



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

植物营养研究方法

(第3版)

■ 申建波 毛达如 主编

Research Methods of Plant Nutrition



中国农业大学出版社

CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

植物营养研究方法

(第3版)

申建波 毛达如 主编

资源环境科学专业(本科生)
植物营养专业(研究生)用

中国农业大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

《植物营养研究方法》(第3版)是全国高等农业院校的教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

植物营养研究方法属于植物营养学和肥料科学与统计学的交叉领域。新编的第3版《植物营养研究方法》共六章,涵盖了植物室内培养方法、田间试验方法、生物统计方法、施肥模型方法、模拟模型方法和根际研究方法等内容,形成了植物营养科学完整的、系统的方法论。这些方法不仅适合于资源环境科学专业,也适用于农学、园艺、生物、林学和生态类有关专业。

图书在版编目(CIP)数据

植物营养研究方法/申建波,毛达如主编. —3版. —北京:中国农业大学出版社,2011.1
ISBN 978-7-5655-0163-0

I. ①植… II. ①申… ②毛… III. ①植物营养-研究方法 IV. ①Q945.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 244795 号

书 名 植物营养研究方法(第3版)

作 者 申建波 毛达如 主编

策划编辑 张秀环

封面设计 郑 川

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路2号

电 话 发行部 010-62731190,2620

编辑部 010-62732617,2618

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

经 销 新华书店

印 刷 北京国防印刷厂

版 次 2011年5月第3版 2011年5月第1次印刷

规 格 787×1092 16开本 30印张 739千字

印 数 1~3 000

定 价 49.80元

责任编辑 王艳欣

责任校对 王晓凤 陈莹

邮政编码 100193

读者服务部 010-62732336

出版部 010-62733440

e-mail cbsszs@cau.edu.cn

图书如有质量问题本社发行部负责调换

第3版编写人员

主 编 申建波 毛达如

编写人员 (按章节先后顺序)

毛达如 绪论(中国农业大学)

毛达如 吴良欢 第一章(中国农业大学、浙江大学)

王兴仁 第二章(中国农业大学)

肖俊璋 田霄鸿 高亚军 王朝辉 第三章(西北农林科技大学)

刘小虎 申建波 第四章(沈阳农业大学、中国农业大学)

韩晓日 第五章(沈阳农业大学)

申建波 第六章(中国农业大学)

第2版编写人员

主 编 毛达如

副 主 编 申建波

编写人员 (按章节先后顺序)

毛达如 第2版前言、绪论、第一章(中国农业大学)

王兴仁 第二章(中国农业大学)

肖俊璋 田霄鸿 高亚军 第三章(西北农林科技大学)

邱忠祥 申建波 第四章(沈阳农业大学、中国农业大学)

韩晓日 第五章(沈阳农业大学)

申建波 第六章(中国农业大学)

第 1 版编写人员

主 编 毛达如(北京农业大学)

副 主 编 杨志福(北京农业大学)

编写人员 (按章节先后顺序)

毛达如 绪论、第一章、第四章(北京农业大学)

王兴仁 第二章、第四章(北京农业大学)

吴毅文 第三章、第四章(南京农业大学)

邱忠祥 第四章、第五章、第七章(沈阳农业大学)

肖俊璋 第六章(西北农业大学)

杨志福 第七章(北京农业大学)

主 审 李昌纬(西北农业大学)

连兆煌(华南农业大学)

第3版前言

《植物营养研究方法》是全国高等农业院校的教材,经全国高等农业院校教材指导委员会审定于1994年3月出版第1版,2005年7月修订并出版了第2版,随后入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书已在全国高等农业院校的土壤与植物营养专业及资源环境科学专业或农学、园艺、生物、林学和生态类有关专业的本科生或研究生的教学科研中发挥了重要作用。

植物营养研究方法属于植物营养学和肥料科学与统计学的交叉领域。本书所论述的植物培养方法、田间试验方法、生物统计方法、施肥模型方法、模拟模型方法以及根和根际研究方法不仅适合于资源环境科学专业,也适用于农学、园艺、生物、林学和生态类有关专业。近年来,随着生物技术和信息技术的不断发展,植物营养科学及其研究方法在以下三个方面取得了快速发展。一是计算机统计分析方法日益得到普及,为复杂试验设计的数据统计和分析提供了快速、简便和准确的方法,计算机图形处理技术使数理统计的图示表达更为精确和生动。二是植物营养科学从宏观的定性研究走向微观的定量研究。从植物营养施肥经验模型,进入了以过程定量化为主的植物营养模拟模型研究的时代,已开始应用模拟过程的机理模型,如植物对养分的吸收模型、养分吸收动力学模型、田间土壤溶液中溶质运移和作物生长模型等。这些模拟模型与科学方法的建立,对于深入研究“土壤-植物”环境中营养元素的行为,进而理解植物矿质营养的过程并揭示其机理具有重要的意义。三是植物根和根际研究方法取得新进展,特别是植物“根际”、“根际环境”、“根际对话”、“根际管理”、“根际调控”和“菌根际”等概念和方法的建立推动了植物根际营养理论与实践研究的创新和发展。上述这些内容都是第3版修订的重点。

第3版修订中对第2版的部分章节作了如下调整:第2版的第一章植物营养的培养研究方法,更新了灭菌培养方法部分,并修订了部分营养液配方。第二章植物营养的田间研究方法增加了试验数据缺区估计方法与测土配方施肥“3414”试验方案的统计分析方法。第三章植物营养研究的生物统计方法和第四章植物营养的施肥模型研究方法中的内容和结构顺序做了较大调整,使其系统性更强。第五章植物营养的模拟模型研究方法内容进行了精炼和简化,以更适合于专业学习。第六章植物营养的根和根际研究方法更新了根际原位研究方法的内容,并修订了部分根系与根际研究方法。

新编的第3版《植物营养研究方法》共六章,涵盖了植物室内培养方法、田间试验方法、生物统计方法、施肥模型方法、模拟模型方法和根际研究方法等内容,形成了植物营养科学完整的、系统的方法论,对进展、内容和课程的要求在绪论中做了简要叙述和说明。

本书第六章第四节丛枝菌根真菌的一些研究方法由李晓林教授、冯固教授提供资料和方法,袁会敏博士、张立桢副教授对有关章节进行了校对,在此一并致谢!

主编 申建波 毛达如

2011年4月10日

第 2 版前言

植物营养研究方法是全国高等农业院校的教材,经全国高等农业院校教材指导委员会审定出版,已有 10 年了。本书已在全国高等农业院校的土壤与植物营养专业及农业资源与环境专业或农学、园艺、生物、林学类有关专业的本科生或研究生的教学科研中发挥了重要的作用。

近 10 年来植物营养科学及其研究方法在以下三个方面已发生了较大的变化。一是计算机及软件的普及,对复杂试验设计的数据统计和平面、曲面的图示技术提供了多视角、简便、准确、全新的方法。二是植物营养科学从宏观的定性研究走向微观的定量研究。从植物营养施肥(经验)模型,进入了植物营养模拟(机理)模型,已开始应用的模拟(机理)模型有养分(营养元素)在土壤溶液中的迁移模型(包括扩散、质流,其他方式迁移模型),植物对养分的吸收模型,养分吸收动力学模型,养分在植物体内运转分配模型,田间土壤-根系溶液中溶质运移和作物生长模型等。这些模拟(机理)模型、科学方法的建立,对深入研究“土壤-植物”环境中营养元素的行为,进而揭示植物矿质营养的实质有着重要的意义。三是植物根和根际研究方法的新进展,特别是植物“根际”、“根际环境”、“根际对话”、“根际管理”和“菌根际”等概念和方法的建立对植物根际营养的理论、应用有一个新的推动和发展。上述这些都是第 2 版修订的重点。

第 2 版修订中对第 1 版的部分章节做了如下调整:第 1 版的第四章植物营养物理化学及其他研究方法,将调入其他有关专业课程中。第五章植物营养的生物数学统计方法,调入第 2 版第四章植物营养的施肥(经验)模型方法。第七章植物营养的核技术研究方法,由于不少院校核技术实验条件的限制,以及环境保护日益加强和核实验室从分散到集中管理并严格的监控,防止核实验材料、废料的泄漏、扩散、污染,再加上今后本科大学生就业的去向主要是基层生产、农业推广、企业、行政管理等部门,不需要掌握复杂的核技术理论和方法,因此在教学大纲的修订中取消了本科大学生对核技术的选修要求。建议在有条件的个别院校中对科研课题有需要的少数博士研究生对核技术方法作一些基本训练。第 1 版的第七章仍可作为参考用书,为此第 2 版教材中全部取消了第 1 版第七章的内容和方法。

新编的第 2 版植物营养研究方法共六章。对进展、内容和课程的要求在绪论中做了概要的叙述和说明。

书稿的文字、图幅的计算机处理由项小菊同志负责完成,也得到了刘全清老师的帮助,丛枝菌根的一些研究方法由李晓林、冯固教授提供资料和方法,在此一并致谢!

谨以本书献给 2005 年中国农业大学诞辰 100 周年及 15 届国际植物营养科学大会首次在中国北京召开!

主编 毛达如

2004 年 12 月 25 日

目 录

绪论	(1)
一、植物营养研究方法的进展	(1)
二、植物营养研究方法和课程要求	(2)
第一章 植物营养的培养研究方法	(5)
第一节 培养研究的特点、种类及发展概况	(5)
一、盆钵培养研究方法	(5)
二、植物短期培养研究方法	(6)
三、控制培养条件的其他生物研究方法	(6)
第二节 土壤培养研究方法	(7)
一、土培试验的任务	(7)
二、土培试验的技术	(7)
第三节 溶液培养研究方法	(12)
一、溶液培养研究的特点与任务	(12)
二、配制营养液的原则与依据	(12)
三、常用营养液的种类	(14)
四、营养液的配制	(20)
五、溶液培养的准备、播种与管理	(22)
第四节 砂砾培养研究方法	(24)
一、砂砾培养的特点与任务	(24)
二、砂砾培养的准备工作	(24)
三、装盆和播种	(26)
四、试验期间的管理	(27)
第五节 控制培养条件下的生物研究方法	(28)
一、隔离培养试验	(28)
二、流动培养及更换培养试验	(32)
三、灭菌培养试验	(33)
四、渗滤水研究方法	(35)
五、幼苗法	(36)
第六节 植物营养培养室的建立	(39)
一、植物营养培养室的结构材料	(39)
二、植物营养培养室的组成、设计要求与类型	(39)
三、植物营养培养室的使用与管理	(41)
思考题	(42)
参考文献	(42)

第二章 植物营养的田间研究方法	(44)
第一节 植物营养田间研究方法的概述	(44)
一、田间研究方法的特点	(44)
二、田间研究方法的类型	(44)
三、田间研究方法的进展	(46)
第二节 植物营养田间研究的方案设计	(48)
一、一些基本概念	(48)
二、试验方案设计的原则	(48)
三、试验方案的设计	(50)
四、试验方案的评价	(59)
第三节 植物营养田间研究的方法设计	(61)
一、试验方法设计的原则	(61)
二、试验方法设计的内容	(62)
三、几种常用的试验方法设计	(65)
四、试验方法设计的选择和应用	(69)
第四节 植物营养田间研究的实施	(70)
一、试验地的选择和准备	(70)
二、试验的布置	(71)
三、田间管理与观察	(73)
四、收获和考种	(74)
五、分析样本的采取	(75)
第五节 植物营养田间研究资料的整理和总结	(76)
一、析因试验资料的整理	(76)
二、回归分析试验资料的整理	(77)
三、多点分散试验资料的整理	(78)
四、肥料长期定位试验资料的整理	(78)
五、试验数据缺区估计和异常数据的判别	(80)
第六节 “3414”试验方案的特点和数据处理	(83)
一、“3414”设计的特点	(84)
二、“3414”设计的数据分析	(85)
第七节 植物营养田间研究成果的示范推广	(89)
一、大田示范试验的意义和特点	(89)
二、大田示范试验技术	(89)
三、数据分析	(90)
四、成果推广	(93)
思考题	(93)
参考文献	(94)
第三章 植物营养研究的生物统计方法	(95)
第一节 误差	(95)

一、总体与样本·····	(95)
二、真值与平均值·····	(95)
三、误差的概念、种类及产生原因·····	(96)
四、集中性与变异性的度量·····	(96)
五、随机误差的分布·····	(101)
六、置信限与置信概率·····	(106)
第二节 统计假设检验·····	(107)
一、统计假设检验的基本方法·····	(107)
二、 t 检验·····	(110)
三、百分数的假设检验·····	(116)
四、卡方(χ^2)检验·····	(119)
第三节 方差分析·····	(125)
一、方差分析的基本原理·····	(125)
二、随机区组设计方差分析·····	(141)
三、拉丁方设计方差分析·····	(157)
四、裂区设计方差分析·····	(159)
五、正交设计方差分析·····	(164)
第四节 回归分析·····	(167)
一、回归分析的概念·····	(167)
二、线性回归·····	(168)
三、非线性回归·····	(187)
第五节 相关分析·····	(206)
一、直线相关·····	(206)
二、多元相关与偏相关·····	(209)
三、通径系数与通径分析·····	(212)
第六节 协方差分析·····	(217)
一、协方差分析的意义·····	(217)
二、协方差分析的基本原理和方法·····	(217)
思考题·····	(227)
参考文献·····	(228)
第四章 植物营养的施肥模型研究方法·····	(230)
第一节 施肥模型的概述·····	(230)
一、植物营养施肥模型研究进展·····	(230)
二、建立施肥模型的原则与一般程序·····	(231)
三、应用统计学理论建模的方法与步骤·····	(232)
第二节 施肥模型的建立·····	(234)
一、线性模型·····	(234)
二、非线性模型·····	(243)

第三节 施肥模型的回归设计	(256)
一、二次回归正交设计	(256)
二、二次回归旋转设计	(272)
第四节 正交趋势模型	(281)
一、正交趋势模型的原理	(281)
二、正交趋势模型的应用	(286)
第五节 区域施肥模型研究方法	(291)
一、聚类研究	(291)
二、模糊评判	(299)
第六节 施肥模型的田间校验	(302)
一、田间校验的试验方案	(303)
二、校验系数 A 的计算	(303)
三、田间校验实例	(303)
思考题	(304)
参考文献	(304)
第五章 植物营养的机理模型研究方法	(306)
第一节 植物营养机理模型概述	(306)
一、机理模型的种类	(306)
二、植物营养机理模型的基本原理	(307)
第二节 植物养分吸收模型	(316)
一、没有竞争的简化根系吸收模型	(316)
二、有竞争的单根根系吸收模型	(316)
三、有竞争的简化根系吸收模型	(319)
第三节 养分吸收动力学模型	(322)
一、Michaelis-Menten 方程	(322)
二、主要营养元素吸收动力学模型	(324)
第四节 田间土壤溶质运输和作物生长模型	(343)
一、大田作物对水分和养分的吸收和作物生长模型的发展	(344)
二、单一栽培作物模型(模拟单种作物模型)	(345)
三、种植后氮素运输与硝酸盐残留模型	(351)
四、混作植被的养分吸收模型	(352)
思考题	(357)
参考文献	(357)
第六章 植物营养的根和根际研究方法	(362)
第一节 根系的研究方法	(362)
一、根系参数与根系生长的影响因素	(362)
二、根系研究概况	(367)
三、几种常用的根系研究方法	(368)

第二节 根分泌物的研究方法	(383)
一、根分泌物的概念、组成和作用	(383)
二、根分泌物的研究概况	(384)
三、根分泌物的收集和提取	(386)
四、根分泌物的分离与测定	(388)
五、几种典型的根分泌物研究方法	(389)
第三节 根际的研究方法	(398)
一、根际的定义	(398)
二、根际环境的研究概况	(399)
三、根际的研究方法	(402)
第四节 丛枝菌根真菌的研究方法	(423)
一、菌根真菌及其作用	(423)
二、丛枝菌根真菌的定性和定量研究方法	(424)
思考题	(431)
参考文献	(432)
附录	(438)
附录 1 一些常用的曲线方程及其图形	(438)
附录 2 一些常用的数据表	(440)

绪 论

一、植物营养研究方法的进展

植物营养科学的发展与植物营养研究方法的进展密切相关。植物营养学是研究植物与环境之间营养物质和能量交换过程,即营养物质的吸收、运输、代谢和能量的转化过程的科学。植物营养的研究从农业生产中施用草木灰、石灰、厩肥等开始,已有 2 000 余年历史,但是人们最初并不知道植物的正常生长发育需要哪些必需的营养元素。1840 年,德国农业化学家李比希(Justus von Liebig)应用化学方法研究了植物与环境之间营养物质和能量的交换过程,首次提出了植物的矿质营养学说。李比希认为,氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硅(Si)、钠(Na)、铁(Fe)等元素是植物营养的必需元素,开创了近代植物营养科学的新纪元。尽管李比希的矿质营养学说是从植物分析和生物学观察中推测出来的,但当时还缺乏可靠的科学试验数据支持。李比希矿质营养学说提出以后,在 19 世纪末和 20 世纪初,世界各国的植物生理学家和植物营养学家,应用砂培和溶液培养等生物模拟研究方法进一步确定了 16 种矿质元素和它们在植物生长和代谢中的作用,从而确定了该 16 种矿质元素是植物营养的必需元素。这是通过严格的科学试验证实了李比希矿质营养学说的正确性与科学性。至今我们仍把李比希矿质营养学说的创立作为近代植物营养科学的起点。由此可见,植物营养科学的创建与近代植物营养研究方法的进展是分不开的。

与李比希同时代即 19 世纪中叶,法国植物营养学家布森高(J. Boussingault),在人工控制条件下,进行了植物营养田间研究、砂培模拟试验和化学分析。1841 年布森高明确指出豆科植物能固定空气中的氮,从而增加土壤中的氮素含量,而非豆科的植物只能吸收土壤中的氮,布森高的研究开创了田间—温室模拟—化学分析相结合的近代植物营养研究方法。劳斯(Lawes)从 1843 年开始,在英国洛桑试验站(Rothamsted experiment station)Broadbalk 试验地首次开展古典肥料长期定位试验,至今已延续了 160 多年。在劳斯的倡导下,世界各国为了植物营养与施肥科学的建立,继英国之后,美国、芬兰、挪威、丹麦、德国、法国、波兰、捷克、荷兰、奥地利、比利时、俄罗斯、日本等 50 个国家,均布置长达半世纪以上的田间肥料试验,国际上称为非常长期肥料试验(very long-term fertilizer experiment),这是近代植物营养田间研究的开端。近代数理统计方法的应用又使植物营养的田间研究进入现代科学方法的新阶段。在这方面影响较大的有 20 世纪 20 年代的费休(R. Fisher)的方差分析和随机区组设计,叶茨(Yates)的混杂设计和复因素试验,以及 20 世纪五六十年代的回归正交设计、回归旋转设计、回归最优设计、配方试验设计等等,这些现代研究方法的渗透和应用,使植物营养的研究又进入了定量化统计分析研究的新阶段。

近代植物营养科学的进展表明,只有植物营养的田间研究,还难以揭示植物营养的理论问题,必须在人为控制的模拟条件下,通过严格控制的模拟试验才能进一步揭示植物营养的过程。近代植物营养模拟研究包括各种培养试验、短期幼苗试验、盆栽试验等等。1629 年万·海利门特(von Hellement)的柳条试验,尽管结论是错误的,但人们还是公认他开创了植物营养土壤培养研究方法的先河,以后 1699 年乌特渥尔特(Woodward),1804 年索秀尔(Saus-

sure), 1857年萨克斯(Sacks)和克诺普(Knop),以及格里利格尔(Hellerigel)、瓦格涅尔(Wagner)等,均为近代植物营养模拟试验——各种砂培和溶液培养研究方法奠定了基础。现代的植物营养模拟试验,不仅可以实现研究过程的自动化,而且管理效率高,控制准确,精度高。

随着科学的发展,测试手段的改进,植物必需的微量元素被一一发现。现代自动化测试分析仪器的应用,为微量元素、痕量元素的研究提供了先进的测试手段,例如原子吸收分光光度计(AAS)、等离子体发射光谱仪(IPC)和质谱仪(MS)等等。借助这些植物营养研究方法的改进,人们不仅了解了植物必需的大量元素的功能和代谢机理,而且还了解了植物必需的微量元素及其功能,以及它们与酶反应的关系。以往的研究结果大多是在实验室模拟条件下用离体组织试验获得,目前植物营养研究方法已从离体组织转向整株植物的系统研究。

尽管植物营养元素的必需性在19世纪末已被人们所认识,但有半个世纪的时间,植物营养的研究进展不大,直到20世纪50年代借助于同位素示踪技术,植物营养的研究才有较大的进展,这些研究方法有放射性同位素和稳定性同位素示踪技术以及核辐射技术等。特别是放射性同位素示踪技术的应用,促进了离子吸收和运输机理的研究,同时应用酶动力学和载体理论,还阐明了离子吸收的选择性。20世纪60年代美国植物营养学家巴波(Barber)等人应用此方法,阐明土壤中离子向根表移动的机理,大大推动了植物根际微区养分动态的研究。20世纪70年代以来,电子探针、微电极、电子显微镜等新技术的应用,使植物根际微区养分动态的研究向更微观方向深入,研究范围也更广。

植物营养的土壤物理化学方法的研究进展,对土壤养分的供应,促使人们用热力学平衡方法来研究土壤固相离子的吸附和解吸、固定和释放。土壤养分位如石灰位、磷位、钾位等研究,又使人们用能量的概念来论述土壤养分的有效性。众所周知,土壤中不同形态养分总是处在动态平衡之中,因此,近年来更多的植物营养学家,从动力学的观点来研究土壤养分的有效性,并将土壤养分的释放量和释放速率作为研究土壤养分有效性的重要参数。

植物对矿质营养元素的吸收和利用受植物种类、品种的影响,这主要归因于植物营养基因型的差异。因此,可以应用植物生理生化的方法,来研究植物矿质营养基因型差异的机理,增强植物耐低土壤养分的能力,即在施用少量矿质肥料条件下获得高效种质资源,为农作物高产优质高效育种服务,以便在中低产土壤上获得高产、优质的作物新品种。

综上所述,植物营养科学是多学科交叉的科学,它需要土壤学、植物生理学、微生物学、作物科学、分子生物学和环境科学、化学、物理、数学的研究方法进行综合研究。从一定意义上讲,近代植物营养科学的发展史,也是近代植物营养研究方法的发展史,二者是密切联系、相互促进、相互发展的。

二、植物营养研究方法和课程要求

先进而严密、科学的研究方法能推动科学技术的不断发展。只有掌握了相应的研究方法才能保证在最短的时间内,以最高的精确度和可靠性来实现预期的研究任务。植物营养科学的研究方法有生物、化学、物理、数学的研究方法,这些方法相互配合、相辅相成,才使得研究工作不断深入,本书介绍了植物营养学研究方法中最基本的6种方法。

(一)植物营养的培养研究方法

它是在人工控制水分、光照、温度等条件下,采用特殊容器,给予特定营养环境进行植物营养科学的研究。根据模拟的植物生长载体的条件,又可分成土壤模拟培养、砂砾模拟培养、溶

液模拟培养以及其他各种特殊条件的模拟培养,总称为模拟培养试验或培养试验。培养试验的任务是进一步揭示植物营养的实质和机理,确定植物对肥料的反应和肥料中营养元素的功能和作用,它是植物营养研究的基本方法和田间研究的必需补充。

(二)植物营养的田间研究方法

它是在田间自然的土壤、气候条件下进行的生物试验。它的任务是在田间条件下研究植物营养的过程,阐明各种肥料的效应,农作物对肥料的反应,肥料的相互配合,土壤—植物—肥料之间的相互作用机制,不同农作物经济有效的施肥技术,为不同土壤、气候、农业技术条件下选择最佳施肥方案,为合理施肥提供科学依据。植物营养的田间研究以田间试验为主,包括对作物、土壤、气候等试验因素的调查、观察与测试。植物营养科学研究的成果在应用于生产以前,均必须通过田间研究的校验,所以它也是植物营养研究的基本方法。

(三)植物营养研究的生物统计方法

这是植物营养研究中不可缺少的基本方法之一。我们应用误差理论来研究和判别植物营养研究中获得的各种数据,应用方差分析方法来判别植物营养研究中两个数据之间差异的可靠性。方差分析方法可以帮助我们去伪存真,揭示肥料效应的实质。相关分析和回归分析方法是研究两个变量所必备的基本研究方法,它可以帮助我们从定性进入定量的研究,进一步揭示营养元素之间、肥料与产量之间相互变化的数量关系和实质,为植物营养研究和施肥决策提供科学依据。

(四)植物营养的施肥(经验)模型研究方法

科学的施肥是调节植物与环境之间营养物质和能量交换过程的重要手段,也是提高农作物产量、改进品质、保持生态平衡的重要措施。据文献记载,西汉是我国古代施肥技术发展的全盛时期。古代的施肥都是经验施肥,它只强调供给农作物生长和培肥土壤的充足肥料即“肥大水勤”的传统概念,没有认识到施肥的数量化概念和施肥的经济效益。显然这种经验施肥的概念和方法在今天已不再适用了。

近代的科学施肥是以高产、优质、环保、低成本为目标,应用数学方法建立施肥模型、确定获得最大利润的施肥量和不同营养元素的比例才能实现上述目标。因此,近代施肥是高产、品质、环境和经济效益相结合的数量化施肥方法。

植物营养的近代施肥技术从1909年德国土壤学家米切里希(E. A. Mitscherlich)提出的米氏方程建立的施肥模型开始,1927年尼克莱(Niklas)、米勒(Miller)应用一元二次肥料效应函数,通过农作物对肥料的反应建立二次施肥模型来确定最优的施肥量,从而达到高产、优质、环保、低成本的最大经济效益与社会效益。这些研究都给近代施肥技术提供了科学的理论和方法技术。20世纪70年代英国植物营养学家库克(G. W. Cooke)首次提出了近代施肥的4种施肥模型:(a)直线施肥模型;(b)指数递增型施肥模型;(c)一元二次抛物线施肥模型;(d)二元二次反应曲面施肥模型。

植物营养的施肥模型从20世纪60年代开始已经向实际应用发展,并与计算机技术相结合,建立适合于不同土壤、气候和生态条件下的农作物施肥系统。由于这些施肥系统都是在一定的土壤、气候、生态条件下经过多年的生物试验所建立的生物统计模型,统称为施肥模型,为了区别以后发展的理论模型或机理模型,故称为经验模型。20世纪90年代以来一些国家发展的精确(或精准)农业的施肥系统,都是以生物统计模型为主的施肥(经验)模型,因此学习掌握科学施肥常用的几种模型和建模的理论与方法是本学科重要的研究方法之一,也是本专业

大学生和研究生必须选读的内容之一。

(五)植物营养的模拟(机理)模型研究方法

模拟(simulation)研究是应用数学方法对自然界各种规律进行模仿与拟合的动态数量化的研究,由于自然过程的复杂性,早期的模拟研究一直停留在简单的动态过程。德国农业化学家李比希(Justus von Liebig)是植物营养科学中第一个应用一元回归方程 $y = b_0 + b_1x$ 来模拟氮肥(x)与农作物产量(y)之间动态过程的开创者。长期以来植物营养施肥的模拟研究一直停留在实验室基础上,美国普渡大学的 Barber 建立的养分吸收模型,Michaelis-Menten 的养分吸收动力学模型,Epstein 离子运输的动力学模型等,成功推动了植物营养科学理论研究的发展。遗憾的是,这些研究没有与现代计算机技术相结合。近 30 年以来,随着植物营养科学与现代计算机技术的发展,植物营养模拟研究有了较快的发展,代表性成果为:M. Mchroon 和 K. K. Tanji 的氮素在土壤中转化的计算机模拟,R. D. Harter 和 B. B. Foster 的土壤中磷移动的计算机模拟,M. A. Scaif 的作物对营养的吸收及其生长的计算机模拟,荷兰瓦格宁根大学(Wageningen)H. Kenten 和 J. van Wolf 编著的计算机模拟研究的重要参考书《农业生产模型——气候、土壤和作物》(系统介绍了植物营养与施肥技术计算机模拟研究的理论与应用)。

植物营养的模拟(机理)研究方法重点介绍养分在土壤中的迁移模型,植物根系生长与养分吸收模型,养分吸收动力学和主要养分元素吸收动力学模型,养分在植物体内运输与分配模型,田间土壤溶质运移与作物生长模型等。学习和掌握这些方法,使植物营养的研究从形态、定性的研究深入到数量化模拟(机理)模型研究的新阶段。

(六)植物营养的根和根际研究方法

这是植物营养科学研究的重要领域,它的重要性在于,植物的营养物质和能量交换过程主要通过根系和根土界面进行,因此植物营养的过程,实质上就是植物的根际营养过程。尽管近代的科学研究已揭示出植物根外营养的可能性,特别是叶部也可吸收营养元素,但叶部的吸收量明显少于根部的吸收量。在近代植物根际营养研究中,VA 菌根(即内生菌根)的研究是一个十分活跃的领域,借助于各种微区冰冻切片法、微电极法、电子探针法和电子显微镜法等先进的测试技术,已进一步揭示了 VA 菌根与植物的共生理理,VA 菌根的菌丝对土壤中磷、锌等养分的吸收与运输,VA 菌根可提高植物的抗旱性等等。应用放射性同位素自显影法,可以研究植物根际养分的亏缺;借助于化学分析方法,可以研究植物根质外体的自由空间;应用各种特异性荧光探针和显色方法,可以原位直观精细观察植物根系诱导的根际过程的变化,并通过计算机影像分析系统量化根际动态变化的参数。这些均是关于根际研究的基本方法,也是本课程的重要内容。

尽管植物营养研究方法很多,本课程中只要求大学生掌握植物营养科学研究的一些基本方法,即第一章、第二章、第三章的全部方法以及第四章、第五章、第六章的部分方法。其他方法作为大学生、硕士、博士研究生和科研工作者的参考或选修内容,可拓宽视野,了解新的近代研究方法,有利于掌握和促进植物营养科学的发展。本课程是一门科学的方法论,是一门操作技术很严格、规范化很强的技术性课程,因此要求学习本课程时,既要弄通理论,更要掌握操作、运算方法,具备熟练的动手能力。为了实现这个目标,要求每个大学生、研究生能通过课程设计、实验、实习、习题等教学辅助环节,树立辩证唯物主义方法论和理论联系实际的学风,树立实事求是的科学态度和献身科学的良好风尚,为丰富与发展植物营养科学及其方法论而努力。