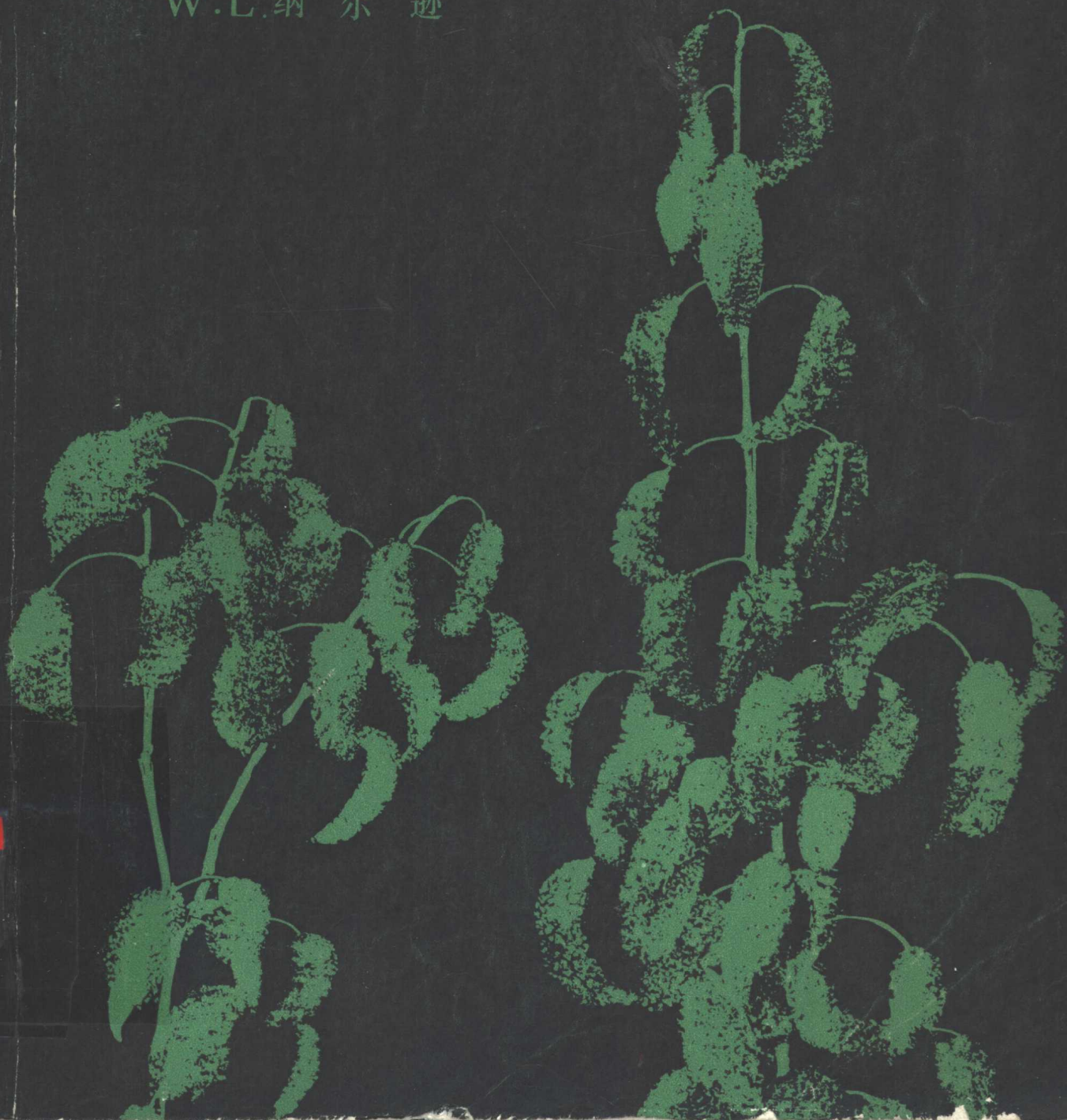


土壤 肥力与肥料

[美] S.L.蒂斯代尔 著
W.L.纳尔逊



土壤肥力与肥料

[美] S. L. 蒂斯代尔 W. L. 纳尔逊 著

孙秀廷 曹志洪 等 译

鲁如坤 等 校

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书系统地介绍了土壤肥力和肥料的制造及使用的基本原理。书中首先论述了土壤肥力的过去和现在、作物的影响因子,然后着重阐述了土壤和肥料中植物必需的各种大量元素和微量元素、各种肥料的制造原理和方法、土壤肥力评价、施肥的基本原则、耕作制度和管理、合理用水和肥料效应等。书中还用不少篇幅讨论施用石灰和肥料的经济学问题,这对于提高我国农业的经济效益有一定的参考价值。

本书可供土壤及农业科技工作者、农业院校有关专业师生、肥料工业的科技工作者参考。

S. L. Tisdale W. L. Nelson
SOIL FERTILITY AND FERTILIZERS
Macmillan Publishing Co., Inc.
NEW YORK 1975

土壤肥力与肥料

〔美〕S. L. 蒂斯代尔 W. L. 纳尔逊 著

孙秀廷 曹志洪 等译

鲁如坤 等校

责任编辑 洪庆文

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年8月第一版 开本:787×1092 1/16
1984年8月第一次印刷 印张:29 3/4
印数:0001—5,850 字数:695,000

统一书号:13031·2622
本社书号:3613·13-12

定价:4.60元

前 言

《土壤肥力和肥料》第三版的目的是与前两版一样，即介绍土壤肥力和肥料制造及使用的一些基本原理，适于农学院三、四年级学生使用。如同第一版的情况一样，这本书对那些已经学完内容相当广泛的土壤基础课程的人来说，价值最大。

各章的次序和每一章的组织结构基本上与第二版相同。但内容增加了，包括从1966年以来发表的文献中的大量最新资料。对《作物生长及其影响因素》这一章作了改写，在讨论了各种生长因素之后，增补了一些有关生长的数学表达式资料。

第四章《土壤与植物的基本关系》依据现代概念深入讨论了关于有效阳离子交换量和诸如质流、扩散及接触交换这样一些因子，以及它们对植物根系吸收离子的影响等一系列问题。

十一章《石灰的施用》作了重大改写，重点讨论了Al、Mn和Fe对土壤酸度的影响。还详细讨论了新近提出的关于在美国温暖湿润地区以及湿润地区和寒冷地区的土壤上施用石灰的意见。

第十二到第十六章介绍了关于土壤肥力评价、肥料使用、石灰和肥料使用的经济学、以及良好的土壤管理等的一些最新概念。引用了有关这些论题的最近发表的实验数据，对这几章的内容作了补充修订。

同第二版一样，在每一章的末尾都有摘要和问题。

本文中所用的成本：盈利数字，只是为了说明问题。很多因素导致世界农业情况不断的变化，价格也一直戏剧性地波动。但是，不论价格如何，植物与它们的环境条件之间的自然关系却始终是一样的，不过为了决定某个措施在经济上是否合算，就必须根据作物增产数据用当时的价格加以衡量。

从1965年以来，世界对于粮食和纤维的需要有了惊人的增加。肥料的生产和消费随之也有了相应的增加，但在七十年代发生了一次能源危机，它严重地减少了氨的生产，而氨是几乎所有化学氮肥的基础。如果能源危机延续下去，对于粮食生产的冲击将是严重的，可能不得不考虑另外一些供应植物生长所需氮素的替代方法。在这些替代的方法中，如更多地使用污泥、豆科作物和农家肥料，这些措施在十年前看来好像就要放弃不用了。

讨论影响农业价格和能源供应的各种因素不在本书的范围之内，但懂得在本书中陈述的土壤肥力和植物生长的原理可大有助于农民应付在能源短缺的世界中所面临的生产问题。在农业价格不断波动的情况下，为了成功地调节经济上的收入和支出，必须了解植物生长和影响植物生长的因子（包括土壤肥力）之间的关系，这就是本书的中心论题，本书的正文就是围绕这一中心论题组织的。

我们从北美和别的一些国家的同事们发表的著作中吸取了不少精华，这些论文的作者们提供了许多包含在他们过去发表的一些报告中的图表。我们对这些人表示特别的感谢，因为人数很多，不能在此一一列出。我们的许多同事对本书的修改提了许多宝贵的建议，我们也向他们表示感谢。

S. L. 蒂斯代尔 W. L. 纳尔逊

目 录

前言	iii
绪论：化学肥料在世界发展中的作用	1
第一章 土壤肥力的过去和现在	5
第二章 作物生长及其影响因子	15
第三章 植物必需的营养元素	42
第四章 土壤与植物的基本关系	64
第五章 土壤氮素和氮肥	74
第六章 土壤磷素和磷肥	115
第七章 土壤和肥料的钾、镁、钙、钠	146
第八章 土壤与肥料的硫和微量元素	167
第九章 氮、磷、钾肥的制造	206
第十章 混合肥料的制造和性质	221
第十一章 石灰的施用	244
第十二章 土壤肥力的评价	271
第十三章 施肥的基本原则	308
第十四章 耕作制度和土壤管理	346
第十五章 石灰和肥料施用的经济学	374
第十六章 合理用水和肥料效应	394
第十七章 土壤肥力问题的探讨	411
参考文献	431

绪论：化学肥料在世界发展中的作用

现在我们比以往任何时候都更清楚地认识到,为了保证作物高产,满足植物养分的需要是多么重要。农民们除了使用改进了的管理措施以外,正在不断地努力克服养分的缺乏,以便使作物产量更接近于它遗传特性所决定的极限产量。由于人们努力的结果,特别是1960年以来,美国以及其他一些国家在肥料工艺和植物养料的施用方面已经取得了巨大的进展。人们对植物和土壤化学更广泛的了解已经导致了施肥和栽培措施的改进。而改进的肥料工艺则使得生产出了各种更有效的肥料品种。

大约在1900年以前,在美国还是靠开垦新耕地来满足增加农业产量的需要的。虽然通过灌溉、排水或者在林区开垦农田,还有一些新的土地可供耕种,但是用这些办法增加的作物种植面积相对来说是非常少的。实际上,从1962年到1972年每年大约减少耕地6,000,000英亩,或者说每年大约减少0.5%。由于城市的扩展、道路的修建以及运动娱乐场地的扩大,这种耕地减少的情况还将不断继续下去。因此,毫无疑问,农业生产上任何实质性的推进只能来自耕地上产量的提高。单位面积上的高产,意味着单位面积的净得收益较高而单位生产成本较低。

从1950年到1973年,美国对植物养料的消费有了惊人的增长,表明肥料对作物生产的重要性在美国正在被大家所接受。在这期间,施用的氮、磷、钾分别增长的吨数如下:

施用的吨数(美国农业部)

年 份	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1949—1950	956,000	1,930,000	1,070,000
1964—1965	4,605,442	3,785,230	2,828,458
1972—1973	8,339,000	5,072,000	4,412,000

尽管有了这样的进展,但美国的肥料单位面积用量,正如表1-1所表明的那样,还远低于许多欧洲国家。不过,按人口平均来算,美国仍在前六名中,这有助于增加农产品出口的机会。就农业利用来说,欧洲的土地是古老的,同时,因为那里人口密度高,所以也必须保持高的生产水平。与欧洲相比,美国的土壤在农业上是比较新的土壤,在某些地区仍然较多地依赖土壤的自然肥力。此外,在美国还有数百万英亩的土地是处在干旱或者沙漠地区,在那里,限制农业生产的因素是水,而不是植物养料。表1-1所提供的资料说明了世界各地对肥料的需要及其重要性。

全世界对植物养分的施用正在迅速地扩大,据联合国粮农组织、田纳西流域管理局以及其他一些组织估计,到1980年其需要量将比1972年增加50%。

我们把三十个国家的肥料施用与单位耕地面积作物生产的价值指数之间的关系表示在图0-1。肥料不仅是现代化农业的一个指标,而且也是促使其他栽培措施改进的一个有力因素。当然,图0-1所表示的产量增加并不全是施用肥料的结果,但是这些增产数字

表 0-1 各国按可耕地面积和人口平均的肥料消费情况

	每公顷可耕地消费的肥料量* (公斤数)			按人口平均的消费量(养分总量)(公斤数)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N, P ₂ O ₅ , K ₂ O
美国	52.7	22.9	26.7	84.9
苏联	36.1	25.3	21.1	71.6
比利时	224.6	105.7	159.9	42.0
丹麦	141.8	39.7	51.5	120.6
法国	117.5	89.9	91.1	103.2
东德	149.6	74.6	120.0	103.1
西德	176.8	100.6	141.0	50.8
希腊	85.3	39.6	8.7	54.0
荷兰	551.8	93.1	122.5	46.6
英国	198.5	63.7	67.3	40.9
加拿大	20.9	13.8	7.2	79.3
巴西	9.1	17.9	10.5	21.9
秘鲁	28.6	5.2	3.7	7.3
中国	114.3	29.1	6.8	15.0
印度	22.9	6.9	4.0	8.2
日本	132.5	144.4	110.2	16.0
土耳其	27.3	17.4	0.8	27.9
阿尔及利亚	9.5	12.3	4.4	10.0
南非(阿扎尼亚)	38.7	40.1	11.6	40.9
埃及	204.5	38.5	4.5	16.5
扎伊尔	0.4	0.4	0.4	0.3
澳大利亚	5.8	19.0	3.2	82.5
新西兰	48.0	722.3	253.8	148.1
全世界	41.2	21.1	16.3	25.5

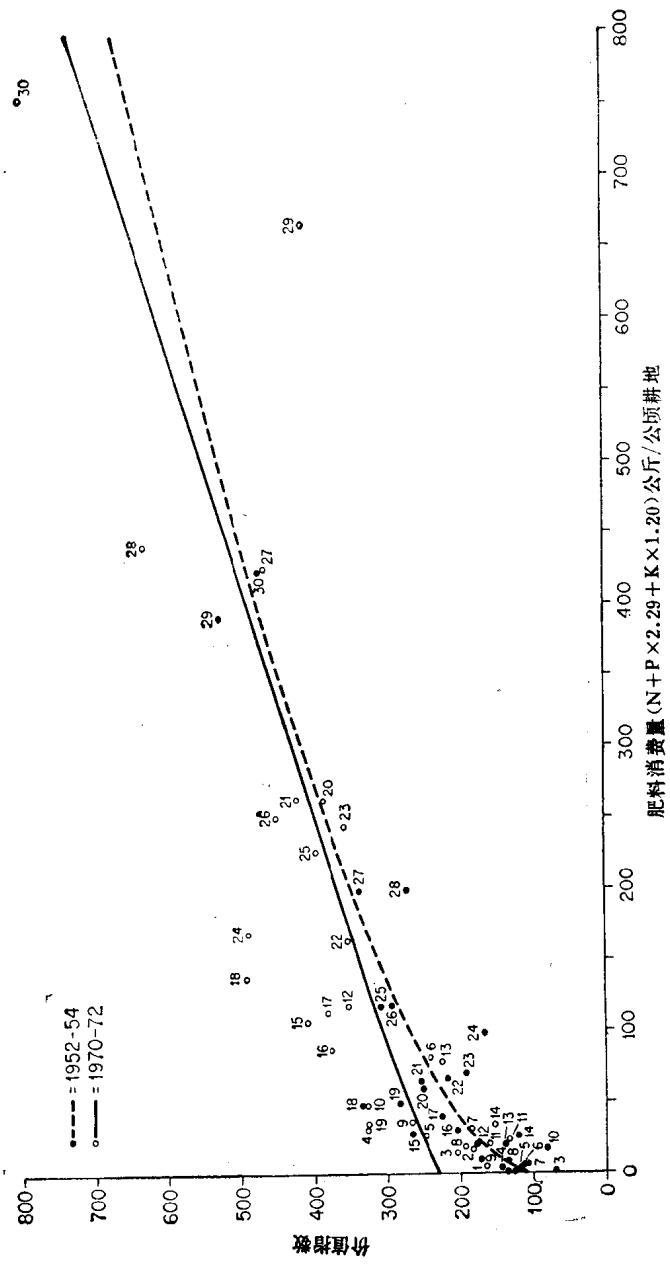
* 原文为联合国粮农组织 1972 年肥料年鉴,为使读者了解最新材料,特改用 1982 年肥料年鉴。——译注

突出地表明,当我们使用了肥料从而也改进了耕作措施时,能获得多么大的成就。有意义的是,施肥水平较低的一些国家在肥料施用和价值指数方面已经取得了相当大的进步。联合国粮农组织对 1982 年施用肥料中的 N:P₂O₅:K₂O 比例的报告如下:

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
发达国家	100	61	57
发展中国家	100	37	15

美国在四十年代石灰的施用有了显著增长。在 1946 年和 1947 年石灰石的应用达到了高峰,但从那以后对石灰的需要量就下降了。这是不幸的,因为 N 肥的用量增加和集约化耕作的发展都增加了对石灰的需要。据估计,美国每年需要的石灰石量超过 8800 万吨,而现在施用的却只有 2400 万吨。石灰石的作用既有直接的,也有间接的,如果要使施肥能得到最大的效益,那么在酸性土壤上就非施用石灰不可。

美国一些主要作物产量的逐步提高(见表)是由于改良品种、改进栽培措施、控制病虫害以及施用肥料的结果。但是,因为从土壤中取走的植物养料比加进去的多,我们许多土壤的实际肥力正在下降。



- 肥料施用
1. 阿根廷 2. 土耳其 3. 印度 4. 巴西 5. 墨西哥 6. 南斯拉夫 7. 菲律宾 8. 加拿大 9. 智利 10. 南非(阿扎尼亚)
 11. 澳大利亚 12. 希腊 13. 西班牙 14. 葡萄牙 15. 斯里兰卡 16. 美国 17. 意大利 18. 埃及 19. 秘鲁 20. 奥地利
 21. 法国 22. 瑞典 23. 朝鲜民主主义共和国 24. 以色列 25. 丹麦 26. 英国 27. 德意志联邦共和国 28. 日本 29. 新西兰 30. 荷兰

图 0-1 1952—1954 年和 1970—1972 年三十个国家肥料施用和单位耕地面积作物生产的价值指数之间的平均关系(联合国粮农组织, 罗马, 1973 年)

年 份	玉米(蒲式耳)	小麦(蒲式耳)	大豆(蒲式耳)	棉花(磅,皮棉)	苜蓿(吨)
1950	37.6	14.3	21.7	269	2.1
1964	62.1	26.2	22.8	524	2.4
1972	96.9	32.7	28.0	495	2.9

世界上 40 亿的人口估计有三分之二人口粮食是不充裕的。这种情况,加上到 2000 年世界人口预计将达 70—80 亿,这就向世界粮食和纤维作物的生产者提出了一个严重的挑战。

第一章 土壤肥力的过去和现在

在人类发展的进程中，开始栽种植物的时候就标志着农业的开端。其确切的时间我们并不知道，但它肯定是在公元前几千年。在那以前，人类几乎只以狩猎寻找食物，习惯于游牧生活。

上古的记载

随着年代的推移，游牧者渐少，定居的人渐多，出现了家庭、氏族和村庄，随之而来的我们称作农业的技能也就发展起来了。一般都认为位于底格里斯河和幼发拉底河之间（现在是伊拉克）的美索不达米亚是世界上一个早期非常文明的地区。公元前 2500 年的著作就提到了土地的肥力。它记载着大麦的产量是 86 倍，在某些地区甚至是 300 倍，当然，这是指收获量是播种量的 86 倍到 300 倍。

大约 2000 年以后，希腊历史学家 Herodotus 报告他旅行经过美索不达米亚的见闻，提到了当地居民得到的惊人产量。高产可能是由于完善的灌溉系统和土壤肥力高的缘故，而土壤的肥力高，部分应归因于每年河流的泛滥。在公元前 300 年左右，Theophrastus 在其著作中谈到底格里斯河冲积物的肥沃性，他说如果让泛滥的河水留在地上尽可能久些，这样就可使大量的淤泥沉积下来。

人们终于认识到某些土壤在连续种植时就得不到好的收成。把动植物肥料加到土中来恢复土壤肥力的措施，可能是根据这些经验才发展起来的。但是施肥是如何开始的或什么时候开始的，现在并不清楚。不过，希腊神话为我们提供了一个生动的说明：传说伊利斯有个国王叫 Augeas，他因拥有 3000 头牡牛的牛厩而著名。这个牛厩已经三十年没有清扫了。国王 Augeas 与 Hercules 订立了一个清扫牛厩的契约，并同意给他百分之十的牛群作为报酬。据说 Hercules 是这样完成任务的：他使阿尔费斯河水通过牛厩，从而把牛厩的积垢冲走并在邻近的土地上沉积下来，但是，Augeas 国王拒绝付给 Hercules 报酬，于是爆发了一场战争，后来 Augeas 国王被 Hercules 处死。在一首古希腊史诗《奥德赛》（The Odyssey）中提到了 Odysseus 的父亲给葡萄园施肥。这首诗是盲诗人荷马（Homer）写的，据认为他大约生活在公元前 900—700 年。在诗中还提到了一个肥料堆，这个肥料堆也许可以认为是不断地收集和贮存起来的。诗中描述了 Odysseus 离家二十年后回来时，他的忠实猎犬 Argos 就躺在一个肥料堆上。当 Argos 认出了他的主人，无力地摆动着它的尾巴，然后就“沉没到死亡的黑暗中去了。”这些著作使人感到，早在公元前九世纪，施肥就是希腊的一项农业措施。

Xenophon 生活在公元前 434—355 年之间，他注意到了“田园已经毁坏”，因为“有些人并不知道给土地施肥是有益的。”他又写道“……再没有像肥料那样好的东西了。”

Theophrastus（公元前 372—287 年）建议在瘠薄的土壤上大量施肥，但认为在肥沃的土

壤上不可滥用肥料。他还赞成一种至今还认为是很好的措施，即在畜舍中使用褥草。他指出，这将保全粪尿，而且还会增加肥料的腐殖质价值。令人感兴趣的是，Theophrastus 认为，需要养分多的植物，对水分的需要也多。

雅典城郊区的菜园和橄榄园曾因使用城市污水而肥沃起来。当时在那里使用了一种沟渠系统，并且还有调节水流装置的遗迹。据信污水是卖给农民的。古代的农民也用厩液加水给他们的葡萄园和橄榄树施肥。

肥料是按它们的肥效或者浓度来分级的。例如 Theophrastus 把肥料按效果递减的次序排列如下：人粪尿，猪粪，山羊粪，绵羊粪，母牛粪，公牛粪和马粪。以后，罗马农业的一个早期作者——Varro 也排列了一个类似的顺序表，但是他把鸟禽粪排在人粪尿之前。Columella 推荐用苜蓿属的植物喂牛，因为他觉得这种饲料能使牛粪更肥。

古人不仅认识到肥料的优越性，而且也注意到动物尸体有促进作物生长的作用。公元前 700 年前后，Archilochus 曾对此作过观察，而《旧约全书》(Old Testament) 对此的记载甚至更早一些。在旧约《申命记》(Deuteronomy) 中指明动物的血液应该浇灌到土地上去。多年来，人们已经认识到加有动物尸体的土地其肥力是提高了。波斯天文学家-诗人 Omar Khayyam 对此的描述可能是最富有诗意的了。他大约在十一世纪末期写道：

有时我以为玫瑰不会那样的红，
如果它不是生长在凯撒流过血的土地上；
那装饰着花园的每朵紫蓝色的风信子，
也都曾舐尝过那一度是美丽的头颅。

河流的两岸被令人喜爱的嫩绿色的草装上了羽毛，
那儿就是我躺着的地方，
啊，轻轻地躺着吧！

谁曾知道这青草会是从可爱的嘴唇里暗暗地吐出来的。

绿肥作物，特别是豆科作物绿肥的价值很快也被人们认识了。Theophrastus 注意到塞萨利 (Thessaly) 和马其顿 (Macedonia) 的农民将一种豆科作物 (*Vicia faba*) 耕翻入土。他发现这种作物即使播得很密，而且生产出大量的种子，但它仍能使土壤肥沃。

公元前约 400 年前后，Xenophon 推荐春耕，因为“在那时候土地比较酥松”，而且“在春季草已长得很高，足以当肥料用了，但种子还没有脱落，因此不会再长草了。”他还指出：“每一种植物和每一种土壤在静水中都能变成肥料。”

Cato (公元前 234—149 年) 建议在贫瘠的葡萄园地上间作“acinum”。虽然不知道这是一种什么作物，但从不能让它结籽，可知是意味着要把它翻压下去。他还说肥沃土壤的最好的豆科作物是大田豆类、羽扇豆和苕子。

羽扇豆在古代是很普遍的。Columella 列举了许多豆科作物，其中包括羽扇豆、苕子、小扁豆、鹰嘴豆、三叶草和紫花苜蓿，它们对改良土壤都有很好的效果。但是许多早期的作者都一致认为羽扇豆是最好的通用绿肥作物，因为它在各种土壤条件下都生长良好，可供人和动物食用，容易立苗，以及生长迅速。

Virgil (公元前 70—19 年) 提倡使用豆科作物，就像在下面一段文章中所指出的那样：

“在换季的时候，在你曾经收获带有沙沙作响豆荚的豆类作物或是野豌豆的长蔓和苦味羽扇豆的脆嫩茎秆形成的豆科小丛簇的地方，你就可以在那里播种金黄的小麦。”

古人并不是完全不知道使用现在称之为矿质肥料或土壤改良剂之类的东西。Theophrastus 提议把各种土壤掺混作为一种“弥补土壤的缺点和把精华加入土中”的方法。这种做法从几方面来看都是有益的。把肥土加到瘦土中去能增加肥力，把一种土壤与另一种土壤混合的做法在某些田块上可为豆科作物种子提供更好的接种条件。再者，粗质地的土壤与细质地的土壤混合或细质地的土壤与粗质地的土壤混合，都可以改善这些土壤中的水气关系。

古人还认识到泥灰的价值。希腊的埃吉纳岛的早期居民采掘泥灰并把它施在自己的地里。罗马人从希腊人和高鲁人那里学到了这个办法，并进而把各种石灰材料分类，一类推荐用于谷类作物，而另一类则推荐用于草地，Pliny(62—113年)说：石灰应该薄薄地撒在地上，这样处理一次“虽然用不到50年，但也足以维持许多年了。”Columella也建议把泥灰岩撒在砾质土壤上，以及把砾石与粘重的石灰性土壤掺和在一起。

圣经上记载了犹太人燃烧荆棘和灌木丛所得木灰的价值，Xenophon和Virgil都报道过为了清理田地和消灭杂草要烧掉作物残茬。Cato劝告葡萄树管理人把修剪下来的枝条就地烧成灰后翻入地里以肥沃土壤。Pliny谈及对橄榄树林施用石灰窑烧出的石灰是非常好的，他还讲到有些农民把农家肥料烧成灰施在他们的地里。Columella也建议在低洼地土壤上用撒施草木灰或石灰的办法中和酸度。

Theophrastus和Pliny都提到了硝石或者硝酸钾可以做肥料。在圣经《路加福音》中也提到了它。Theophrastus还提到了盐水，早期的农民显然认识到棕榈树需要大量的盐分，所以把盐水浇灌在棕榈树根的周围。

关于预测土壤对作物生产的适宜性的方法，即使是今天，土壤科学家也正在研究探索，而早期的农业哲学家和作家就已注意到这方面的问题了。例如，Virgil相信，“在深层土壤是黑油油的、疏松而团聚化的土壤，对玉米来说一般是最好的。”

Virgil描述了现今称作容重的土壤特性，他建议对该性质的测定是：

“……首先，用你的眼睛看准一块地方，然后在坚实的地上挖掘出一个坑，再把挖出的松土全部放回坑中，用脚把顶部的砂弄平。如果挖出的土填不满这个坑，该土壤就是疏松的，较适于放牧和种植葡萄。而如果挖出的土不能都回到这个坑中，在填满土坑以后还有多余的土，那么该土壤就是紧实的，是难耕的粘泥块和僵硬的田地，在第一次犁地时要用强壮的大公牛。”

对Virgil提出的这种测试方法的价值，Pliny显然持有不同的观点。他说，把土壤放回原来挖出的那个洞里去，是从不会填满这个洞的，因此用这个方法不可能形成任何关于土壤密度或松度的评价。

后来，Columella在写出一些为了测定土壤物理性质适于农业利用的程度的土壤测定方法时，记下了一个不同于Virgil的测定方法。他建议挖一条壕沟，把取出来的土再放回沟里去。如果沟洞没有完全填满，该土壤就是贫瘠的，但如果还有一些土留在外面，那么这土壤就是肥沃的。

Virgil描述了另一种方法，它可能就是今天称为土壤化学测试的雏型。他写道：

“那些含有盐分而味苦，同时也决不会繁生谷物的土壤，就可以为这种影响提供证明。随意取几蒲式耳紧紧交织在屋顶上烟熏过的细树枝和一个压机用的过滤器，把这些霉菌物与泉水中取出的淡水一同满满地压入过滤器中，注意一定要让水通过树枝滴出。这样，仅仅从水味中就能清楚地有所发现。由于觉到水味苦而得到的惊人发现，会使尝了水的苦味而皱起的眉头舒展开来。”

Columella 还提议用品尝法来测定土壤的酸度和盐渍度,而 Pliny 则认为根据地上的黑斑和草类就可以知道土壤的苦味。

Pliny 写道“土壤好坏的证据之一是比较玉米茎秆的密度,” Columella 则简单地说,土地对某一作物适宜程度的最好检验方法是看该作物能否在这块土地上生长起来。

许多早期的作者相信,土壤的颜色是衡量土壤肥力的一个指标(今天还有许多人这样认为)。一般认为黑色的土壤是肥沃的,而浅色的或灰色的土壤是不肥沃的。Columella 不同意这种观点,他指出黑色沼泽土并不肥沃,而利比亚的浅色土壤却是十分肥沃的。他觉得像结构、质地和酸度这样一些因子用于估价土壤肥力要比上述方法好得多。

许多有关土壤肥力的早期著作内容大都是描述耕作措施的,虽然那里似乎没有什么关于农业问题的试验方法,但许多手稿反映出对现在知道的一些影响植物生长的因子都有相当深刻的理解。在这些早期著作中描述的某些措施直到今天还像当初那样有效。但更多的措施是不行了,然而要知道,这些措施是在人类开始明智地解决面临的农业问题之前几百年的事。

大致从公元前 800—200 年的希腊时代确实是一个黄金时代。这个时代的许多人所表现出来的天才是几个世纪以来无可比拟的,至少是不可能表现出来的。他们的著作、文化和农业都被罗马人仿效,这期间,希腊的许多哲学支配了人们的思想达二千多年。

公元十八世纪初叶对土壤肥力的认识

在罗马衰亡之后,直至 Pietro de Crescenzi (1230—1307) 收集当地的一些农业实践写成的《Opus ruralium commodorum》一书出版以前,在农业上几乎没有什么重大发展。De Crescenzi 被某些人认为是现代农业的奠基人,但是他的手稿看来并未超出荷马(Homer)时代一些作者的著作。他的贡献主要是将材料作了总结。不过,他也确实建议要增加肥料用量,要超过当时一般的施肥量。

De Crescenzi 的著作发表以后,有好多年几乎没有增添多少农业知识,虽然在 1563 年 Palissy 作出了贡献,他观察到植物的灰分含量代表了植物从土壤中带走的物质。

十七世纪初叶前后, Francis Bacon (1561—1624) 认为植物的主要养料是水。他相信土壤的主要用途是保持植株直立并保护它们免遭冷热的危害,他还相信每一种植物为了自身特殊的营养需要从土壤中吸收独特的物质。并进一步坚持认为,在一块地上连续生产同一类型的作物将会使它所需要的那种特殊养料枯竭。

同一时期,一个佛兰芒的医生和药剂师 Jan Baptiste van Helmont (1577—1644) 报告了一个试验结果,在这个试验中,他自信证实了水是植物的唯一养料。他把 200 磅土壤放进一个陶制的容器中,将土壤湿润,然后种上一段重 5 磅的柳树苗。他小心保护瓦罐中的土壤不被尘土弄脏,只加入雨水或蒸馏水。经过 5 年以后, van Helmont 终止了这个试验。这时柳树的重量已达 169 磅 3 盎斯左右。原先用的 200 磅土壤少掉约 2 盎斯。因为在此试验中他只加了水,而把损失的 2 盎斯土壤归于试验误差,所以他的结论是:水是植物的唯一养料。

当然,现在已经知道二氧化碳(CO₂)和土壤中的矿物质都是植物营养所需要的。但是应该记住, van Helmont 的试验工作是在人们对矿质营养或光合作用毫无了解时进行

的。他的工作和他的错误结论实际上是对我们知识的一个宝贵贡献，因为虽然结论是错误的，但却促进了以后的研究，而此后的研究结果导致了对植物营养的更好了解。

几年以后英格兰的 Robert Boyle(1627—1691)用同样的方法重复了 van Helmont 的工作。Boyle 是以表达气体体积和压力之间的关系而闻名于世的。他也对生物学发生兴趣，并且是一个用实验手段解决科学问题的伟大信仰者。他相信，观察是通向真理的唯一道路。Boyle 除证实了 van Helmont 的发现外，还向前进了一步。由于他对植株样品进行了化学分析，他指出了植物含有盐类、醇类、尘土和油，所有这些都是由水形成的。

大约在同一时期，德国化学家 J. R. Glauber (1604—1668) 认为：植物生长的要素是硝酸钾 (KNO_3) 而不是水。他从牛栏下面的土壤中收集到了硝酸钾，并争辩说它必定来自这些牛的粪便。他进一步又说，因为牛吃了饲料，所以硝酸钾最初必定来自植物。当他把硝酸钾施用于植物并观察到它大大促进了植物生长时，他确信，土壤肥力的肥料的价值完全在于含有硝酸钾。

英国化学家 John Mayow(1643—1679) 支持了 Glauber 的观点。Mayow 测定了一年中各个时期土壤所含硝酸钾的数量，发现在春天时它的浓度最大，而在夏天时则未能找到。于是他断定，在植物迅速生长时期，硝酸钾已被吸收了。

在当时，实验技术还是十分粗放的。甚至在 Mayow, Glauber, Boyle 和 Bacon 做出贡献的工作中，拿现代标准来看，也几乎没有什么能真正称为是好的研究工作。但是大约在 1700 年，一个名叫 John Woodward 的英国人，进行了一项突出的研究，这项研究代表了在农业科学的发展中一个相当大的进展。Woodward 熟悉 Boyle 和 van Helmont 的工作。他收集了雨水、河水、污水以及加上菜园土的污水等各种来源的水，在这些水样中种上了留兰香。他仔细地测定了由植株蒸发的水量，并记下了植株在试验开始和终了时的重量。他发现留兰香的生长与水中杂质的数量成比例，从而断定植物生长的要素是泥土而不是水。虽然他的结论就整体而言是不正确的，但毕竟代表了知识上的一个进步，而且他的试验技术也比以前任何一个试验都要好得多。

在这期间，关于植物营养问题，存在着许多可以想像的愚昧无知。许多古怪的想法产生后，“过一、二个钟头便消失了。”另一个有事业心的英国人 Jethro Tull (1674—1741) 的这些古怪想法不算很少。Tull 在牛津大学受过教育，这对于一个爱好农业的人来说，一般认为有点不平常。他看来曾对政治发生过兴趣，但健康状况不佳迫使他退休到农村。在那里他做了许多试验，其中大部分是关于栽培措施的。他相信为了供应植物生长所需要的“合适的养料”，土壤应该粉碎得很细。根据 Tull 的说法，土壤颗粒实际上是通过植物根系的孔被吞进去了。他认为那是生长着的根系不断膨大所引起的压力迫使这些粉碎得很细的土壤进入“根系的乳糜管口”，以后再进入植物的“循环体系”。

Tull 关于植物营养的概念，至少可以说是有点古怪，但是，他的试验使两种重要农具得到发展，这就是条播机和畜力中耕机。他的一本已发行的书《畜力锄地耕作》(Horse Hoing Husbandry) 很长时间都被看作是英国农业界的一篇权威性著作。

1762 年前后，Tull 的追随者 John Wynn Baker 在英格兰建立了一个试验农场，目的是公开示范一些农业试验结果。Baker 的工作后来受到 Arthur Young 的称赞，但是 Young 劝告读者，对于只以几年工作结果为基础的推论谨防给予太多的信任，这个忠告到今天还像当初那样是合适的。

Arthur Young(1741—1820)是十八世纪比较著名的英国农学家之一。他为了寻找那些能增加作物产量的物质,进行了一些盆栽试验。他在加有木炭、鲸油、家禽粪便、果酒精、硝石、火药、沥青、牡蛎介壳以及许多其他物质的砂中种植大麦。这些物质中有一些能使作物生长,而另一些则不能。Young是一个多产作家,出版了一部《农业年刊》(Annals of Agriculture)共四十六卷。这部著作受到了高度的重视并对英国农业产生过相当大的影响。

十七世纪和十八世纪的许多农业著作都反映了植物是由一种物质组成的概念,这个时期的大部分工作者一直在寻找这种所谓“植物要素”。而到1775年前后,Francis Home才声称组成植物的不是只有一种要素,而是可能有许多种要素,其中包括了空气、水、土壤、盐类、油以及呈固定状态的火。Home感到农业的问题实质上是植物营养的问题。他为了测定各种不同物质对植物生长的影响,进行了盆栽试验并且做了植株的化学分析。他的工作被认为在科学农业的进程中是一个有意义的阶梯。

植物含有固定状态的火或称之为燃素的概念在人们脑海中徘徊了许多年。还有认为植物可直接吸收有机质或腐殖质并构成植物主要养料的信念也延续了多年。要消除这些概念是困难的,因为化学分析的结果已经表明,植物和腐殖质所含的元素本质上是相同的。而且光合作用的过程也还没有被发现。1775年左右;Joseph Priestley对薄荷嫩枝能“净化”空气的观察,启发他想到植物对空气的影响是与呼吸作用相反的。在进行这个观察的时候,氧还未被发现。后来,当他发现了这种气体时,他想弄清它与植物的关系,但失败了。

对有助于揭开植物生活奥秘的许多其他发现来说,Priestly对氧的发现是关键。Jan Ingenhousz(1730—1799)指出植物对空气的净化作用发生在有光线的地方,而在暗处,空气就没有被净化。与这个发现结合在一块的是瑞士自然哲学家和历史学家Jean Senebier(1742—1809)的报告,他认为van Helmont试验的柳树的重量增加是由空气引起的。

十九世纪时期的进展

以上这些发现启发了Theodore de Saussure的思考(他父亲熟悉Senebier的工作)。他着手研究的是Senebier已经研究过的问题,即空气对植物的影响以及植物中盐分的来源。结果,de Saussure能够证实植物吸收氧和释放二氧化碳这个呼吸作用的中心论题。此外,他发现在有光线的地方,植物才会吸收二氧化碳,同时放出氧气。而如果把植物保存在没有二氧化碳的环境中,它们就会死亡。

De Saussure断定土壤仅仅只供应植物需要的一小部分养分,但是他证明了土壤能供应灰分和氮素。他还有力地消除了植物能自发地产生钾碱的概念,并进一步说明植物根系的行为并不像一个单纯的过滤器,更恰当地说,根系的膜是能够选择性渗透的膜,它能让水比盐更快进入根系。他也指出,植物对各种盐分的吸收是不同的,植物的组成成分也是互不一样的,它们都随土壤性质和植物生长发育阶段的不同而变化。

De Saussure的关于植物所含的碳是来自空气的结论并没有立刻被他的同事们所接受。大约在1813年Humphrey Davy爵士出版发行了《农业化学原理》一书,他以同样多的数据说明,虽然某些植物可能从空气中得到碳,但大部分碳还是通过根系吸收的。Davy如

此热衷于这种信念,以致于建议用油作为肥料,因为油含有碳和氢。

在十九世纪中期到二十世纪初期,人们在了解植物营养和作物施肥方面取得了很大的进展。一个游历很广的法国化学家 Jean Baptiste Boussingault (1802—1882) 就是这时期有突出贡献的人之一,他曾在阿尔萨斯建立了一个农场并在那里做了一些田间小区试验。Boussingault 采用了 de Saussure 的仔细的试验方法,对加到小区中的肥料和收获的作物都进行称重和分析。他曾得出一个指明各种植物营养元素中有多少来自雨水、土壤或空气的平衡表;分析了不同生长阶段的作物的组成成分,并决定了最好的轮作是那些除了加入的有机肥料外,能生产最大量有机质的轮作。Boussingault 被某些人称为田间小区试验方法之父。

这时期虽然有几个农业科学工作者认识到 de Saussure 观测结果的价值,但古老的腐殖质理论仍有很多信徒。腐殖质理论是一种难以消除的自然理论。那时有许多人必定已经感觉到,就像今天有些人认为的那样,动植物体腐烂得到的产物是植物生长最适宜的养料。德国化学家李比希 [Justus Von Liebig(1803—1873)]非常成功地摒弃了腐殖质神话。他在一个著名的科学会议上发表的论文极大地地震动了当时守旧的思想家,以致于从那时起,只有少数几个科学家还敢于认为植物所含的碳不是来自二氧化碳而是来自其他来源。李比希提出了如下论点:

1. 植物体中的大部分碳来自大气中的二氧化碳。
2. 氢和氧来自水。
3. 植物需要碱金属用来中和它新陈代谢活动所形成的酸。
4. 磷酸盐是种子形成所必需的。

5. 植物无差别地从土壤中吸收每一样物质,而把那些不必要的物质从它们的根系分泌出来。

当然,李比希的概念并不全都是正确的。例如,他认为根系分泌醋酸。他还相信氨态氮是植物吸收的唯一的氮素形态,植物可以从土壤、有机肥料或空气中得到这种化合物。

李比希坚信,如果分析植物并研究它所含的元素,就能在这些分析的基础上建立一套施肥措施。他还认为植物的生长与肥料中有效的矿物质数量是成比例的。他终于发现了最小因子律,所谓最小因子律,实际上是说当其他的营养元素以充足的数量存在时,植物的生长受到以最小量存在的植物营养元素的限制。此后很长一段时间,这个概念统治了农业工作者的思想。

李比希根据他的植物营养概念,制造了一种肥料。这种肥料的配方是完全正确的,但是他把磷酸盐和钾盐与石灰一起熔融,因而造成了一个错误。结果使这种肥料完全失败了。虽然如此,李比希对农业发展所作的贡献仍然是不朽的,把他看作是农业化学之父也是十分恰当的。

随着李比希的著名论文接踵而来的是 1843 年英国洛桑农业试验站的建立。这个研究机构的创立者是 J. B. Lawes 和 J. H. Gilbert。这里的工作是沿用法国 Boussingault 早期用过的方法进行的。

Lawes 和 Gilbert 并不相信 Liebig 建立的原理全都是正确的。在洛桑试验站建立十二年后,他们澄清了以下几点:

1. 作物需要磷和钾,但植物灰分的组成不是植物所需这些成分的数量度量。
2. 非豆科植物需要供应氮素。如果没有氮素的供应,那么不管提供多少磷和钾,作物

还是不能生长。由空气提供的氨态氮的数量是不能满足作物的需要的。

3. 依靠化学肥料,可使土壤肥力保持若干年。

4. 休闲的有益作用在于增加土壤含氮化合物的有效性。

很长一段时间,在某些地区甚至到今天,农民不大相信单施化学肥料能保持土壤肥力。然而,洛桑试验站的早期工作确实证明了这是能够做到的。有时尽管施用了商品肥料,土壤还是变得贫瘠,那不是矿质肥料本身引起的,而大都是因为施肥量不够和土壤管理不恰当的缘故。洛桑试验站的工作一直继续了许多年,今天,这个试验站已被看作是世界农业研究的领导中心之一。

1852年在英国有了一个相当重要的发现。Thomas Way注意到约克郡农民把土加到肥料中能减少肥料中氮的损失,第一次证明了这个称做阳离子交换的现象。但即使是伟大的李比希也没能立刻认识到这个发现的重大意义。

Georges Ville(一个出生于万森的法国人)认识到了洛桑试验站的一些早期试验结果的价值。他认为施用化学肥料是维持土壤肥力的唯一方法。他根据田间试验结果制定作物施肥方案,并且起草了一个简单的小区试验计划,使农民能够自己用它来决定他们的作物上需要施用什么肥料。

土壤和植物氮素的问题仍然没有解决。有几个工作者已经观察到豆科作物的不寻常表现。在某些情况下它们不加氮素也生长得很好,但在另一些情况下却不能生长。另一方面,非豆科作物在氮素不足的土壤中则总是长不起来。

1878年,两个法国细菌学家,Theodore Schloessing和Alfred Müntz对这些现象进行了某些阐明。这两个科学家让污水通过一个用砂和石灰石制成的滤器,使它得到净化。他们定期分析滤液,在28天之内只测出了氨态氮。到28天末了,滤液中便开始出现硝态氮。Schloessing和Müntz发现,加入氯仿能够停止硝酸盐的产生,而加入一点点新鲜的污水则又能使硝酸盐的产生开始。他们断定,硝化作用是细菌活动的结果。

这些试验结果被英国的Robert Warrington应用于土壤。他表明二硫化碳和氯仿能阻止硝化作用的进行,而再加入少量的未经消毒的土壤,可使硝化作用又开始进行。他也证实了硝化作用是分两步进行的,氮首先转化成亚硝酸盐,随后亚硝酸盐又转化成硝酸盐。

Warrington没有能够分离出担负硝化作用的微生物。这个任务留给了S. Winogradsky,他用硅凝胶平板而不是用通常的琼脂培养基完成了分离,因为这些微生物是自养细菌,它们的碳取自大气的二氧化碳。

由于豆科植物对氮素反常的表现,在1886年两个德国人Hellriegel和Wilfarth断定细菌一定存在于豆科植物根的根瘤中。而且他们相信这些微生物能同化来自大气中的氮气,并把它转化成能被高等植物利用的形态。这是关于豆科植物固氮作用的首次专门报导。Hellriegel和Wilfarth把他们的论证建立在他们所做的某些试验的观察的基础上。然而他们没有能分离出相应的微生物。后来,M. W. Beijerinck分离成功了,他把这种微生物称作根瘤菌(*Bacillus radicola*)。

土壤肥力研究在美国的发展

虽然十八世纪农业上取得的大多数成就是在欧洲大陆上完成的,但是提一下美国早