



全国高等农业院校教材



肥 料 学

● 毛知耘 主编

● 农学类专业用

中国农业出版社

全国高等农业院校教材

肥 料 学

毛知耘 主编

农学类各专业用

中 国 农 业 出 版 社

全国高等农业院校教材

肥料学

毛知耘 主编

责任编辑 黄慧民

出版 中国农业出版社
(北京市朝阳区农展馆北路2号)

发行 新华书店北京发行所

印刷 北京通县京华印刷制版厂

* * *

开本 787mm×1092mm16开本

印张 23.5 字数 541千字

版、印次 1997年10月第1版
1997年10月北京第1次印刷

印数 1—2,000册 定价 22.20元

书号 ISBN 7-109-04661-3/S·2892

前 言

《肥料学》是农业部教育宣传司计划编写的教材。90年代初,经部教学指导委员会土化植保学科组讨论,确定了编写大纲。1993年编成初稿,1994年完成定稿,1995年上半年送教学指导委员会审定。

《肥料学》是高等农业院校农学类各专业的通用教材。再早称为《农业化学》,80年代中期改称《植物营养与肥料》,有的专业如植保、农经等改为《土壤肥料学》。为了区别于古老的肥料学,为了适应农学类各专业的通用性,在专业覆盖面上采取以农学为主、兼顾其它的原则;在取材上本着承前启后、新颖翔实的原则。书中一般选用80年代及90年代初的资料,并尽量说明今后发展的趋势。总之,我们是按植物营养元素的农业化学的构思来编写这本新型肥料学的。除了农学类各专业外,本书也可以作为成人教育和自学考试大专班的参考教材,还可以作为广大土壤肥料科技人员的参考书。

本书内容分为3个部分:第一篇是肥料学的理论基础和肥料资源,包括植物营养的基本原理、土壤养分的生物有效性、肥料资源与利用等方面内容。第二篇是化学肥料与无机肥料,主要论述氮、磷、钾、钠、钙、镁、硫、硅、铁、锌、锰、铜、硼、钼、氯、硒等元素的植物营养特点,土壤含量与可给性,肥料的品种、性质、施用技术与肥效等内容。考虑到我国含氯化肥生产的施用量大,将含氯化肥单列一章,较为详细介绍植物氯素营养和含氯化肥科学施用的新成果。第三篇是有机肥料,包括绿肥、秸秆肥、粪尿肥、厩肥、杂肥等,主要论述有机肥料在培肥土壤、养分循环、营养平衡中的重要作用,有机肥利用途径和方法,以及有机肥与化肥配合施用的连应效果等内容。总之,本书力求为作物优质、高产、高效在植物营养和肥料方面提供理论基础、物质基础和实用技术。

本书的编写分工:毛知耘写绪论和二、五、七章;黄建国写一、四、六章;周则芳写三、八、十章;石孝均写四、五、六章;刘洪斌写八、九章;魏世强写八、九章;袁玲写十一至十五章。

书中大部分图幅蒙西南农业大学唐俊臣同志清绘。全书完稿之后蒙中国农业大学毛达如教授、杨志福教授在百忙中抽时予以审定。编者对他们关心、支持本书的出版致以衷心的感谢。

尽管编者力求本书内容全面、新颖,力求文字深入浅出、表达清晰;然而,限于编者思想和业务水平,偏颇和不妥之处在所难免,切望读者予以批评指正,以便今后修订。

毛知耘

于重庆市北碚西南农业大学

1995年3月

目 录

前言

绪论	1
第一节 肥料在农业发展中的重要作用	1
第二节 植物营养与肥料学的发展概述	3
一、国外植物营养与肥料学发展概况	3
二、我国植物营养与肥料学发展概况	8
第三节 肥料学的内容及其研究方法	13
一、肥料学的内容	13
二、肥料学试验研究方法	14

第一篇 肥料学的理论基础

第一章 植物营养与肥料	15
第一节 植物营养元素	16
一、植物必需的营养元素	16
二、植物的有益元素	18
三、植物的有害元素	19
第二节 植物对养分的吸收	21
一、根系的基本结构与养分吸收	21
二、根系吸收养分的途径及机理	24
三、植物的叶部营养	28
第三节 影响作物吸收养分的因素	30
一、影响作物吸收养分的内在因素	31
二、影响作物养分吸收的外在因素	34
第四节 矿质营养与作物产量品质	36
一、矿质营养与作物产量	36
二、矿物质营养与农产品品质	38
第五节 植物营养特性与施肥原则	41
一、植物营养的一般性与特殊性	41
二、植物营养的阶段性和连续性	42
三、合理施肥的原则	43
第二章 土壤与肥料	44
第一节 植物的根际营养	45
一、植物根系的形成、分布与代谢	45
二、影响根系生长及代谢的土壤条件	46
三、根际在作物营养上的意义	48
第二节 土壤是作物养分的基本来源	55

一、我国土壤养分的含量概况	56
二、土壤养分的类型及有效化	59
三、影响养分有效化的因素	62
第三节 土壤—植物系统中的养分平衡与施肥	65
第三章 肥料资源与利用	66
第一节 有机肥料资源	67
一、有机肥料资源数量与利用价值	67
二、我国有机肥源的发展前景和途径	68
第二节 化学肥料资源	69
一、我国化肥生产应用概况	69
二、我国氮肥资源及利用概况	72
三、我国磷肥资源及利用概况	72
四、我国钾肥资源与利用概况	78
第三节 微量元素及中量元素肥料资源	80
一、含微量元素的矿藏资源	81
二、含微量元素的矿渣资源	81
三、含中量元素的肥料资源	83

第二篇 化学肥料与无机肥料

第四章 氮肥	86
第一节 植物氮素营养	86
一、植物体内氮的含量与分布	86
二、氮的营养功能	87
三、植物对氮的吸收和同化	88
四、作物氮素丰缺与产量品质	91
第二节 土壤中氮的含量与转化	94
一、土壤中氮素的含量与来源	94
二、土壤中氮的形态和转化	95
三、土壤供氮能力	102
第三节 我国氮肥生产	103
一、氮肥制造原理	103
二、我国氮肥品种及产销概况	105
第四节 氮肥的种类、性质和施用技术	106
一、液体氮肥	106
二、固体氮肥	109
三、有机氮肥	116
四、缓效氮肥	119
第五节 氮肥利用率和提高肥效的途径	123
一、氮肥利用率及其损失途径	123
二、提高氮肥肥效的途径	125
第五章 磷肥	127
第一节 植物的磷素营养	127

一、植物磷素含量和分布	127
二、磷的营养功能	128
三、作物对磷的吸收与同化	130
四、作物磷素丰缺与产量品质	132
第二节 土壤中磷素含量和转化	136
一、土壤磷的来源和含量	136
二、土壤磷的形态和转化	137
三、土壤磷的生物有效性	141
第三节 我国磷肥品种与产销概况	143
一、磷肥的种类和品种	143
二、我国磷肥的生产与销售概况	143
第四节 主要磷肥的性质和施用技术	145
一、水溶性磷肥	145
二、枸溶性磷肥	149
三、难溶性磷肥	153
四、新型磷肥	154
第五节 提高磷肥肥效的途径	155
一、磷肥利用率现状分析	155
二、提高磷肥肥效的途径	156
第六章 钾肥	157
第一节 作物的钾素营养	157
一、作物钾的含量和分布	157
二、钾的营养功能	158
三、作物对钾的吸收和利用	162
四、作物钾素丰缺与产量品质	163
第二节 土壤钾的含量和转化	167
一、土壤钾的来源和含量	167
二、土壤钾的形态和转化	168
三、土壤钾的生物有效性	170
第三节 我国钾肥的产供销概况	172
一、我国钾肥的生产与施用概况	172
二、我国农田钾素平衡与调节	173
第四节 主要钾肥的性质和施用	175
一、氯化钾	175
二、硫酸钾	179
三、草木灰	180
四、窑灰钾肥	181
五、钾镁肥	182
第五节 提高钾肥肥效的途径	183
一、防止钾肥流失与固定,提高利用率	183
二、根据土壤性质和供钾水平合理施用钾肥	183
三、根据作物特性合理施用钾肥	183
四、钾与其它肥料配合施用	183

第七章 含氯化肥	184
第一节 植物氯素营养	184
一、植物氯的含量与分布	184
二、植物对氯的吸收与氯的营养功能	185
三、植物氯素丰缺症状与耐氯力类型	186
第二节 土壤中氯的含量与移动	189
一、土壤中氯的含量	189
二、土壤含氯量等级与含氯化肥应用	189
三、土壤中氯的移动及其对土性的影响	189
四、氯对土壤中氮素的硝化抑制作用	190
第三节 含氯化肥的特性与施用	192
一、氯化铵	192
二、氯化钾	196
三、氯化钠	200
第八章 微量元素肥料	201
第一节 铁肥	202
一、作物的铁营养	202
二、土壤中铁含量及其有效性	204
三、铁肥种类、性质与施用技术	205
第二节 锌肥	206
一、作物的锌营养	206
二、土壤中含锌量及其有效性	208
三、锌肥种类、性质及施用技术	210
第三节 锰肥	211
一、作物的锰营养	211
二、土壤中锰含量及其有效性	213
三、锰肥种类、性质与施用技术	214
第四节 铜肥	216
一、作物的铜营养	216
二、土壤中铜含量及其有效性	217
三、铜肥种类、性质与施用技术	218
第五节 硼肥	219
一、作物的硼营养	219
二、土壤中硼含量及其有效性	222
三、硼肥种类、性质与施用技术	224
第六节 钼肥	225
一、作物的钼营养	225
二、土壤中钼含量及其有效性	227
三、钼肥种类、性质和施用技术	229
第七节 硒肥	230
一、作物的硒营养	230
二、土壤中硒含量及其有效性	231
三、硒肥种类、性质与施用技术	232

第九章 钙、镁、硫、硅肥料	233
第一节 作物的钙营养与含钙肥料	233
一、作物的钙营养	233
二、土壤中钙含量及其有效性	235
三、含钙肥料的性质和施用	237
第二节 作物的镁营养与含镁肥料	240
一、作物的镁营养	240
二、土壤中镁含量及其有效性	242
三、含镁肥料的性质和施用	243
第三节 作物的硫营养与含硫肥料	244
一、作物的硫营养	244
二、土壤中硫含量及其有效性	245
三、含硫肥料的性质和施用	247
第四节 作物的硅营养与硅肥料	250
一、作物的硅营养	250
二、土壤中硅含量及其有效性	252
三、含硅肥料的性质和施用	253
第十章 复合及混合肥料	256
第一节 复混肥料及其发展方向	256
一、复合及混合肥料概述	256
二、世界复混肥发展简况	257
三、我国复混肥发展简况	258
第二节 复合肥料主要品种和性质	258
一、磷酸铵系复合肥	258
二、硝酸磷肥系复合肥	262
第三节 混合肥料的剂型、品种和性质	264
一、混配肥料的品质标准	264
二、混合肥料的生产工艺类型	264
三、我国复混肥生产的代表品种与配制	271
第四节 复混肥料的肥效与施用	273
一、复混肥料的肥效	273
二、复混肥料的施用	278

第三篇 有机肥料

第十一章 有机肥料概述	280
第一节 有机肥料的特点和作用	280
一、有机肥料的分类及特点	280
二、有机肥料的作用	282
第二节 有机肥与化肥配合施用的效果	287
一、促进作物增产、化肥增效	287
二、改善作物品质	291
三、培肥地力、用养结合	292

第十二章 粪尿肥和厩肥	294
第一节 粪尿肥	294
一、人粪尿	294
二、家畜粪尿	297
三、禽粪	300
第二节 厩肥	300
一、厩肥的积制、贮存与转化	300
二、厩肥的成分、性质与施用	305
第十三章 秸秆还田与堆沤肥	307
第一节 秸秆还田	307
一、秸秆的成分与性质	307
二、秸秆在土壤中的转化	308
三、秸秆直接还田技术	312
第二节 堆肥与沤肥	313
一、堆肥的原料和性质	313
二、堆肥的方法和施用	314
三、沤肥的积制方法与效果	316
第三节 沼气发酵肥	317
一、沼气发酵的原理和方法	317
二、沼气发酵肥的性质和施用	319
第十四章 绿肥	320
第一节 绿肥在农业生产中的作用	320
一、提高土壤肥力	320
二、减少水土流失,改善生态环境	324
三、绿肥饲料促进农牧结合	325
第二节 栽培绿肥与野生绿肥	326
一、我国绿肥的种类与分布	326
二、豆科绿肥的栽培与利用	326
三、非豆科绿肥的栽培与利用	333
四、水生绿肥养殖与利用	334
五、野生绿肥的利用	337
第三节 绿肥的利用与发展趋向	339
一、绿肥的利用	339
二、绿肥的发展趋向	344
第十五章 杂肥	345
第一节 城市垃圾肥	345
一、城市垃圾的基本特征	346
二、城市垃圾的农业利用	346
三、城市垃圾农用的环境污染问题	349
第二节 污水与污泥的农业利用	350
一、污水的农业利用	350
二、污泥的农业利用	354

第三节 饼粕类肥料	356
一、饼粕成分和性质	356
二、饼粕的施用	356
第四节 泥炭与腐殖酸类肥料	357
一、泥炭	357
二、腐殖酸类肥料	358
参考文献	363

绪 论

肥料是植物的粮食，这生动地说明了肥料学是以植物营养为中心，以土壤肥力为基础，以优化配方施肥为手段，促进农业优质、高产、高效的一门科学。这就是说肥料学是一部植物营养元素的农业化学，是农业生产必不可少的一门基础学科，是农学类各专业的一本基础教材。本书正是从植物营养元素的农业化学观点来论述肥料的种类、性质和施用。

第一节 肥料在农业发展中的重要作用

农业是国民经济的基础产业，是当今世界利用绿色植物的光合作用生产人类所需食物与有机原料的唯一基础产业。绿色植物生产称为第一性生产，而动物生产是依靠植物的能量和物质为基础的第二性生产。而农业这一基础产业又依赖于土、肥、水这3个基本因素。没有适宜的土、肥、水，就没有茂盛生长的绿色植物，就没有发达的农业，人类也就得不到量多、质优的食物和天然有机原料。

新中国成立40多年来，农业生产有了很大的发展，主要经验是：一靠政策，二靠科技，三靠投入。肥料是植物的粮食，是农业中的重要物质投入，在农业增产中起着重大的作用。国外一般认为肥料在农业增产中的作用占30%—50%。根据有关部门对我国28个省、市、自治区1978—1984年间统计数据，采用评价技术进步作用的截留剩余法，分别估计化肥、农电、农机和水利的技术进步作用，结果表明我国农业发展中最重要的因素是化肥因素的技术进步作用，占整个农业技术进步作用的52.23%。这里的化肥因素包括化肥数量的增加，化肥质量的提高与优化配方施肥等方面的技术进步。

从表0-1可清楚地看出，40年来我国粮食是随着肥料增加而增加的。前20年，粮食总产翻一番，由1949年的1132亿公斤增加到1970年的2402亿公斤。人均粮食由209公斤增加到286公斤，即增加了1.89倍。耕地亩施养分由2.91公斤增加到8.16公斤。到1970年，我国化肥工业尚未很好发展，在肥料总养分中，有机养分占71.6%，化肥养分仅占28.4%，能够取得这样的增产效果是难能可贵的。1970—1990年的20年，我国引进和自建了一批大、中型氮肥厂，1990年我国施用的肥料总养分达到4146.9万吨，其中有机肥养分占37.4%，化肥养分占62.6%。总养分比1970年增加了2.35倍。耕地亩施养分达到28.90公斤，比1970年增加了2.54倍。1990年粮食总产达到4250亿公斤，比1970年增加了76.9%。1990年人均粮食达到386公斤。

随着人口的增长和人民生活的改善，国家要求到2000年粮食总产达到5000亿公斤以上，以保证人均粮食400公斤的需求。同时要求棉花总产达到1亿担以上。粮食作物加上经济作物对肥料的需求，还须大力增加肥料数量，扩大品种、提高质量、调整结构，以满足粮、经作物发展的需要。

表 0-1 40 年来我国粮食产量与肥料施用量^[5,30]

项目 年份	粮食总产 (亿 kg)	耕地面积 (亿亩)	人均粮食 (kg)	耕地亩产 (kg)	播面亩产 (kg)	肥料总养分 (万 t)	耕地亩施养分 (kg)	播面亩施养分 (kg)
1949	1 132	14.68	209	97.7	58.9	428.5	2.91	2.13
1952	1 639	16.18	288	119.2	91.0	592.8	3.66	2.80
1957	1 950	16.77	306	136.8	97.3	695.3	4.12	2.95
1965	1 945	15.53	272	147.3	106.5	931.1	5.60	4.33
1970	2 402	15.17	286	186.2	131.2	1 237.7	8.16	5.75
1975	2 845	14.95	309	223.9	149.2	1 602.2	10.72	7.14
1980	3 205	14.89	327	268.9	174.5	2 400.2	16.12	10.45
1985	3 789	14.53	365	326.1	219.9	3 156.7	21.73	14.66
1990	4 250	14.35	386	370.9	230.3	4 146.9	28.90	18.64
2000 (预计)	5 200	14.35	400	452.8	292.1	5 337	37.19	23.98

注 表题左上角 [5, 30] 表示表中资料来源于参考文献 5, 30, 下同。

目前我国每日每人食物消耗 2 600—2 700 千卡的能量、消耗蛋白质 60—80 克,而人均每年占有 400 公斤粮食,大体上可以满足这一标准。当然食物质量不高,动物性蛋白不足,仍属于低消费型。然而近年来我国粮食生产仍未达到这一标准。例如 1994 年,我国人口已达 12 亿,粮食总产 4 445 亿公斤,人均粮食仅 370 公斤,这比 1990 年人均粮食 386 公斤减少了 16 公斤。考虑到我国人口增加、耕地减少这一基本国情,在本世纪内达到每年人均粮食 400 公斤以上,仍是一项艰巨的农业生产任务。

据有关资料估算,我国在 2000 年和 2010 年粮食供需的基本态势仍是需求量大于生产量(表 0-2)。因此,只有调整政策,加强科技,增加投入,从多方面采取一系列重要措施,才能促进粮食和农业的稳定增长。以满足 2000 年粮食需求的低方案,即生产量的高方案 52 450 万吨计,需要肥料总养分 5 245 万吨。在肥料总养分中若以 2/3 由化肥提供,1/3 由有机肥提供,则 2000 年需要化肥养分 3 497 万吨,比 1990 年的 2 590 万吨增加 35.0%;需要有机肥养分 1 748 万吨,比 1990 年的 1 557 万吨增加 12.3%。2010 年以满足粮食需求的中、低方案,即粮食生产的高方案 62 725 万吨计,比 2000 年增加 19.6%;相应地肥料总养分至少需要 6 273 万吨,其中需化肥养分 4 182 万吨,有机肥养分 2 091 万吨。以上只是根据粮食需肥养分测算的,加上棉、油等经济作物需肥量,则上述肥料养分至少还需增加 20% 以上,每年肥料总养分至少需增加 1 000 万—1 200 万吨以上,其中化肥养分需增加 700 万—900 万吨,有机肥养分需增加 300 万—500 万吨。

表 0-2 我国粮食及肥料供需预测

年份	方案	粮食 (万 t)		肥料养分 (万 t)		
		需求量	生产量	总养分	化肥养分	有机肥养分
2000	高	56 000	52 450	5 245	3 497	1 748
	中	53 980	50 150	5 015	3 343	1 672
	低	52 000	47 750	4 775	3 183	1 592
2010	高	67 150	62 725	6 273	4 182	2 091
	中	64 590	60 075	6 008	4 005	2 003
	低	61 550	57 625	5 763	3 842	1 921

综上所述,为了保证我国粮食和农业能够持续、稳定、协调发展,我国肥料的生产和施用也必须有相应的发展,今后应当长期坚持以有机肥为基础,有机肥与化肥相结合的综合肥料体系。有机肥料面广、量多、价廉、效好,是改土培肥的物质基础,是农业中物质循环的纽带,今后我国有机肥应本着广辟肥源、综合利用、增加数量、提高质量的原则大力发展。化学肥料浓度高、体积小、效果好,今后我国化肥生产应本着增加数量、提高质量、调整结构、合理布局的原则大力发展。在化肥施用应本着改进技术、调整比例、优化配方、提高效益的原则,向着定量化、模式化、预报化方向发展。总之,搞好肥料的生产、供应、施用、效益,对于我国优质、高产、高效农业的发展具有十分重要的作用;同时,这也是我国国民经济中一项长期的、系统的、艰巨的任务。

第二节 植物营养与肥料学的发展概述

施用肥料作为农业增产措施已有几千年的历史。但是,在科学的植物营养原理指导下的肥料生产与施用,还是在上一世纪后半期逐步发展起来的,至今只有 150 多年的历史。下面简要介绍国内外植物营养与肥料学发展概况。

一、国外植物营养与肥料学发展概况

(一) 现代植物营养与肥料学的建立与轮耕农业的发展 随着生物学、化学、地学的进展,到 19 世纪后半期至本世纪初,在欧洲已基本形成现代植物营养与肥料学的理论基础。

1. 1804 年法国的索秀尔 (De Saussure) 用精确的定量法证明植物体中的碳是同化空气中的二氧化碳,植物中的 C、H、O 来自空气和水。

2. 1834 年法国的布森高 (Boussingault) 通过 5 年轮作试验并进行定量分析后提出豆科植物能增加土壤氮素;而禾谷类作物只取走土壤氮素。以后直到 1888 年德国的赫锐格尔 (H. Hellriegel) 才弄清根瘤菌共生固氮是豆科植物增加土壤氮素的原因。

3. 1840 年德国的李比希 (Liebig) 否定了当时流行的腐殖质营养学说,提出了植物矿质营养学说,即植物只吸收土壤中的矿质养分。由于连续种植作物会使土壤养分贫瘠,因此应该把植物取走的矿质养分全部归还土壤。以后他又提出最小养分律,认为作物产量受土壤中数量最少的养分限制,产量随这种养分的多少而变化。现在美国土壤学书中的限制因子率就是从最小养分律演变而来的。事实上植物从土壤中取走的矿质养分并不是都要全部归还的。

4. 1843 年英国的鲁茨和吉尔伯特 (Lawes and Gilbert) 在洛桑斯太德 (Rothamsted) 建立了世界上第一个长期肥料试验站,用精确的长期田间试验和定量方法纠正了李比希关于厩肥、氮素营养和“完全归还”等方面的错误认识,并首次用兽骨加硫酸制成了过磷酸钙,取得了专利,使得以后磷肥工业继续发展。而为了解决植物 P、K、Ca 营养,当时李比希是把磷矿石、钾盐与石灰混在一起熔成固体化肥,结果使 P、K 难溶于水,他的专利失败了。但李比希矿质营养学说提出的植物需要 P、K 肥的观点还是正确的。由此推动了化肥工业的发展。而洛桑长期肥料试验站延续至今已有 150 多年,取得了许多短期试验难以获得的重要成果,为现代农业的发展作出了重大贡献。

5. 1860年萨克斯(Sachs)和克诺普(Knop)设计了水培、砂培营养液标准配方。以后不少人经过近百年努力,用缺失法证明了植物除了C、H、O、N外,还有P、K、Ca、Mg、S、B、Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、Cl共16种植物必需营养元素。在16种元素中,最晚确定的是Cl。由布洛伊尔(T. C. Broyer)于1954年由精确培养试验确定Cl是植物必需的一种微量元素。此后有人提出Na是甜菜等、Si是水稻等部分作物所必需,但至今未能确证其必需性;一般看作在某种条件下对某些作物生长发育是有益无害的元素。

6. 本世纪前半世纪,俄国及原苏联的农业化学家普良尼施尼柯夫(Прянищников)在深入研究了植物的 $\text{NO}_3\text{—N}$ 和 $\text{NH}_4\text{—N}$ 营养机理,并在全苏进行了3 000多个化肥试验(网)的基础上,发展了N、P、K化肥工业,提出了植物—土壤—肥料相互作用的农业化学理论,这就是著名的生理路线的农业化学派,有别于西欧以矿质营养为基础的农业化学派。这两个流派对40多年来我国农业化学的发展有着深远影响。当然,我国农业化学是在总结了几千年施肥经验,开展了大量的土壤—植物营养研究的基础上,吸取国外先进经验逐步形成的。但要成为有中国特色的农业化学派则还需要继续广泛实验,深入研究,认真总结,也许这需要相当长时期的实际工作之后才能达到。

综上所述,随着现代化农业化学的建立和发展,推动了国外农业的发展。

(1) 确立了农、林、牧结合的土地利用制度。在草场中配种了豆科、禾本科、十字花科牧草,并进行施肥管理,使之成为牲畜的综合营养饲料。山地和坡地一律保护森林,实行间伐间种、更新森林。

(2) 在耕地实行豆科、禾本科及其它作物轮作耕作制度,和与之相应的施肥制度,包括饲料绿肥的轮作间种。

(3) 在施肥制度中正确认识厩肥的作用,尽量利用厩肥和其它有机肥料作为施肥制度的基础。

(4) 大力发展化肥,以满足农业发展中的作物营养需要。上一世纪欧洲已经发展了磷、钾肥工业。1913年德国化学家发明由氮气和氢气合成氨,奠定了化学氮肥工业的基础。但是直到本世纪末50年代以后才开始广泛而大量的使用化学氮肥。

(二) 长期肥料试验的成就与“石油农业”的发展 由于19世纪的西欧,腐殖质营养和矿质营养不同学派之间的争论,促进了英国洛桑长期肥料田间试验站于1843年建立,至今已进行了150多年。其后,法国、美国、德国、丹麦、荷兰等国相继建立了长期肥料试验站。本世纪初至20年代,芬兰、挪威、比利时、奥地利、波兰、日本、捷克等又相继建立了一批长期肥料试验站。俄国的门德列耶夫(Д. И. Менделеев)于1865年在莫斯科近郊建立了长期肥料试验站,对厩肥、氮肥、磷肥、石灰等进行了广泛试验,尖锐地批评过李比希的归还学说。著名的前苏联农业化学家普良尼施尼柯夫于本世纪初也布置了规模甚大的化肥田间试验网。

田间肥料试验是农业化学“三大法宝”之首位。因为许多植物营养与施肥的实际问题需要通过它上升到理论;而许多理论问题也只有通过它才能应用于农业生产实际。这些长期肥料试验的原始目的主要是:(1)研究不同轮作的施肥增产效果;探索在施用厩肥或完全肥料(N、P、K)的条件下,长期单一种植禾本科作物,是否可以获得持续增产?(2)弄清厩肥的增产作用究竟是腐殖质或者是矿物质?比较厩肥和矿质肥料的增产效果;探索是否可能用矿质肥料代替厩肥。(3)研究各种营养元素的相对重要性;明确

长期施用矿质肥料或有机肥必需补充的植物营养元素。通过长期试验，有的问题在几年、十几年就已经弄清了。例如厩肥中到底是只有矿物质起营养作用？还是有其它因素？结果表明，除矿质元素外，氮和某些其它组分也有肥效作用。而施肥对土壤肥力的影响则是通过几十、上百年试验才看出一些趋势的。总之，通过长期肥料试验，获得了比预期更多、更好的结果。现就其主要之点概述于下。

1. 不同肥料对作物产量和品质的效应。从多年平均产量看，化学肥料（主要是 N、P、K，下同）和有机肥料（主要是厩肥）对所有作物几乎有同样的持续增产效果，连续施用化肥并不影响土壤生产力。在试验开始的一些年份，施用化肥的产量还稍高于有机肥区，但在以后的一些年份，二者逐渐相近。矿质氮肥和有机氮肥都可提高产品中蛋白质，但几乎不影响蛋白质中氨基酸的组成，对产品中灰分元素含量影响也很小。就营养元素种类看，N、P、K 是植物营养的三要素，Ca、Mg、S 等是次要的。

2. 在相同施肥条件下，作物轮作较之连作产量更高一些；但在施用足量 N、P、K 化肥或厩肥的情况下，连作也可达到相当高的产量水平。根据洛桑试验站 Broad Balk 1968—1978 年 10 年平均，连作小麦在 N、P、K 区和厩肥区分别为每公顷 5 000 公斤和 5 500 公斤；在相同肥料处理区轮作中小麦产量为每公顷 5 800 公斤和 6 600 公斤，连作小麦产量相当于轮作的 83%—86%。美国试验（1955—1973）结果，连作玉米产量相当于玉米—燕麦轮作或玉米—燕麦—三叶草轮作玉米产量的 80%—95%。当然，如果考虑到轮作对于减少杂草、防治病虫害等方面因素，合理轮作当更为有益。

3. 作物对肥料中的养分利用率，长期试验结果显著高于短期试验的利用率，这显然是因为施入土壤中的化肥或厩肥均有后效。根据洛桑试验站一组轮作肥料试验连续 15 年（1961—1975）的平均值计算，小麦对化肥 N 的利用率为 49%—50%，大麦为 44.7%—45.7%，马铃薯为 40%—46%，甘蓝为 39% 上下。这些结果表明，作物对化肥 N 利用率可以达到 45%—50%，且施氮量多少对 N 利用率影响不大。几种作物对 P 的平均利用率达 35%；对 K 的平均利用率达 56.7%。

作物对厩肥中 N、P、K 平均利用率显著低于化肥，15 年平均 N、P 利用率均在 20% 左右，K 的利用率为 30%—40%。根据洛桑试验站 1852—1975 年 123 年统计，共施用厩肥氮（只用于马铃薯和甘蓝）27.2 吨/公顷，其间土壤氮增加氮量 4.3 吨/公顷。作物移走氮量 6.3 吨/公顷，占施入氮的 25%。粗略计算厩肥氮的损失为 16.1 吨/公顷，占施入氮的 59%，这是一个惊人的数字。看来这与厩肥的浅施、撒施有关。尽管如此，厩肥的残效可以持续多年，特别是厩肥中的磷、钾养分更是如此。洛桑站的 Hoosfield 试验于 1852—1871 年的 20 年，每年每公顷施用厩肥 35 吨，以后不再施肥。在停肥后 40 年间，作物产量比无肥区高一倍以上；在停肥后 40—90 年间，产量也比无肥区高 50% 以上。由此可见，有机肥的改土培肥作用是长期的，有近百年的持续效果。当然有机肥的施用也是长期的，不是几年所能奏效的。厩肥中磷、钾养分的残效比氮素更为明显，这将在下节中论述。至于化学 N、P、K 肥也有相当残效，特别是 P、K 肥的连年施用，可以逐渐丰富土壤中磷、钾库源，从而增加释放量和供给率。

4. 长期施肥能显著提高土壤养分贮量和有效性。

(1) 长期施用厩肥大大增加了土壤的有机营养库，使之含有较高的有机 C、N、P，并提高了养分的有效性。厩肥的效果优于 N、P、K 化肥。看来这是厩肥维持了土壤中的 C、

N 平衡并显著增加了土壤有机胶体——腐殖质有密切关系。厩肥增加土壤代换性钾量也是非常显著的。而且厩肥的残效达百年之久，正是由于有机肥料不仅是养分的供应者，而且是养分的保蓄库。从这种意义上说，有机肥料是改土培肥的根本措施，远非化肥所能代替。

(2) 化学氮肥能略为提高土壤中 C、N 库，可能是由于提高了作物残茬产量之故。化学磷肥在增大土壤磷库和提高有效性磷的作用非常显著。无论厩肥或化学钾肥对土壤全钾量影响不大，但都明显地提高了有效性钾的含量，尤以厩肥作用最大。

5. 美国 Morrow 长期试验结果表明，连续 79 年不施肥料的瘠薄土壤，一旦施用 N、P、K 矿质肥可以大幅度提高土壤生产力。原为无肥区的连作玉米产量由每公顷 2 630 公斤提高到 7 090 公斤。而在玉米—燕麦轮作区的玉米产量由 3 640 公斤提高到 7 900 公斤。由此可见，不论土壤肥力水平高低，只要合理配方施肥都能获得高产。当然这只有在其它肥力因素较为协调，而且没有旱涝灾害情况下才是如此。要使作物持续、稳定高产，还是要不断改良培肥土壤，提高土壤基础肥力。上述结果只是表明，即使肥力低的土壤，只要合理耕作施肥也能获得高产。

根据以上长期肥料试验提出的论据，欧洲、美国及其它发展国家近几十年来形成了“石油农业”，即规模化的单一种植、化肥、农药、机械等现代化农业的四大支柱，其中化肥、农药、机械都是高额消耗能源的。当然，石油农业的形成和发展有经济学方面的因素，欧美的大、小农场都是以商品生产为主，农业商品生产是以赚钱为目的。加之各国政府对高能耗的化肥、农药实行补贴政策，保持相对稳定的粮、肥比价，鼓励农产品外销。所以石油农业得以形成和发展。这对传统的“有机农业”无疑是一大进步，因为依靠品种的改进，化肥、农药的应用，冬小麦连作数十年亩产可保持 350 公斤，玉米亩产可保持 500 公斤以上。当然这并不意味着“石油农业”只施用化肥，不施用有机肥料。在西欧和美国，除了部分饲用玉米地上部生物产量全部收获外，其余作物只收获经济产量，稿秆则让其自然还田或旋耕还田。在美国中西部半干旱地区也有将稿秆刈下覆盖在土表的，起保土、护水、增肥作用。欧美农村能源大多用电，不需要稿秆作燃料。所以稿秆大部还田，这可能是近几十年来化肥中磷、钾肥比重逐渐下降的原因之一，也可能是对高能耗的“石油农业”的一种修正。

(三) 持续农业中的植物营养与肥料学 近十多年来，国外提出了“生态农业”“生物农业”等途径，其目的主要想找出一种节能高效的农业发展模式来替代“石油农业”发展模式，但由于种种原因未能在生产上大面积应用。1980 年世界自然资源保护联盟第一次提出“持续农业”。1988 年美国农业部决定将“低投入持续农业”列为重点项目。1991 年 4 月联合国粮农组织在荷兰的丹波斯召开了持续农业与环境会议，把持续农业与农村发展联系在一起。1993 年 5 月首次在中国举行了国际持续农业与农村发展研讨会，交流了国内外的新进展，提出了具体的行动建议。这些活动表明，发展持续农业已成为全球的共同行动。

持续农业是 80 年代提出的农业发展新方向，它是一种经济、社会、技术与环境协调发展的农业，即是一种“不造成环境退化，技术上适当，经济上可行，社会上能接受的农业”。持续农业的目的主要是：(1) 尽量减少投入土地之化肥、农药、灌水等，以节约能源，降低成本，增加收益；(2) 更多地采用生物措施和综合措施，以保持土壤的持久