

磷肥品种、土壤性质和植物磷素营养间的相互关系

李庆逵

(中国科学院土壤研究所)

近年以来,由于绿肥面积的扩大,化学氮肥用量的增加,高产作物品种的推广以及低产田的改良等,对磷肥的需要也随之大为增加,磷肥的供应问题便显得十分突出。解放以来,地质工作者发现了大量的磷矿,其中一部分已经做了详细的勘察,化学工业部门也根据我国具体条件,生产了适宜的磷肥品种。这样,我国磷肥工业实际上已经走上了自力更生的道路。

随着磷肥用量的增加,有关磷肥生产品种和磷肥施用方法等的研究也日益为科学工作者所注意。这篇报告扼要的介绍一下各种磷肥的性质、发展历史和生产状况,磷酸盐在土壤中的转化过程,以及植物对磷酸盐的吸收机制。

一、世界磷矿的发展史和磷矿石¹⁾生产状况

虽然千百年以前人们早已用骨粉作为磷肥,但是磷矿的发现还只有一百二十年的历史。而磷肥工业的发展以及作物磷素营养问题具有解决的可能却又在磷矿石大量开发以后。当前国外磷矿石的年产量约为3900万吨^[1]。

世界上第一个发现的磷矿是在英国(1845),接着在法国(1850年前后),这些早期发现的小型低品位磷矿现在已经放弃了^[2]。美国在1867年首先发现南加罗来纳矿,但是美国的佛罗里达和田纳西的巨型高品位磷矿直到1890—1895年间才大量开采,目前美国出产的磷矿石约占国外总产量的42%^[1]。

国外第二位产磷矿石的地区是北非洲,主要是摩洛哥和突尼斯,这两个国家1960年的总产量约为950万吨^[3]。北非磷矿石的品位较高而晶体构造又很疏松,磨成磷矿粉直接施用是世界上最优良的类型,有它特殊的价值。摩洛哥磷矿石广泛销售于欧陆、亚洲和拉丁美洲许多国家。

苏联在1885年开始发现磷矿。它拥有一些分布广泛、品位中下的磷灰土,如乌拉尔山区,斯

摩梭斯克等地的磷灰土曾大量作为磷矿粉来直接施用。苏联早期的过磷酸钙其磷酸(本文中的磷酸均指 P_2O_5)含量有的只有12%。科拉半岛的高品位巨型磷灰石矿是在1923年才发现的。苏联1961年的磷矿石产量约为国外总产量的18%^[1]。

我国发现的第一个磷矿是锦屏磷矿(1919年,即东海磷矿),1938年发现昆阳磷矿,1947年发现凤台磷矿。对于这三个磷矿的储量解放以前也没有详细的勘测。1949年解放以后我国所发现的磷矿多至数十处,已经完成了详细地质勘测的矿区中包括了某些巨型和大型的磷矿,矿石的开采量也逐年提高。这样,使磷肥工业得以迅速发展,逐渐满足了我国农业上对于磷肥的需要。

二、磷肥工业的发展

世界上生产的巨额的磷矿石中,有很大一部分是供肥料用的。现在国际上所生产的磷肥品种已经很多,我们按磷素的性质,归纳成下列几类来介绍。

1. 水溶性磷肥(包括过磷酸钙、重过磷酸钙等的磷酸一钙,以及铵、钾、钠的磷酸盐)。早在1840年著名农业化学家 Liebig 已经把硫酸加在骨粉中,指出这样制成的可溶性磷肥对于作物生长的效应要比骨粉好。Liebig 的研究实际上已经奠定了过磷酸钙工业的基础。到1857年在磷矿石发现以后,他又建议把硫酸加在磷矿粉上制造过磷酸钙。1860年英国的过磷酸钙产量为每年20万吨^[4]。

在1950年以前,过磷酸钙是世界上的主要化学磷肥,它含有20%上下的磷酸和大约一半的石膏。为了运输及施用上的方便起见,近十年来重过磷酸钙的发展很快,它的成分接近于纯粹的磷酸一钙,含磷酸45—50%。重过磷酸钙是以磷酸和磷矿粉为原料来制造的。

1) 这里把有经济价值的含磷岩石统称为磷矿石。

目前磷酸铵、磷酸钾等复合肥料也逐渐为人们所重视。世界上的水溶性磷肥是向浓缩肥料和复合肥料方向发展的。1961年美国所施用的磷肥中有三分之二是含磷酸44%以上的重过磷酸钙以及复合磷肥^[6]。当前我国通用的水溶性磷肥是过磷酸钙。

2. 沉淀磷肥——磷酸二钙 CaHPO_4 。由于肥料工业上硫酸的供应比较紧张,而有些国家的硫酸资源又极为贫乏,因此便应用盐酸或硝酸来分解磷矿粉(重过磷酸钙虽然是用磷酸来制造,但是在现在的工业流程中制造磷酸仍然要用硫酸做原料。因此对于硫酸并没有节省),在制成的磷酸一钙中,含有大量的氯化钙或硝酸钙,这是高度吸湿性物质,使肥料的物理性质变得很坏,因此需要加以分离。但是在析出这些可溶性钙盐的过程中,磷酸一钙沉淀为磷酸二钙(一般称为枸溶性磷)。沉淀磷肥中,磷酸对植物的供应强度,在一定程度上受土壤性质的影响。

磷酸二钙的商品肥料主要是由比利时和法国制造,在国际市场上不占重要地位。但是目下有一部分复合肥料,其磷素组成实际上是属于磷酸二钙,我国开始生产的硝酸磷肥,便是属于这一类型。

3. 钙镁磷肥。钙镁磷肥的制造原理首先是在1943年由Walthall及Bridger提出来的^[5]。就国外的生产情况看来,这项磷肥以日本发展最快(1959年产量为40万吨)。钙镁磷肥是用磷矿石加蛇纹石或橄榄石(也有掺入部分白云石的),在1400—1500℃熔化,经水淬而制成的。优质的钙镁磷肥含磷酸20%上下,全部为枸溶性。此外还含有大量的枸溶性镁(约10—20%)。

把优质的钙镁磷肥制成2%水溶液,其酸度为pH 8—8.5,它的总碱量通常可以相当于35%上下的生石灰。因此钙镁磷肥是一种碱性肥料,在我国红壤地区施用,对作物的增产效应可以相当于(甚至超过)含有等量磷素的过磷酸钙。最近三五年以来,我国南方各省普遍发展钙镁磷肥,在产品质量上也不断的提高,这种磷肥已成为我国主要磷肥品种之一。

化学工作者似乎没有肯定这项磷肥的分子结构,一般认为它是一种玻璃体,但是也有人主张它是磷酸二钙和磷酸二镁的混合组成。

4. 脱氟磷肥。脱氟磷肥的生产不过20年的历史,它是氟磷灰石在高温下通过水蒸汽制成的。

优质的脱氟磷肥在国外大都掺和在饲料中,作为牲畜的磷素营养。它的有效成分是磷酸三钙 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$,是枸溶性磷,在国际肥料市场中不占重要地位。当前我国也有生产这项磷肥的考虑。

5. 钢渣磷肥。按照国际上磷肥的用量来讲,钢渣磷肥占有重要的地位。它是炼钢工业的副产品,是售价最低的磷肥(除磷矿粉外)。第二次世界大战以前年产量达500多万吨,1957—1958年间年产量为122万吨,主要是德意志民主共和国和德意志联邦共和国生产。钢渣磷肥的成分随铁矿质量而变化,虽然最优良的产品可以含磷酸达17%上下,但是一般很少超过15%,低品位的钢渣含磷只有7—8%。国际市场上规定,商品钢渣磷肥的磷酸含量不能低于12%,其中至少应有80%可以溶解于2%的柠檬酸。我国炼钢工业迅速发展,钢渣磷肥将因而逐渐占有重要地位,但是1965年以前的产品其有效磷的含量大都偏低。

至少有一部分化学工作者认为钢渣磷肥的磷素组成主要是磷酸四钙 $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$,虽然它通常被看成是磷酸和硅酸的复合钙盐。

6. 磷矿粉。磷矿粉的分子式是 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot (\text{F}, \text{OH})_2$ 。我国主要的磷矿石是氟磷灰石,其溶度积为 $\text{pK} 114.25$ 。国内石灰性土壤中的主要磷素是氢氧磷灰石,其溶度积(pK)为111.82。因此磷矿粉的肥效只有在酸性土壤中才比较明显,而石灰性土壤中,通常则不施用磷矿粉。

磷矿粉的活度取决于它的晶体构造,结晶疏松的磷灰土,通常有较高的肥效。摩洛哥和突尼斯的磷矿粉其枸溶性磷占全磷的三分之一上下,它们广泛施用于北欧的灰化土上。苏联施用磷矿粉很多,斯摩棱斯克和库尔斯克的磷灰土,虽然品位较低,但是磷素的有效率比较高。我国已经发现的磷矿中,虽然有一部分结晶坚致,枸溶率极低,但是大都具有不同程度的枸溶率,加之我国又有大面积酸性缺磷土壤,所以在磷矿粉的利用上是很很有前途的。

上面我们已经介绍了几种主要类型的磷肥,其中有一部分磷肥品种在我国已经有了大量的生产,某些也正在发展中。现在按照磷酸活度递降顺序归纳如下:

水溶性磷肥(磷酸一钙, $\text{pK} 1.1436$,以及铵、钠、钾的磷酸盐)→磷酸二钙(二水) $\text{pK} 6.6616$ (枸溶性,包括各种沉淀磷肥,硝酸磷肥;钙镁磷肥可能也属于这一类)→磷酸三钙(枸溶性,包括脱氟

磷肥, 鸟粪, 骨粉, 我国西南地区的溶洞型磷矿(其主要的磷素组成也属于这一类)→磷酸四钙(钢渣磷肥的主要组成, 以枸溶性磷为主)→磷矿粉, $pK_{114.25}$, 其枸溶率因晶体构造而异。

虽然国际上磷肥生产的趋势总的来讲是往浓缩性和水溶性的方面发展, 但是农业情况, 土壤性质, 资源分布和工业条件等使每个国家还是需要比较全面的磷肥品种。即使施用浓缩磷肥最多的美国, 1948—1961年间的每年磷矿粉用量还始终保持在70—100万吨之间^[6]。

三、磷肥在土壤中的转化

各种磷肥施入土壤以后, 就发生一系列的变化。这种变化的方向除了决定于磷肥品种以外, 也决定于土壤性质, 特别是酸度, 粘土矿物类型, 铁、铝和石灰的含量, 以及土壤水分条件等。磷酸盐在土壤中可能引起的化学反映及其转化过程, 不仅影响到当季作物对于磷素的利用, 并且更重要的是决定了磷肥对于后作的效应。

1. 磷酸一钙的异成分溶解。现代土壤化学的研究说明了过磷酸钙在土壤中的动态并不能简单的以 $CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O$ 溶液在土壤中的沉淀和固定来表示。施入土壤中的过磷酸钙颗粒(或其他磷酸一钙肥料), 首先吸收土壤水分, 在颗粒的内部形成饱和溶液。在这项饱和溶液中便产生磷酸二钙(二水)的沉淀, 颗粒内的 $CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O$, $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ 和溶液之间随着保持一定时期的平衡, 按照 $25^\circ C$ 时的相律, 溶液中的成分为 $3.98M$ 磷, $1.44M$ 钙, 其酸度为 $pH 1.48$ (亚稳性三相点溶液)^[7], 进一步转变为 $CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O$, $CaHPO_4$ 和溶液间的稳定性三相点溶液, 其组成为 $4.50M$ 磷, $1.34M$ 钙, $pH 1.01$ 。这样, 饱和溶液便逐渐的向颗粒外围扩散, 形成不同梯度的磷溶液。然后再与土壤矿物质起反应。

由于这项溶液不断向外扩散, 使肥料颗粒附近的土壤的磷酸离子浓度高达 $10-20PPM$, 较之原来土壤溶液中的磷离子高出几百倍到一千倍, 并且大约可以维持五星期之久。因此, 水溶性磷肥在施入土壤以后, 在一个较长的时间内对于作物磷素营养有很强的供应率。磷酸离子逐渐的与土壤矿物起反应, 变成各种不溶物质。而残留下来的磷肥颗粒则继续以磷酸二钙的状态与土壤发生作用。

2. 磷酸离子在土壤中的沉淀。磷酸离子在酸

性土壤内的扩散过程中不断形成各种沉淀物质, 主要是各种磷铝石, 粉红磷铁矿 $FePO_4 \cdot 2H_2O$, 胶态磷酸铁 $FePO_4 \cdot xH_2O$ 等。实验室和温室中所发现的由水溶性磷酸盐与酸性土壤及各种肥料所形成的磷化合物不下三十种^[8], 大都具有不同程度的稳定性。因此, 总的讲来水溶性磷肥在酸性土壤中是逐步趋向于固定的。

在潜水条件下的水稻土, 有较低的氧化还原电位, 使高铁在还原条件下形成了活度较大的亚铁离子, 使磷酸的活度从而有所增加。这项作用有人认为是晶体粉红磷铁矿 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 通过还原作用, 转化为胶体磷酸铁所引起^[9]。也有人以为是在还原条件下, 可能形成活度较强的蓝铁矿 $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ 。

在石灰性土壤中施入磷酸一钙肥料时, 通过异成分溶解阶段而扩散出来的磷酸离子, 主要是与碳酸钙起反应, 初步的沉淀物质以磷酸二钙为主, 进一步转化为磷酸八钙, 土壤化学工作者证实土壤中石灰颗粒的外表面上包被着磷酸八钙沉淀物^[10]。磷酸八钙的溶度积(pK)为 46.90 , 其活度远较磷灰石为高。但是进一步的转化产物, 一般认为是氢氧磷灰石。

3. 磷酸二钙及其他枸溶性磷在土壤中的转化。上面已经说过, 把水溶性磷施入酸性土壤中, 磷酸离子通过扩散作用, 沉淀为各种铁盐和铝盐, 但是残余的肥料颗粒则成为磷酸二钙。至于在石灰性土壤中, 则主要形成磷酸二钙, 再逐渐碱化成为磷酸八钙。由此可以看到, 磷酸二钙在磷素营养问题上起了主要的作用, 这不仅是因为有一部分磷肥直接以磷酸二钙的状态施入土壤。土壤化学工作者几乎一致的认为磷酸盐在土壤中不能形成磷酸三钙, 因为磷酸三钙只是高温下的熔成产物(商业上的“沉淀磷酸三钙, 实际上是 Ca/P 分子当量为 $3/2$ 的氢氧磷灰石)。

把磷酸二钙颗粒施入土壤中, 在肥料颗粒的四围也形成了浓度极高的磷溶液。在中性及微石灰性土壤中所形成的饱和溶液, 其组成为 $1 \times 10^{-3}M$ 的钙, 土壤溶液的酸度也显著下降 (pH 由 7.40 降到 6.75)^[11], 这项高浓度的磷 ($30PPM$ 左右), 经 $40-60$ 天以后才明显的下降到 $10PPM$ 左右。在酸性土壤中由磷酸二钙所扩散的磷离子, 其浓度较之在石灰性土壤中的更高些。它和铁铝的氧化物发生沉淀。

沉淀磷肥、钙镁磷肥、钢渣磷肥等在酸性土壤

中的活度都较在中性和石灰性土壤中为高。生物试验也证明这些肥料在酸性土壤中的肥效相对讲来更明显些。在现有的文献上我们还没有看到磷酸三钙、磷酸四钙等在土壤中转化过程的研究,但是植物根系与肥料颗粒间的两相效应,使这些磷肥在各种土壤中都能有效地被植物所吸收。

4. 磷矿粉在土壤中的反应。磷矿粉的晶体构造决定了它在土壤中的活度。一般讲来,结晶疏松的磷矿粉在酸性土壤中的溶解度总是增加的。例如高度有效性的摩洛哥和我国凤台等磷矿粉在酸性土壤中(pH 4.5—5.5),其溶解度便急剧增加,中度有效的昆阳类型磷矿粉,只有在强酸性(pH < 4.0)条件下其溶解度始有明显的增加。有效性低的锦屏山类型磷矿粉,在 pH 3—8 之间,它的溶解度短期内不起变化。在酸性土壤条件下,磷矿粉逐渐分解的趋势是很明显的,同时磷矿粉的用量一般比化学磷肥来得高(以磷素计算通常为 2.5:1 到 3.0:1),因此,磷矿粉在酸性土壤中的后效往往高出过磷酸钙。

磷矿粉在土壤中的活度,第一决定于土壤酸度;第二决定于土壤代换量,在代换量高的酸性粘土上,磷矿粉的肥效总是较砂土上为高;第三决定于土壤中粘土矿物的性质,2:1 型粘土矿物活化磷矿粉的性能较高岭石型为强。Graham 曾经证明对钙离子的结合能强,同时具有较强的氢离子自由能的酸性胶体,对活化磷矿粉最为有效^[12]。

四、植物的磷素营养

1. 磷素供应量与磷素供应强度与作物生长的关系。在肥力中等,含磷酸 0.12% 左右的土壤中,每亩耕作层的土壤含有 350—400 斤的磷酸,而每亩一季作物所吸收的磷酸,通常在 3—8 斤。就量来讲,作物的磷素营养应该不是一个严重的问题。但是土壤中的磷素以各种磷酸钙盐、铁盐、铝盐、有机态磷以及极少量的吸附性磷的状态存在着,对植物营养来讲,有的可给性很低,有的要通过分解才能为植物所利用。因此磷肥对植物营养的作用,主要的是增进磷素供应的强度,不仅是一个量的问题。这点可以通过下面具体例子来说明^[13]。

在石灰性土壤中,磷矿粉通常不起增产作用,这并不是说农作物在石灰性土壤中不吸收磷矿粉中的磷素。把中度有效的昆阳磷矿粉,通过原子反应堆来标记,以每亩 350 斤用量施入含磷酸 0.17% 的灌云石灰性粘土中,证明小麦所吸收的

磷素有 35% 来自磷矿粉,但是小麦的产量和小麦植株中的磷素含量却没有增加,而施用过磷酸钙却起明显的增产作用。这说明磷矿粉中磷素的活度,大体上和石灰性土壤中的含磷矿物相等。植物虽然同样的能加以利用,但是供应强度并没有增加,而水溶性磷肥却能以较强的活度为植物所利用。可见植物营养的原理,不仅依赖于磷素供应的容量,并且也决定于磷素供应的强度。

农作物对于营养元素供应的强度要求,在磷素方面特别显著。许多试验指出,当植株干物质的累积量为成熟期的 30% 上下时,一般农作物大约已经吸收了整个生育期所需要磷素的 70% 左右。作物生长后期所需要的磷素,大多依赖于内部所积累的磷素的转移。

上面这些情况,说明了水溶性磷肥在作物营养中的重要地位。

2. 植物对于磷素的接触吸收。对于水溶性和枸溶性磷肥在土壤中的扩散范围,示踪化学的研究结果不很一致。扩散的梯度似乎限于 1 毫米到 25 毫米范围以内^[14]。但是磷酸离子只在几星期以内便在土壤中逐渐的趋于固定状态。因此接触吸收的意义对于磷肥来说较之氮素和钾素更具有重要性。

接触吸收的机制,虽然在植物根系营养研究上得到广泛的承认,但是这项学说及其验证,在理论上和实验方法上都受到了批评。主要的原因在于人们对于两相效应不够重视,包括“根系-土壤”间的两相效应和“根系-肥料颗粒”间的两相效应。Jenny^[15]在总结了兩相效应的文献以后,他说:“植物的生长是一个高速度的作用,为了使植物迅速生长,向根系表面提供的营养物质必须有一定的速率。以后我们可以看到,接触吸收是植物‘生’和‘死’的关键性问题”。

许多早期的试验结果已经证明,一般缺乏磷素的土壤其土壤溶液中的磷酸浓度大约在 $10^{-6}M$ 或 $10^{-7}M$ 以下。即使不缺乏磷素的土壤溶液,其磷酸浓度也只在 $10^{-5}M$ (大约相当于 0.3PPM) 到 $10^{-4}M$ 之间。即使一季作物的耗水量为 50 厘米,每亩土壤溶液中也只有 0.19 斤磷为植物所吸收,远远不能满足植物正常生长的需要。因此,磷素的接触吸收在植物根系营养上是占有很重要的地位。为了满足植物在幼苗时期高度需磷的情况,磷肥集中施用有重要的意义。

3. 植物根系分泌物的螯合作用和根系代换

量。生物试验指出,在植物的整个生长期中,早期所吸取的磷素来自肥料的比例比较高,而在生长的后期,则有更多的磷素来自活度显然较低的土壤磷素。近十年来螯合化学对于植物无机营养的研究结果^[16]认为,植物根系分泌物对于铁、铝、钙等阳离子的螯合作用,有助于增进磷素的活性。这样,在作物的幼苗时期往往需要较多的水溶性磷肥,而在根系发达以后,作物对于利用难溶性磷的性能便相对的增强。

我们也是根据这样的原理,在磷矿粉中掺和少量过磷酸钙来施用,大田试验证明这项措施能够获得显著的增产效果。

对于水溶性磷肥及枸溶性磷肥来讲,各种作物之间的吸收性能并没有明显的差别,但是对于磷矿粉的差别却极为明显。和吸收磷矿粉性能关系最密切的指标是植物根系的代换量。小粒禾谷类作物(包括小麦、大麦、燕麦、小米等)的根系代换量为9—15毫克/100克,吸收性能最弱。玉米为15—20,豆科作物(包括大豆、苜蓿、苕子、羽扇豆、饭豆等)为35—60,荞麦为40左右,萝卜菜为40—50。从我们的试验结果看来,这些根系代换量的数据与作物对磷矿粉的利用率有很好的相关性。

五、总 结

本文简要的介绍了与我国当前生产关系比较密切的几种磷肥,说明不同类型磷酸盐在土壤中的转化过程,以及植物吸收磷素的机制。根据这些材料提出下面几点意见供大家参考。

就国外磷肥生产和施用情况来看,每个国家总是按照他自己的肥料资源、农业需要和工业条件来发展磷肥工业的。欧陆国家、美国、苏联和日本在生产的磷肥品种上,也各有所侧重。我国面积广大,各地的农作制度、土壤性质和自然条件相差很远,能适应于我国情况的磷肥品种也比较多些。所以应当尽可能根据自己的工业和资源条件来做适当的安排。

水溶性磷肥(包括过磷酸钙、重过磷酸钙和其他复合正磷酸盐)在磷肥工业中占有首要地位。它适用于各种土壤(虽然施用方法可以有所不同),并且具有强度的供应率,能在较短的时期内满足作物对于磷素营养上的需要。

钙镁磷肥在酸性土区有特殊的效应,在强酸性土壤上的增产率不亚于过磷酸钙,也有少数的

例子超出过磷酸钙。在我国红壤地区低产田上广泛施用,已经收到很好的效果。钙镁磷肥在北方石灰性土区施用,也有增产效应,但是与过磷酸钙相比较时,相对的讲来,其效率便没有红壤区高。

各种沉淀磷肥属于磷酸二钙类型。西沙群岛的鸟粪,西南石灰岩山地的溶洞型磷矿粉,骨粉,脱氟磷肥均属于磷酸三钙类型,都是枸溶性磷肥,可以广泛的施用于石灰性、中性及酸性土壤上。当然,这些磷肥在酸性土壤上的肥效更好些。

钢渣磷肥应该是价格最低的磷肥品种,品质优良的钢渣磷肥中的主要磷素(通常应该有80%左右)是属于枸溶性的。在我国工业发展中,将逐渐占有重要的地位。这项强碱性的磷肥也是适宜于在酸性土区施用的。

磷矿粉是一种辅助性磷肥。一般来说,它不适宜直接施用于石灰性土壤。只有高度有效性的磷矿粉,施在酸性土壤上才能对当季农作物有明显的效应。但是在强酸性低产土壤上,它起长期的改土作用,在发展绿肥牧草和种植经济林木时有持久的肥效。根据我国磷矿的分布及其性质,估计磷矿粉也将起一定作用。

今天我国磷肥的生产已经有了很大的发展,当前农业化学工作者的主要任务,还是要在一个具有一定代表性的地区,根据当地的农作制度和土壤性质,切实找出经济有效的施用方法。这样才不至于浪费磷肥,使更大面积的农田可以受到磷肥的增产效益。

随着化学工业的迅速发展,新的磷肥品种还在不断的出现,现代土壤化学和植物营养方面研究的进展,使我们对磷素营养问题逐渐的明确起来。在土壤植物营养化学的研究方法和理论上,我们还有许多工作要做。

参 考 文 献

- [1] World Survey of Phosphates Deposits, Vol. 1, p. 2, The British Sulphur Corporation Ltd., London, 1961.
- [2] Gray, A. N.: Phosphate and Superphosphate, p. 22, New York, Interscience Publishers, Inc., 1943.
- [3] World Survey of Phosphates Deposits, Vol. 4, p. 2—18, The British Sulphur Corporation Ltd., London, 1961.
- [4] Waggaman, Wm. H.: Phosphoric Acid, Phosphates and Phosphatic Fertilizers, p. 238—240, Reinhold Publishing Corporation, New

- York, 1952.
- [5] 同文献 [4] p. 387—390.
- [6] Scholl, W., Schmidt, W., Wilker, C. A.: Preliminary report consumption of commercial fertilizers and primary plant nutrients in the United States year ended June 30, 1961, Commercial Fertilizer and plant food Industry, vol. 104, no. 4, 23—26, 1962.
- [7] Huffman, E. O. and Taylor, A. W. (曹翠玉译): 水溶性磷在土壤中的动态。土壤译丛, 第5期, 32—37页, 1964年。
- [8] Lindsay, W. L., Frazier, A. W., Stephenson, H. F.: Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26:446—452, 1962.
- [9] 蒋柏藩等: 南方水稻土中磷酸铁对水稻磷素营养的意义, 土壤学报 11卷, 361—369页, 1963年。
- [10] Bouldin, D. R. and Semple, E. C.: Laboratory and green house studies with monoammonium and diammonium phosphates, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 23:338—342, 1959.
- [11] Moreno, E. C. Lindsay, W. L. and Osborn, G.: Reactions of dicalcium phosphate dihydrate in soils, Soil Sci., 90:58—68, 1960.
- [12] Graham, E. R.: Soil chemistry availability of natural phosphates according to energy changes, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 19:26—29, 1955.
- [13] 李庆远等: 应用放射性磷矿粉进行土壤性质对植物吸收磷素的影响的研究, 土壤学报 12卷, 330—337页, 1964年。
- [14] Murdock, J. T. Corey, R. B. Bhure, N. D., Waugh, D. L.: Special techniques for the use of radioisotopes in soil and fertilizer research. Trans. 7th Intern. Congr. Soil Sci., 3:526—534, 1960.
- [15] Zarrow, M. X.: Growth in Living Systems, p. 665, Basic Books, Inc., New York, 1961.
- [16] Wallace, A.: A Decade of Synthetic Chelating Agents in Inorganic Plant Nutrition, Edwards Brothers, Inc., Ann. Arbor, Michigan, U.S.A., 1962.