

# 第一章 总 论

## 第一节 绪言

### 一、土壤肥力测定的意义

作者在本书之前出版的《土壤肥力学概论》一书中业已说明，土壤肥力的核心问题是养料肥力〔1〕。尽管土壤肥力广义上的内容确实包括水、肥、气、热，甚至土壤以外的一些环境因子〔2〕，但水、气、热等因子均十分复杂，已不得不另辟专门学科去研究；留下“肥”为中心的肥力内容乃是指土壤养料的有效含量及其有关因子〔3〕。这个问题也是足够复杂和重要的。一方面由于目前高产作物每季均从土壤中吸取大量养料，而所吸取养料的三分之二以上来自土壤速效养料，只有不足三分之一是来自速效肥料；另一方面因土壤中各种养料元素存在的形式与变化均十分复杂。我们已知全氮含量仅能说明土壤氮肥力之半〔4〕，全磷含量一般不能说明土壤磷肥力，而全钾含量完全不能说明土壤钾肥力；其它钙、镁、硫、铜、锌、锰、铁、硼、钼等养料的全含量均基本上不能说明土壤对它们的供应量。由此可见，单就测定土壤养料肥力这一问题而论，就已十分复杂，从而需要很坚实的理论基础与极其科学的测试手段。我们决不应把它同其它土壤肥力因子混在一起而把问题搞得更加复杂化。因此，我们主张把“土壤养料肥力学”看成是狭义的土壤肥力学定义与范围；同时把“土壤肥力研究法”局限于土壤养料肥力的研究，为测定土壤养料的供应能力与测土施肥服务。

土壤肥力测定的意义，实际上就是测定土壤中各种养料的有效含量与供应量的科学。土壤肥力测定法大致可以分为：（1）一般生物学测定法；（2）同位素标记生物学测定法；（3）化学提取法；（4）各种物理化学法与（5）某些纯物理方法。

在上述方法中，两类生物学测定法乃是标准方法。因为它们均由作物本身的生长量或吸收量来作出指示，并以此作为理论依据及事实依据均很充分。尤其是同位素标记吸收法，可借以算出作物分别吸自土壤与吸自速效肥料的养料，结果最为可靠。然而这类方法往往是不及时的，费时费事过多，于做完试验以后一季作物生长已过去了，故不可能作为实用方法，只能用作研究其它实用方法时的参比标准，而不能作为常规应用。化学提取法是土壤养料肥力测定的常规方法，因为它的操作简便、快速，准确度已合乎实用需要。然而化学提取法必须：（1）根据不同土壤性质的土壤化学原理选用方法；（2）事前要用标准的生物方法的结果作为参比经过相关研究；（3）以作物本身的生长量为依据而把化学提取测定值划分为“高”、“中”、“低”等指标值，否则就不可能任意应用化学提取法所得的测定结果。目前有些人把化学提取法看得过分简单，盲目搬用其方法与指标，而不做任何事前试验，势必导致错误结果而不符合实际<sup>〔5〕</sup>。用物理化学方法测定土壤养料肥力是一种新兴方法，它依据土壤的吸附平衡、离子交换或同位素交换等物理化学过程原理来研究各种养料的有效度；其中有的方法迄今过于繁杂而不利实用；有的方法则较简便，愈趋实用化。物理化学方法的最大优点是不必分别土壤性质与类型选用不同方法。任何一种物理化学方法对任何一种土壤都是同样可以应用的。但是其测定值的数量指标，仍然要用田间试验中的生物生长量与吸收量为依据。

综上所述，可知土壤养料肥力测定，实质上就是土壤有效养料含量或供应量的测定。它是一项土壤测试科学，而且是颇为特

殊的测试科学。因为它集生物方法、化学方法和物化方法于一体，以提取“速效养料”为重点，再配合以适当的较为快速的分析方法，故它与一般土壤分析有原则区别。

## 二、土壤肥力测定的重要性〔6〕

土壤养料肥力的测定，在全世界范围内均受到充分重视。这是因为它无论在土壤科学中或农业生产上都是十分重要的。土壤养料肥力测定主要是为了解决下列几个关键问题：

1. 正确地选定各种养料有效含量的提取方法，然后定出适用于各类土壤与各种主要作物的养料丰缺指标，因而才能对大量分析测定数据进行评定与综合。在此基础上才能绘制出土壤肥力图。土壤肥力图是摸清土壤资源“底子”，合理安排生产与分配肥料的依据。

2. 土壤养料丰缺程度的测定是肥料试验网的延伸、补充甚至代替。我国正在进行大规模的化肥试验网工作，其目的无非是为了在各类不同土壤上取得氮、磷、钾等养料的丰缺资料。而正确的土壤肥力测定方法就是以田间肥效试验与作物产量反应为基准而确定的。故一旦测定方法与养料丰缺指标被正确地确定，就必然可用测试手段来代替田间肥效试验，达到事半功倍之目的。

3. 作为科学施肥的依据。一般地讲，科学施肥需要两方面依据：（1）以作物营养学为基础的营养需要；（2）以土壤肥力测定为依据的土壤供肥能力。营养需要对于一种作物的一定产量来说，是可以预知的（通过科学定产与植株分析），而土壤供肥能力则因田块而异，变异度很大，倘不科学地加以测定则无从计算科学施肥量。因为土壤供肥部分往往大于肥料供肥部分，故不测定土壤即无法科学地施肥。这在农业发达国家已成常规。

## 三、土壤养料有效度指标性质分类〔7〕

土壤养料有效含量的测定值通称“指标”。指标首先应分为绝对值与相对值。对此必须树立清楚的概念；而有一些实际的测

土工作人员往往互相混淆,不但失去科学性甚至成为笑柄。土壤中养料有效含量绝对值可用公斤/公顷或斤/亩等单位表示之。但绝对值的测定是很困难的。只有下列方法的测定结果才具有绝对值的意义(1)不施该养料区作物对该养料的吸收量;(2)同位素标记盆栽试验得到的A值;(3)氮矿化位势法测得的 $N_0$ 值或 $N_t$ 值。土壤交换性钾、钠、钙、镁的测定值最好也不要看成绝对值。因为土壤交换性阳离子的测定方法与条件变动时,测定结果就不一样。土壤缓效钾的测定值更不能看成绝对值了,因为它是一定提取条件下取得的值。除此而外的任何提取测定的结果,均是相对值或相对指标,它们均指一定提取剂,在一定条件下提取得到的值;它们可供互相比较之用,但绝无绝对含量的意义,故最好不用公斤/公顷或斤/亩等单位来表示,而只能用ppm数来表示提取量对土壤总体的相对比值。

绝对值与相对值之间是决不能任意换算,更不能相互加减或乘除的。相对值换算成绝对值的先决条件乃是一系列的相对值与一系列的绝对值(均指多个土壤样品的测定值)之间确实存在很好的直线回归关系,此时就可利用回归系数来换算。倘事前没有测定过两者之间的相关性与回归关系,则任意换算是决不可以的。

常规化学提取法得到养料丰缺值全部是相对值。对同一土壤的同一养料,倘应用不同提取方法,可以得到相差几倍的值。尽管如此,相对值仍然是有用的,因为只要把提取方法与条件固定,不同土壤间的提取测定值即可供互相比较,看出养料丰缺的程度。因此,在应用相对值时,必须注明提取方法(但不必注明分析方法),否则就是对土壤养料肥力测定原理的认识不足。

相对指标或相对值又可分为强度指标、容量指标与速率指标三大类,今分别介绍如下:

1. 强度指标(*Intensity Index*) 强度指标指直接能作用于作物根部或可供作物根部直接吸收的任何养料的量。一般

来说，强度指标指溶解于土壤溶液中的任何养料的测定值。例如来说，对于 $H^+$ 离子，pH是一个强度指标的典型例子；对于磷， $H_2PO_4^-$ 在土壤溶液中的浓度（一般用0.01M  $CaCl_2$ 溶液来提取）或 $pH_2PO_4$ 乃是强度指标；对于钾，土壤中水溶性 $K^+$ 浓度是强度指标；对于氮，水溶性 $NO_3-N$ 以及水溶性 $NH_4-N$ 都是强度指标。如果用稀酸或中性盐类的溶液来提取 $K^+$ 或 $NH_4^+$ ，提取值就不是纯粹的强度指标，因为土壤胶体表面的 $K^+$ 与 $NH_4^+$ 离子会部分地被提取出来（对于 $NO_3^-$ 离子来说，就没有这种混淆）。因此可知，强度指标与容量指标之间也是没有严格界限的。

强度指标的优点在于能直接反映测定时土壤中供应某养料的强度，了解在这一特定时刻该养料是否缺乏。强度指标的缺点在于它只能说明短时间内养料的供应状况，只多说明短生长期作物的全生长期养料供应状况，一般地不能说明较长生长期作物的全生长期养料供应状况。由于气温雨量与作物生长阶段等的不同，养料强度指标的测定值必然随测定时间不同而有所变化。用强度指标来说明作物生长期内各个时期的养料供应状态之变化是相宜的。企图以一次测定强度指标来表达土壤的养料肥力与施肥量要求之间的关系则是不相宜的。

2. 容量指标( *Capacity Index* ) 容量指标指包括贮存在土壤胶体表面养料活性贮存库( *Labile pool* ) 中的全部有效养料在内的测定值。所有作为绝对值的测定方法的结果当然都是容量指标；所有化学提取测定值的结果虽然都是相对值（因为它们所提取的仅是一部分有效养料，提取之多寡视试剂性质与提取条件而异），然而也都是容量指标。可举例说明：对于氢离子，总酸度、滴定酸度及石灰需要量等观念都是容量指标；对于磷，无论用0.5M  $NaHCO_3$ 、 $HCl-NH_4F$  或  $NaOH-NaC_2O_4$  等试剂的提取值都是容量指标（虽然三种提取剂的提取值可相差数倍）。磷有效含量的物理化学测定值有的是强度指标，有的则是容

量指标，当于以后再行讨论。对于钾，缓效钾与交换钾（一般不应该用“速效钾”名称）的测定值也是容量指标，尽管交换钾的测定值于应用不同方法时相差不大，但它同样受测定方法与测定条件的影响。其他交换性阳离子的测定值，用络合或螯合剂提取微量元素的测定值（包括热水提取硼）也均为容量指标。

容量指标的优点在于它指示一定条件下土壤活性贮存库中可能供应有效养料的量。凡是被正式公认的各种提取测定法的结果，尽管它们都是相对值，一般均在一定的土壤种类范围之内与某些供试验作物的整个生长期的产量反应呈良好相关性，故有利于说明一季作物生长季节之内的土壤供肥情况，而不是说明短期的供肥强度。

容量指标与强度指标之间缺乏严格界限。例如：（1）北方土壤0—60或0—120厘米土层中 $\text{NO}_3-\text{N}$ 的含量数值较多，它的测定值往往与生长期较短的一季作物的产量呈良好的相关；（2）用中性盐类溶液或稀酸提取的 $\text{NH}_4-\text{N}$ 往往包括一部分交换性铵，故带有一些容量指标的性质。

容量指标一般均为相对值，但相对值与绝对值之间也无严格界限。例如，被粘粒矿物固定的缓效钾，倘反复提取的次数愈多，则测定值愈接近于绝对值含量。交换性钾的测定值只有应用24小时淋洗法，其测定值才接近于绝对值。

3. 速率指标 (*Rate Index*) 由于容量指标与强度指标之间存在着动态平衡，土壤胶体表面活性贮存库中的养料可按土壤性质之异同以一定速率转入土壤溶液中，从“容量”变成“强度”。这种转移的速率固然视溶液中养料被吸收而减少的程度而异，但更重要的还是土壤胶体对养料吸附牢固的程度。因此，土壤养料有效度的速率指标乃是联系容量与强度的一个独立指标，它可用化学平衡中的平衡常数类比之。在有的文献中用  $\Delta Q/\Delta I$  来代表速率指标；式中的Q是“量”的意义，I是强度的意义。

但在另一些文献中把  $\Delta Q/\Delta I$  说成是容量指标，把  $Q$ （即本段 2 中的容量指标）叫做数量指标；而速率指标则另有所指。由此看来，科学界对于几种指标的用语与观念尚未完全统一，在后面的‘土壤磷有效度的物理化学研究法’一章将再行讨论。本书论述的上列观念是统一的：（1）数量指标就是容量指标；（2）强度指标的含义与一般文献所述者则无不同之处；（3）把从数量（或容量）转入强度的速率（或维持强度不变的能力）看成是速率指标。

## 第二节 土壤养料有效度的机制

### 一、土壤养料有效度的土壤化学原理

土壤中各种植物养料的全含量基本上不能说明其有效含量，这一事实目前已为土壤肥力学界所公认。但有效养料与非有效养料之间严格界限又是不存在的。对作物即刻有效的养料，一般地说，这部分养料是以土壤溶液中离子状态的养料为主，但也并非完全如此：（1）土壤表面吸附的离子态养料可与根表面排出的离子进行直接交换而被吸收；（2）土壤中某些络合或螯合的分子态化合物也可以被植物根部吸收；（3）一些简单的有机态分子化合物也可被植物直接吸收。从目前的研究成果来看，土壤溶液中离子态养料的吸收仍是主要方面，而其他各种形式的养料吸收乃是其重要的补充。

土壤中养料的有效化（即从基本无效成为有效）乃是一个过程。在植物生长的季节中，植物在成长乃至成熟过程中，土壤中的养料也无时不在起化学的、物理化学的与生物化学的变化；其结果使一部分养料从基本上无效成为有效，供植物吸收，但也有另一部分养料从有效变成无效。

土壤中氮的有效化基本上属于生物学与生物化学过程。土壤

矿物质原来是不含氮的，土壤中的氮乃是依靠于生物有机质的积累。目前土壤中的氮主要也是有机质的氮，它可分为难矿化、易矿化与少量已矿化的土壤氮。在作物生长过程中，一部分易矿化的有机氮可转变成为矿化氮供作物吸收。这就是除氮素化肥以外的土壤有效氮的唯一来源。因此，可以说土壤氮的有效度问题实际上是一个土壤有机质含量与矿化可能性的问题，而矿化可能性或矿化速率不但受土壤有机质本身性质的影响，而且严重地受环境因子（气候）与土壤性质因子（质地、水分条件与pH等）的影响。

土壤硫的有效度与氮相似。尽管岩石与矿物中原来含有少量硫，但作物生长所需要的硫主要来自有机质矿化。自然界只有少数土壤中含有较多的无机硫酸盐。

土壤磷的有效度是一个物理化学问题。土壤中磷的终极来源是各种难分解的磷灰石。它们在长期的化学风化过程中生成磷酸钙（石灰性土壤）、磷酸铝与磷酸铁（酸性土壤）。这些物质本身仍然是极难溶解的。但它们在土壤中以不同的物理状态存在。呈结晶状态时就极难溶解，呈非结晶或微晶的胶体状态时，其表面积很大，表面上的活性较大的磷就可以与土壤溶液中的 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 离子互呈平衡，成为土壤有效磷的活性贮存库。在时间的进程中，活性磷会逐渐老化成为结晶的非活性磷。另一方面，非活性磷也在不断受土壤因子与外界因子的作用逐渐分解成为活性磷。

土壤钾、钙、镁的有效度均与土壤粘粒矿物的含量与种类有关，特别对钾更是如此。钾化合物的溶解度并不小于钠化合物。然而土壤中吸持多量钾而基本不吸持钠（除碱土以外），以致海水中含钠比钾多10倍以上。这是因为水化钾离子小于水化钠离子，其大小刚适合于被吸持在2:1型粘粒矿物的层间与晶格内部。钙与镁则以同晶置换为主，以及一部分表面吸附而被保持在次生矿

物中。除碱土因无法排除表面吸附多量钠外，钠在土壤中不存在上述几种形式的吸附与保持。

土壤溶液中的少量  $K^+$  离子，与土粒吸持的交换性钾相平衡。而交换性钾又与粘粒矿物晶格吸持的钾平衡。这些钾的数量完全取决于粘粒矿物的种类与含量。

土壤中微量元素的有效度，一方面取决于母质性质与全含量；另一方面取决于土壤性质。母质（矿物质）影响于微量元素的缺乏或过多远甚于大量、中量元素，这是它们之间的主要区别。影响土壤中微量元素有效度的土壤性质以 pH 为主，其次则为  $E_h$  有机质含量等。其影响的方式与方向对各种微量元素各有其特殊性，读者可适当参考本书上册《土壤肥力学概论》。

综上所述，可知土壤养料元素的有效度是一个较为复杂的问题。对于从事土壤肥力测定或测土施肥工作的人来说，如果没有一定的养料元素的肥力化学知识的基础，应当说是一个严重缺陷。本书上册大部分篇幅均是针对这个问题而编写的。

## 二、土壤养料有效度的能量观念

近年来养料的能量概念常被用来表达土壤中某一养料的有效程度。在应用这一概念时，土壤吸持有效养料的体系可被看成是一个弱电解质，它可以解离出养料离子来；其解离的程度视养料与土粒之间引力的大小而定。在物理化学观念中，离子的解离倾向可以用化学位势来表示；而化学位势就是克分子自由能的大小。当养料从固相表面进入土壤溶液时，其克分子自由能值就发生变化。在一个不均匀体系中，物质有从化学位势较高的一相，向化学位势较低的一相移动的倾向，因此，化学位势之差值就可以用来衡量养料转入溶液倾向之强弱。

在常温常压下，化学位势可用下式表示之（8）：

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln C_i$$

式中： $\mu_i$  为组分  $i$  的化学位势； $\mu_i^0$  为该组分在标准状态下的化学

位势； $R$ 为气体常数； $T$ 为绝对温度； $\ln$ 为自然对数符号， $C_i$ 为该组分的浓度。可见在温度不变时，化学位势乃是其有效浓度的函数。在一个多相体系中，某一组分在不同状态（相）下面的化学位势之差，主要取决于该组分在不同状态（相）下面的有效浓度（活度），有时还与其他离子的有效浓度（活度）有关。

土壤养料肥力研究工作把土壤看成是一个多相胶体。养料离子从胶体表面转入液相的过程似乎也可以应用上述化学位势差的概念来说明。已被研究与引述的论点有下列几种：

1. 离子吸附结合能〔9〕 这一观念由马歇尔（Marshall）于四十年代首先提出。他把土壤胶体看成是弱电解质体系，平衡溶液中存在的离子乃是由固相表面解离产生的，其有效浓度（活度  $a$ ）与总浓度（ $c$ ）之比即为活度系数  $f$ 。

即 
$$f = a/c$$

离子从胶体上解离出来的难易程度可用活度系数来衡量。而活度（有效浓度）则与化学位势有关，故

$$\Delta G = RT \ln \frac{c}{a} = RT \ln \frac{1}{f}$$

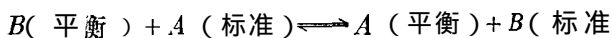
式中  $\Delta G$  为克分子自由结合能，也就是离子从胶体表面进入溶液时需要克服的它与胶体之间的结合能，或应做的功。

马歇尔的概念已可付诸实际测定，对说明土壤中交换性离子的有效度可借以作出说明。

2. 离子交换自由能〔10〕 这一观念由伍德鲁夫（Woodruff）于五十年代提出。我们已知溶液中离子的化学位势与其活度有关，而离子从一种化学位势转入另一种化学位势时必然发生自由能的变化。倘从标准状态（离子活度为 1 克离子）转入活度为  $a$  的溶液时，其自由能的变化为：

$$\Delta G = RT \ln a$$

在下面的平衡状态中：



$$a_B \qquad a_A = 1 \qquad a_A \qquad a_B = 1$$

$$\Delta G^0 = RT \ln \frac{a_A \times 1}{a_B \times 1} = RT \ln \frac{a_A}{a_B}$$

式中： $a$ 代表活度 (activity)。

如果自由能值的变化 ( $\Delta G^0$ 值) 是负值, 说明交换过程中能量趋于减小, 则反应可自发进行, 胶体表面的交换性离子可被交换出来供植物吸收; 反之, 如  $\Delta G^0$  为正值, 则交换反应即不能自发进行。故  $\Delta G^0$  值的大小可反映胶体表面交换性离子有效度的大小。

3. 养料位势 [11] 这是由叔菲尔 (Schofield) 于五十年代提出的近似于上述自由能概念的计算方法。叔菲尔认为平衡溶液中的离子活度比可以说明土壤胶体表面离子的饱和度及其有效性。这一比值与胶体表面吸附性离子的组成、饱和度与结合能有关, 故对一种特定土壤, 这个比值是一个常数。如果用对数方式来表达这一比值, 即称为该养料的“位势”。

以含有  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{H}^+$  的平衡溶液为例:

$$\text{活度比为:} \qquad AR = \frac{\sqrt{a_{\text{Ca}^{2+}}}}{a_{\text{H}^+}}$$

$$\text{以负对数表示之:} \qquad AR = \text{pH} - \frac{1}{2} \text{pCa}$$

倘分子与分母各乘以  $a_{\text{OH}^-}$ , 则:

$$\frac{\sqrt{a_{\text{Ca}^{2+}}}}{a_{\text{H}^+}} = \frac{\sqrt{a_{\text{Ca}^{2+}} \times a_{\text{OH}^-}}}{a_{\text{H}^+} \times a_{\text{OH}^-}}$$

于 20 时,  $a_{\text{H}^+} \times a_{\text{OH}^-} = 14.2$  则:

$$\text{pH} - \frac{1}{2} \text{pCa} = \frac{1}{2} \lg a_{\text{Ca}(\text{OH})_2} + 14.2$$

但  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的化学位势为:  $\mu = \mu^0 + \frac{RT}{2.303} \lg a_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ , 故

“ $\text{pH} - \frac{1}{2} \text{pCa}$ ” 实际上就是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  化学位势的简单函数，故常称为“石灰位势”或“石灰位”。

同理，在  $\text{K}^+$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的平衡溶液中均可计算出钾位势；在  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  平衡溶液中可计算出磷位势。它们可总称之为“养料位势”。养料位势的高低可代表养料有效度的高低。

用上述能量观点来表示土壤养料有效度，基本上是说明其强度因子而不是其容量因子。目前，上述观点可用来说明各种交换性阳离子与磷的有效度，但不能用于象氮、硫等依赖于有机质分解矿化的几种养料的有效度。

### 三、养料的动态平衡及其有效度的可衡量性

1. 土壤中养料的动态平衡 土壤中的有效养料是在不断地进行着流动与变动；它是在各种不同形式的变动中达成一个复杂的平衡。从养料的无机来源讲，除氮以外，极大部分养料均导源于土壤母质的风化，由物理风化到化学风化，该矿物质彻底分解释放出有效养料。有效养料除被植物直接吸收外，还可反过来被土壤胶体表面固定，可被重新沉淀为不溶解状态，也可被雨水冲洗淋失，排出土体直至河海，或挥发损失至大气中。自从生物生长在土壤之中与土壤上面后，养料又在生物体与非生物体之间流动。有机质是在不断分解着的，在分解过程中不断释放出有效养料；另一方面，有效养料又可立即被微生物与植物吸收利用。于农业发达之后，给土壤不断增施了有机和无机肥料，增加了土壤中的有效养料，提高了作物产量；尤其是一些高产作物每年又从土壤中带走大量养料，这样就加速了养料物质的循环。

由此可知，土壤中速效养料的含量乃是一个动态的概念。养料在“有效”与“无效”之间不断转化，同时保持一个动态平衡。土壤养料供应的强度因素之变化远大于其容量因素。养料有效度的强度因素可随气候（气温与雨量）、作物生长等因素而时

时发生变化。同时，不同田块间的差异性也较大。而养料有效度的容量因子则相对地比较稳定，无论时间方面与地域方面的变异性都比较小。这就是土壤肥力测定工作中多用容量因子而少用强度因子来说明土壤养料肥力的原因。对于土壤氮肥力更是如此。

袁可能于1983年提出用下图形象的表示土壤中有有效养料的动态平衡〔12〕（经本书作者修改）。

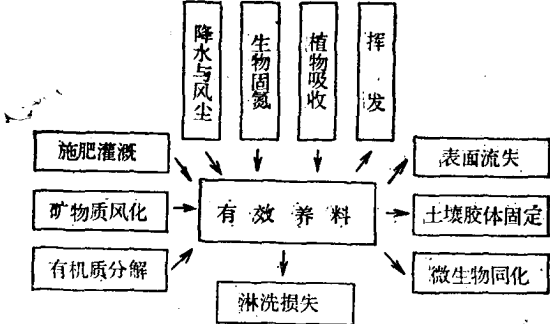


图 1—1 土壤中有有效养料的动态平衡示意图

康瓦尔于1978年曾用下列图解方式来说明土壤中有有效养料的移动与变化〔13〕。

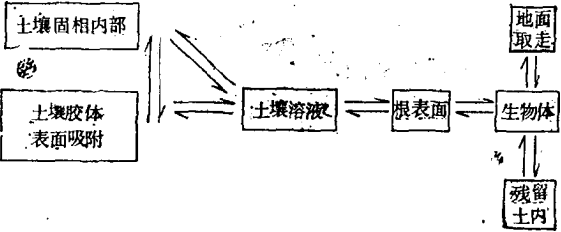


图 1—2 康氏土壤中有有效养料变化和移动示意图

2. 土壤养料肥力的测定可能性 土壤中的有效养料既在不断地移动与变化着，同时又在一定时间之内达到一个动态平衡。在动态平衡达到后，养料的有效含量仍然要随时间地点之不同发

生变化，而且其强度因素的变化大于其容量因素之变化。故此，在一定时间地点上的土壤供肥强度以用强度因素来表达较为妥当。例如土壤供氮问题，在作物生长的各个阶段，土壤供氮的变化如何？则应以强度因素来表达。至于说明一季作物整个生长季节内的总供氮能力，则应以容量因素来表达。因为它所代表的时间阶段与地块面积均可比强度因素来得宽一些。

尽管土壤养料肥力是在变化着的，但无论其强度因素或容量因素都是可以测定的。认为土壤养料肥力“变化莫测”的观点是不科学的。但是，于测定土壤养料肥力时，必须：（1）把养料以外的肥力因子全部相对固定起来，使它们尽可能符合正常状态，气温与雨量、灌水等（亦即水、气、热等条件）均应在试验范围内尽可能统一化；（2）供试作物种类与品种也要统一，严格来说，土壤养料肥力水平是针对某一特定供试作物的，而不可能针对全体作物，因为不同作物的需肥、吸肥情况差异很大。故离开供试作物笼统地说土壤养料肥力是“高”、“中”或“低”是不够正确的；（3）如果研究一种养料的有效含量（事实上应一种一种分别研究），则应把其它养料的供应量全部统一与满足；（4）研究测定的范围限于同一大类土壤之内，如果土壤 pH 和质地等性质发生较大差异，尚应把不同性质的土壤测定结果分别开来加以解释说明。因为这些土壤性质因子的较大变化会使养料肥力测定结果的意义发生变化。例如，粘性土壤固钾能力强，故对交换性钾的测定值的要求就应提高。如此等等，下面将详细讨论。

在上述条件之下，就可以推导出下列五条衡量任一养料元素有效含量的依据：

（1）在其他养料满足时，作物对某一待测养料的吸收量乃是该养料在土壤中的有效含量的量度。

（2）于外界条件基本一致，其他养料满足时，作物的产量

变化可以作为该养料在土壤中有效含量的量度。

( 3 ) 用同位素标记法测定标准化肥的速效程度 ( 或利用率 ) 也同时就是供试土壤中, 同一有效养料速效的程度 ( 或利用率 )。

( 4 ) 某种具有土壤化学依据的提取剂的提取值, 倘与上述 ( 1 ) ( 2 ) 两项结果具有高度统计学相关性时, 则提取测定值乃是该养料有效含量容量因素 ( 水提取值或极稀溶液提取值则说明其强度因素 ) 的函数。

( 5 ) 一个单位 ( 例如 1 克离子 ) 的某一养料自土壤表面转入溶液再转入植物根细胞中均伴随着能量变化。这一能量变化的值, 如果得到测定, 它就是该养料有效含量强度因素的函数。

### 第三节 土壤养料肥力测定的发展简史

#### 一、生物试验法的发展简述

1. 田间试验法及其优缺点〔14〕 土壤养料肥力测定的最基本与最早发展的方法乃是生物试验法中的田间试验法。用具体作物的生长反应及产量反应来说明土壤中某一养料的丰缺程度早在十九世纪已开始应用, 而迄今仍然是一种重要方法。简单的田间试验设计中, 只要对指定养料 $X$ , 设 $X_1$ 与 $X_0$ 两个处理, 就可以从作物产量反应中大致比较出土壤中该养料的丰缺情况。如果把 $X$ 设成 $X_0, X_1, X_2, \dots$ 等等级水平, 即可计算出该养料丰缺的程度与应施用的量。随着生物统计与田间设计科学的发展, 用田间试验的方法来测求“最佳施肥量”已自成一个体系, 一门新的学科。但由于田间土壤的养料肥力变化相当大, 肥力均一田块的面积相对较小, 且界线不明, 故单纯用田间试验法来测定养料肥力时, 工作量很大, 可推广面积较小; 若到处做这种复杂的田间试验以及几年重做一次田间试验都是不太可能的。在本书论述范

围之内，田间试验法以及其他生物试验法都是用来作为考核化学提取法的参比标准的。对田间试验法本身仅就需要所及，作适当讨论，详细研究则不在本书范围之内。

2. 盆栽试验法及其发展 盆栽试验仅为田间试验法的一种特殊形式，它们的原理完全相同；其优点是可在温室或网室中进行，对外界条件得以适当控制。早期的盆栽试验也始于上一个世纪；除在室内进行外，并无其他不同内容。然而德国农业化学家密采里希 (Mitscherlich) 于1930年提出其独创的密氏盆栽法〔15〕，通过此法可定量计算土壤中主要养料的有效含量。这是人类历史上第一次把养料有效含量与相应的产量用数学式联系起来。密氏式子在土壤养料肥力测定上起划时代的贡献，其功绩可与李比希的矿质养料学说相媲美。在三十至四十年代，欧美各国的很多土壤肥力研究工作者确实是应用密氏盆栽法来测定土壤养料有效含量的。至四十年代后期以后，由于化学提取法迅速发展，本法就成为校核化学提取法结果的一种生物学标准。

3. 植物吸收法 植物在土壤中，对某一种养料的吸收量，可以说明土壤中该养料的有效含量。植物吸收法的发展年代很早，德国科学家芮包与施奈特 (Neubauer, Schneider) 早于1923年就提出其有名的经典的幼苗吸收法〔16〕，用黑麦幼苗在小盆子中对少量土壤的短期磷、钾吸收量来说明土壤中该二种养料的有效含量。长期的科学实践证明了本法的可靠性。故直至五十年代，本法尚在科学工作中广泛应用。直至1957—1959，史旦福 (Stanford) 等对该法的具体做法作了全面改进，称为幼苗短期密集吸收法，使本法更加快速而可靠〔17〕。

于五十年代后期以来，先后提出的植物吸收法尚有：( 1 ) 植物在不施钾土壤的长期连续吸钾法 ( Nelson, 1959 ) ; ( 2 )  $X_0$  区作物全生长期吸收量法；例如无氮区全生长期吸氮量法；无磷区全生长期吸磷量法；无钾区全生长期吸钾量法等，均为目前常

用的参比标准方法。

吸收曲线法是一种颇具特色的养料有效含量测定法。此法早于1954年由定氏(Dean)第一次提出〔18〕；用多级施肥盆栽试验为具体方法；可获得养料有效含量的绝对值而不仅仅是一个相对的参比标准，故其测定值也称为A值。

4. 同位素标记法 在同位素示踪法应用到农业科学研究中以后不久，用此法来测定土壤中养料有效含量绝对值的方法与原理即先后问世。首先是应用放射性同位素 $^{32}\text{P}$ 标记肥料，通过盆栽试验来测定土壤速效磷的绝对含量。此法原理于1952年由弗里特与定(Fried与Dean)二人提出〔19〕，原理与方法的科学性均很强，故至今仍然是测定土壤养料有效含量绝对值的标准方法。用稳定同位素 $^{15}\text{N}$ 标记法测定土壤氮有效含量的绝对值的原理同于放射性同位素标记法，但因涉及到质谱仪的发展与应用，故直至六十年代始由勃劳腾(Broadbent)等(1968)将其具体化〔20〕；此后由于质谱仪灵敏度的提高，对 $^{15}\text{N}$ 标记丰度要求愈来愈低，应用日趋广泛。由于放射性同位素 $^{42}\text{K}$ 的半衰期仅12小时左右，其吸收与测定技术均十分困难；直至1967年始由诺太尔(Nuttall)等采用短期密集吸钾法并应用高度灵敏的液闪计数计而取得成功〔21〕，目前其应用已无问题。七十年代以后，本法的应用已扩充至Fe、Mn、Zn等好几种微量元素有效含量的测定。本法的优点为所测定的乃是绝对值。其符号A值取自英文“Available”的第一个字母。但后来发现盆栽的测定值与田间的测定值之间仍然有距离，故还只能作为一个接近绝对值的相对参比标准来看待。

5. 微生物方法 利用某种微生物的生长量、吸收量或其他特征也可以用来测定土壤中主要养料的有效含量。本法的发展历史很早，早在1909年就由布特开维奇(Буткевич)开始研究利用真菌黑曲霉(*Aspergillus Niger*)的生长量来测定土壤中