普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等农林院校“十二五”规划教材

植物营养学

黄　云　主编

中国农业出版社

普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等农林院校“十二五”规划教材

植物营养学

黄　云　主编

中国农业出版社

图书在版编目（CIP）数据

植物营养学 / 黄云主编．—北京：中国农业出版社，2014.7

普通高等教育农业部“十二五”规划教材　全国高等农林院校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-109-19338-3

Ⅰ.①植…　Ⅱ.①黄…　Ⅲ.①植物营养-高等学校-教材　Ⅳ.①Q945.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 139744 号

中国农业出版社出版

（北京市朝阳区麦子店街 18 号楼）

（邮政编码 100125）

责任编辑　李国忠

北京中科印刷有限公司印刷　　新华书店北京发行所发行

2014 年 8 月第 1 版　　2014 年 8 月北京第 1 次印刷

开本：787mm×1092mm　1/16　　印张：18.75

字数：448 千字

定价：32.50 元

（凡本版图书出现印刷、装订错误，请向出版社发行部调换）

内 容 简 介

本书由10章构成，阐述了植物营养的基本理论、研究内容与任务，系统地介绍了大量营养元素肥料、微量营养元素肥料、复合肥料和有机肥料的类型与品种、基本性质及特点、施用技术以及在农业生产中的应用。在此基础上还介绍了作物高效施肥的技术与方法。

本书结构合理，内容全面，论述清晰，理论联系实际，结合植物营养学科发展前沿，对新型肥料的发展、平衡施肥的现状也做了简要介绍。该书主要作为农业资源与环境专业的专业课程教材，也可作农学类相关专业教学用书，对从事农业生产、农业技术推广及管理的相关部门及人员也具有参考价值。

主　编　黄　云

副主编　高亚军　廖铁军　刘士哲

编　者　（以姓名笔画为序）

王宜伦（河南农业大学）

王艳群（河北农业大学）

孔凡美（山东农业大学）

田　慧（西北农林科技大学）

刘士哲（华南农业大学）

孙　磊（东北农业大学）

孙志梅（河北农业大学）

杨劲峰（沈阳农业大学）

肖海华（四川农业大学）

何俊瑜（贵州大学）

罗　健（华南农业大学）

姜佰文（东北农业大学）

高亚军（西北农林科技大学）

黄　云（西南大学）

董元杰（山东农业大学）

廖铁军（西南大学）

主　审　毛知耘（西南大学）

唐树梅（海南大学）

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

前　言

植物营养学是普通高等教育农业部“十二五”规划教材、全国高等农林院校“十二五”规划教材。随着高等教育改革的深入，为了适应21世纪农业资源与环境专业本科培养目标，造就一批“厚基础、宽口径、高素质、强能力”的专门性人才，根据农业部“十二五”规划教材的编写要求，我们组织10所高等院校的骨干教师编写了这本适应新形势下的、体现学科发展现状与前沿的本科专业教材。

本书在编写中，遵循系统性、完整性和新颖性相结合的原则，按照植物是核心，土壤是基础，肥料是物质，施肥是手段的思路，将肥料施用与植物营养特性、土壤条件进行有机的结合与协调，系统地阐述了植物营养的基本理论，化学肥料和有机肥料的类型、性质与基本特点，肥料的施用技术，平衡施肥的现状及发展，力求将植物营养学科的基础理论与生产实际应用紧密地结合起来，拓展专业知识体系，体现现代农业对施肥的要求，迎接人才培养的新挑战，反映高等教育改革的新成果。

全书由10章组成。绪论阐述了植物营养学的研究目的、任务、基本内容及学科的发展历史；第一章阐述了植物营养的基础理论；第二章至第五章介绍了氮、磷、钾等大量营养元素肥料的性质、特点及施用；第六章介绍了微量元素肥料的性质特点及施用；第七章介绍了复合肥料的发展、复合肥料的类型及应用；第八章介绍了有机肥料的类型、作用及生产中使用要点；第九章介绍了作物高效施肥的技术与方法；第十章介绍了新型肥料和国内外的平衡施肥。

编写的具体分工为：绪论由黄云编写，第一章由孙志梅和王艳群编写，第二章由廖铁军编写，第三章由高亚军和田慧编写，第四章由何俊瑜编写，第五章由肖海华编写，第六章由杨劲峰编写，第七章由董元杰和孔凡美编写，第八章由王宜伦编写，第九章由姜佰文和孙磊编写，第十章由刘士哲和罗健编写。全书由主编黄云教授统稿，再由主审毛知耘教授和唐树梅教授审定把关。

承担教材编写的均是长期工作在植物营养学教学第一线的骨干教师，不仅

有丰富教学经验，还将自己的实践和科研成果融入到教材的内容中，在继承传统教材的基础上，有更加深入的阐述，使教材的前瞻性、科学性和实用性得到了进一步的加强。教材是编者多年植物营养学教学、科研和实践的结晶。同时本教材编写中参阅、引用了国内外很多学者的相关教材、专著和论文，限于篇幅，在每章后只列出主要部分。

我们期望本教材的出版能为我国农业资源与环境专业及相关专业的学生提供一本全新教材，为教学工作、也为我国现代农业的发展作贡献。

教材的编写人员虽然做了很大努力，但由于时间、资料收集等诸多原因，鉴于编者学识和水平有限，加之教学和教材改革仍在进行之中，全书仍有不尽如人意之处，谨请专家和读者指正。

本教材在编写过程中，西南大学教务处和资源环境学院给予大力支持和关怀，各编者所在学校也给了大力支持，特此致谢！

编　者

2014年6月

目　　录

前言

绪论 …… 1

第一节　植物营养学在农业生产中的作用 …… 1
第二节　植物营养学的发展概况 …… 3
第三节　植物营养学的研究内容及研究方法 …… 7
一、植物营养学的研究内容 …… 7
二、植物营养学的研究方法 …… 7

第一章　植物营养与施肥的基础理论 …… 10

第一节　植物的营养成分 …… 10
一、植物的元素组成 …… 10
二、植物必需营养元素 …… 10
三、植物有益元素 …… 13
第二节　植物对养分的吸收 …… 14
一、根系对养分的吸收 …… 14
二、根外器官对养分的吸收 …… 17
三、养分在植物体内的运输和分配 …… 19
第三节　影响植物吸收养分的因素 …… 28
一、植物吸收养分的基因型差异 …… 29
二、影响植物吸收养分的环境因素 …… 31
第四节　植物营养特性与合理施肥技术 …… 35
一、植物营养特性 …… 35
二、合理施肥技术 …… 39
复习思考题 …… 43
主要参考文献 …… 43

第二章　氮肥 …… 46

第一节　植物的氮素营养 …… 46
一、植物体内氮的含量及分布 …… 46
二、氮的生理功能 …… 46
三、植物对氮的吸收和同化 …… 47
四、氮素不足或过多对植物生长发育及产量品质的影响 …… 50
第二节　土壤氮素的含量、形态与转化 …… 52
一、土壤氮素的含量与形态 …… 52

二、土壤氮素的转化 …… 53
三、土壤氮素的损失 …… 54
第三节 氮肥的种类、性质及施用 …… 55
一、铵态氮肥 …… 56
二、硝态氮肥及硝-铵态氮肥 …… 61
三、酰胺态氮肥——尿素 …… 63
四、氰氨态氮肥——石灰氮 …… 64
五、长效氮肥 …… 65
第四节 提高氮肥利用率及肥效的途径 …… 68
一、氮肥利用率 …… 68
二、提高氮肥肥效的途径 …… 69
复习思考题 …… 70
主要参考文献 …… 70

第三章 磷肥 …… 71

第一节 植物的磷素营养 …… 71
一、植物体内磷的含量与分布 …… 71
二、磷的营养功能 …… 71
三、植物对磷的吸收和同化 …… 73
四、缺磷及过量供磷对植物生长的影响 …… 79
第二节 磷肥的种类、性质及施用 …… 80
一、水溶性磷肥 …… 81
二、弱酸溶性磷肥 …… 85
三、难溶性磷肥 …… 86
第三节 提高磷肥肥效的途径 …… 87
一、土壤条件与磷肥肥效 …… 87
二、作物需磷特性与磷肥合理施用 …… 89
三、磷肥的残效 …… 90
四、磷肥与其他肥料配合施用 …… 90
复习思考题 …… 91
主要参考文献 …… 92

第四章 钾肥 …… 93

第一节 植物的钾素营养 …… 93
一、植物体内钾的含量、分布与特点 …… 93
二、钾的营养功能 …… 94
三、植物对钾素的吸收 …… 102
四、植物体内的钾循环 …… 104
五、钾对作物的影响 …… 106
六、植物钾素失调的一般症状 …… 107
第二节 钾肥的种类、性质及施用 …… 108
一、我国钾盐资源状况 …… 109

二、提钾工艺路线 …… 110
三、钾肥在土壤中的转化 …… 111
四、常见的钾肥种类及其性质 …… 114
第三节　提高钾肥肥效的途径 …… 116
一、有效施用钾肥应考虑的因素 …… 117
二、钾肥的合理施用技术 …… 122
复习思考题 …… 125
主要参考文献 …… 125

第五章　钙、镁、硫肥料 …… 126

第一节　钙元素与含钙肥料 …… 126
一、植物的钙营养特征 …… 126
二、植物中钙元素的营养生理功能 …… 126
三、植物对钙的需求与缺钙症状 …… 128
四、含钙肥料 …… 129
第二节　镁元素与含镁肥料 …… 133
一、植物的镁营养特征 …… 133
二、植物中镁元素的营养生理功能 …… 133
三、植物对镁的需求与缺镁症状 …… 135
四、含镁肥料 …… 137
第三节　硫元素与含硫肥料 …… 138
一、植物的硫营养特征 …… 138
二、植物中硫元素的营养生理功能 …… 139
三、植物对硫的需求与缺硫症状 …… 140
四、含硫肥料 …… 141
复习思考题 …… 142
主要参考文献 …… 142

第六章　微量元素肥料 …… 144

第一节　微量元素的营养作用及在土壤中的转化 …… 144
一、铁的营养作用及在土壤中的转化 …… 144
二、锰的营养作用及在土壤中的转化 …… 146
三、铜的营养作用及在土壤中的转化 …… 147
四、锌的营养作用及在土壤中的转化 …… 149
五、硼的营养作用及在土壤中的转化 …… 150
六、钼的营养作用及在土壤中的转化 …… 152
七、氯的营养作用及在土壤中的转化 …… 153
第二节　微量营养元素的缺乏诊断与毒害 …… 154
一、铁的缺乏诊断与毒害 …… 154
二、锰的缺乏诊断与毒害 …… 155
三、铜的缺乏诊断与毒害 …… 156
四、锌的缺乏诊断与毒害 …… 157

五、硼的缺乏诊断与毒害 …… 158
六、钼的缺乏诊断与毒害 …… 159
七、氯的缺乏诊断与毒害 …… 160
第三节　微量元素肥料的种类、性质及施用 …… 161
一、微量元素肥料种类及性质 …… 161
二、微量元素肥料施用 …… 163
三、施用微量元素肥料应注意的问题 …… 165
复习思考题 …… 166
主要参考文献 …… 166

第七章　复混肥料 …… 167

第一节　复混肥料及其发展动态 …… 167
一、复混肥料的定义、分类及特点 …… 167
二、复混肥料的发展动向 …… 169
第二节　复混肥料的种类及施用 …… 170
一、复合肥料 …… 170
二、混合肥料 …… 172
三、复混肥料的合理施用原则 …… 173
第三节　复混肥料的配制 …… 174
一、复混肥料配方设计原理 …… 174
二、复混肥料配方设计方法 …… 175
第四节　复混肥料的生产 …… 178
一、复混肥料的生产准备 …… 178
二、复混肥料的配料工艺及技术 …… 181
三、复混肥料的生产工艺 …… 182
复习思考题 …… 186
主要参考文献 …… 187

第八章　有机肥料 …… 188

第一节　有机肥料概述 …… 188
一、我国有机肥料发展概况 …… 188
二、有机肥料的分类及特性 …… 189
三、有机肥料的基本作用 …… 191
第二节　有机肥料种类及特性 …… 192
一、秸秆肥 …… 192
二、粪尿肥 …… 194
三、堆沤肥 …… 199
四、绿肥 …… 204
五、微生物肥料 …… 213
六、沼气肥 …… 217
七、商品有机肥 …… 220
八、其他有机肥料 …… 224

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

第三节　有机肥料的合理施用 …… 230
一、有机肥料合理施用原则 …… 230
二、有机肥料施用技术 …… 231
三、有机肥料与化学肥料配合施用 …… 231
复习思考题 …… 235
主要参考文献 …… 235

第九章　高效施肥技术与方法 …… 236

第一节　常规施肥法 …… 236
一、施肥量 …… 236
二、施肥时期 …… 236
三、施肥方式 …… 239
第二节　肥料效应函数法 …… 243
一、施肥量与产量之间的关系 …… 244
二、施肥量的确定 …… 245
第三节　测土配方施肥法 …… 247
一、测土配方施肥的含义 …… 247
二、配方施肥的理论依据 …… 248
三、配方施肥的作用 …… 249
四、配方施肥的方法 …… 251
第四节　营养诊断法 …… 256
一、营养诊断的依据 …… 256
二、传统的营养诊断方法 …… 258
三、现代无损测试技术 …… 263
复习思考题 …… 264
主要参考文献 …… 265

第十章　新型肥料及国内外平衡施肥简介 …… 267

第一节　新型肥料简介 …… 267
一、新型肥料的定义和分类 …… 267
二、新型肥料的发展趋势 …… 268
三、主要的新型肥料 …… 268
第二节　我国平衡施肥现状 …… 276
一、平衡施肥的定义 …… 276
二、平衡施肥的发展 …… 276
三、我国目前推行的平衡施肥技术 …… 276
第三节　国内外平衡施肥的主要技术 …… 277
一、国内外平衡施肥的主要技术 …… 277
二、其他施肥新技术 …… 282
复习思考题 …… 286
主要参考文献 …… 287

绪　论

植物营养学是研究植物营养的基本理论和肥料施用的科学，是农业资源与环境专业的专业课程。植物对营养物质的吸收、运输、转化和利用的规律以及植物与外界环境之间营养物质和能量交换是施肥的理论基础，掌握各种化学肥料和有机肥料的类型、性质及特点，通过施肥的方式给作物提供营养，对植物进行营养调控和平衡施肥，是实现农业生产的优质、高产和高效的重要手段。

第一节　植物营养学在农业生产中的作用

农业是国民经济的基础产业，随着人口的增加，单位面积的耕地负载压力越来越大。现代农业的基本特点是农业劳动生产率的极大提高，依靠科学技术来获取农业增产。农业是以绿色植物为基础，将光能转化成化学能的产业，因此不仅要有科学技术的投入，还要靠物质投入，要充分了解植物生长的环境条件（如气候、土壤、水利、肥料、病虫害及栽培因素等），合理投入各种农业生产资料，充分运用现代科学技术来研究合理施肥的技术，以满足作物生长发育的需求，并发挥肥料的最大效益。肥料供给作物养分，不仅能提高作物产量、改善农产品的品质，而且能改良土壤性质、培肥土壤，充分合理地使用肥料在种植业生产中具有极其重要的作用。

传统农业在向现代农业的转化过程中，要求不断提高土地的产出率、资源利用率、劳动生产率和可持续发展的能力。肥料是作物的粮食，合理的施肥既可为作物提供充足的养分，还能改善土壤结构，提高肥力。我国目前科学施肥的整体水平不高，肥料资源浪费较为严重，因此充分了解和掌握作物、土壤和肥料之间的相互关系，采用先进的现代技术（如自动化分析仪器、同位素示踪、电子计算机技术等）研究作物的高产施肥、探讨营养物质的转化，通过改良植物遗传特性的手段来调节植物的代谢，提高植物的营养效率才能达到提高农作物产量、降低成本、改善农产品品质和实现施肥的预测、预报和预控。

施肥作为农业增产措施已有几千年的历史，农业生产的不同历史阶段有不同的肥料，20世纪50年代以前灰肥、粪肥、绿肥等有机肥料是传统肥源，虽然促进了作物的生长，提高了地力，但要受到自然循环的限制，难以大规模地提高农业产出。化肥的出现使农业生产出现了质的飞跃。化肥作为一种新肥源，突破了农业废弃产品还田和农业自然物质循环的局限性，其现代工业的生产方法可以大量提供作物所需养分，因而在现代农业中大放异彩。许多发达国家农业现代化的实践证明，以提高作物单产为主要目标，以化肥的形式对农业增加投入，不仅保证了作物的稳定增产，也并未引起土壤的破坏而弃耕。据联合国粮食与农业组织（FAO）统计，在1950—1970年的20年间，世界粮食总产量增加了近1倍，而增施化肥起到了40%～60%的作用。发达国家与发展中国家在化肥的单位用量上差异较大，如一些耕地有限的发达国家（如日本、荷兰、德国等），农业现代化是以增施化肥起步。我国的粮食

产量也与化肥增施密切相关（表0-1），我国化肥产量和用量从1950年的不到5.0×10^4 t上升到2010年的5.0×10^7 t，粮食总产量从1.0×10^8 t左右增加到5.0×10^8 t左右，以世界7%的耕地养活了世界22%的人口，粮食生产取得巨大成就，其主要的贡献来自化肥和作物品种的改良。然而我国部分地区由于施肥不当，化肥也引起了局部的生态问题，化肥的施用不当主要体现在不合理地过量施肥。特别是氮肥的过量使用有可能引起水体污染等连锁效应。对于片面追求粮食高产以及化肥不合理使用导致的负面效应应该引起高度重视。

据相关资料，粮食产量和化肥用量之间并非呈线性关系，作物产量的增幅远小于化肥用量的增幅，化肥的农业增产效应随着化肥用量的增加呈下降趋势。如何科学合理地利用化肥，提高肥料的利用率，对养分资源进行综合的管理，保障粮食的安全，已成为我国农业与环境可持续发展的一个重大课题。

科学施肥是现代农业中的一个重要内容。肥料的科学施用必须与其他优良农业技术措施配合进行才能最大限度地发挥肥料的增产提质潜力，从而加速传统农业向现代农业的转变。合理施肥首先必须遵循作物的营养特点及生长发育规律，考虑作物对环境条件的要求，掌握各种肥料的性质，在施肥的技术和管理上多下功夫，一方面不断推进先进的测土配方施肥技术，另一方面注重化肥与有机肥的配合，做到既增产又不带来生态环境问题。这需要在高产高效的目标下，通过多学科合作，通过养分优化管理，增施有机肥，广辟有机肥源，提高土壤肥力，进一步提高化肥对农业增产的贡献率。在施用上不断改进技术，调整养分比例，提高效益，向着定量化、模式化、预报化方向发展。调整肥料的产业结构，加大新型肥料的研制，加强不同区域科学施肥的试验研究，并广泛建立示范基地，进行农业产前、产中和产后的综合服务，改变我国氮、磷、钾肥比例失调的局面，才能进一步提高化肥的增产贡献率，降低生态风险和环境代价。

科学技术的进步，会引起生产力的突飞猛进，实验技术的不断发展，对植物营养学基础理论的研究起到极大的推动作用，理论与生产实践的结合又推动了现代农业的发展。多年的实践证明，获得作物高产和优质的关键，在很大程度上取决于养分的平衡供应。应该加强对化肥的认识，指导合理施用，解除对化肥形成的传统偏见，充分认识化肥对土壤肥力产生的积极影响，配合有机肥的施用，以正确的理论指导科学的施肥，既要保证农业的增产，又要兼顾生态环境效益，这对我国农业生产的持续稳定发展将产生重大作用。

表0-1　1980—2011年我国粮食产量和化肥消费量（$\times10^4$ t）

年份	粮食产量	化肥消费量	年份	粮食产量	化肥消费量
1980	32 056	1 269	2004	46 947	4 637
1985	37 911	1 776	2005	48 402	4 766
1990	44 624	2 590	2006	49 804	4 928
1995	46 662	3 594	2007	50 160	5 108
2000	46 218	4 146	2008	52 871	5 239
2001	45 246	4 254	2009	53 082	5 404
2002	45 706	4 339	2010	54 641	5 560
2003	43 070	4 412	2011	57 121	6 027

注：表中数据来自对国家统计局资料和统计年鉴的整理。

第二节　植物营养学的发展概况

恩格斯早就指出，科学的发生与发展一开始就是由生产决定的。在植物营养学诞生之前，人类通过生产实践，对促进植物生长方面就已积累了丰富的感性认识，因而其发展是与人类农业生产实践相关的。人类在开始种植植物时就是农业的开端，人们世代同自然界作斗争，不断地认识、利用和开发自然资源。我国在农业生产的过程中施用肥料以促进农业增产已有几千年的历史，在生产中积累了丰富的经验，但对植物营养理论的探索却仅有几百年的历史。

我国早在奴隶社会的西周时期就已经有“以薅荼蓼，荼蓼朽止，黍稷茂止”的歌咏，这是对腐草可能肥田的最初认识。到了战国时期和西汉时期，黄河流域的农业已有较快发展，在当时的《管子·地员篇》和《氾胜之书》，以及北魏的《齐民要术》等书中已经记载了有关土宜、堆肥制作、改土培肥、适时种植等农业生产经验。在唐、宋、元、明、清各时期又有一些重要的农业书籍如《四时纂要》《王祯农书》《知本提纲》《农政全书》等记载了“粪壤篇”，把肥料分为大粪、踏粪、苗粪、草粪、火粪和泥粪六大类；在土壤肥力方面提到了地力常新的理论，有客土、施肥、精耕细作，使土壤“精熟美肥，常保持新壮”的农业生产经验；在施肥方法上已提出“时宜”、“土宜”、“物宜”，就是因时制宜、因地制宜、因物制宜，做到天时、地利、人和，以获得最佳的生产效益；在施肥的理论和实践中均有独特创造，为今天的看天、看地、看庄稼的施肥原则奠定了基础，反映出我国在早期农业中对生产整体性的重视与关注。

植物营养学的发展是随生产力的发展和其他基础学科的发展而发展的。在14～15世纪，欧洲的文艺复兴促进了人们的思想从神学的束缚中解脱出来，有力地促进了自然科学和技术的进步，而在15～18世纪植物学获得蓬勃发展，这为植物营养学的发展奠定了良好的基础。

植物营养学的发展可以划分为3个阶段，第一阶段是植物营养学尚未形成独立的学科体系，直到矿质营养学说的建立；第二阶段是1840年李比希（Liebig）建立的矿质营养学说起到20世纪初植物营养学诞生并快速成长阶段；第三阶段是现代植物营养学科的发展。经过100多年的时间，植物营养学从对基础理论的研究走向了生产应用，在各种现代技术和实验技术推动下，它们对农业生产起着越来越大的作用。

15世纪以前，在农业上几乎没有什么重大发展，在植物营养学的第一阶段，生物学家们把注意力关注到植物到底依赖什么物质生长，体内的汁液是如何上升到顶端的。在17世纪前后有众多学者认为植物的养料是水，特别是在荷兰的凡·海尔曼特（van Helmont）进行了有名的柳树枝条试验后，确信水是植物的唯一养料，形成了早期的水营养学说。他将90.7kg(200lb）的土壤放入陶制的容器中，将土壤湿润，然而插种一枝2.27kg(5lb）重的柳条，除了雨水外不加入其他任何东西，5年后，柳树重量已达76.66kg(169lb)，而原先容器中的土壤却只少了56.7g(2oz)，所以他报告中的结论是：水是植物的唯一养料。他的观察是正确的，但却得到了错误的结论。18世纪海尔斯（Hales）将植物干馏，观察到有气体溢出，因而又做出了另一个推测，认为植物体内大部分物质是以气体状态而被吸收的，人们开始注意到了空气营养。1804年法国的德·索秀尔（de Saussure）采用了精确的定量方法测定了空气中的CO_2含量，以及在含有不同数量CO_2的空气中所培养的植物体内碳素含量

以后，证明植物体内的碳素是来自大气的CO_2，而植物体内的灰分是来自土壤，而他的著作《对于植物的化学分析》可以代表当时的水平。

在19世纪中叶以后，西欧的资产阶级产业革命引起了社会生产力的高涨，出现了资本主义特色的农场，农业机械和化学肥料开始得到应用。1840年李比希出版了《化学在农学和生理学上的应用》一书，是植物营养学发展到第二阶段的起始和标志。书中论述：植物体内的碳素是从大气中获得的，而所有的矿物质是从土壤中获得的，还对植物营养学的原理做了如下论断：只有无机物质才能供给植物以原始材料。植物营养的早期探索从水营养学说、空气营养学说因李比希而进入到了矿质营养学说。同时代的法国学者布森格（Boussingault）还采用田间试验的方法对植物营养问题进行了一系列的研究，1834年他在自己的庄园创立了世界上第一个农业试验站。随后在1843年J. B. Lawes和J. H. Gibert在英国也建立了洛桑农业试验站，用精确的长期田间肥料试验和定量的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，在李比希矿质营养原理的基础上进一步明确了以下几点问题：

① 作物需要磷和钾，但灰分组成不是植物所需这些成分的数量和量度。

② 非豆科植物需要供应氮素，若没有氮素的供应，不管提供多少磷和钾，植物还是不能生长。

③ 依靠化肥时，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。

1859年克诺普（Knop）和勃费尔（Pfeffer）两学者又在无土条件下，成功地使植物在成分已知的溶液中生长，并开花、结实，这对植物营养的理论做出了重大贡献。无土栽培因在阐明植物对养分需求方面起到决定性作用，奠定了施用化肥的理论基础，因而也受到广泛重视。19世纪末，植物营养学的生物试验方法及实验技术获得了进一步的发展，美国、德国、荷兰、丹麦等许多国家均已仿效英国和法国，纷纷建立农业试验站，对土壤的肥力、肥料的作用等进行研究。20世纪20～50年代，芬兰、比利时、奥地利、日本等国又相继建立了一批长期肥料试验站；特别是苏联的植物营养学家普良尼施尼布置了规模甚大的化肥田间试验网，深入研究了NH_4^+-N和NO_3^--N的营养机理，对有机肥、氮肥、磷肥、石灰肥料等进行了广泛的研究，有力促进了苏联氮肥、磷肥和钾肥工业的发展，还提出了植物、土壤和肥料相互作用的理论，为苏联化肥工业的发展和肥料的分配施用提供了重要的科学依据，也对我国植物营养领域的研究产生了深远的影响。

从19世纪到20世纪初，人们在了解植物营养和施肥方面均取得了很大进展，李比希在研究过程中还发现了最小因子律，即植物的生长受到以最小量存在的植物营养元素的限制，作物产量的高低则随最小养分补充量的多少而发生变化。李比希的矿质营养学说以及对同时代有关矿质营养对植物生长重要影响的相对系统总结，使他成为植物营养学无可争议的奠基人。

20世纪初到21世纪，是植物营养学获得蓬勃发展的第三阶段，化学、物理学、电子计算机技术、实验分离分析技术的发展，使植物营养学的研究无论是从理论上还是在实践中都取得了重大成果，使植物营养学逐步发展成为一门基础理论扎实、内涵丰富而又相对独立的学科。

随着现代植物营养学科的建立和发展，合理地施肥大大促进了农业的进步和发展。在正

确认识和使用有机肥的基础上，开始大力发展化肥。1913 年德国化学家发明由氮和氢气合成氨，奠定了化学氮肥工业的基础，而大量、广泛地使用化学氮肥是从 20 世纪 50 年代以后。

我国研究植物营养最早从钱崇澍开始，罗宗洛、李继侗、汤佩松等又相继开展了这方面的工作，为植物营养的基础理论研究打下良好基础。1936—1940 年，张乃凤等在 14 个省 68 个试验点的 7 种不同土壤上，对小麦、棉花、水稻、玉米、油菜和谷子 6 种作物进行了 156 个试验，这是我国的第一次全国性的化肥肥效试验。1939 年孙羲通过研究甘蔗产量、品质与施肥的关系，提出了单施硫酸铵能提高产量但却降低含糖量和蔗汁的纯度，施用菜子饼能提高产量且提高蔗汁的纯度，施用磷钾肥特别是钾肥能改善甘蔗的品质。同一时期，黄瑞采等采用复因子设计的方法，进行了 9 年的肥料定位试验。1935—1946 年，何文骥、屠启澍等连续 10 年进行了地力测定、肥料试验以及施肥与灌溉、施肥与气候、施肥与品种等多因子的相关性试验。1941 年，李庆逵进行了磷矿粉直接利用的试验。

新中国成立后，我国的化肥工业、肥料施用和研究方面取得了巨大成就。我国化肥工业从无到有，从小到大，迅猛发展。在 20 世纪 80 年代中期已建立了大中小结合的、具有相当规模的化肥工业体系，到 90 年代，我国化肥的产量已居世界第一位。我国的化肥工业虽然获得了极大发展，我国已成为世界化肥消耗量和生产量第一大国，但在化肥品种、数量、质量、规模等方面都有待于进一步改进和提高。联合国粮食与农业组织的统计资料表明，在提高单产中，化肥对增产所起的作用占 40%～60%，我国农业部门也认为在 40%左右。2012 年世界化肥的消耗量为 1.5×10^{11} t 左右，而我国的化肥消耗量已超 5.8×10^{7} t 纯养分，占世界消耗总量的 1/3。我国单位面积化肥使用量大大高于世界平均水平。目前，我国氮肥利用率仅为 30%～35%，磷肥利用率为 20%左右，钾肥利用率为 45%左右，远低于发达国家水平。全世界都遇到了一个同样的问题：化肥施用量越来越多，而粮食产量却并没有相应快速增长。美国 40 年来氮肥的施用量增加了 13 倍，而同期玉米作物吸收的氮素只增加了 3 倍。1984—1994 年，我国化肥的使用量增加了近 1 倍，而粮食产量仅增长了 9.1%。化肥尤其是氮肥的低利用率和高环境风险，已成为我国亟待解决的问题，我国 130 多个大型湖泊中已有 60 多个遭到包括富营养化在内的严重污染。由于资源的约束，我国每年仍需进口大量的钾肥和一定量的磷肥，以满足不断增长的肥料需求。而氮肥工业中，尿素已开始出现产能过剩，尿素的出口呈现出递增的态势。

美国及欧洲一些发达国家，其农业在近几十年盛行“石油农业”，即以规模化种植、化肥、农药、机械为现代农业的支撑，政府对农业实行一定量的补贴，农业商品化生产取得了显著的成效，不同于传统的有机农业，小麦、玉米、大豆等大宗作物类型连作数十年仍能获取较高产量。当然，发达国家的现代农业也重视有机肥的配合，在北美洲的美国和加拿大，在收获经济产量后，其秸秆除一部分作为其他用途的综合利用外，其余部分在相当部分区域是被粉碎旋耕还田，对维持地力、改良土壤也起到明显作用。随着生态农业的兴起，发展无公害农产品体系，在农业投入中节约能源、降低成本、增加收益，特别是减少农药的使用，发展高效低毒的农药，尽量采用综合性的措施，以减少环境的污染已成为全球共同的行动。

提高化肥利用率成为全球关注的问题。美国、法国、荷兰等均提出要控制化学氮肥用量，以避免水体中硝态氮含量过高而产生危害，并通过各种节能增产的措施来降低农业面源污染。20 世纪 70 年代以后，国外经过大量研究，已推出了数十种缓释、控释肥料，这种肥

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com