

生菜、菠菜和番茄幼苗利用不同形态无机磷的差异研究^①

伊晓云^{1,2,3}, 陈志长^{1,2}, 梁林洲^{1,2}, 赵学强¹, 沈仁芳^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008)

摘要: 在砂培条件下, 分别以磷酸二钙 (DCP)、磷酸八钙 (OCP)、氟磷灰石 (FA)、磷酸铝 (Al-P) 和磷酸铁 (Fe-P) 作为单一 P 源, 研究了不同形态的无机 P 对生菜、菠菜和番茄的有效性以及这 3 种蔬菜对其吸收利用的差异。结果表明 3 种蔬菜对各种形态无机 P 的利用存在显著差异: 生菜利用各形态无机 P 的能力为 DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA; 菠菜为 DCP、OCP>Al-P>Fe-P>FA; 番茄从生物量角度分析为 Al-P、DCP>OCP>Fe-P>FA, 从 P 积累量角度分析为 DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA。

关键词: 蔬菜; 无机磷; 生物量; 磷积累量; 磷利用效率

中图分类号: S606

土壤中的无机 P 依据 Chang 和 Jackson^[1]的土壤无机 P 分级方法分为磷酸钙、磷酸铝、磷酸铁和闭蓄态磷酸盐。20 世纪 80 年代末蒋柏藩、顾益初^[2-3]等对石灰性土壤中的无机 P 在 Chang 和 Jackson^[1]的基础上将磷酸钙细分为磷酸二钙型、磷酸八钙型和磷灰石。不同作物利用各种形态无机 P 的能力存在一定的差异。安志装等^[4]通过玉米的盆栽试验结果发现, 几种合成磷酸盐在轻壤质和轻黏质潮土中的生物有效性大小为 DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA 和 DCP>Al-P>OCP>Fe-P>FA; 李健梅和曹一平^[5]认为油菜对 Ca₃(PO₄)₂ 的利用能力较强, 而肥田萝卜对 Al-P 的利用能力较强; 赵明等^[6]研究结果表明菜豆在 Al-P 处理中生长的比 Fe-P 处理好; 李峰等^[7]研究结果表明水稻对难溶性 P 的利用效果为 Al-P>Fe-P>Ca-P, 但三者间的差异显著性因不同基因型的品种而异; 郭再华等^[8]研究表明水稻利用 Al-P 的能力比 FA 强; Qiao 等^[9]研究表明大豆比较偏爱 Al-P。

蔬菜在农业生产和人类营养方面起着重要的作用, 是人们日常生活不可缺少的副食品, 蔬菜的产量和质量对保证经济发展、社会稳定、人民身体健康起着重要的作用。由于缺乏科学的土壤施肥管理, 导致菜园土壤中 P 的累积严重^[10], 菜园土壤中无机 P 的存在形态也发生了较大的变化, DCP、OCP、Al-P 和 Fe-P 均有一定程度的累积^[11-13]。Aulakh 等^[14]采用对

P 敏感的作物施 P 肥而对后作作物不施 P 肥的方法, 通过利用土壤转化和残留的 P, 提高了 P 肥的利用率。然而以往的研究很少通过作物对各形态无机 P 的利用差异来提高 P 肥利用率, 特别是在菜园土壤上。鉴于此, 有必要明确不同的蔬菜作物对各形态无机 P 的利用能力差异。

番茄是一种 P 敏感作物, 目前对于番茄耐低 P 的基因型差异以及机理研究较多, 但国内的研究较少涉及番茄对难溶性 P 的利用方面, 而且很少与叶菜类蔬菜放在一起比较。菠菜自古便被认为是一种营养和保健价值较高的蔬菜。生菜也因含有丰富的微量元素、膳食纤维以及各种维生素, 加之口感较好而成为需求量较大的叶菜类蔬菜之一。同时菠菜和番茄属于直根系作物, 生菜属于须根系作物。所以本试验选用生菜、菠菜和番茄这 3 种蔬菜, 采用砂培种植, 在单一 P 源供应下研究了这 3 种蔬菜对各种形态无机 P 的利用能力以及各种形态无机 P 的有效性差异, 以期期为 3 种蔬菜利用土壤中各形态无机 P 能力差异的研究以及提高菜园土壤 P 肥利用率方法的研究提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 供试 P 源

试验采用磷酸二钙 (DCP)、磷酸八钙 (OCP)、

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-YW-N-002) 和国家科技支撑项目 (2006BAD05B08) 资助。

* 通讯作者 (rfshen@issas.ac.cn)

作者简介: 伊晓云 (1983—), 女, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: yixiaoyun@mail.tricaas.com

氟磷灰石(FA)、磷酸铝(Al-P)和磷酸铁(Fe-P)为P源。其中磷酸二钙、磷酸八钙和氟磷灰石为实验室合成,制备方法参照顾益初等^[15]的磷酸盐合成方法。磷酸铝和磷酸铁为购买的分析纯试剂。供试P源全P

及水溶性P含量见表1。

1.2 供试植物

生菜(耐抽苔)、菠菜(南京小圆菠)和番茄(金陵之星)。

表1 各种磷酸盐全P及水溶性P含量

Table 1 Total P and water-soluble P contents in different phosphate compounds

磷酸盐	分子式	代号	全P含量 (P ₂ O ₅ , g/kg)	水溶性P含量 (P ₂ O ₅ , g/kg)
磷酸二钙	CaHPO ₄ ·nH ₂ O	DCP	459.9	15.3
磷酸八钙	Ca ₈ H ₂ (PO ₄) ₆ ·nH ₂ O	OCP	467.5	4.4
氟磷灰石	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ ·F ₂	FA	425.3	0.2
磷酸铝	AlPO ₄	Al-P	494.7	2.7
磷酸铁	FePO ₄ ·4H ₂ O	Fe-P	312.2	11.2

1.3 试验方法

试验在中国科学院南京土壤研究所温室进行,采用砂培种植,设置3个重复。石英砂经自来水洗-酸洗-自来水洗-去离子水洗后晾干,以0.4 kg/盆分装于塑料盆中,分别与各种磷酸盐混匀。为避免磷酸盐的流失,盆内套一个保鲜袋。试验设置每盆全P含量为P₂O₅ 200 mg/kg,以不供P(-P)处理为对照。其余养分以pH 6.0的缺P Hoagland营养液和Arnon营养液定量供应。供试植物种子用1%的次氯酸钠消毒30 min,25℃±1℃下催芽露白后,于2006年11月11日播种,并于2007年1月15日收获。

1.4 样品处理

分别收获植株的地上部和地下部,用去离子洗净后在105℃±1℃下杀青30 min,75℃±1℃下烘干至恒重。称植株干重,计算根冠比。粉碎的干样经硝酸消煮后,用ICP-AES测植株体内含P量^[16]。

1.5 计算公式及统计方法

P肥利用率: P肥利用率(%)=[(供P处理植株P积累量-缺P处理植株P积累量)/P肥施用量]×100

P利用效率: P利用效率=每盆干物质积累量(g/盆)/每盆P吸收量(g/盆)

试验数据应用SPSS13.0统计软件分析,方差分析采用Duncan法,相关性检验采用Pearson(one-tailed)法。

2 结果与讨论

2.1 不同形态无机P处理对3种蔬菜生长的影响

地上部干重、地下部干重和根冠比是反映作物生长好坏的重要指标,以DCP处理下的干重为100,得出不同处理下的相对干重结果见表2。从表2可以看出,

生菜Ca-P(DCP和OCP)处理地上部生物量最大,OCP处理的相对地上部干重为99,而Al-P、Fe-P和FA处理分别是84、74和16,表明生菜利用Ca-P的能力较强,这与Reddy和Surekha^[17]的研究结果一致。菠菜DCP、OCP和Al-P处理间地上部干重差异较小,分别为100、110和86,且显著高于Fe-P和FA处理。番茄Al-P和DCP处理地上部干重最大,其次是OCP处理,再次是Fe-P处理。作物利用DCP的能力普遍较高,是一种较好的P源。随pH值的降低,OCP容易向DCP等较易利用的P形态转化,从而提高其有效性。前人对水稻^[18]、大豆^[19-20]和烟草^[21]等作物利用难溶性P能力的机理研究表明,根系分泌质子和有机酸可以提高Ca-P、Al-P和Fe-P的利用能力。本试验中3种蔬菜利用Ca-P能力较好可能与低P胁迫下作物分泌质子和有机酸有关。根系分泌质子和有机酸也促进了Al-P的活化,这可能是3种蔬菜在Al-P处理中生长较好的原因之一。同时随着营养液中AlPO₄的水解,Al-P由较难利用的结晶态向较为容易利用的无定形转化,从而提高了有效性。由于试验采用的是不透水装置,在淹水厌气条件下,Fe³⁺容易向Fe²⁺转化,晶态磷酸铁结晶破坏,磷酸铁溶解度增加,从而提高Fe-P的有效性。由于试验中供应pH 6.0的营养液,FA的颗粒较大,再加上FA本身的有效性较差,所以FA处理地上部生物量很小,其中菠菜FA处理地上部干重与不施P的对照处理间没有统计上的差异,表明FA对菠菜几乎是一种无效P源。

3种蔬菜的地下部干重也受不同形态无机P的影响(表2)。本试验中FA处理地下部生物量增加幅度较小,其中菠菜没有显著性的增加,表明FA是一种有

表 2 不同形态无机 P 处理下 3 种蔬菜的地上部相对干重、地下部相对干重和根冠比

Table 2 Effects of different forms of inorganic phosphate on shoot relative dry weight, root relative dry weight and root/shoot in three vegetables

蔬菜	测定指标	-P	FA	Fe-P	Al-P	OCP	DCP
生菜	地上部相对干重	6 e	16 d	74 c	84 b	99 a	100 a
	地下部相对干重	16 d	46 c	107 ab	118 a	113 a	100 b
	根冠比 R/S	0.70 a	0.71 a	0.36 b	0.34 b	0.28 c	0.24 c
菠菜	地上部相对干重	17 d	33 cd	47 c	86 b	110 a	100 ab
	地下部相对干重	35 b	62 b	52 b	98 a	110 a	100 a
	根冠比 R/S	0.80 a	0.71 ab	0.46 bc	0.44 bc	0.39 c	0.39 c
番茄	地上部相对干重	13 e	33 d	59 c	104 a	84 b	100 a
	地下部相对干重	14 d	42 c	73 b	103 a	71 b	100 a
	根冠比 R/S	0.31 ab	0.36 a	0.35 a	0.28 bc	0.24 c	0.28 bc

注：同一行中不同字母表示均值间差异显著 ($p < 0.05$)，下同。

效性很低的 P 源。作物地下部对低 P 胁迫的响应较地上部敏感，地下部能通过改变根系形态和构型来适应低 P 环境，所以地下部生物量在不同形态无机 P 处理间的差异较地上部小，如菠菜在 DCP、OCP 和 Al-P 处理下地下部生物量没有显著性的差异。生菜在 DCP、OCP 和 Al-P 处理间的差异与地上部相反，而番茄则与地上部一致，表明生菜通过增加根系生长来适应较难利用 P 的能力比番茄强。

根冠比在不同形态无机 P 处理间也有显著性的差异，生物量较小的处理，其根冠比较大（表 2）。这可能是作物适应较难利用 P 的表现之一。FA 处理的根冠比与不施 P 肥的对照处理没有显著性的差异，且大于其它处理，进一步表明 FA 的低有效性，FA 利用能力的提高与根冠比的关系较小。3 种蔬菜的根冠比在不同处理间的变化幅度有所不同，番茄的根冠比在 0.24 ~ 0.36 间，而菠菜和生菜则分别在 0.39 ~ 0.80 和 0.24 ~ 0.71 间，这可能是由作物自身的生理适应机制决定的。

2.2 不同形态无机 P 处理对 3 种蔬菜 P 肥利用率和 P 积累量的影响

不同形态无机 P 处理时，3 种蔬菜的 P 肥利用率都较低，处理间存在显著性差异（表 3）。P 肥利用率较低可能与种植时间较短，作物生物量较小有关，生菜 DCP 处理时生物量最大，P 肥利用率也最高。相关性分析表明（表 4），番茄的 P 肥利用率与地上部干重、地下部干重和根冠比均呈极显著相关，而与菠菜的根冠比仅达到显著性相关。这可能是因为番茄对 P 的需求量比菠菜大，所以表现得更为明显。生菜属于须根系作物，这可能导致了地下部干重与 P 肥利用率间没有显著的相关性。

生菜 P 积累量 DCP > OCP，两者地上部干重间没有显著性的差异，地下部干重 OCP > DCP（表 3）。P 积累量较大，表明 DCP 对生菜的有效性较 OCP 高，但是有效性的差异并不能从地上部生物量上体现出来；地下部生物量 OCP > DCP 则进一步说明了 DCP 的有效性较 OCP 高，地下部生物量增加是作物适应较难利用 P 的一种响应。比较番茄 DCP 和 OCP 处理时的地上部干重、地下部干重和 P 积累量，发现三者的变化趋势是一致的，均为 DCP > OCP，表明番茄利用

表 3 不同形态无机 P 处理下 3 种蔬菜的 P 积累量 (mg/盆) 和 P 肥利用率 (%)

Table 3 Effects of different forms of inorganic phosphate on P accumulation amount and P utilization rate in three vegetables

蔬菜	-P	FA	Fe-P	Al-P	OCP	DCP
生菜	0.20 d	0.65 d	2.42 c	2.68 c	4.23 b	5.53 a
	-	(0.56)	(2.77)	(3.10)	(5.04)	(6.67)
菠菜	0.17 d	1.31 c	1.09 c	2.13 b	3.39 a	3.52 a
	-	(1.42)	(1.15)	(2.45)	(4.02)	(4.18)
番茄	0.22 f	0.43 e	1.19 d	1.73 c	2.28 b	3.28 a
	-	(0.27)	(1.28)	(1.89)	(2.57)	(3.82)

注：括号内数字为 3 种蔬菜的 P 肥利用率。

DCP 的能力比 OCP 强。然而植株生物量和 P 积累量对不同形态无机 P 的响应趋势并不是完全一致的, 如番茄 OCP 和 AI-P 处理下, 地上部干重和地下部干重均为 AI-P>OCP, P 积累量则是 OCP>AI-P。AI-P 处理虽然植株积累的 P 较少, 但生物量却较大, 这可能与植株体内的 P 利用率有关, 所以我们进一步分析了不同处理下 3 种蔬菜的 P 利用率。

表 4 地上部生物量、地下部生物量和根/冠与 P 肥利用率的相关性

Table 4 Correlation between P utilization rate and shoot dry weight, root dry weight, root/shoot

蔬菜	地上部干重	地下部干重	根/冠
生菜	0.791**	0.299	-0.841**
菠菜	0.843**	0.721**	-0.512*
番茄	0.874**	0.752**	-0.687**

注: *表示两者达到显著性相关 (p<0.05), **表示两者达到极显著性相关 (p<0.01)。

2.3 不同形态无机 P 处理对 3 种蔬菜体内 P 利用效率和 P 转运的影响

表 5 是不同处理时 3 种蔬菜的 P 利用效率。从表 5 可以看出, 菠菜的 P 利用效率在各形态无机 P 处理间没有显著性的差异, 生菜的 P 利用效率为 AI-P、FA、Fe-P>OCP>DCP, 番茄的 P 利用效率为 FA>AI-P>Fe-P>DCP、OCP。P 积累量最大的 DCP 处理 3 种蔬菜的 P 利用效率较低, P 积累量最小的 FA 处理 P 利用效率较高。然而与丁洪等^[22]在大豆上的研究结果不同, 并不是对于所有形态的无机 P 都是 P 积累的越少, P 利用效率越

高。如番茄 P 积累量 Fe-P<AI-P 处理, P 利用效率也是 Fe-P<AI-P。另外番茄 P 积累量 OCP>AI-P 处理, P 利用效率 AI-P>OCP。以上结果同时也表明番茄 AI-P 处理下的 P 利用效率较高, 且与 P 积累量无关, 较高的 P 利用效率使 AI-P 处理下的生物量较 Fe-P 和 OCP 高, 这与前面的结果一致。本试验中较难比较番茄利用 AI-P 和 OCP 能力的差异, 可能是由于试验种植作物的时间比较短。生菜 Fe-P 和 AI-P 处理 P 的积累量分别是 FA 处理的 3.7 和 4.1 倍, 而 P 利用效率 3 个处理间却没有显著性的差异, 均处于较高水平, 表明 Fe-P 和 AI-P 对生菜的有效性较高, 表现在生物量上也是较大的。菠菜的 P 利用效率在不同处理时没有显著性的差异, 所以生物量和 P 积累量对各种形态无机 P 的响应趋势一致。

表 5 不同形态无机 P 处理下 3 种蔬菜的 P 利用效率

Table 5 P utilization efficiencies of three vegetables under different forms of inorganic phosphate treatments

蔬菜	FA	Fe-P	AI-P	OCP	DCP
生菜	539.8 a	537.8 a	549.0 a	393.5 b	293.6 c
菠菜	309.9 a	364.9 a	341.8 a	263.3 a	229.7 a
番茄	612.0 a	360.1 c	450.3 b	266.9 d	229.3 d

不同形态无机 P 处理下 3 种蔬菜地上部和地下部 P 积累量占总量的比例如图 1 所示。从图 1 可以看出, 在 P 肥利用率较低的 FA 处理中, 生菜和菠菜体内的 P 主要分布在地下部, 地下部积累量占整株的比例 (分

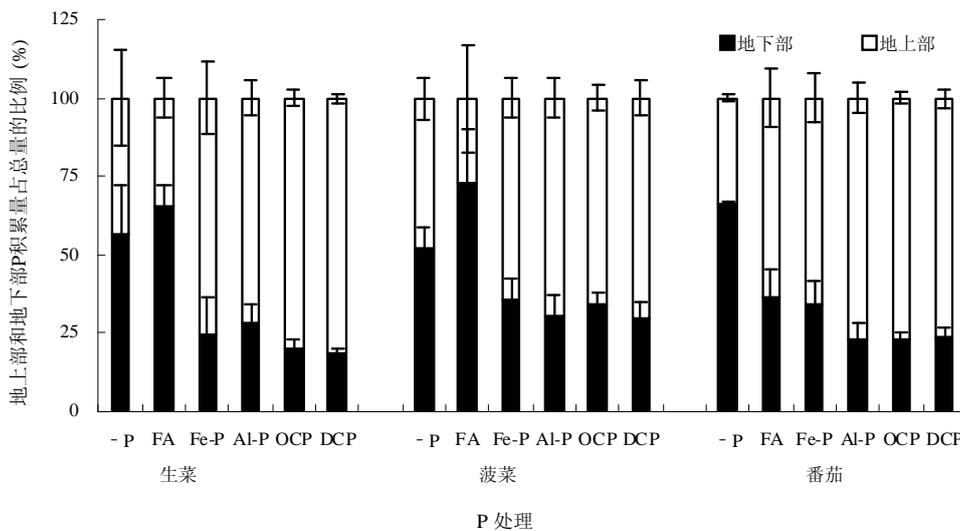


图 1 不同形态无机 P 处理对地上部和地下部 P 积累量占总量比例的影响

Fig. 1 Effects of different forms of inorganic phosphate on percentages of P accumulation amount in shoots or roots to total P accumulation amount

别为 65.6% 和 72.7%) 显著高于其它处理 (主要分布在地上部), 表明根部对低P胁迫的响应优于地上部, 这与前人的研究结果一致^[23]。与生菜和菠菜不同, 番茄在FA处理时体内的P主要分布在地上部 (地上部占 63.6%), 可能是因为番茄对P更为敏感, 从而加速了往地上部的运输; 但FA的有效性仍然是最差的, FA处理下地下部的P积累量仍然高于Al-P、OCP和DCP处理。

3 结论

不同形态P的有效性, 是指产生干物质多少的效应和P被植物吸收量大小的效应^[24]。本试验中综合生物量和P积累量的结果表明, 生菜利用各形态无机P的能力强弱顺序为DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA, 菠菜为DCP、OCP>Al-P>Fe-P>FA。对于番茄应将生物量和P积累量分开考虑, 即从生物量角度分析为Al-P、DCP>OCP>Fe-P>FA, 从P积累量角度分析为DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA。

参考文献:

- [1] Chang SC, Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 1957, 84: 133-144
- [2] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. *中国农业科学*, 1989, 22(3): 58-66
- [3] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法. *土壤*, 1990, 22(2): 285-288
- [4] 安志装, 介晓磊, 李有田, 刘世亮, 魏义长, 自由路. 合成磷源在石灰性潮土中的有效性及氮肥形态对其的影响. *土壤学报*, 2002, 39(5): 735-742
- [5] 李健梅, 曹一平. 磷胁迫条件下油菜、肥田萝卜对难溶性磷的活化与利用. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1 (3/4): 36-41
- [6] 赵明, 沈宏, 严小龙. 不同菜豆基因型根系对难溶性磷的活化吸收. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 435-440
- [7] 李锋, 曲雪艳, 潘晓华, 姚锋先, 杨福孙. 不同水稻品种对难溶性磷利用能力的初步研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 420-424
- [8] 郭再华, 贺立源, 徐才国. 不同耐低磷水稻基因型秧苗对难溶性磷的吸收利用. *作物学报*, 2005, 31(10): 1322-1327
- [9] Qiao YF, Han XZ, Miao SJ. Genotypic variation in P utilization of soybean (*Glycine max* L.) grown in various insoluble P sources. *Soybean Science*, 2007, 26 (4): 571-577
- [10] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. *磷肥与复肥*, 2003, 18(1): 4-8
- [11] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翻. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(2): 179-186
- [12] 宋付朋, 张民, 于林. 石灰性菜园土壤中各形态磷素的富集与变异特征. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 65-69
- [13] 于群英, 李孝良, 李粉茹, 汪建飞. 安徽省土壤无机磷组分状况及施肥对土壤磷素的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 57-66
- [14] Aulakh MS, Kabba BS, Baddesha HS, Bahl GS, Gill MPS. Crop yield and phosphorus fertilizer transformations after 25 years of applications to subtropical soil under groundnut-based cropping systems. *Fields Crops Research*, 2003, 83 (3): 283-296
- [15] 顾益初, 李阿荣, 蒋柏藩. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力. *土壤*, 1991, 23(6): 296-301
- [16] 顾培, 巩万合, 陈荣府, 王火焰, 沈仁芳, 徐小华. 普通消解与微波消解分析植物样品中 Al 等元素的方法比较. *土壤通报*, 2007, 38(3): 616-618
- [17] Reddy MN, Surekha K. Role of chickpea in enhancing available P in chickpea-rice system in Vertisol. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 1999, 77: 805-808
- [18] 李永夫, 罗安程, 魏兴华, 姚旭国. 水稻利用难溶性磷酸盐的基因型差异及其与根系分泌物活化特性的关系. *中国水稻科学*, 2006, 20(5): 493-498
- [19] 沈宏, 杨存义, 范小威, 严小龙. 大豆根系分泌物和根细胞壁对难溶性磷的活化. *生态环境*, 2004, 13(4): 633-635
- [20] 沈宏, 菊井森士, 严小龙, 松本英明. 大豆根系分泌物活化难溶性铝磷的研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 68-83
- [21] 周冀衡, 李永平, 杨虹琦, 王勇, 邵岩, 郭紫明, 朱列书, 王文广. 不同基因型烟草根系分泌物对难溶性磷钾的活化效应. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2005, 31(3): 276-280
- [22] 丁洪, 李生秀, 李世清. 不同形态无机磷对不同大豆磷利用效率的影响. *中国油料作物学报*, 1998, 20(4): 71-75
- [23] Raghothama KG, Karthikeyan AS. Phosphate acquisition. *Plant and Soil*, 2005, 274: 37-49
- [24] Gourley CJP, Allan DL, Russelle MP. Defining phosphorus efficiency in plants. *Plant and soil*, 1993, 155/156: 289-292

On Utilization of Different Forms of Inorganic Phosphate by Lettuce, Spinach and Tomato Seedlings

YI Xiao-yun^{1,2,3}, CHEN Zhi-chang^{1,2}, LIANG Lin-zhou^{1,2}, ZHAO Xue-qiang¹, SHEN Ren-fang¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China)

Abstract: A quartz sand culture experiment was conducted to study the bio-efficiency of different forms of inorganic phosphate, i.e., DCP, OCP, FA, Al-P and Fe-P, and the differences in P uptake and utilization by three vegetables, i.e., lettuce, spinach and tomato. The results showed that the utilizations of different forms of inorganic phosphate in three vegetables were different. The utilization of different forms of inorganic phosphate was in the orders of DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA in lettuce, DCP, OCP>Al-P>Fe-P>FA in spinach, and Al-P, DCP>OCP>Fe-P>FA in tomato based on the dry weight. Total P accumulation showed an order of DCP>OCP>Al-P>Fe-P>FA in all three vegetables.

Key words: Vegetable, Inorganic phosphate, Dry weight, P accumulation amount, P utilization efficiency