植物营养与肥料学报 1999,5(3):193~205
Plant Nutrition and Fertilizer Science

植物营养与肥料学科的现状与展望①

李生秀
(西北农业大学资源与环境科学系,陕西杨陵 712100)

摘要 经过了一百多年科学家的辛勤工作,植物营养和肥料学科已经形成了自己完整的科学体系,在农业生产中发挥了巨大作用。目前的植物营养与肥料学科正在向定量化投入营养物质的方向发展,在考察宏观效应的同时充分注意考察微观机理,把各营养元素之间的交互作用作为研究的热点,并正与环境科学、生态科学在交叉,向植物遗传学渗透和扩展而形成新的学科。加强植物营养物质的循环和再利用,提高营养物质的利用效率,提高作物本身吸收利用养分的能力,发展保肥增效的新型肥料将是今后植物营养与肥料科学的研究重点。市场经济促进了新型肥料的出现和生产,也产生了形形色色的模糊概念,影响了植物营养与肥料科学的正常发展。这些模糊概念表现在,过低地估计了化学肥料的作用,过高地估计了化肥的污染效应;把农作物产品质量的降低归罪于化学肥料的施用;歪曲了肥料概念,造成了商品混乱。澄清这些模糊概念,有助于植物营养与肥料学科的发展,也有利于农业生产的发展。

关键词 植物营养;肥料;进展与现状;研究重点;展望

生产实践的需要是科学发展的源泉,也是促进科学发展的动力。人类开始种植植物以获取生活资料之后,就逐渐认识到了植物需要营养,植物需要肥料。通过农业生产实践,人类逐渐认识了可以作为肥料的物质,也逐渐累积了植物营养与肥料学科方面的知识。由此可见,植物营养与肥料学科源远流长,伴随着农业兴起而兴起,伴随着农业发展而发展。

但是,经验毕竟不是科学,现象也决不等于本质。要把经验的、现象的认识变成植物营养与肥料科学,必须经过由此及彼、由表及里、由浅入深、由现象到本质的深化过程,使实践的认识上升成为系统理论。完成这一任务的是 Liebig。1841 年,Liebig 发表了《化学在农业和生理学上的应用》[1],提出了矿质营养学说;又在以后的修改版中提出了最小养分律,为植物营养和肥料学科奠定了理论基础,也有力地促进了化肥工业的发展。此后,研究者沿着这一方向不断深入,使植物营养理论日趋完善[2,3]。植物营养和肥料科学一直以土壤、植物和肥料为研究对象,但重点各有不同:植物营养学科主要是研究植物营养元素在土壤中的转化和归宿,作物对营养元素的吸收和代谢,营养元素的功能和生理效应,元素之间的相互作用;而肥料科学则是在植物营养理论指导下研究肥料的制造、生产和应用。植物营养与肥料科学是一对孪生兄弟,前者是后者的基础,而后者则是前者的延伸和应用,两者相依相存而构成一个整体。

经过 160 多年科学工作者不懈的努力,植物营养与肥料科学已步入了一个新阶段,取得了很大进展。既形成了自己的科学体系,又在农业生产中发挥了重要作用。

---

① 国家自然科学基金资助项目(39770425)

本文为作者于 1999 年 4 月在桂林召开的"中国植物营养与肥料学会第五届会员代表大会暨学术年会"上的学术报告。应与会代表要求,并经作者进一步修改,现予发表——编者。

1 植物营养与肥料学科的现状

1.1 定量化的研究方向

一百多年来,植物生理学家、植物营养学家和肥料学家通过大量工作,确定了植物需要哪些营养元素,各个营养元素的生理功能和代谢过程,不足和过剩所导致的生理失调现象;营养元素在土壤中的行为和归宿,各个土壤供应不同营养元素的状况,确定了因土因作物施用肥料的依据和指标。但这些工作大多属于定性方面的研究,涉及到定量方面尚少。现在,植物营养与肥料学科已经在过去工作的基础上,集中于定量方面的研究,即根据植物的营养特点,根据土壤供应养分的情况,通过施肥定量地投入营养物质,调节植物生长和发育。国内外发展起来的平衡施肥,测土施肥,植株诊断施肥,我国通过实践所形成的三类六法配方施肥技术[4,5],反映了定量投入营养物质研究方面的一些进展;而利用数学模型确定不同环境、不同作物、不同生育阶段养分的供求则是这一方面进一步的深化。为了确定合理的养分投入量,各种试验方法,各种数学模型也日益出现[6~12]。虽然这一方面的工作尚属起步,距达到定量调控的要求尚有不少差距,但这一好的开端促使了这一工作更快发展。

1.2 同时考察宏观效应和微观机理

科学的发展大致遵循着从效应到机理的研究过程,植物营养和肥料学科也不例外。早期和中期的工作大都集中在查明各个营养元素的宏观效应,确定有效施用条件。现在的研究工作已在此基础上深入了一步,在重视宏观效果的同时也重视微观机理。从土壤来说,重点是考虑营养物质在其中的变化、吸收、迁移和流向;从作物来说,主要考虑对养分的吸收、转运,在不同器官、部位的分布和累积,以及同化和代谢过程,这些过程所导致的生理效应;从肥料来说,主要是考虑投入后的利用效率,对产品数量和质量的效应,对环境的影响等。这些方面深化了植物营养与肥料学科的研究领域,也促进了植物生理学、植物营养生理学的进一步发展。

1.3 各营养元素之间的交互作用已成为关注热点

一百多年来的研究工作,尤其是近几十年的研究工作表明,营养元素之间、营养元素与作物之间、营养元素与土壤之间的作用是复杂的,是相互联系的。不从联系的观点出发,孤立地研究某一元素的作用则难以从本质上全面揭示这一元素的行为。例如,磷肥有无效果,除受作物需要、土壤供应等因子限制外,还受到供氮多少的限制;磷对氮有促进作用,而对锌则有颉颃作用。有一位科学家预言,今后科学的研究重点将不再是各个事物的本身效应,而是它们之间的交互作用。这一说法是正确的,只有查明交互作用不同方向(正交互还是负交互)及大小,才能避短而扬长,充分发挥营养元素的作用。正因为如此,植物营养与肥料学科正转向研究各营养元素之间颉颃、抑制、协同和激励等方面的交互作用。

1.4 正与环境学科、生态学科在交叉中发展

不少的植物营养元素也是污染元素,施用不合理就会污染环境,引起生态条件恶化。就氮素来说,在通气良好的旱地土壤上,施入的有机肥料中的氮素,或铵态氮、酰胺态氮肥,均会经硝化作用转变为硝态氮。形成的硝态氮进入植物体后,大部分经过硝酸还原酶作用参与植物一系列代谢过程;但如果施氮多,就会有一部分氮素以硝态氮的形态存在于植物体内,这一情况在蔬菜中更为严重。形成的硝态氮也会随径流流失或随水下渗,污染湖泊和地

下水源。农田当季未回收的氮素大部分进入水体和大气,成为污染环境最重要的氮源。据估计,流入河、湖中的氮素约有 60% 来自化肥。水体氮素污染加剧了地面水体的富营养过程,引起藻类大量生长,使水中氧气耗竭而导致水生生物死亡或绝迹。硝态氮对地下水的污染更为严重。不少地区地下水中硝态氮含量已超过饮水标准。70 年代,化肥氮增长 6.4%,同期地下水中硝态氮含量增加了约 23%。存在于植物或地下水中的硝态氮严重危害摄食、饮用它的人体健康。进入人体的硝态氮在体内还原成亚硝态氮(NO_2-N)后,能迅速进入血液,将血红蛋白中的铁氧化为高铁,使其形成无法运载氧气的高铁血红蛋白,影响氧气运载。亚硝态氮还可与各种胺类发生反应,生成致癌的 N—亚硝基胺和次生胺两类物质。在过量施用氮肥的地区,农作物抗病虫能力减低,导致农药大量施用,不仅增加农业成本,而且加剧了环境质量下降,导致一些物种灭绝。氮肥如此,磷、钾化肥也是这样。我国磷肥的当季利用率只有 15% 左右;即使把后效包括在内,也不超过 25%。磷肥投入增加了土壤重金属元素如镉(Cd),铅(Pb)和氟等的含量,磷素流失更是导致湖泊富营养化的主导因素。这种恶性循环已经并将继续危害人类的生存和健康,若不改善,势必动摇整个农业基础,威胁人类的健康。另一方面肥料的不合理应用还能引起大气环境变化,直接影响人类生存。现已查明,世界性的三大环境问题,即臭氧层的破坏,温室效应气体以及最近日本人提出的所谓环境激素,都直接和间接地与施肥有关。

臭氧层是在地表上空 15～50 km 的平流层里存在的臭氧含量高达 10ppmv 的气层。臭氧对太阳光中的紫外线有极强的吸收作用,能吸收高强度紫外线的 99%。如果没有臭氧气层这一天然保护屏障,让太阳光中的紫外线全部到达地球的话,人体和其他生物被曝晒的程度将比夏天烈日下强 50 倍。但据美国宇航局观测,自 1969 年以来,除赤道外,全球所有地区臭氧层中臭氧含量减少 3%～5%,对人类和生物产生了直接不利效果。臭氧层中臭氧含量减少 10%,地面不同地区的紫外线辐射将增强 19%～22%,由此引起的皮癌发病率将增加 15%～25%。现在全世界每年约有 10 万人死于皮癌,多与臭氧层破坏有关。造成臭氧层破坏的一个原因是施用肥料所引起的氮的氧化物增加,主要的是 NO_2,会在平流层中参与重要的大气反应而消耗臭氧。据估计,大气中的 NO_2 浓度增加一倍,臭氧层就会减少 10%[13～17]。

温室效应的实质是气体效应。大气中某些气体会使太阳入射的短波透过,但却阻止地面反射的长波向高空逸散,结果造成地球表面的热量收支不平衡,导致大气增温,全球变暖。这是一种环境灾害,会引起海水上涨,海平面上升,冰川融化,水资源分布变化,从而影响农业生产和整个人类生活。温室效应气体之一是 N_2O,主要来自投入的氮肥或有机物质中的氮素经过化学反硝化和生物反硝化而产生。这种气体在对流层中的惰性较大,寿命长达 110～150 年;且一个分子的增温效应约为一分子二氧化碳的 200 多倍。据估计,大气中 N_2O 的浓度每增加 0.2%～0.3%,温室效应将增加 5%[18～22]。

除了臭氧层破坏、温室效应之外,日本人最近提出的另一个威胁全人类的环境问题就是所谓"环境激素"。大量调查证明,施用农药以后,可以形成类似于雌性激素一类物质。这类物质已弥漫世界各地,广泛存在于土壤、海水和大气中,喜马拉雅山也发现了 DDT 的痕迹。这些环境激素通过食物链进入生物体后,首先影响雄性生殖系统,特别是野生动物和人类生殖系统,使精液量、精子数量减少,精子活性降低,导致一些野生动物绝种;同时由于具有着雌性激素的特点,使女性发育提前,男性女性化,阴胜阳衰。如此下去,人类和生物面临着

断子绝孙的可怕趋势。目前尚未证明施用化肥是否会产生环境激素,但有确切的证据说明,应用调控植物生长和发育、调控植物营养代谢过程的某些生长调节物质本身就是环境激素,或是环境激素的前产物。这些环境问题已引起了植物营养与肥料学家的广泛关注,促进了植物营养和肥料科学与环境科学的交叉和融合。

1.5 正在向植物遗传学扩展

矿质营养是植物生长发育的基本物质和调节因子之一,但作为供应矿质养分介质的土壤并不能完全满足其生长发育之需。据估计,全世界近 130 亿 hm^2 的土壤中,约有 22.5% 存在着不同程度的养分胁迫。另一方面,即使土壤比较肥沃,养分供应比较充分的土壤也会随着作物产量的提高而日益贫瘠。解决这一问题的主要途径是改善土壤的养分状况,创造合适的营养条件,保证作物高产优质。这是一条有效的途径,也是过去植物营养与肥料学科致力工作的方向。农业生产中日益突出的经济、生态环境、自然资源等问题迫使人们寻求另外一条途径。这就是通过育种手段改变植物的矿质营养遗传学特性,使其活化土壤固有的养分,把它们由植物不能利用的形态变为植物可利用的形态,从而挖掘土壤固有的养分潜力,充分利用自然资源。自古以来,人们就知道不同作物和同一作物的不同品种对有养分胁迫的土壤反应并不一致,并把这种知识成功地用在农业生产实践中,但现代的科学手段开拓了人们追踪的视野,使人们对这一问题的探讨更为有力,更为有效。为了这一目的,人们从植物的根系形态学、动力学及生理生化等方面的差异进行了探讨[28]。根系形态主要研究根系的多少,数量和分布。根系动力学主要研究反映根系表面对离子亲合能力大小的表观米氏常数 K_m,反映根系运转离子能力的最大吸收速率 I_{max},表示根系净吸收能力为零时的溶液中养分浓度的离子补偿点(C_{min})。大量研究结果证明,具有小 K_m、大 I_{max} 和小 C_{min} 值的植物基因型可以在较广泛的溶液中吸收离子,吸收率高,耐低肥能力强。

生理学与生物学差异是植物在长期进化过程中,尤其在环境胁迫条件下为满足生存所做出的适应性反应,这种反应以根系分泌物上的表现最为明显。可以说,由养分胁迫所诱导产生的根系分泌物变化是构成植物矿质营养特性差异的重要原因之一。根系分泌物有糖类、有机酸、氨基酸、酚类等低分子化合物,有多糖、多聚半乳糖酸等高分子凝胶物质,有细胞或组织的脱落物及其溶解产物,包括根冠、细胞、根毛、细胞内含物等,还有无机离子。这些分泌物有的有专一性,有的无专一性。前者是指植物受内部和外部诸多条件的影响而使体内某些代谢过程发生变化,引起体内某些物质累积并由根系分泌到根际的分泌物。这种分泌物多和膜结构破坏有关,可能是植物被迫适应养分胁迫的一种机理。专一性分泌物是指植物受到某种养分胁迫,在体内合成并分泌到根际的某一特殊产物,其合成分泌仅受该胁迫养分的控制。禾本科作物缺铁所诱导产生的麦根酸就是这一类物质,它是一类非蛋白质组分的氨基酸,对 Fe 有极高的螯合能力。无论专一或非专一性根系分泌物对植物根际矿物营养都起着极其重要的作用。

除了根系分泌物以外,植物对养分胁迫的反应差异也会在不少酶活性的变化及合成蛋白质方面表现出来。不少研究表明,植物缺磷时,体内磷酸酶活性和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性明显增加。上述物种和基因型之间的差异给人们提出了希望,也促进了植物营养遗传学发展。但这一方面的研究相当薄弱,大量的工作集中在比较不同基因型品种在某种养分胁迫下的反应,包括产量和这种养分吸收量,并在此基础上探讨其根系形态、根系动力学及根系分泌物和酶系统的变化。把这些知识用之于改造植物,或者根据这些知识进行有效

的基因定位、克隆、转移和高效表达尚无实质进展。因为涉及到养分吸收利用的问题多是数量遗传,受微效多基因控制。这一遗传上的特点增加了这一方面研究的难度。

2　植物营养与肥料学科面临的任务和展望

植物营养与肥料学科在农业生产中一直起着并将继续起重要作用。随着农业的持续发展,植物营养与肥料学科必将持续发展。发展的主要方向仍然是提高植物营养元素的利用效率,减少营养元素或由于施肥而带入的某些非营养元素对环境的污染。为达到这一目标,植物营养与肥料科学正从多方面拓宽和深化。

2.1　加强营养物质的循环和再利用

从养分循环来看,农作物生产是营养物质的利用过程。然而,作物吸收的营养物质只能被人类或动物利用一小部分(其中的几十分之一),大部分则存在于排泄物或废弃物之中。给土壤返还这些有机物料,加强这一部分营养物质的再利用,并加上适量的外界营养物质投入,则营养物质的匮缺将不会成为问题。有机物料返还土壤,还能增加土壤的有机质含量,改善土壤结构,提高土壤的保水、保肥能力,避免养分的损失。我国是磷、钾资源贫乏的国家,生产磷、钾肥料除消耗能量外,资源是主要限制因子。有机物质或有机肥料除氮素外,磷钾均比较丰富。随着氮、磷肥料的投入量增加,不少地方出现了土壤钾素耗竭严重的现象。只要把有机物料均匀地返还土壤,缺钾将不会成为严重问题[24]。贮存不善和应用不当已造成了这些营养物质的巨大损失;市场经济规律的影响又把大量的富能量、富养分的有机物料付之一炬,更加重了农田投入量少而分布不匀的现象。这个问题不解决,我们将越来越多地依靠化肥,依靠进口磷、钾肥料。研究有机肥料的养分循环和效果,采用相应的能鼓励农民返还有机物料的政策,发展以高效、节能、省资、易行为基础的保管、施用有机物料技术是解决这一问题的出路所在,也是植物营养和肥料学科面临的任务。这一工作搞好了,养分的良性循环将会形成,营养元素的利用效率将会提高,营养元素的污染将会逐步得到控制。

2.2　提高营养物质的利用效率

提高营养物质的利用效率是营养物质管理的核心。作物对营养物质利用得越充分,则利用效率越高,报酬越高,遗留在土壤中的营养元素越少,对环境污染也越轻。提高营养元素的利用效率首先要从养分平衡着手。作物需要养分,更需要平衡协调的养分供应。目前营养元素效率不高的一个主要原因是养分不均衡,氮磷钾不均衡,大量元素和微量元素不均衡,如此等等。养分不平衡往往导致肥料失灵,使投入的营养元素无增产效果,甚至减产。造成养分不平衡的原因,既与土壤原来的亏缺有关,也与不合理的养分投入有关。一种养分的过量投入往往可导致多种元素的不协调。如氮素过量投入,既可引起磷、钾失衡,也可引起微量元素失衡。过去的工作多着重于根据最小养分律补充所匮缺的营养元素,而没有考虑到在补充这一元素时所带来的养分失衡问题。这一现象,在大量施用有机肥料的情况下尚不成为一个问题,但在大量施用化肥的情况下则显得突出而严重。研究这一问题是一个重点,也是一个难点,需要植物营养学家下大功夫。

根据土壤供应养分的能力确定投入量是提高营养元素利用效率的关键。根据国外经验,理想的氮肥投入量应以施用后能保证作物高产,作物收获后土壤基本无残留为原则。只有这样,肥料的效率才能提高,污染才能避免。我国大部分土壤仍然缺氮,施氮不可忽略,但

一些地区施氮过量,远远超出了作物的需求,造成了土壤剖面中大量矿质氮的累积。我们前几年采样测定表明,陕西永寿县无灌溉条件的半干旱地区的农田,1 m 深的土层每公顷平均累积 150kg 氮素,而有灌溉条件的岐山县则平均累积 225kg 氮素,数量相当可观。根据氮素迁移的活塞理论,累积在土壤中的矿质氮,尤其是硝态氮,总是一个向下迁移过程,既可损失,也可污染地下水源。因此根据土壤供应养分能力,确定合适的投入量,尤其是氮素投入量更为迫切。解决这一问题要从三方面着手:一是查明作物能利用养分的土层深度,不同作物在不同生育期由不同土层吸取的养分数量;二是查明不同土层在作物不同生育时期所能提供的养分数量,包括已有的养分和在作物生长过程中释放的可利用养分;三是根据这两方面的结果确定需要补充的养分数量。在这里重要的是发展一种准确的化学方法来测定土壤供应养分的能力。

改善作物生育条件,培养健壮植物是提高养分效率的重要途径。健壮植物会由土壤和肥料中吸取更多的养分,提高养分的利用效率。改善作物生育条件包括,采用合适的密度和栽培方式,保证作物有充分的光照供应;改良土壤性质,采用良好的耕作措施,保证作物生育的介质——土壤有良好的水、肥、气、热协调供应,如此等等。在当前特别要重视的是水分与养分的协调。充分供水固然能发挥养分的作用,但充分的供水也会导致养分通过其它途径的损失。而且,特别重要的是,我国大部地区水资源匮缺,供水难以如愿以偿。在这种情况下,研究水分和养分协调供应的条件、时期和用量,确定水分和养分的正交互相作用就显得特别重要了。植物营养学家和肥料学家应在这方面做出贡献。

2.3 提高作物本身吸收利用养分的能力

改变作物种性,创造或利用那些对养分利用效益高的基因型品种是合理利用资源、减少环境污染和劳力投入的一条重要途径。所谓对养分利用高的基因型品种包括三方面的意思:一是吸收效率高,一是回收效率高,一是利用效率高[25]。吸收效率是指从单位面积上所吸收的某种养分的数量,越大,则吸收效率越高;回收效率指肥料利用率,即由肥料中所吸收的营养物质的多少。这两个概念都反映了作物对土壤中或施加到土壤中的养分吸取的多少,不同之处是前者指吸收总量多少,是绝对数量;后者指由肥料中吸取某种养分的数量占施入总量的多少,是相对数量,都没有和作物产量联系起来。利用效率则是指吸收单位养分所增加的作物产量,把养分吸收与作物产量联系起来。理想的情况是,既要吸收效率、回收效率高,也要利用效率高。只有吸收、回收效率高,才能由土壤、肥料中吸取更多的养分,才会使养分进入植物体而避免在土壤中残留;只有利用效率高,才能使吸收的营养物质更多地转化为经济产品,得到高效利用,避免"奢侈吸收"和无效累积。要达到这一目的,植物营养学家、肥料学家和植物遗传学家必须结合起来,利用分子生物技术,通过基因工程手段对作物的营养特性进行改造,选育营养高效型的作物品种。这是一项基础性、长期性的工作,虽然近十几年来一直是研究热点,也取得了一定成绩,但由于难度大,不可能期望在短期内取得重大突破。在当前有现实意义的工作仍是对现有生物资源进行评价,即确定不同基因型品种对不同营养胁迫的抗性、耐性和适应能力,为生物资源的合理利用提供决策依据。

2.4 发展保肥增效的新型肥料

提高肥料利用效率有工业和农业两条途径。农业措施主要是通过各种栽培措施使作物正常生长,提高作物对养分的吸收和利用;工业途径主要是针对化肥存在的问题从养分平衡或从养分释放上着手,生产能保肥增效的新型肥料。实践证明,化学肥料利用率低,就其本

身来说,存在着三个问题:一是多为单元肥料,养分不完全;二是容易变化,如氮肥会挥发,发生硝化和反硝化,磷肥容易退化、固定;三是溶解过快(特别是氮肥),容易造成淋失。从这几方面考虑就形成了几条改造肥料本身的工业途径。

解决第一个问题的途径是生产复合或复混肥料。通过化学或物理办法,把单元肥料制成二元或三元复合肥料很早就受到了人们的注意。由于化学反应只能生成特定的化合物,这种严格的限制条件使化学合成办法生产的复合肥料种类甚少,主要的有磷酸一铵、磷酸二铵、磷酸二氢钾、硝酸钾等,而通过物理的熔融办法生产二元或三元肥料则品种繁多,比例不一。后者的最大好处是成分均一,最大缺点是耗能多,一个工厂往往限于生产一种产品。固定的产品面对着不同作物和不同土壤的需要,势必发生有的元素供应不足,而有的元素供应有余,用之于实际,尚需根据具体情况而补施其它肥料。复合肥料生产的局限性促使了复混肥料发展。后者一般是按不同地区的土壤和作物需要确定配方,采用混合加工的办法进行生产,而且生产的多是专用肥料。根据我国小农经济(即农户小、土地占用面积不大)的情况,发展适应不同地区的专用肥料有广阔前途,是科技与产品结合起来的途径。要保证这类肥料的质量和效果,必须有科学的配方和完善的工艺,加入有保护作用的添加物料。

解决第二个问题的途径是向肥料中加入各种增效物质。在氮肥上,应用广泛的是氮肥增效剂,如硝化抑制剂,脲酶抑制剂等,使施入的氮素形态能在土壤中保持相对长的时间,防止很快地转变成铵态氮或硝态氮而造成挥发或淋失;在磷、钾肥料中加入一些化学物质或生物制剂如溶磷、溶钾,解磷、解钾细菌,使磷、钾肥料长效或增效。当前的问题是向氮肥中加入的增效剂效果不稳定,且多为有毒物质,甚至是致癌物质,迄今褒贬不一,有人唱赞歌,有人致悼词;向磷、钾肥料中加入的化学物质皆无实效,加入的生物制剂往往无活的微生物存在,而且,即使有活的有效微生物存在,在高盐浓度的化肥中也很难存活,因而其效果有多大很难评说。

解决第三个问题的途径是生产缓释(Slow Release Fertilizers, SRF)或控释肥料(Controlled Release Fertilizer, CRF)[26~28]。缓释就是使可利用的养分缓慢释放。达到缓释的办法是生产低水溶性的含氮无机化合物或有机化合物。目前生产的无机化合物多为无机磷酸铵化合物,通式为 $MeNH_4PO_4 \cdot xH_2O$,其中 Me 为金属元素,主要有磷酸铵镁、磷酸铵钾;生产的有机化合物主要是由尿素分别与甲醛、乙醛或丁烯醛缩合制得的改性尿素产品,如脲甲醛(UF)、脲乙醛(CDU)、异丁叉二脲(IBDU)和草酰胺。均三嗪、双氰胺(DCD)和脒基硫脲(ASU)等有机含氮化合物及其硫酸或磷酸盐类也属于这一类,以其分子较为复杂,具有缓效与硝化抑制剂的双重功能而受到人们重视。采用上述方法生产的缓效或缓释肥料有利也有弊,既要缓效,就不可能速效,在作物迫切需要养分或需要大量养分的时候往往强度不足,供不应求;而且缓效肥料的后效究竟有多大,至今仍是未解之谜。针对缓释肥料的缺点,控释肥料(Controlled Release Fertilizers, CRF)应运而生。理想的控释肥料应该具备以下特点:可根据作物不同生长阶段对养分的需求,人为地控制养分的供应和释放速度,即在作物需要的时候,养分能够释放出来供其利用,而在不需要的时候,则能保留在土壤中,从而一次施用能满足作物各个生育阶段的需要;基本上能消除养分在土壤中的淋失、退化、挥发等损失;能在很大程度上避免养分在土壤中的生物、化学固定;能基本满足现代农业规模化生产的需求,省工、省时、省力,一次大量施用不会对作物根系产生伤害;价廉、养分含量高、利用率高等。根据这些要求,针对水溶性肥料的特点,人们从包裹、包膜两个方面进行了探索。包裹肥料

从制造角度看多是以粒状速效肥料为核心(如尿素、硝铵、重钙、钾肥等),以枸溶性的钙镁磷肥,或其它类型的枸溶性磷肥为包裹层,添加无机酸复合物、缓溶剂为粘结材料所构成的植物营养复合体。包裹层是渗透性的涂层,肥料施入后,水分会溶解包裹层中的可溶性组分,从包裹层断开的裂隙或微孔中进入,溶解包裹在核心中的可溶性肥料,并使之从孔中扩散出来。可溶性养分的释出速率取决于肥料的平均粒度、包裹层材料、厚度及理化特性、比表面积、粘结剂性质、制造工艺、水分、温度等多种复杂因素,因而难以达到控释要求。但价格低廉,效果优于一般肥料。包膜肥料有两种类型,一种采用不渗透性涂层,这种涂层通过摩擦、化学或生物作用打开后释放可溶性养分。美国国家肥料发展中心(NFDC)开发、英国帝国化学工业公司(ICI)生产销售的涂硫尿素(SCU)是这类的一种产品。SCU 能够向植物提供中量元素硫,在缺硫地区更为适用;成本较低廉(一般约比普通尿素高 30%),在肥料市场中拥有一定地位。影响 SCU 释放速度的因素复杂,难以在多种土壤类型上对作物需要的养分实行适时有效的供应。另一类采用半渗透性涂层,土壤水分可以自由地扩散到涂层内部,使涂层扩张(膨涨)到具有足够的孔径,将内部溶解的养分释放出来。包膜材料多采用非亲水性高分子聚合物,最初是蜡、石油等天然高分子材料,以后随着材料科学及工业发展,采用了热固性或热塑性高分子材料。采用热塑性高分子材料的根本原因在于用其所制成的包膜肥料可随温度的变化而释放养分,温度高释放快,温度低释放慢,而作物的生长快慢恰与温度相适应,因而这种肥料的养分释放情况恰与作物生长快慢及养分需要多少相一致,解决了不同温度条件下(日变化、生长季节温度变化)肥料养分释放速率的快慢与作物养分需求的矛盾。日本著名的肥料生产厂商窒素一旭化成(Chisso-Asahi)株式会社研制的一种包膜尿素就是这类产品,其中的尿素释放主要受温度控制,而不受土壤类型、含水率、pH、微生物等复杂环境因素的影响。在多种作物上试验,一次施用这种肥料,平均增产幅度较尿素 4 次施用还高,氮素利用率在 60%～70%之间,还可在 100～360 天内控制尿素释放速度。由于较好地做到了可控释放,国外有人称其为"施肥技术的一次革命","二十一世纪的肥料"等。虽然用热塑性高分子材料所制成的包膜肥料能较好地达到可控释放要求,但这一材料价格昂贵,含氮 40%的包膜尿素的价格比普通尿素近乎高 3 倍,有效成分相等的包膜复合肥比普通复合肥近乎高 1.5 倍,昂贵的价格使人们望而止步。这一肥料的另一缺点是污染环境。生产这类肥料,包膜材料占肥料总量的 10%～15%,这种高分子材料要 30 年才能降解,长期使用必然带来严重的环境后果。由于这两个原因,这类肥料的生产和在农业应用方面受到极大限制。从目前的总体情况来看,国内外商品化的各种缓释或控释肥料普遍难以满足作物早期及吸肥高峰期的需要;大多数品种(如高聚物包膜肥料)价格过高,难以在大田推广应用,多用于园艺(果树)及多年生观赏作物上;即便某些优良的缓释肥料品种也难以满足环境特别是可持续发展的要求。各国缓效肥料在市场份额很少,也从另一方面说明了这些问题的存在。

针对缓释和控释肥料存在的问题,一些新的构思不断出现:有的想用框架结构的大分子有机物质把养分包裹起来,随着框架结构的破坏速度不同而形成养分的释放速度不同;有的想用分解快慢不同包膜材料分层包裹,而形成不同养分的释放速率;有的则想把分解快慢不同的颗粒按一定的比例混合。这些想法虽非异想天开,但有很大难度。因为分解快慢的控制,不仅涉及到肥料本身,也涉及到作物和气候。要达到真正控释,尚有一段很长的路要走。

3　植物营养与肥料学出现的混乱和模湖概念

市场经济促进了新型肥料的出现和生产,也产生了形形色色的模糊概念,影响了植物营养与肥料科学的正常发展。作为植物营养与肥料科学工作者,对这些不正确的看法应当有一个清楚的认识。

3.1　过低地估计了化学肥料的作用

施用不合理所产生的化肥效果不高,使一些人产生了错觉,认为化肥效果差,要减少化肥用量,农业持续发展要靠有机肥料。这一看法是不正确的。农业生产水平是物质和技术投入水平的综合反映。在一定自然条件下,物质和技术投入水平越高,生产水平越高。化肥问世,通过化学肥料投入营养物质的实践有力地促进了农业生产发展,开创了农业历史新纪元。世界上从 1800 年到 1978 年 178 年间的粮食增产和化学肥料的应用为此提供了有力的证据。据 Siemes 资料[29],1800 年,无化肥 NPK 投入,1 公顷土地只生产 0.73 吨粮食,1.25 公顷土地生产的粮食才能供一人之需;而 1978 年,每公顷投入的化肥 NPK 为 155.8 公斤,生产 4.63 吨谷物,可供 4.5 人之需。按 178 年的增产量计算,平均投入 1kg NPK,约增产 20kg 粮食。本世纪由于营养物质投入而引起的农业大幅度增长曾使很多人震惊。30 年代,一位美国科学家就欧州粮食增产的原因征询德国科学家的意见,得到的答案是,如果把增产量看作 100,化肥的贡献占 50%,其余的 50%中,品种占 30%,其它管理措施占 20%。德国科学家估计并未言过其实。联合国粮农组织估计,发展中国家粮食增产中,55%来自化肥的作用。我国化肥的投入和粮食的关系也基本符合这一规律。化肥的投入不但增加了作物产量,也增加了能量[30]。每生产 1 kg N 素的化肥需投入 73 兆焦耳(Mj)能量,生产 1 kg P 素的磷肥或 1 kg K 素的钾肥,需要投入 14 或 8 兆焦耳的能量。按现代生产水平,合成 1 吨氨约需 875m^3 天然气(甲烷),或 658 升石油,或 2 吨煤。磷、钾化肥生产需要的能量物质可以上述比例折算。由此可见,化肥的投入也是能量的投入,数量可观。但把投入的能量与获得的能量相比,却又回报最高。各行各业中,农业生产是一个唯一增加能量的过程,有着高效的能量回报。它的产投比均大于 1,如小麦为 2.2,大麦为 2,糖甜菜为 2.5,马铃薯为 1.3;化肥投入后,产出比更高,如小麦产生的能量与化肥投入的能量之比为 3.3,大麦为 3.2,马铃薯为 2.1。上述结果仅根据食用部分计算,禾秆中蕴藏的能量还大于食用部分,如把这一部分能量包括在内,则能量的产投比至少在 5 以上。另一方面,化肥生产虽然消耗能量,但消耗的能量仅仅是社会消耗能量的极小一部分,即使象英国这样一个施用化肥较多的国家,生产化肥所消耗的能量仅是其所消耗的总能量的 1%。由此可见,化肥的投入既是必需的,也是有利的。今后的问题不是限制化肥生产,而仍然需要扩大生产,这是不可抗拒的趋势。否则,人口增长对粮食的需求将无法满足。目前所出现的化肥效果不高,主要在于使用不合理,而不是化肥本身效果不好。

3.2　过高地估计了化肥的污染效应

施用化学肥料会污染环境,降低产品质量,但这些问题的产生不在于化肥本身,而在于应用不合理。实际上,不仅是化学肥料,有机肥料同样也会造成污染。欧洲引起环境污染的不是化肥,而是有机肥料。在欧洲,种植业与养殖业分家,造成一些养牛场大量的牛粪在附近农田堆积。这些有机肥料中氮素的释放无法控制,往往作物收获后仍在土壤有大量残留。

这种情况在我国将会逐渐出现,现在一些养鸡场、养牛场、养猪场空气污染严重,地下水污染严重,土壤也污染严重。从本质上来看,化学肥料的养分是速效的,可以按照作物的需要准确投入,投入量只要满足作物需要就可以了,污染比较容易控制;而有机肥料的养分释放难以控制,也难以按作物需要投入,对其污染的防止就更加困难。另外,磷、钾肥料的投入可能会带入副成分,甚至有害成分,但只要控制用量,合理搭配也可防止这些问题的发生。据鲁如坤等人研究,我国的磷矿和磷肥中的重金属有毒元素镉的含量低,根据我国磷肥通常用量和作物吸镉特点,长期施用国产磷肥不至于产生环境污染问题[31]。

3.3 把农作物产品质量的降低归罪于化学肥料的施用

当前,一些农产品品质下降,例如西瓜甜味不浓,水果风味不佳。不少人不分青红皂白把这一概归之于施用化肥的过错。造成农产品品质下降有好多原因:一是品种,有些作物品种追求了产量,而忽略了质量,采用这些品种,施用任何肥料,产品的品质依然不佳。二是灌水,过量的灌水往往可使作物生长过快,内部贮存的物质不多,品质必然下降。三是施肥,突出的是氮肥用量过高,磷钾用量偏少,养分供应不协调。后两方面所导致的结果都是作物生长过快,形成的同化产物过多地与氮素结合形成蛋白质,构成了植物体,而需要累积的物质不充分,达不到一定标准。所有这些问题均和肥料施用不合理有关,而与化肥本身无关。从植物营养的角度来看,有机肥料之所以能成为肥料,就在于它含有植物所需要的营养元素。有机质在改良土壤方面有着巨大作用,但有机质本身不能视作营养物质。有机物分解以后可形成有机酸、氨基酸等小分子有机化合物。这些有机化合物固然可以被作物吸取,但不是作物吸收利用的主要成分,吸收的数量比起无机成分微不足道。作物吸收的主要营养成分是有机物质分解以后所形成的矿质营养元素,这些矿质营养元素与化学肥料完全一样。从矿质营养角度来看,不管是有机肥料或是化学肥料,均是以矿质元素营养作物的,本质上没有任何差别。施用有机肥料产品质量好的原因主要是养分比较协调,而不是有机质含量高。协调地供应化学肥料的养分,也能达到同样的效果。因此,说有机肥料效果好,能提高产品品质;化学肥料效果差,能降低产品品质,是没有任何根据的。

3.4 歪曲了肥料概念,造成了商品混乱

肥料的应用已有很久历史,肥料一词也早为人所熟知,但什么是肥料迄今并无一致的定义。例如:ISO (International Organization for Standardization)对肥料的定义,英文文本为"主要功能是提供植物食品的物质"(Material, the main function of which is to provide plant food),而法文文本为"主要功用是对植物提供它们在营养上直接利用元素的物质"(Engrais, Matière fertilisante dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition)[32]。日本的定义是"在法规范围内,肥料这一术语应当定义为施用在土壤中为了供给植物养分的目的;使土壤发生化学变化而有益于植物栽培;或者施之于植物可提供植物养分的任何物质"(The term "fertilizers" as used within the law shall be defined as being any substance applied to the soil for the purpose of supplying nutrients to plants; for producing a chemical changes in the soil which will contribute to the cultivation of plants; or which, when applied to the plant, will supply plant nutrients)[33]。德国的定义是"肥料是可直接或间接的供之于作物以促进作物生长,增加产量,改善品质的一类物质"(Fertilizers are substances that are intended to be supplied directly or indirectly to crop plants in order to promote their growth, increase their yield, or improve their quality)[33]。尽管各国肥

料定义不完全相同,但有一点是共同的,这就是强调直接供应植物所需要的营养元素。正由于有这一点,肥料才成其为肥料,而不是其它物质。问题在于供应什么营养元素。作为非商品肥料,这一点可不考虑,但作商品肥料则需要考虑供应元素的价值。肥料定义虽指作物需要的营养元素,但包括所有的营养元素并无实际意义。因为作物需要的营养元素来自土壤。在土壤中,有些营养元素比较缺乏,有些营养元素则供应有余。从肥料角度上来说,不应施用供应有余的元素,而应施用和补充土壤缺乏或不足的元素。这才是矛盾所在,这也才是肥料的价值所在。正因为这样,不应有全元素的肥料,也不需要生产全元素的肥料。目前不少地方出现的全元素肥料是无科学依据的产品。土壤本身就是全元素的,含有作物所需要的各种养分,但土壤不应视作肥料。商品化学肥料所应供应的营养元素应按 ISO 对化学肥料和复合肥料的界定,即氮、磷、钾三种元素之一或至少其中之二。因为从全世界来说,氮、磷、钾三种元素是作物需要较多,而土壤较为缺乏的元素,把这三种元素作为化学肥料的主要成分,是抓住了关键和要害。其它元素要不要加入,要看肥料应用的地区是否缺少,不缺则没有必要加入。从世界范围来说,可以加入的第四个元素是 Mg,第五个元素是 Ca,但不缺的地区,不应成为主要成分。微量元素是作物必需而不少土壤缺乏的成分,可以加入和标明。现在不少复混肥料中把有机质也作为营养成分,这是不对的。有机质在改良土壤中有巨大作用,但作为市售肥料却不能以其作指标。有机物质以碳为主体,但作物吸收的碳素是空气中的 CO_2,而不是土壤中的有机质。正因为这样,世界上没有一种商品肥料是卖碳的肥料。有机质多,而养分不高者只能视作土壤调理剂。

参 考 文 献

1 Liebig J. The organic chemistry and its application on agriculture and physiology. Verlag Viehveg, Braunschweig, 1841.

2 Mitscherlich EA. Bodenkunde für Landwirt, Fortwirte, Gaertner in pflanzenphysiologischer Ausrichtung und Auswertung. Paul Parey in Berlin und Hambug, 1954.

3 普良尼施尼柯夫(苏)著,王天锋,夏苏芳译. 在植物生活和苏联农业中的氮素. 北京:科学出版社,1956,1～120.

4 周鸣铮. 中国的测土施肥. 土壤通报,1987,(1):7～13.

5 中国农业科学院土壤肥料研究所(主编). 中国肥料. 上海:上海科学技术出版社,1994, 390～430.

6 Boyd DA. Some recent ideas on fertilizer response curves. Proceedings of the 9th congress of the International Potash Institute, 1970, 461～472.

7 Mead R, Pike D J. A review of response surface methodology from a biometric viewpoint. Biometrics, 1975, 31:803～851.

8 Sparrow P E. Nitrogen response curves of spring barley. J. Agr. Sci, 1979, 92:307～310.

9 Cowell J D. The Derivation of fertilizer recommendation for crop in Nonunifrom Environment: fertilizer, crop quality and economy, 1974, 936～961.

10 Cowell T D. Some consideration in modeling the effects of fertilizers on crop yield. J. Austr. Inst. Agri. Sci., 1981, 142～148.

11 毛达如,张承东. 推荐施肥技术中施肥模型与试验设计的研究. 土壤通报,1991,22(5):216～218

12 方开泰. 均匀设计－数值方法在试验设计中的应用. 应用数学学报,1990,3(4):363～372.

13 Crutzen PJ, Ehhalt DH. Effects of nitrogen fertilizers and combustion on the stratospheric ozone layer. Ambio. 1977, 6:112～117.

14 Williams EJ, Hutchinson GL, Fehsenfeld FC. NO_X and N_2O emissions from soil. Global Biogeochem. Cycles, 1992, 6:351～388.

15 Galbally IE, Freney JR, Muirhead WA, Simpson JR, Trecvitt ACF, Chalk PM. Emission of nitrogen oxides (NO_X) from

a flooded soil fertilizes with urea relation to other nitrogen loss processes. J. Atmos. Chem., 1987, 5:343～365.

16 Ko MKW, Sze ND, Weinstein DK. Use of satellite data to constrain the model-calculated-atmosphere lifetime for N_2O: implications for other trace gases. J. Geophys. Res., 1991, 96:7547～7552.

17 Byrnes BH. Environmental effects of N fertilizer use—An overview. Fertilizer Research, 1990, 26:209～215.

18 Bowman J. The 'greenhouse effect'. *In*: Bennett R M (ed), The 'greenhouse effect' and UK agriculture, Centre for Agricultural Strategy, Unversity of Reading, 1989, 17～26.

19 Aulakh MS, Doran JW, Mosier AR. Soil denitrification significance, measurement, effects of management. Adv. Soil Sci., 1992, 18:1～57.

20 Mosier AR, Chapman SL, Freney JR. Determination of dinitrogen emission and retention in floodwater and porewater of a lowland rice field fertilized with ^{15}N urea. Fert. Res., 1989, 19:127～136.

21 Jordan C. The effect of fertiliser type and application rate on denitrification losses from cut grassland in northern Iseland. Fert. Res., 1989, 19:45～55.

22 Hooker ML, Sander DH, Peterson GA, Daigger L . Gaseous N losses from winter wheat. Agron J., 1980, 72:789～792.

23 陈化榜,李振生,杨继云.植物矿质营养育种的研究进展.中国农业科学,1995,28(增刊):1～6.

24 Committee on the Role of Alternative Farming Methods in Modern Production Agriculture, Board on Agriculture, and National Research Council (eds). Alternative Agriculture. National Academy Press, Washington, D.C., 1989, 135～194.

25 Trenbath B R. Resources use by intercrops. *In*: Francis CA (ed.), Multiple Cropping Systems, New York: Macmillan Publishing Co., 57～81.

26 Kumar DJ, Singh RP. Slow release urea and its evaluation for water transmission and release characteristics. Madras Agricultural Journal, 1993, 80(5): 283～286.

27 Chris AM, John MR, Robert WR, William PS. Element absorption and hydration potential of polyacrylamide gels. Commun. Soil Sci. Plant Anal, 24(5－6)539～54.

28 Bowman DC, Evans PY and Paul JL. Fertilizer salts reduce hydration of polyacrylamide gels and affect physical properties of gel-amended container media, J. A. Soc. Hort. Sci., 115:382～386.

29 Siemes J. Maintenance of human nutrition by mineral fertilizer application. Pflug u. Spaten, 1979, 6:2.

30 Mengel K, Kirkby EA. Principles of plant nutriention (4th Edition). International Potash Institute, Bern, Switzerland, 1987:303～346.

31 鲁如坤,时正元,熊礼明.我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价.土壤学报,1992, 29(2):150～156.

32 International Organization for Standardization. Fertilizers and Conditioners－Vocabulary, *In*: Draft international standard ISO/DIS 8157, 1983:1～13.

33 Ullmann's. Fertilizers. *In*: Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A10, VCH. Verlagsgesellschaft mbH, D-6940 Weinheim, 1987:410.

THE CURRENT STATE AND PROSPECT OF PLANT NUTRITION AND FERTILIZER SCIENCE

Li Shengxiu

(*Dept. of Resou. and Environ. Sci., Northwest Agri. Univ., Yangling, Shaanxi* 712100)

Abstract Over more than 100 years through hard work by the scientists, the plant nutrition and fertilizer science have formed their complete scientific systems, and played a great role in the agricultural production. Currently, The plant nutrition and fertilizer science are being rapidly developed for solving quantitative inputs of nutrients, investigating the mechanism of the nutrients while continuously studying their effects, and considering the interaction of different nutrients as a key point. In addition, the disciplines are being intersected with environmental and ecology sciences, and enlarged and extended their focuses on plant genetics, forming a new discipline, plant nutrition genetics. Strengthening the cycle and reuse of the nutrients, raising nutrient use efficiency, increasing plant abilities for utilizing nutrients, developing new types of fertilizers that may reserve nutrients and increase nutrient use efficiency will be the major areas for researches in the future. The market economy has promoted the development and appearance of new fertilizers on one hand, and made some different vague and blurred ideas on the other, which have influenced the normal development of the disciplines. These include underestimation of the role of the chemical fertilizers, overestimation of their pollution, and attribution of the poor quality of the agricultural products to the application of these fertilizers. Also, the concept of fertilizer has been distorted or misrepresented, leading to some confusion in the commodities of fertilizers. Clarification of the vague ideas and concepts will help the development of both plant nutrition and fertilizer science as well as agricultural production.

Key words Plant nutrition; Fertilizer; Progress and current state; Major points for researches in the future; Prospect