

土壤肥力手冊

鉀磷研究所(美國)主編

加拿大鉀磷研究所北京辦事處編譯

1992

北京

土壤肥力手冊

（中文版）

《土壤肥力手册》中文版序

这本《土壤肥力手册》十几年前问世于美国，先后印刷过十一次，它注重知识性和实践性，文字通俗洗炼，内容与时俱进，不失为钾磷研究所（美国，亚特兰大）的一本较为成熟之作。

为了能使中国的广大读者共享此书，加拿大钾磷研究所总践 James Beaton 博士决定出资将它翻译成中文出版，现在大家见到的是美国 1990 年的最新版本。希望它为中国的广大农民、从事农业生产、科研、推广、经销的人所乐用。

本书的出版，得到了众多人士的帮助，加拿大钾磷研究所的耿庆文博士首先组织有关人士将此书翻译成中文初稿，北京办事处又进一步邀请中国农业科学院的刘荣乐和曹恭等人做了大量的翻译、校对工作，同时，加拿大钾磷研究所的 Jacquie Gautier 女士和 Sam Portch 博士对此书出版给予了大力支持和协助；在此，一并致谢。

加拿大钾磷研究所北京办事处

1992 年 1 月

目 的

撰写本手册是为了帮助肥料商、县级代理商和其他人员为农民提供正确的农艺指导。

作为一名农场的农业顾问，你也许是一位受过培训的农艺师，也可能不是。本手册的目的不是使你成为这样一位农艺师，而是将有关农学术语、土壤—植物关系及肥料和石灰使用原理的实用知识传授给你。它将指导你去充分掌握土壤肥力知识。我们希望本手册能提出一些问题，以激发你深入探究的热情。

本手册可用作自学指南。许多内容是作物生产系统的基础知识。同时它可以作为土壤肥力研讨班或短期推广课程的教材。通过添补当地的数据资料和图表，可以进一步充实本手册。结合当地的情况，会使本手册对该地读者更有意义。

本手册中正确的农学基本原理和概念适用于任何地区。

使用该手册作教材的课程计划建议

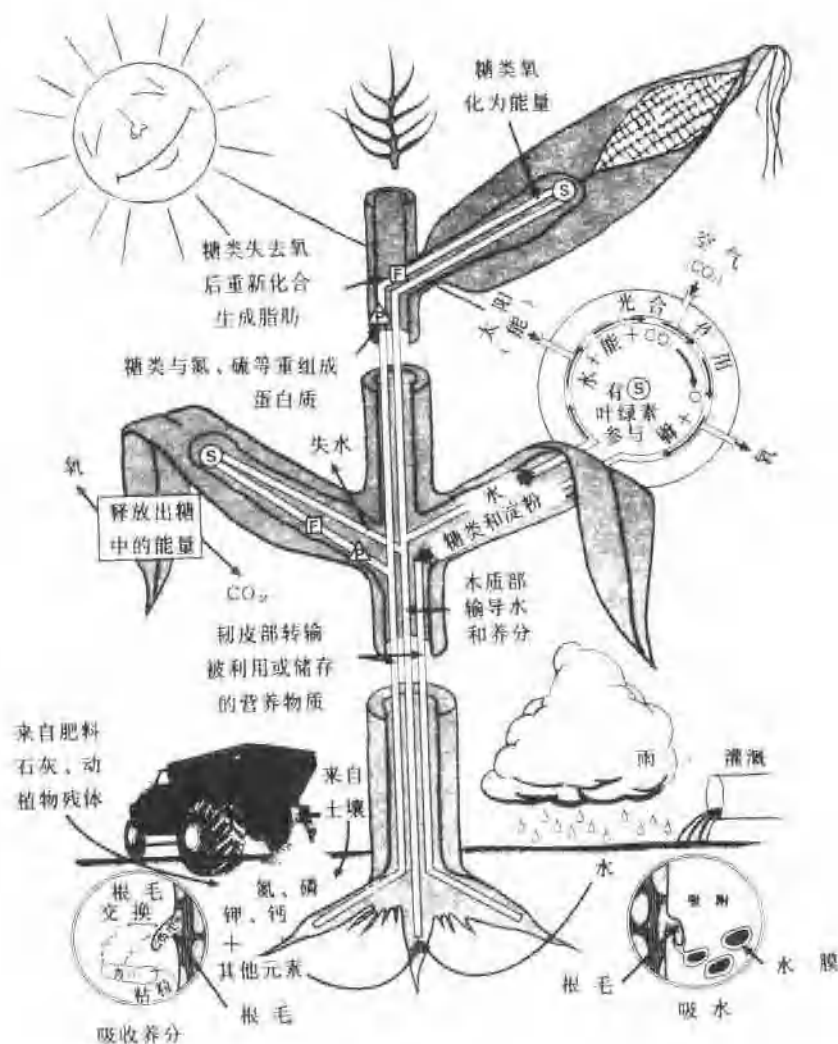
四期课程——例如在肥料商培训中，由一个工业生产专家和一个推广农艺师组成教学小组，分别负责每一期课程。每一位教师被指定讲授特定的主题，并全面讨论该主题，包括对课程教授地区内作物和土壤适用的研究结果。当然，一个专业教师也可在班上教授全部课程。

课程	进度	课时分配 (小时)
1	1	$1\frac{1}{4}$
	2	$1\frac{1}{4}$
2	3	$1\frac{1}{4}$
	4	$1\frac{1}{4}$
3	5	$1\frac{1}{4}$
	6	$\frac{3}{4}$
	7	$\frac{1}{2}$
4	8	1
	9	$1\frac{1}{4}$

五期课程——一至四期课程可由两人组成的教学小组承担，但主要讲授概念和原理。第五期全部用于研讨研究结果，可以由四至五名教师共同担任这一期课程。

课程	进度	课时分配 (小时)
1	1	$1\frac{1}{4}$
	2	$1\frac{1}{4}$
2	3	$1\frac{1}{4}$
	4	$1\frac{1}{4}$
3	5	$1\frac{1}{4}$
	6	$\frac{3}{4}$
	7	$\frac{1}{2}$
4	8	1
	9	$1\frac{1}{4}$
5	总结	$2\frac{1}{2}$

自然的奇迹



有一句现代人不曾听说过或可能并不赞同的谚语：上帝善助自助者。在人和植物的关系上这句话再明确不过了。

上面的图式表明了植物如何利用土壤中的水分和养分以及空气中的氧气制造碳水化合物、脂肪和蛋白质。植物制造的这些物质越多，它生产的粮食或纤维也就越多。

人类给予自然的三大帮助是：(1) 提供保证作物最佳产量所需的足量的氮、磷、钾、石灰和其它营养元素；(2) 通过灌溉、排水或改善水分利用的土壤措施调控水；(3) 优良耕作和生产措施，以寻求尽可能最佳的生长环境。

目 录

· 第一章 土壤肥力和土壤生产力的概念·····	5
· 第二章 土壤反应与施石灰·····	16
· 第三章 氮·····	24
· 第四章 磷·····	36
· 第五章 钾·····	49
· 第六章 中量元素·····	59
· 第七章 微量元素·····	65
· 第八章 土壤测试、植株分析和诊断技术·····	73
· 第九章 施肥获取的利益·····	84

第一章 土壤肥力和土壤生产力的概念

· 概述·····	5
· 植物必需营养元素·····	5
· 土壤质地和结构·····	6
· 土壤胶体和离子·····	8
· 阳离子交换量 (CEC) ·····	9
· 土壤阴离子的保持·····	12
· 土壤有机质·····	12
· 影响土壤生产力的其它因素·····	13
· 土壤深度·····	13
· 地表坡度·····	13
· 土壤生物·····	14
· 养分平衡·····	14
· 小结·····	14

概述

土壤是作物赖以生长为全世界提供衣食的中介。了解土壤肥力就了解了作物生产的基本要求。

没有肥沃的土地，农民如何有效地和有竞争能力地生产作物？！

不懂得土壤的基本肥力知识，农业顾问如何帮助和支援农民？！

土壤肥力对丰产土壤是至关重要的。但肥沃的土壤不一定是丰产土壤。即使当土壤肥力充足时，排水不良、虫害、干旱和其他因素也可能限制作物生产。为了充分地认识土壤肥力，我们必须了解提高或限制生产力的其他因素。

为了解土壤生产力，我们必须认识客观存在的土壤—作物关系。一些控制植物生长的外部因素有：空气、热量（温度）、光、机械支撑、养分和水分。除光以外，植物依赖土壤（至少是部分地）获取所有这些因素。每个因素都直接影响植物生长。每个因素又与其他因素互有联系。

因为水和空气占据土壤孔隙，故影响水分关系的因素必然影响土壤空气。湿度变化又进一步影响土壤温度。养分有效性则又受到土壤与水分平衡以及土壤温度的影响。根系生长也受土壤温度、土壤水分和空气的影响。

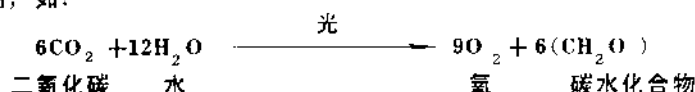
本章的以下各节介绍了影响植物生长的土壤特性，也列出了植物必需营养元素并进行了分组。

该手册的后面几章将介绍每一种植物养分的情况，包括作物高产量的养分移取量，养分在植物生长中的作用，植物的缺素症状，养分与土壤的关系及其肥源。

植物必需营养元素

已知有 16 种化学元素是植物生长所必需的。它们被划分为非矿质和矿质两大类。

非矿质营养元素，包括碳（C）、氢（H）和氧（O）。这些养分存在于大气和水中。它们被用于光合作用，如：



光合作用的产物在植物生长中占绝大多数。二氧化碳、水或光不足都会降低作物生长。但由于用于光合作用水的数量很小，在水分低到足以影响光合速率之前，植物早就显示出缺水。

来自土壤的 13 种矿质营养元素，可划分成三类：大量营养元素、中量营养元素和微量营养元素。

大量营养元素

氮 (N)
磷 (P)
钾 (K)

中量营养元素

钙 (Ca)
镁 (Mg)
硫 (S)

微量营养元素

硼 (B)
氯 (Cl)
铜 (Cu)
铁 (Fe)
锰 (Mn)
钼 (Mo)
锌 (Zn)

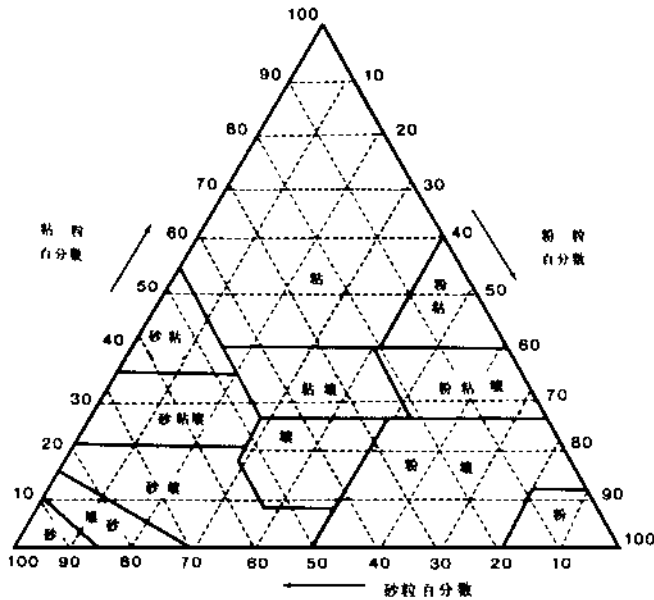
由于作物利用较大量的大量营养元素，这些元素通常先在上壤中出现短缺。中量营养元素和微量营养元素的利用量小，不那么常表现缺乏。但对完整的土壤肥力来说，它们和大量营养元素一样重要。无论何时何地作物需要它们时，作物必须得到它们。

土壤质地和结构

土壤质地是由砂粒、粉粒和粘粒在土壤中的数量决定的。土壤颗粒越小越接近粘粒，越大越接近砂粒。例如：

1. 砂粒含量高的土壤，按质地被分类为“砂土”。
2. 当土壤中存在少量的粉粒或粘粒时，该土壤不是“壤质砂土”就是“砂质壤土”。
3. 主要由粘粒组成的土壤为“粘土”。
4. 当砂粒、粉粒和粘粒在土壤中的比例相等时，该土壤称作“壤土”。

土壤的 12 种质地类型如下：



土壤质地和结构影响生长中的植物能够获得的空气和水分的数量。土壤颗粒大小的重要性在两方面：

1. 较小的土壤粘粒比大的砂粒更紧密地结合在一起。这意味着供空气和水占据的孔隙较少。
2. 小土壤颗粒比大土壤颗粒具有更大的表面积。例如，最大的粘土颗粒的表面积是最小的砂粒表面积的 25 倍。随着土壤表面积的增加，其吸附（或保持）的水量增加。

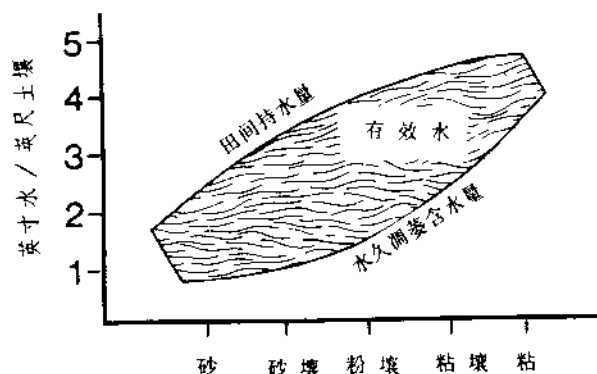
于是，由于砂土孔隙空间较大，水分能够自由地从土壤中排出，故砂土保持的水很少，粘土吸附相对大量的水分，而且粘土的小孔隙能够克服重力而保持水分。

虽然粘质土壤比砂质土壤的持水量大，但并不是所有的水分都对生长中的植物有效。粘土（和那些有机质含量高的土壤）比砂土保持的水分更紧固。这意味着粘质土中无效水分较多。所以，尽管粘质土比砂质土保持有更多的水分，但其中无效部分较多。

“田间持水量”这一术语是指在重力水流停止后土壤中保持的水量。用重量百分比表示。

作物永久萎焉后土壤的含水量称作“永久凋萎含水量”。虽然这时仍然有水，但其被土壤紧紧吸持，植物无法利用。

对生长中的植物来说，有效水是指土壤在田间持水量与永久凋萎含水量之间所含的水量。下图表明了土壤有效水随土壤质地的变化。



砂质土壤不能储存象粘质土壤那么多的水分，但其中有效水的百分比较高。因而如图所示，在土壤质地和有效水间不存在固定不变的关系。

细质地土壤（如粘土）易被压实。这便减少了土壤孔隙空间，限制了空气和水在土壤中的移动。这使大量降雨变为径流。即使在高降雨量的情况下，也将出现缺水问题。粘土湿时很粘，干时则形成硬块。因此，耕作时适宜的土壤含水量极为重要。

砂质土壤由于保持水少而天生易旱。砂土结构松散，不象粘土那样易压实，因此易于耕作。但是，含有大量极细砂粒的土壤也易于被压实。

粉粒含量高的土壤通常是土壤结构最差的土壤。粉粒极紧密地结合在一起，极易被压实。

土壤结构强烈地影响根系和地上部的生长。当土壤较紧实时，大孔隙比例下降，根系生长停顿，产量下降。

作物生产的理想土壤看来是：

- 土壤质地和有机质含量适中，以便空气和水分的移动。
- 足够的粘土以保存土壤水分。
- 底土深且渗透性强，以及肥力充足。
- 一个适于根系深扎以吸收水分和养分的环境。

良好的管理能保持或改善良好的土壤结构。良好的土壤结构有利于形成强大的作物根系。土壤团粒的大小和形状决定土壤结构的质量。最好的土壤结构是具有团聚颗粒的块状和粒状结构，这样空气和水分能够自由移动。

土壤胶体和离子

随着土壤在风化过程中形成，一些矿物和有机质被分解成极细小的颗粒。化学变化进一步使这些颗粒缩小后，肉眼便看不见。这些最细小的颗粒叫做“胶体”。

科学家们已经了解到，矿物粘土胶体为片状结构，其性质上为晶体。在多数土壤中，粘土胶体在数量上超过有机胶体。胶体在土壤的化学反应中起主要作用。

土壤母质和风化程度决定土壤中粘土的类型。既然土壤胶体是由这些粘土衍生而来，其反应性也受到土壤母质和风化作用的影响。

每一胶体（粘土和有机质）带净负电荷。电荷是在其形成过程中产生的。这就是说它能够吸引和保持带正电的颗粒，就象磁铁不同的两极相互吸引一样。胶体排斥其他带负电的颗粒，就象磁铁相同的两极相互排斥一样。

带电荷的元素叫作“离子”。钾、钠、氢、钙和镁都带正电荷。它们被称作“阳离子”，它们可以写成离子形式，如下表所示。注意一些阳离子带一个以上的正电荷。

养分	化学符号	离子形式
钾	K	K^{+}
钠	Na	Na^{+}
氢	H	H^{+}
钙	Ca	Ca^{++}
镁	Mg	Mg^{++}

带负电荷的胶体吸引并保持阳离子，就象一块磁铁吸住金属小片一样。这个概念表示如下：



胶体的这种特性解释了硝态氮 (NO_3^-) 比铵态氮 (NH_4^+) 更易从土壤中淋失的原因。象土壤胶体一样，硝态氮带一个弱负电荷。所以，硝酸根不能被土壤保持，它作为自由离子保留在土壤水中，故在一些降雨条件下和某些土壤中，它通过土壤剖面被淋失。

带负电的离子例如硝酸根和硫酸根 (SO_4^{2-}) 被称作“阴离子”。下表列举了一些常见的阴离子：

阴离子	离子形式
氯	Cl^-
硝酸根	NO_3^-
硫酸根	SO_4^{2-}
磷酸根	PO_4^{3-}

阳离子交换量 (参见图示 2 和 3)

被土壤胶体保持的阳离子可被其他阳离子取代。这就是说他们是可交换性的。钙可被交换为氢或钾，反之亦然。土壤能够保持的可交换性阳离子的总量 (土壤所带负电荷的总量) 称作土壤的“阳离子交换量” (CEC)。土壤的 CEC 越高，它能保持的阳离子越多。

土壤保持可交换性 K^+ 和其他阳离子的能力各不相同。CEC 取决于土壤中存在的粘土和有机质的类型和数量。例如，粘土含量高的土壤比粘土含量低的土壤能够保持更多的可交换性的阳离子。同样，CEC 随土壤有机质的增加而增加。

土壤 CEC 可以每 100 克土壤中的毫克当量数表示，计作 $\text{meq}/100\text{g}$ 。这样表示的唯一原因是表明粘土和有机质的相对 CEC。粘土矿物的 CEC 值通常在 10 至 $150\text{meq}/100\text{g}$ 之间。有机质的 CEC 值在 200 至 $400\text{meq}/100\text{g}$ 之间。所以，粘土和有机质的类型及数量极大地影响土壤的 CEC 值。

在土壤高度风化、有机质含量低的南部，CEC 值较低。往北走，土壤风化程度低、有机质含量通常较高，CEC 值可能很高。CEC 值高的粘质土壤可保持大量的阳离子，防止由于淋洗作用引起的潜在损失。CEC 值低的砂质土壤只能保持少量的阳离子。

阳离子交换量：土壤管理和施肥的助手

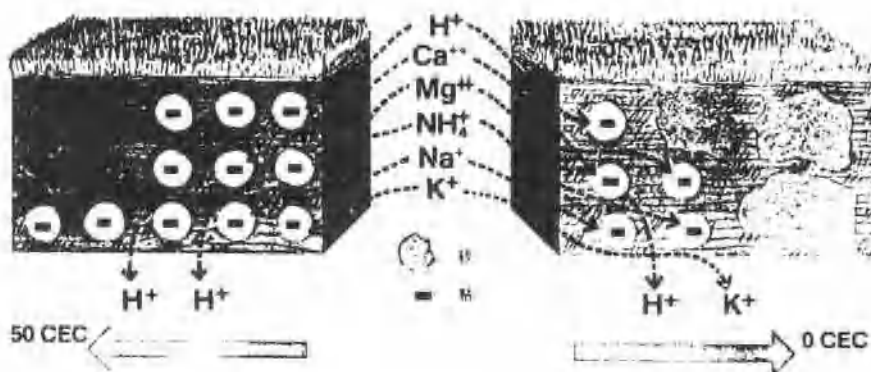
阳离子是带正电荷的养分离子和分子，如钙 (Ca)、镁 (Mg)、钾 (K)、钠 (Na)、氢 (H) 和铵 (NH_4)。

粘粒是土壤带负电荷的组份。这些带负电的颗粒 (粘粒) 吸引、保持并释放带正电的养分颗粒 (阳离子)。有机质颗粒也带有负电荷，吸引带正电荷的阳离子。砂粒不起作用。

阳离子交换量 (CEC) 是指土壤保持和交换阳离子的能力。阳离子正电荷的强度各异，这就使得一个阳离子能取代带负电荷土壤颗粒上的另一阳离子。

阳离子交换示意图

CEC 25 CEC 5
粘粒越多，保持阳离子的位点越多 粘粒含量越低，保持阳离子的位点越少



常见 CEC 范围

(重粘土)

(砂土)

一些实际应用

CEC 11-50 的土壤

CEC 1-10 的土壤

- 粘粒含量高
- 矫正一给定 pH 需石灰较多
- 在给定土壤深度内保持养分能力较强
- 具高粘土含量土壤的物理性质
- 土壤持水量高

- 砂粒含量高
- 氮、钾易淋失
- 矫正一给定 pH 需石灰少
- 具高砂粒含量土壤的物理性质
- 土壤持水量低

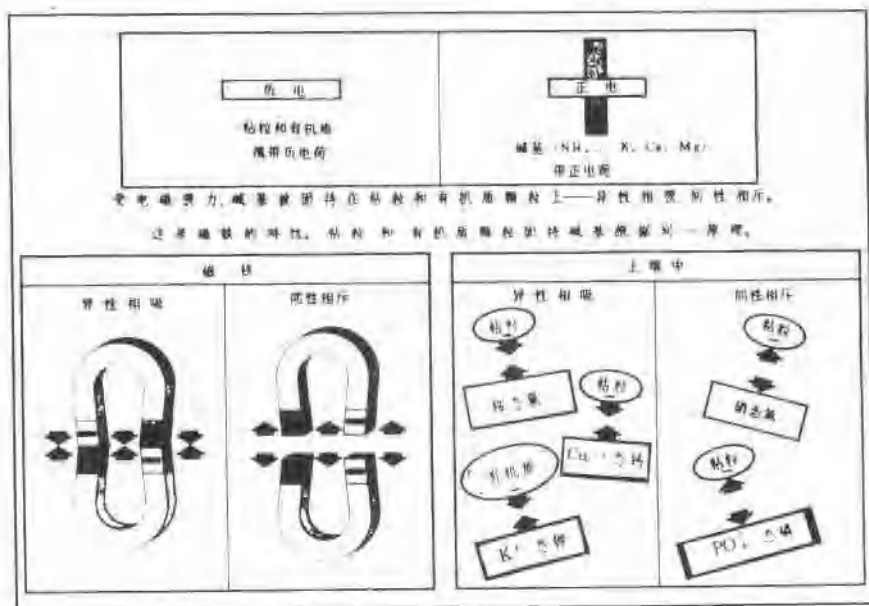
图承 3

粘土和有机质颗粒

土壤質地	粘粒百分含量
壤砂土	5%
砂壤土	10%
粉壤土	20%
粉粘壤土	30%
粘壤土	35%
粘土	45%

为了解土壤中养分的行为，我们必须了解粘土和有机质颗粒的作用。所有农业土壤都含有一些粘土和一些有机质。主要土壤类型的粘粒含量如上所示。

下面的图说明：(1) 铵离子 (NH_4^+) 被粘土和有机质保持而防止淋失。(2) 石灰中的钙固持在粘土和有机质上 (通常置换氢)，使得土壤碱性更强。(3) 土壤的盐基交换量在粘土、有机质和土壤水分间往复交换碱基中起作用，为生长中的作物根系提供养分。



土壤的阳离子保持能力使施肥时间和施肥量在规划施肥计划中占据重要地位。例如，在秋季给极砂性的土壤施钾肥以供来春作物利用的做法可能不明智，特别是在秋雨和冬雨量高的地区。但是，在 CEC 高的土壤上，便可以在秋季一次安全地施用足够供后茬一、二季作物利用的钾肥。

另一影响土壤肥力并与 CEC 紧密相关的因素是“盐基饱和度”。盐基饱和度是指每 100 主要阳离子占总 CEC 的百分比。对大多数土壤来说，下表所列的范围是供作物生产的最佳范围。

阳离子	盐基饱和度
钙 (Ca^{++})	60—70
镁 (Mg^{++})	10—20
钾 (K^+)	2—5
氢 (H^+)	10—15
其他 *	2—4

* 包括铁 (Fe^{++})、锰 (Mn^{++})、铜 (Cu^{++})、锌 (Zn^{++}) 和钠 (Na^+)。

如果某种阳离子在土壤 CEC 中占优势（如酸性土壤中的 H^+ ），那么象阳离子 K^+ 和 Ca^{++} 就会被大大减少并遭受淋洗损失。土壤就不能提供作物正常生长所需的必需养分比例和数量。

土壤阴离子的保持

土壤对阴离子的保持机制还不明确。例如，硝酸根是完全流动性的，能随土壤水自由移动。在降雨量高的情况下，硝酸根向下移动。在极干旱的气候下，其随土壤水向上移动，在土壤表面积累。

在一定条件下，某些土壤可疏松地保持硫酸根。低 pH 值时，在粘土（如高岭石）的断裂边缘可产生正电荷。在表层土或底土层含有水化铁铝氧化物的土壤可通过产生的正电荷吸附一些硫酸根。但是，在土壤 pH 超过 6.0 时，这种低保持量的作用很小。在干旱和半干旱地区，通过石膏积累可保持相当数量的硫。

硫酸盐可被保持在土壤胶体的表面上，硫酸根离子也可被土壤吸附的其他络合物疏松地吸持，有机质有时会产生正电荷，此时，它们可吸附硫酸根。

土壤有机质

土壤有机质由不同腐解阶段的植物和动物的残留物组成。充足的有机质对土壤有多方面的益处：（1）改善土壤物理状况；（2）增加水分入渗；（3）改善土壤耕性；（4）减少土壤侵蚀损失；（5）向植物生长提供养分。大多数的益处来自于土壤有机质残留物分解时释放的产物。

有机质大约含 5% 的全氮量，因此它是备用氮库。但有机质中的氮为有机化合物形态，由于土壤有机质的分解很慢，不能立即供植物生长利用。尽管土壤可能含有丰富的有机质，但为保证非豆科作物有足够的速效氮源，氮肥仍是需要的，特别是对那些需氮量高的作物。

土壤有机质也含有其他植物必需营养元素。植物和动物残留物含有数量不同的矿质营养，如磷、镁、钙、硫和微量元素。当有机质分解时，这些营养元素便对生长中的植物有效。

有机质分解有助于释放养分，但在分解过程中，氮和硫可能暂时被固定起来。分解有机质的微生物需要氮来合成其机体内的蛋白质。如果被分解有机质的碳/氮比 (C/N) 高、（即含氮量低），那么这些微生物将会利用土壤有效氮和肥料氮。

所以，当棉花残茬和玉米秸秆或燕麦和小麦蒿秆掺入土中时，如果不久将播种作物，就应该增施氮肥，否则，作物可能会暂时缺氮。随着土壤生物的死亡和腐解，被固定在其体内的氮，最终将

变成有效氮。

一些土壤含有机质很少。在湿润的南方，由于气候温暖和雨量充沛有利于有机物的迅速分解，大多数土壤的有机质含量历来不高。在冷凉的地区，有机质分解较慢，天然有机质含量可能相当高。但因精耕细作，其中一些土壤的有机质正在损失。

在施肥充足和管理措施良好的条件下，可以产生更多的作物残茬。在高产玉米地上，籽粒收获后有高达 8 吨的玉米残茬留下来。这些残茬有助于维持或提高土壤有机质水平。它们有助于改善土壤的物理、化学和微生物性质。应定期向土壤施用作物残茬，以维持作物生产水平。因此，重要的一点是保持充足的残茬量进入土壤循环。

影响土壤生产力的其他因素

土壤深度

土壤深度可定义为利于植物根系穿透的土壤层深度。具理想质地、结构深厚和排水良好的土壤有利于作物生产。植物需要足够的深度供根系生长和吸收养分和水分。只要土壤条件允许，根系可伸展到 0.9—1.8 米甚至更深。紫花苜蓿根系可达到 9 米多深。

生根深度受土壤物理和化学障碍层及高水位的限制。硬磐、页岩层、砾石层和土壤物质高达毒害浓度等情况是极难改变的。但高水位通常可以通过改善排水而改变。

下表是通过土壤深度对一般土壤生产力的分级。

作物根系可利用的 土壤深度 (米)	相对生产力 (%)
0.30	35
0.61	60
0.91	75
1.22	85
1.52	95
1.83	100

地表坡度

地形对径流量和侵蚀量在很大程度上起决定作用。它同时决定灌溉方法、排水和其他为保持水土所需的管理措施。土地的坡度越陡，越需要加强管理，因而增加了劳力和设备费用。在达到一定的坡度时，土壤便不宜于中耕作物的生产。表层土壤的易蚀性及土壤坡度是土壤潜在生产力的决定因素。下表是根据土壤坡度和易蚀性对土壤生产力的分级。

土壤坡度 (%)	相对生产力 (%) *	
	不易侵蚀的土壤	易侵蚀的土壤
0—1	100	95
1—3	90	75
3—5	80	50
5—8	60	30

* 少耕法有利于降低坡度的不利影响。

土壤生物

有许多种类的生物生活在土壤中。它们的尺寸从显微级的细菌、线虫和真菌至肉眼易见的种类（蚯蚓和昆虫幼虫）。一些微生物能引起许多有益的土壤反应，如，植物和动物残留物的腐解。另一些反应是有害的——如那些导致植物和动物病害的微生物的发育。

大多数的土壤生物依靠土壤有机质供应食物和能量，因而常常存在于土壤表层 30 厘米范围内。影响土壤生物丰度的因素包括：水分、温度、通气状况、养分供应、土壤 pH 值以及种植的作物。第三章将讨论一些种类的土壤生物的活动。

养分平衡

养分平衡是土壤肥力和作物生产的一个关键概念。氮可能是非豆科植物的第一个限制性养分。但没有数量充足的其他养分，氮不能最好地发挥作用。当氮肥增产时，作物要求更多的其他养分。

当饲料作物获得更多的氮时，它们也需要更多的钾

年施氮量	K ₂ O 移取量
公斤 / 亩	公斤 / 亩
0	7.5
7.5	13.4
15.0	17.2
22.4	18.3

良好的作物生长需要适当的养分平衡。下表的玉米生产说明在美国伊利诺斯州低磷土壤上磷对高施氮量的重要性。

N—P 平衡对玉米产量的重要性

N	P ₂ O ₅	(公斤 / 亩)	P ₂ O ₅ 增产量
公斤 / 亩	0	12	(公斤 / 亩)
0	171	243	72
3.7	197	347	150
7.5	167	393	226
11.2	151	460	309
15.0	209	514	305

小结

有许多因素控制土壤生产力。肥料使用仅是其中之一。如果不采用完善的作物生产措施，将会降低肥料的潜在效益并限制土壤生产力。

掌握并运用控制土壤生产力的因素是这本培训手册的全部目的所在。该手册不能回答我们的全部问题，但它将帮助我们解决那些限制土壤生产能力的问题。