

# 土壤生物在土壤磷有效化中的作用

张宝贵 李贵桐

(中国农业大学农业资源环境学院, 北京 100094)

## 摘要

本文概述了磷被土壤组分固定的机制,详述了土壤微生物、根、菌根和蚯蚓在提高土壤磷植物有效性中起的作用。土壤生物对磷的活化作用主要机制为:通过产生质子和有机酸溶解不溶态无机磷,通过分泌磷酸酶水解有机磷,这种作用受土壤供磷与植物对磷需求间平衡的调控。最后讨论了难溶性矿物磷肥和有机磷肥的应用价值,提出通过增大土壤生物群体和活性,使土壤供磷与植物需磷达到和谐同步的设想。

**关键词** 土壤磷活化, 磷酸酶, 土壤微生物, 根际, 有机磷肥

## 1 引言

我国有74%耕地土壤缺磷,目前生产上应用最多的是高水溶性磷肥。这类磷肥的生产需要大量硫酸或磷酸,成本高;施在固磷力强的土壤上很快被固定为植物难利用的形态,当季利用率仅为10—25%;同时,高水溶性磷肥在砂性土壤上易流失,造成水体污染。因此,国外又重新重视缓效磷肥的利用<sup>[1-3]</sup>。缓效磷肥肥效的发挥取决于土壤生物的活化作用,弄清该作用机理对充分发挥土壤生物的作用,使土壤供磷与作物需磷达到和谐同步具有重要意义。本文对国内外这方面研究进行了小结,以期合理施用磷肥提供依据。

## 2 土壤中的磷

### 2.1 磷在土壤中的固定

当无机磷施入土壤后,部分溶于土壤溶液中,土壤组分与其反应又将其移出土壤液相,成为生物不易利用的形态。这就是磷的固定。磷固定机制主要有两大类:吸附和沉淀。虽然现代研究者将磷固定机制划分为物理吸附(physical adsorption),化学吸附(chemisorption),阴离子交换(anion exchange),表面沉淀(surface precipitation)和独立固相沉淀(separate solid phase)等形态,但这些皆为吸附或沉淀的特例<sup>[4]</sup>。Stevenson(1985)<sup>[5]</sup>很好地归纳了不同类型土壤中磷的固定机制(图1)。

### 2.2 土壤有机磷及其降解途径

2.2.1 土壤中的含磷有机物质 土壤有机磷是土壤全磷很重要的组成部分,有机磷一般占土壤全磷的20—50%。在森林或草原植被下发育的土壤,有机磷可占土壤总磷量的一半以上甚至可达90%<sup>[3]</sup>。至今已查明化学结构的土壤有机磷(P<sub>o</sub>)仅占土壤有机磷总量的50—70%,并均为酯磷(C—O—P),其中肌醇磷酸盐占10—50%,磷酯1—5%,核苷酸0.2—2.5%,此

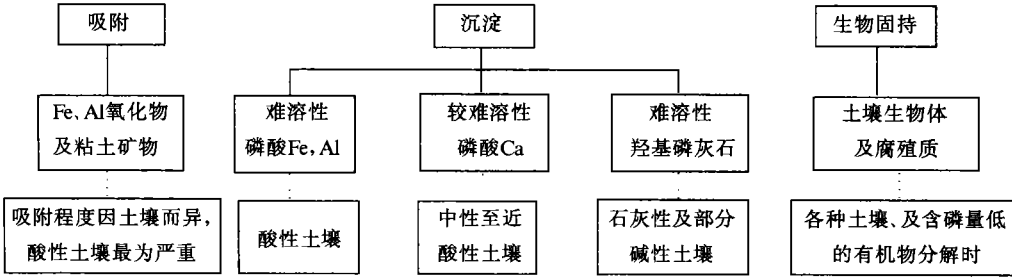


图1 各种土壤中磷的固定作用

Fig.1 Phosphorus retention by different soils

外, 土壤中也含有痕量的磷蛋白。虽然多聚磷酸盐和具 P-C, P-N 或 P-S 键含磷物质也可能具有相当数量, 但酯磷仍可被认为是土壤有机磷的主要形态<sup>[5-6]</sup>。

2.2.2 微生物量磷与植物有效磷 耕作土壤中, 微生物量磷可占土壤总有机磷的 2—5%<sup>[7]</sup>, 而牧场土壤上, 该比例可达 20%。磷在微生物组织内的含量为 1.4—4.7%<sup>[8]</sup>, 细菌为 1.5—2.5%, 真菌为 4.8%, 这比植物体内磷含量 (0.1—0.5%) 还要高。微生物量磷的构成如表 1 所示。和土壤有机磷化合物相比, 微生物量磷容易矿化为植物有效磷。当微生物体完全分解后, 固持其内的磷也以无机磷 (P<sub>i</sub>) 形式释放出来。土壤中生物量磷因土地利用方式和施肥条件而异, 耕作土壤可达 20—40 μg / g<sup>[8-9]</sup>。按微生物量磷的周转周期为 2.5 年计算, 每年可供磷 18—36 kg P / ha, 因此, 土壤微生物磷是土壤中植物有效磷的重要来源。

2.2.3 有机磷的降解途径 有机磷的矿化是以土壤微生物为中介的。微生物利用含磷有机物中的碳 (C) 以获取能量, 而磷则以代谢产物的形式释放出来, 这种矿化途径称为生物矿化 (biological mineralization); 当磷是土壤微生物和植物生长的主要限制因子时, 微生物、植物根就分泌胞外磷酸酶, 将 P<sub>o</sub> 水解, 释放出生物有效磷, 这种矿化途径称为生物化学矿化

表 1 微生物组织中各种含磷物质的相对含量 (据 Hedley & Stewart, 1982<sup>[7]</sup>)

Table 1 Relative content of P-containing compounds in microbial tissues (after Hedley & Stewart, 1982<sup>[7]</sup>)

含磷有机物种类 Type of P-containing compounds	占微生物磷的 % % of microbial biomass P
核糖核酸	30—50
脱氧核糖核酸	5—10
磷酸与糖、核苷酸形成的酯, 含磷辅酶及各种多聚磷酸盐 (酯)	15—20
磷脂	<10
植酸盐	痕量

(biochemical mineralization)<sup>[10]</sup>。磷酸酶是一个系统名称, 代表一组可催化磷酸酯或磷酸酐水解的酶<sup>[11, 12]</sup>, 其中研究最为深入的是磷酸单酯水解酶。根据其量适 pH 又分为酸性磷酸单酯水解酶 (EC3.1.3.2, 简称为酸性磷酸酶) 和碱性磷酸单酯水解酶 (EC3.1.3.1, 简称为碱性磷酸酶), 前者分布于酸性土壤中而后者在碱性土壤中占优势<sup>[13, 14]</sup>。产生酸性磷酸酶的生物有: 细菌、真菌、酵母、原生动物<sup>[15]</sup>和植物根<sup>[16]</sup>; 产生碱性磷酸酶的生物有: 细菌、真菌<sup>[15]</sup>和蚯蚓<sup>[17, 18]</sup>。磷酸酶是诱导酶, 微生物和根对磷酸酶的分泌与正磷酸盐的缺乏强度呈正相关, 缺磷时植物根的磷酸酶的活性会成倍增长; 同时, 无论是新磷酸酶的合成或是土壤中已有磷酸

酶活性的表现均受无机磷酸盐的抑制<sup>[6,11]</sup>。

综上所述,土壤  $P_0$  的累积或矿化受土壤生物对磷的需求及土壤对磷的供应的控制,土壤  $P_0$  中植物有效磷的释放是以土壤微生物为中介,在磷酸酶的作用下进行的。

### 3 生物在磷转化中的作用

#### 3.1 微生物对磷的固持作用

与氮相似,磷的更新(turnover)也要经过矿化作用和固持作用两个过程,土壤溶液中磷酸盐的浓度取决于这两个方向相反的过程的相对速率。它们的相对速率受被降解有机物含磷量的影响。当有机物的  $C/P_0$  比 $\geq 300$ 时,出现净固持(固持作用速率 $>$ 矿化速率);反之,当该比值 $\leq 200$ 时就会出现净矿化。含磷量小于0.2—0.3%的秸秆等植物残体分解时,出现有效磷的净固持。绿肥作物及农家肥等在分解的初期,既有  $P_1$  的释放也有微生物对  $P_1$  的固持。

#### 3.2 土壤生物对磷的活化作用

3.2.1 生物残体的溶磷作用 研究表明,处于不同降解阶段的生物残体都能增大土壤磷的植物有效性。新鲜的有机物可以对土壤有机质的降解起促进作用,从而加速磷的生物矿化作用。有机残体降解过程中产生的有机酸或其它螯合剂可以把被 Ca, Fe, Al 固定的磷释放出来;产生的  $CO_2$  可以增大磷酸钙及磷酸镁的溶解性;最终形成的腐殖素可以在 Fe, Al 氧化物及粘土矿物表面形成保护层,减小磷酸盐的固定;磷酸根可通过钙桥和有机质以较弱的力结合,使磷保持相对较高的植物有效性<sup>[19]</sup>。

3.2.2 VA-菌根真菌的作用 有菌根真菌存在时植物吸磷明显加快。真菌还能帮助作物有效地利用土壤中难吸收的磷酸盐。人们发现几乎所有重要的农作物上都有 VA-菌根。研究证明,菌根在豆科和禾谷类作物利用低品位磷灰石方面有明显效果。菌根真菌增加植物磷吸收的机理为:

(1) 由于菌丝的延伸使植物根的吸收面积扩大<sup>[20]</sup>。磷酸盐主要通过扩散而不是质流被植物吸收,在固磷能力强的土壤上,土壤溶液中磷浓度通常很低,磷向植物根系扩散速度很慢,植物吸收磷往往受磷向植物根系移动性低的限制。因此,所有增加根系吸收面积的因素都能增加植物对磷的吸收。根毛和菌根真菌的菌丝在这方面起着重要的作用,菌根真菌的菌丝能伸至根和根毛都不能达到的土壤区域<sup>[21]</sup>; (2) 真菌的分泌物,如有机酸或能水解磷酸三钙的酶,可以增加难溶性无机磷的植物有效性; (3) 菌根分泌磷酸酶将土壤  $P_0$  水解为植物有效磷。小麦接种 VA-菌根真菌(*Glomus mosseae*)后,菌根的酸性和碱性磷酸酶的活性以及植物的吸磷量均有提高<sup>[22]</sup>。豇豆接种 VA-菌根真菌 40 天后,磷酸酶活性增加了 2 倍<sup>[23]</sup>; (4) 在菌根真菌存在时,根系吸收阴阳离子的差异导致根际 pH 的变化,进而影响植物吸收磷的量。正常根际根系溶解磷的能力远比灭菌根系大也证实了微生物的作用; (5) 与无菌根植物相比,菌根植物呼吸增强,并释放出大量  $CO_2$ , 从而使土壤酸化。

3.2.3 溶磷微生物 从土壤中分离出的细菌和真菌许多都能溶解包括磷灰石在内的难溶性无机磷化合物。微生物的溶磷作用是通过酸化其生长环境,产生螯合或交换过程来实现的。产生有机酸是曲霉(*A. niger*)溶解无机磷的主要途径。有机酸既可以酸化周围土壤又可通过螯合作用来溶解磷。旱地土壤溶磷微生物平均数量为每克土 $10^7$ 个,占整个土壤微生物群的 27.1—82.1%,其中细菌所占比例最大。溶磷细菌数量因土壤类型而异,在

黑钙土、黄棕壤、白土、红壤、砖红壤、盐渍土和瓦碱土中磷细菌的数目分别为 48.9、20.4、16.8、1.07、0.98、1.7 和 0.02 亿个<sup>[24]</sup>。

溶磷细菌有芽孢杆菌(*Bacillus*),假单胞菌属(*Pseudomonas*),产碱菌属(*Alcaligene*),黄杆菌(*Flavobacterium*),节杆菌属(*Arthrobacter*),欧文氏菌属(*Erwinia*),色杆菌(*Chromobacterium*),固氮菌属(*Azotobacter*)及沙雷氏菌属(*Serratia*)。从红壤和砖红壤中分离出的自生固氮菌占溶磷细菌的 5—12.5%。其中圆褐固氮菌(*Azotobacter chroococcum*),棕色固氮菌(*A. vinelandii*)和黄色固氮菌(*A. beijerinckii*)可以释放磷酸三钙、摩洛哥磷矿粉和磷酸铁中的磷<sup>[24]</sup>。根瘤菌 *R. leguminosarum biovar viceae* 在以有机磷为磷源时,既产生酸性磷酸酶又产生碱性磷酸酶,其中碱性磷酸酶的活性较强<sup>[25]</sup>。在土壤中接种 *Bacillus megatherium var. phosphaticum* 在前苏联已实施多年,这种微生物据说在含有有机磷高的松软土(Mollisol)中效果最佳,因为它们的主要作用是把有机磷释放出来,转化为可利用的  $P_i$ 。

3.2.4 植物根系分泌物的溶磷作用 植物根系的分泌物具有溶磷作用,许多物质的分泌是植物对缺磷的专一性反应。根系分泌物有以下几种<sup>[26]</sup>:

(1) 低分子有机酸。苜蓿根可分泌柠檬酸、苹果酸和琥珀酸等,这些有机酸主要是通过降低根际土壤 pH 而起溶磷作用的;Nelemans 和 Findenegg (1990)<sup>[27]</sup>发现,根系分泌柠檬酸和苹果酸是芸薹(*Brassica napus*)能有效地利用磷矿石的主要原因;

(2) 还原糖和氨基酸。玉米和苏丹草(*Sorghum vulgare var. sudanense*)根在缺磷时可以分泌糖和氨基酸,可以促进微生物的活性,利用微生物来活化难利用的磷;

(3) 磷酸酶。根际磷酸酶活性在植物获取磷方面起着非常重要的作用<sup>[28—29]</sup>,植物能且仅能分泌酸性磷酸酶<sup>[16,30]</sup>。磷酸酶活性的增大是小麦和三叶草(*Trifolium*)根际土壤有机磷化合物含量降低的原因<sup>[31]</sup>。植物根磷酸酶活性因缺磷而增大,增大幅度因植物种类而异:羽扇豆和番茄 > 甘蓝,萝卜 > 大豆,甜菜 > 小麦,菜豆<sup>[26]</sup>。

(4)  $H^+$ 。植物根系可以通过分泌  $H^+$  来酸化根际土壤,提高 P 和 Fe 等的植物有效性。根系分泌  $H^+$  可能是对缺磷或铁的反应,也可能是氮同化时的产物。 $NH_4^+$  的同化过程和  $N_2$  的生物固定过程中都有  $H^+$  的生成,为保持细胞内 pH 的稳定, $H^+$  会被分泌到根际土壤中,使其酸化<sup>[32—33]</sup>。在营养液培养条件下,当  $NH_4^+$  为氮源时,小麦根能促进磷酸三钙溶解;而当  $NO_3^-$  为 N 源时,根则不具溶磷作用<sup>[34]</sup>。植物对阴阳离子吸收不平衡也会引起  $H^+$  的分泌和根际酸化,某些植物通过增加 Ca 或减少  $NO_3^-$  的吸收,导致根际土壤 pH 降低,增加难溶性无机磷的溶解性<sup>[35—40]</sup>。Bekele (1983)<sup>[38]</sup>报道,荞麦(*Facopyrum esculentum*)能有效利用磷矿粉是因为它吸收 Ca 的能力较高, $Ca^{2+}$  吸收量的增大,降低了根际钙离子的浓度,从而增大了磷灰石的溶解性。除根系的分泌对磷活化很重要外,根的形态特别是根毛也对植物利用难溶性磷具有很大影响<sup>[41—43]</sup>。

3.2.5 无脊椎动物 在温带土壤中,蚯蚓是生物量最大的无脊椎动物。Park 等<sup>[18]</sup>研究表明,蚯蚓能产生酸性和碱性磷酸单酯酶(最适 pH 分别约为 4.0 和 9.0)以及磷酸双酯酶(最适 pH 约为 9.0)。Satchell 和 Martin<sup>[17]</sup>在加入植酸钙镁的造纸污泥中放入蚯蚓,24 天后测定磷酸酶活性,和不加蚯蚓的对照相比,加入蚯蚓的处理中磷酸酶活性高,有机磷矿化释放出的  $P_i$  量也大。Sharpley 和 Syers<sup>[44]</sup>研究土壤中有有机磷和微弱吸附的  $P_i$  的季节变化时

发现,  $P_i$  释放高峰与蚯蚓 *A. caliginosa* 和 *L. rubellus* 在地表产生排泄物的高峰相吻合; Mansell 等<sup>[45]</sup>发现植物残落物通过蚯蚓肠道后速效磷量增加了 2—3 倍。

## 4 磷肥的应用及生物在磷有效化中的作用

### 4.1 高水溶性磷肥施入土壤后的行为

易溶性的固体磷肥或高浓度的液体肥施入后, 施入位点处土壤溶液中磷浓度很高, 可达到  $1.5\text{mol/L}$ , 或高于  $6.0\text{mol/L}$ ; 溶液中的相伴阳离子可达 10 到  $20\text{mol/L}$ 。磷与这些阳离子可在施入位点发生原位沉淀。磷肥溶液从施入位点向周围土壤运动时, 导致相当量的土壤组分溶解, 使大量阳离子进入土壤溶液中。这些阳离子来自被降解的水合氧化物, 硅酸盐粘土矿物, 土壤碳酸盐和土壤有机质。磷与这些阳离子反应, 在土壤基质中产生沉淀<sup>[4]</sup>。同时由于砂质土壤特别是酸性砂质土壤吸附磷能力较差, 施用水溶性高的磷肥, 还可造成磷对水体的污染及富营养化<sup>[2, 46]</sup>。

### 4.2 作物对难溶性磷的利用

水溶性高磷肥除在土壤中易被重新固定及在固磷力弱的土壤上易流失外, 成本也高, 因此, 人们又重新致力于应用水溶性低的磷源作缓效磷肥 (controlled-released P fertilizer), 如未酸化和半酸化磷矿石<sup>[1, 2, 46, 47]</sup>, 这类磷肥成本低, 如施用得当有效性并不一定差。影响这类磷源施用效果的因素除矿石肥料本身(矿石含磷量, 粉碎及酸化程度等)外, 还有土壤条件(包括 pH, 石灰位 (pCa) 和土壤固磷强度等)和植物条件。Hagin 和 Harrison(1993)<sup>[46]</sup>对矿石肥料及土壤条件的影响进行了较详细的讨论。不同植物对相对难溶磷的吸收能力不同, 吸磷能力强的植物有苜蓿 (*Medicago sativa*), 荞麦 (*Fagopyrum esculentum*), 黍 (*Millet*), 羽扇豆 (*Lupinus*) 和草木樨 (*Melilotus*)。而玉米 (*Zea mays*), 棉花 (*Gossypium*), 小麦 (*Hordeum vulgare*), 小麦 (*Triticum estivum*), 燕麦 (*Avena sativa*) 和马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 的吸收能力相对较弱<sup>[48]</sup>。在牧草土壤上未酸化和半酸化磷矿石应用效果很好, 主要是因为牧草吸收磷的能力较强, 并且磷的吸收不集中于某一较短的时期。为在农田上有效地利用难溶性磷, 将来需要深入研究各种作物和同一作物的不同品种对难溶性磷吸收能力和吸磷特点, 包括吸磷总量和吸磷高峰阶段的吸收强度, 根据作物的吸磷特点, 合理利用难溶性磷肥。

### 4.3 有机磷肥的利用

在生态农业中, 植物的磷营养主要是从有机肥中得到的<sup>[19]</sup>。与无机磷肥相比, 有机磷具有在土壤中的移动性大<sup>[6]</sup>及被土壤组分固定程度低的优点。植物可有效地利用有机磷, Tarafdar 和 Claassen(1988)<sup>[28]</sup>报道, 在盆栽条件下, 磷酸甘油酸盐, 卵磷脂和植酸对三叶草 (*Trifolium alexandrinum*), 大麦, 燕麦和小麦的有效性至少等同于无机磷肥。

现在尚不清楚大田条件下, 若有足够的有机磷源, 根际磷酸酶的活动是否即能保证植物的磷营养。为此笔者正对以下两个假说进行试验测试。a. 施用有机肥土壤对磷的供应与作物对磷的需求在空间上是一致的。由于磷的移动性很小, 根际土壤是根系吸收磷的直接部位。由于根际分泌物的吸引和激活作用, 微生物量及活性在根际土壤中最大, 根际土壤有机磷的矿化作用也因此很强烈; b. 施用有机肥后土壤对磷的供应与作物对磷的需求在时间上也是同步的。作物生长和吸收养分的旺季, 也是土壤水、热条件对微生物活动

最适宜的季节,微生物的活动使有机肥中的磷释放出来。

为保证有机磷肥的供磷强度能满足作物吸磷的要求,需要较大的土壤生物群体。影响土壤生物量因素很多,生产上能有效控制的有:有机物质的施用,土壤结构的保持,限制施用农药的种类和用量。增施有机肥不仅可提高土壤有机磷量,同时,有机质又为土壤微生物和无脊椎动物提供碳源,促进它们的活动。提高有机磷肥的供磷强度的另一重要途径是增加有机肥中磷的含量,如在堆肥或厩肥中加入无机磷肥,研究影响无机磷转化为有机磷的效率、速度的条件。在室内培养条件下,Chauhan等(1981)<sup>[49]</sup>在土壤中无机磷,同时定期加入纤维素作碳源,三个月后加入磷的22%被微生物转化为有机磷。

综上所述,单纯依靠施用水溶性无机磷肥磷时,土壤对磷的供应与植物对磷的吸收不同步进行,造成局部土壤磷浓度暂时过高,引起磷的固定。为协调土壤对磷的供应与植物对磷的吸收,应增施有机肥,为土壤生物提供食源,同时设法提高有机肥中磷的含量,使土壤的供磷强度与作物的吸收相适应。

### 参 考 文 献

1. Rajan, S. S. S., O'Connor, M. B., Sinclair, A. G. Partially acidulated phosphate rocks: Controlled release phosphorus fertilizers for more sustainable agriculture. *Fertil. Res.*, 1994, 37:69—78
2. Yeates, J. S., Clarke, M. F. Developing alternatives to phosphate fertilizers of high water solubility. *Fertil. Res.*, 1993, 36:141—150
3. Zhang, Y. S., Werner, W., Scherer, H. W., Sun, X. Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils. *Biol. Fertil. Soils*, 1994, 17:64—68
4. Sample, E. C., Soper, R. J., Racz, G. J. Reactions of phosphate fertilizer in soils. In: Khasawneh, F. E., Sample, E. C. Kamprath, E. J. Eds. *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Madison, Wisconsin, USA: ASA-CSSA-SSSA, 1980, 263—310
5. Stevenson, F. J. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, and micronutrients. John Wiley & Sons, 1985, 231—284
6. Dalal, R. C. Soil organic phosphorus. *Adv. Agron.*, 1977, 29:83—119
7. Hedley, M. J., Stewart, W. B. Method to measure microbial phosphate in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, 14:377—385
8. Brookes, P. C., Powlson, D. S., Jenkinson, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 1984, 16:169—175
9. Srivastava, S. C., Singh, J. S. Microbial, C, N and P in dry tropical forest soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, 23:117—124
10. McGill, W. B., Cole, C. V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 1981, 26:267—286
11. Tabatabai, M. A. Soil enzymes. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties*. Agronomy monograph no. 9, 2nd Edition, Wisconsin, USA: ASA-SSSA, Madison, 1982, 903—947
12. Florin, M., Stotz, E. H. *Comprehensive biochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1964, 13:126—134
13. Eivazi, F., Tabatabai, M. A. Phosphatases in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1977, 9:167—172
14. Juma, N. G., Tabatabai, M. A., Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Sci.*, 1988, 126:101—108
15. Nakas, J. P., Gould, W. D., Klein, D. A. Origin and expression of phosphatase activity in a semiarid grassland soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19:13—18
16. Dinkelaker, B., Marschner, H. *In vivo* demonstration of acid phosphatase activity in the rhizosphere of

- soil-grown plants. *Plant Soil*, 1992, 199—205
17. Satchell, J. E., Martin, K. Phosphatase activity in earthworm faeces. *Soil Biol. Biochem.*, 1984, 16:191—194
  18. Park, S. C., Smith, T. J., Bisesi, M. S. Actives of phosphomonoesterase and phosphodiesterase from *Lumbricus terrestris*. *Soil Biol. Biochem.*, 1992, 24:873—876
  19. Oberson, A., Fardeau, J. C. Besson, J. M., Stücher, H. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biol. Fertil. Soils*, 1993, 16:111—117
  20. Li, X. L., George, E., Marschner, H. Extension of the phosphorus depletion zone in a VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant Soil*, 1991, 136:41—48
  21. Sander, F. E., Tinker, P. B. Mechanism of absorption of phosphate from soil by endogene mycorrhiz. *Nature*, 1971, 233:278—279
  22. Tarafdar, J. C., Marschner, H. Phosphatase activity in the rhizosphere and hyposphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, 26:387—395
  23. Thiagarajan, T. R., Ahmad, M. H. Phosphatase activity and cytokinin content in cowpeas (*Vigna unguiculata*) inoculated with a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *Biol. Fertil. Soils*, 1994, 17:51—56
  24. 尹瑞龄. 我国旱地土壤的溶磷微生物. *土壤*, 1988, (5):243—246
  25. Abd-Alla, M. H. Use of organic phosphorus by *Rhizobium leguminosarum* biovar *viceae* phosphatases. *Biol. Fertil. Soils*, 1994, 18:216—218
  26. Tadano, T., Sakai, H. Secretion of acid phosphatase by the roots of several crop species under phosphorus-deficient conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1991, 37(1):129—140
  27. Nelemans, J. A., Findenegg, G. R. Origin of organic acids exuded by roots of phosphorus-stressed rape (*Brassica napus*) plants. In: van Beusichem M. L., *Plant Nutrition—Physiology and Applications*. The Netherlands: Kluwer Academic Pub., Dordrecht 1990, 179—183
  28. Tarafdar, J. C., Claassen, N. Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms *Biol. Fertil. Soils*, 1988, 5: 308—312
  29. Helal, H. M. Varietal differences in root phosphatase activity as related to the utilization of organic phosphates. *Plant Soil*, 1990, 123:161—163
  30. Tarafdar, J. C. Use of electrofocussing technique for characterizing the phosphatases in the soil and root exudates. *J. Ind. Soc. Soil Sci.*, 1989, 37:393—395
  31. Tarafdar, J. C., Jungk, A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biol. Fertil. Soils*, 1987, 3:199—204
  32. Raven, J. A., Smith, F. A. Significance in  $H^+$  transport in plant cells. *Can. J. Bot.* 1974, 52:1035—1048
  33. Raven, J. A., Smith, F. A. Nitrogen assimilation and transport in vascular land plants in relation to intracellular pH regulation. *New Phytol.*, 1976, 76:415—431
  34. Trolldenier, G. Techniques for observing phosphorus mobilization in the rhizosphere. *Biol. Fertil. Soils* 1992, 14:121—125
  35. Johnston, H. W., Olsen, R. A. Dissolution of fluorapatite by plant roots. *Soil Sci.*, 1972, 114:29—36
  36. Hedley, M. J., Nye, P. H., White, R. E. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*brassica napus* cv. Emerald) seedlings. II. Origin of the pH change. *New Phytol.*, 1982, 91:31—44
  37. Hedley, M. J., Nye, P. H., White, R. E. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*brassica napus* cv. Emerald) seedlings. IV. The effect of rhizosphere phosphorus status on the pH, phosphatase activity and depletion of soil phosphorus fractions in the rhizosphere and on the cation-anion balance in plants. *New Phytol.*, 1983, 95:69—82
  38. Bekele, T., Cino, B. J., Ehler, P. A. J., Van der Mass, A. A., Van Diest, A., An evaluation of plantborne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. *Plant Soil*, 1983, 75:361—378

39. Mooby, H., Nye, P. H., White, R. E. The influence of nitrate nutrition on  $H^+$  efflux by young rape plants (*Brassica napus* cv. Emerald). *Plant Soil*, 1985, 84:403—415
40. Mooby, H., White, R. E., Nye, P. H. The influence of phosphate nutriyion on  $H$ -ion efflux from the roots of young rape plants. *Plant Soil*, 1988, 105:247—256
41. Gardner, W. K., Parberry, D. G., Barber, S. A. Proteoid root morphology and function in *Lupinus albus*. *Plant Soil*, 1981, 60:143—147
42. Itoh, S, Barber, D. A. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agron. J.*, 1983, 75: 457—461
43. Schenk, M. K., Barber, S. A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. *Agron. J.*, 1979, 71:921—924
44. Sharpley, A. N., Syers, J. K. Seasonal variation in casting activity and in the amounts and release to solution of phosphorus forms in earthworm casts. *Soil Biol. Biochem.*, 1977, 9:227—231
45. Mansell, G. P., Syers, J. K., Gregg, P. E. H., Plant availability of phosphorus in dead herbage ingested by surface-casting earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, 1981, 13:163—167
46. Hagin, Harrison. Phosphate rocks and partially-acidified phosphate rocks as controlled release P fertilizer. *Fertil. Res.*, 1993, 35:25—31
47. Rajan, S. S. S., Marwaha, B. C. Use of partially-acidified phosphate rocks as phosphate fertilizers. *Fertil. Res.*, 1993, 35:47—59
48. Barber, S. A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: Khasawneh F. E., Sample E. C. and Kamprath E. J. Eds. *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Madison, Wisconsin, USA:ASA-CSSA-SSSA, 1980, 591—616
49. Chauhan, B. S., Stewart, J. W. B., Paul, E. A. Effect of labile inorganic phosphate status and organic carbon additions on the microbial uptake of phosphorus in soils. *Can. J. Soil Sci.*, 1981, 61:373—385

## ROLES OF SOIL ORGANISMS ON THE ENHANCEMENT OF PLANT AVAILABILITY OF SOIL PHOSPHORUS

Zhang Bao-gui     Li Gui-tong

(College of Agricultural Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094)

### Summary

In this paper, the authors summarized briefly the retention of phosphorus by soil constituents. Roles of soil microorganisms, plant roots, mycorrhizae and earthworms in the enhancement of plant availability of soil phosphorus are reviewed. The mobilization of soil phosphorus by soil biota involved mainly solubilization of insoluble inorganic phosphorus by excretion of protons and organic acids, and hydrolysis of organic phosphorus by phosphatases. The processes of phosphorus mobilization were regulated by the equilibrium between soil phosphorus supply and plant P demand. In the last part, possibilities of alternatives of P fertilizers are discussed. It was suggested that by increasing soil biota population and activity soil phosphorus supply could be in sychronization with plant phosphorus demand.

**Key words**     Soil phosphorus mobilization, Phosphatase, Soil micro-organisms, Rhizosphere