋失的磷 70%~90% 属可溶性有机磷。

#### 5 不同轮作方式对土壤磷的影响

一般耕地全磷含量是有效磷的 200~500 倍, 在土壤磷组成中无机磷的 2/3 和有机磷的 1/3 为无效态, 而不同作物对不同形态难溶性磷的吸收利用能力不同。寇长林等(1999)在砂质潮土上的长期定位试验表明, 磷高效基因型植物的羽扇豆、荞麦等对难溶性磷的利用能力很强, 种植花生和玉米造成土壤中无机磷组成明显差异, 花生使  $C_{a8}-P$  比例显著降低, 而  $Al-P$  和  $Fe-P$  增加, 花生在缺磷条件下, 能够吸收利用  $C_{a8}-P^{[2]}$ 。不同作物根系养分的种类、数量及其分泌物和残茬对土壤磷素的影响是有差异的, 因此, 不同的轮作制度对土壤磷的影响不同。张为政(1990)研究发现, 玉米与豆科作物轮作可缓解或减轻豆科作物对土壤磷素的消耗, 这可能是因为玉米的外生菌根可能对提高土壤磷素的有效性有良好的影响。玉米连作  $Fe-P$ 、 $Al-P$  含量有所提高, 而豆科-玉米轮作无机磷组分有所下降, 而有机磷组分中, 除中等活性有机磷略有下降外, 其它有机磷组分均有所上升。小麦对豆科作物磷吸收有明显的促进作用。李隆等(2000)在对此进行研究后初步证实了小麦-大豆共生期间存在着小麦对大豆磷吸收的促进作用, 主要表现在磷吸收量的显著提高, 其根际效应可能是机制之一。由上可看出, 禾本科作物与豆科作物轮作对磷的吸收有促进作用, 其机理还有待于进一步探讨。