

福建农业资源 与生态环境发展研究

Fujian Nongye Ziyuan
Yu Shengtai Huanjing Fazhan Yanjiu

罗 涛 王 飞 主 编
林新坚 章明清 范 平 副主编

中国农业科学技术出版社

福建农业资源 与生态环境发展研究

Fujian Nongye Ziyuan
Yu Shengtai Huanjing Fazhan Yanjiu

罗 涛 王 飞 主 编
林新坚 章明清 范 平 副主编

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

福建农业资源与生态环境发展研究 / 罗涛, 王飞主编. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-5116-1385-1

I. ①福… II. ①罗… ②王… III. ①农业资源—研究—
福建省 ②生态环境—可持续发展—研究—福建省
IV. ①F327.57 ②X22

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第225509号

责任编辑 李 雪 胡 博 林树文 林海清

责任校对 贾晓红

出版发行 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82106626 82109707 (编辑室)

(010) 82109704 (发行部) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82100631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张 23.75

字 数 584 千字

版 次 2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价 80.00 元

序 言

土壤生态环境安全与农业和产业可持续发展是现代土壤学的根本任务。万物土中生，食以土为本。土壤不仅是人类生存的基本资源，也是农业发展的重要基础。实际上，土壤肥力是农田最本质的特征，能够提供作物生长所需的养分和水分。科学研究表明，土壤中的养分含量与作物生长之间必须讲求供需平衡，必须注重调节。不注重土壤保育，不注重合理施肥，致使作物减产，品质下降，影响土壤质量，污染环境，不利人类健康和保护生态。很显然，肥沃的农田与洁净的土壤是生产高优农产品的基本保证。农田土壤环境质量的恶化，必然严重危害我国农田生态系统的生物多样性、食物链安全、人类的健康、经济的发展和社会的稳定，也必然影响到我国农业在世界上的地位和命运。探究土壤变化规律，研发土壤保育技术，有效防控环境污染，这无疑是我国人口—资源—环境—经济—社会这个大系统统筹协调和绿色发展的根本保证。

众所周知，农业是以土地、水、能源和生物等自然和环境资源为基础的产业，这些资源的数量与质量状况对农业生产与发展至关重要。中国是一个农业大国，农村人口超 8 亿的农业是我国国民经济的牢固基础。人们充分认识到，随着社会经济的发展，我国农业的转型升级不仅将遇到人口增加、资源紧缺、经济增长的新需求和新挑战，也会受到国际市场与农产品贸易的深刻影响。就世界耕地而言，投资少而质量较高的土壤占总耕地面积的 40%，其余 60% 是低产消耗的类型，其中包括受工业、农药、重金属污染的土壤占一定的比例。专家强调指出，有效保护与合理利用土壤资源是一项长期的战略任务。据相关资料显示：我国土壤资源利用存在的问题是土壤肥力减退，每公顷耕地的作物产量小于 2 250 kg 的低产田占 1/3；土壤退化，侵蚀严重，黄土高原与红壤丘陵地区土壤侵蚀面面积达 5 000 万 hm^2 以上；耕地被侵占，可垦、待垦的宜农耕地已不足 2 000 万 hm^2 。为此，无论是世界还是中国，现代土壤学理论与技术研究所面临的重大任务，重点工作包括加强土壤资源的保护，综合治理与合理开发利用土壤资源。发展趋势表明，2020—2030 年是中国发展的关键时期，占世界 22% 人口的中国要全面实现小康是史无前例的目标！在食物安全方面要满足 13 亿人口的营养与健康，在经济安全方面要保证 13 亿人口的收入增长翻两番，这就要求既要满足全面小康社会所需要的水土资源和能矿资源，又要解决人口与经济快速发展所带来的生态环境问题。例如，相当部分地区水土流失、沙漠化、土壤次生盐渍化虽有治理，但问题仍较为严重。有资料显示，全国水土流失面积达 1.94 亿 hm^2 ，占国土总面积的 20.29%；土地沙漠化继续加

剧,面积已达 1.3 亿 hm^2 ;盐碱地 667 万 hm^2 。与以往相比,我国农业资源仍十分紧张,人均耕地不足 1 067 m^2 (1.6 亩),并呈现逐年减少的趋势,现有耕地中有近一半的土地肥力较差或存在某些障碍因素。根据 1985—1995 年我国耕地地力监测结果显示:中国土壤平均供肥水平即基础地力水平为 50%左右,且氮、磷、钾养分比例失调;而高质量地力的土壤(供肥水平超过 60%)比例偏小,相当部分农田为中低地力的土壤(供肥水平仅达 40%或 30%);除东北地区农田供肥水平稍高之外,其他地区低于或相当于全国平均水平。近 10 多年来,一方面由于中国宜农荒地质量下降;另一方面由于经济建设集中于东部地区和中西部地区的居民点周围和交通沿线,占用优质耕地越来越多,因此,新增耕地与被占用耕地的质量差别越来越大,产出水平相差 1.0~1.5 倍。根据国家土地管理统计资料,1987—1996 年全国新减少耕地 679 万 hm^2 (产粮能力为 600 亿 kg),新增耕地 395 万 hm^2 (产粮能力为 110 亿 kg),两者产粮能力相差 490 亿 kg ,相当于中国目前粮食总产量的 10%。此外,农用水源短缺,特别是北方农用水源严重短缺。许多土壤学家认为,跨世纪的全球战略任务是要着力解决全球及地区性环境及其质量问题。其中包括水、土、气、生等自然环境及其质量,社会经济环境及其质量,人类生存与健康环境及其质量问题等。从土壤学角度看,除了要深入研究土壤自身基本性质及其发生规律外,主要是探索土壤及环境质量命题。具体包括土壤全球变化与环境,土壤圈层与物质循环,土壤生态与环境质量,土地利用与土壤退化,农业土壤与产品质量,种田养地与保护耕作、资源开发与农业利用,土壤肥力与水土保持,土壤污染与优化修复,城乡建设及环境保护等。专家认为,土壤是作物生长与环境科学研究的主体,必须要多学科多专业参与,必须要系统工程理论加以指导。就发展历史分析,20 世纪 50 年代主要是对环境问题进行宏观、定量地描述,60 年代开始对环境的各分支学科进行描述,70—80 年代开始对环境动力系统模拟,人们预测,到 2020 年前将转入对社会环境进行系统性评价,尤其将对土壤与社会环境系统相关性进行深入的研究,力求阐明内在变化与优化调控技术,提升土壤质量与保育水平,为绿色发展与生态保护提供科技支持。

很显然,深入并全面分析中国农业资源与环境目前面临的问题,并切情探索出改善中国农业持续发展与保护生态环境的对策,这无疑是实现中国农业绿色发展与保障粮食安全的迫切需要,也是在农业领域深入贯彻落实科学发展观的重要举措。就理论意义理解,土壤质量是指土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量三个方面的综合体现。它是保障土壤生态安全和资源可持续利用的能力标志,也是现代土壤学的研究核心。通过对土壤质量的时空演变规律:土—气、土—水、土—植的物质交换,红壤、潮土、黑土、水稻土等质量

演变与持续利用研究,最后提出了不同类型与区域的土壤质量指标评价体系,建立土壤质量变化的预警与调控对策。就实践意义认识,就是要通过对环境质量的演变规律、界面过程及环境保护的重建技术的集成研究,力求突破关键环节,优化组合技术,防控面源污染,实现农业资源的循环利用,实现种田养地的有机统一。多年来,许多研究取得了进展,如对我国东南沿海地区、长江三角洲及珠江三角洲的土壤和大气环境变化规律与调控进行的系统研究,对地区污染物的污染过程、机理、土壤重金属、有机污染物、营养盐形成的复合污染及修复与风险评价有了深入了解,并结合区域生产实际,提出了区域环境质量的调控对策。许多研究与实践都为丰富现代土壤学理论与技术体系做出了新的贡献。

就发展趋势分析,专家们认为,今后现代土壤学研究将更加关注土壤质量与生态环境相互关联的系统研究,其重点将集中在五个方面:一是土壤质量的时空变化与发展动态,包括不同时间尺度土壤质量动态变化与内在应变规律、空间分布与重要特点、土壤质量演变与影响因素及发展趋势;二是土壤质量的演变过程与形成机理,包括土壤物理、化学性质应变及交互过程和作用机理,尤其要深入探讨并揭示人为活动对土壤质量演变的影响及反馈机理;三是土壤肥力的指标体系与调控原理,涉及土壤质量的自然与人为指标体系、土壤肥力演变的信息数据库与评价咨询系统的建设、土壤肥力的调控原理研究;四是土壤养分与土壤圈物质循环及环境的交互作用;五是不同类型耕地土壤的持续重建与定向培育。必须指出的是,农田质量与耕地土壤以及合理施肥的科技创新研究应结合绿色发展目标与区域农村产业需求,只有这样才能使土壤环境研究更具实践意义。

就种植产业而言,农业资源与环境科学是研究农业生物生产活动中的基本资源问题及其与生态、环境之间的相互关系,跟踪研究农业自然资源的演化和开发利用过程、格局与调控机理,研究农业资源开发利用的环境影响和开发废弃物资源化技术、环境修复技术;揭示和发现自然资源利用与社会经济发展的相互作用机理、资源流动机制,其对农业生产质量与高优产品开发都是至关重要的。发展农业资源科学和生态环境科学,也一直是农业高优生产与保护资源环境研究领域的研究重要任务和研究重点。而野外长期观测与定位试验是开展农业资源与环境研究的基本手段。通过长期定位试验所提供的土壤质量演变、生态环境变化数据与资料,是科学研究的珍贵资源与基础积累。福建省农业科学院土壤肥料研究所野外台站是由全国化肥网布置的一个长期定位试验点逐步发展起来的,自1983年建站至今已走过30年的历程。从20世纪70~80年代中低产田改良攻关到现今的高标准农田建设,从水稻专用配方肥研发到全省各大作物的专用肥配方提供,从传统的单质肥料到复混肥、稳定性肥料以及水溶

性肥料研发与养分资源高效利用，从绿肥品种选育筛选到分子辅助育种以及综合利用，土壤肥料研究所老中青几代科技人员薪火相传，在台站发展中均留下了辛勤耕耘的足迹。如今，台站已发展形成包括福州市闽侯县、莆田市荔城区、宁德市福安市、漳州市角美区等多个长期定位试验的观测点，形成一站多网的分布格局，涉及的研究领域包括施肥与农产品品质、紫云英与土壤肥力、面源污染、重金属源头控制、耕作轮作制度、生物多样性等。同时，通过野外长期定位试验研究得出的理论成果与配套技术已直接服务于生产，为福建农业农村经济持续发展提供了理论指导与技术支撑。

承前启后、继往开来，土壤肥料和农业资源环境科技工作者应以此为契机，针对国家、社会需求凝练科学问题与目标，持之以恒地开展野外科技研究，为构建高产、优质、高效、生态、安全现代农业做出新的贡献。该书总结了近年来福建省农业科学院土壤肥料研究所在资源环境领域的研究成果，尤其是在长期定位试验研究方面积累了有益经验。相信本书的出版，将对福建土肥技术体系建设与农业资源合理利用以及生态环境有效保护提供参考借鉴，并对深化技术研发起到积极的促进作用。

翁伯琦

2013年8月10日

前 言

土壤是农业生产的基础，也是人类赖以生存的基石，更是世人食物安全与生态环境的保障。长期以来，随着不断发展的工业化、城市化、农业集约化以及社会经济的快速增长，尤其是随着人口、资源、环境与发展之间的矛盾日益突出，我国土壤资源的数量逐渐减少，污染不断加剧，质量继续退化，并出现了土壤侵蚀化、盐碱化、沙质化、酸化及温室气体大量排放等土壤肥力下降与生态环境问题，这些均对我国食物保障、生态保育、环境安全及人体健康带来不良影响。不言而喻，当前我国的农田资源和土壤环境正面临着新的形势与严峻挑战，土壤的地位与重要性正在从农业生产基础向环境安全、资源利用、生态建设及全球变化等方向转变与提升。与此同时，生态学、生物学、物理学、化学、数学及信息科学等学科的发展，为土壤科学与资源利用技术研发，提供了更丰富的理论，更多的方法和更先进的技术手段，必将使土壤科学与肥料技术创新及其应用取得更大突破。因此，我们必须不断提升对土壤变化规律与生态保育重要性的认识，与时俱进地推动土肥科技创新，以更好适应我国未来土壤肥料与资源利用学科的发展。

福建省农业科学院土壤肥料研究所野外台站始于 1983 年全国化肥网布置的福州市闽侯县白沙镇肥料长期定位试验，随后逐渐增加施肥与农产品品质、紫云英品种选育、面源污染、重金属源头控制、耕作轮作制度、生物多样性等定位试验，形成了包括莆田荔城、宁德福安、漳州角美等植物营养与农牧菌废弃物资源化利用长期定位试验在内的野外台站。2009 年福建省科技厅批复成立福建省农业科学红壤肥力与生态环境福州试验站，2011 年遴选进入农业部福建耕地保育科学观测实验站。

2013 年为福建省农业科学院土壤肥料研究所野外台站建站 30 周年。为了便于交流、相互借鉴，共同提高，也为了展示台站 30 年来的相关研究成果，我们组织了有关人员，系统总结了近年来我所在土壤肥料与资源环境领域的研究进展，编写了这本《福建农业资源与生态环境发展研究》，内容包括理论与对策、土壤改良与培肥、植物营养与施肥、土壤环境与治理、农业微生物五个部分，除理论与对策部分为新撰稿外，其余 27 篇为已发表的核心期刊论文（文中已做标注）。

科研成果的取得需要一个漫长的阶段，急功近利是违背科学的，尤其是野外科技工作是一项需要长期坚持的工作。我们希望通过该书的出版，能积极引导青年科技工作者弘扬老一代科技工作者吃苦耐劳、爱岗敬业的优良传统和耐

心严谨的工作作风，扎根农村，甘于寂寞，积极主动与持续有序地开展野外试验研究。

本书在编辑和出版过程中得到多位专家、学者的关心指导，以及各论文作者的配合与支持。对入选论文除格式进行编辑加工外，未对论文进行实质性改动。由于编者水平有限和时间仓促，本书中难免存在错误和不足之处，敬请读者谅解并提出宝贵意见。福建省农业科学院农科出版中心翁志辉主任及中心多名编辑人员为本书的出版做了大量编辑工作。在此，编者向所有关心和支持的专家学者和论文作者表示衷心感谢，并致以崇高的敬意。

本书出版得到了农业部耕地保育重点实验室、福建省农业科学院科技重大专项“福建省农业现代化发展战略研究”的支持，特此感谢！

编 者

2013年8月20日

目 录

第一篇 理论与对策

土壤肥力培育与现代农业发展	翁伯琦 (2)
福建省农业科学院土壤肥料研究所长期定位试验研究及野外台站建设 30 年回顾与展望	王 飞 (11)
福建省主要作物产地环境质量现状与保护对策	罗 涛, 张 青, 王煌平, 等 (18)
福建省绿肥作物发展历史、现状与对策	林新坚, 何春梅, 王 飞, 等 (26)
福建省农作物营养特性与推荐施肥研究进展与展望	章明清, 李 娟, 孔庆波 (38)
农业微生物资源在现代农业生产及生态环境保护的应用	陈济琛, 林陈强, 方 宇 (53)
福建省商品有机肥产业发展前景与对策	李 昱, 林戎斌, 何春梅, 等 (62)
福建省农业面源污染现状、防治对策与研究展望	黄东风, 李卫华, 王利民, 等 (69)
福建省水肥一体化模式及现状	孔庆波 (80)
福建省紫云英研究利用进展	何春梅, 钟少杰, 王 飞, 等 (84)
福建省农业废弃物资源利用现状与展望	罗 涛, 王煌平, 张 青, 等 (92)
福建省耕地土壤质量现状与发展对策	李清华 (100)
福建省冷浸田特性与工程改良利用调研报告	王 飞, 林新坚, 李清华, 等 (104)

第二篇 土壤改良与培肥

Phosphorus Availability and Grain Yield in a Paddy Soil in Response to Long-term Fertilization	Lan Zhongming, Lin Xinjian, Wang Fei, <i>et al.</i> (118)
长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响	王 飞, 林 诚, 李清华, 等 (132)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析	王利民, 邱珊莲, 林新坚, 等 (141)
缺磷对紫云英根系分泌物产生及对难溶性磷活化的影响	兰忠明, 林新坚, 张伟光, 等 (149)
长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒与土壤锌、硼、铜、铁、锰含量的影响	王 飞, 林 诚, 李清华, 等 (162)
长期不同施肥处理对南方黄泥田冬春季杂草群落及其 C、N、P 化学计量的影响	林新坚, 王 飞, 王长方, 等 (171)
施肥模式对茶叶产量、营养累积及茶园土壤肥力的影响	林新坚, 黄东风, 李卫华, 等 (178)

第三篇 植物营养与施肥

Monte Carlo 法在多元肥效模型参数估计和推荐施肥中的应用

- 章明清, 徐志平, 姚宝全, 等 (188)
- 一个改进的土壤铵、磷和钾等温吸附新模型 颜明娟, 章明清, 陈 防, 等 (197)
- 菠菜硝酸盐含量符合安全生产的氮肥用量研究 罗 涛, 王煌平, 张 青, 等 (205)
- 福建早稻测土配方施肥指标体系研究 李 娟, 章明清, 孔庆波, 等 (212)
- 水稻根长增长和养分吸收动态及其模拟模型 章明清, 李 娟, 孔庆波, 等 (222)
- Effects of ^{15}N Labeled Gel-based Controlled Release Fertilizer on Dry Matter
Accumulation and the Nutrient Uptake Efficiency of Corn
..... Ding Hong, Zhang Yushu, Qin Shenjin, *et al.* (232)

第四篇 土壤环境与治理

- 菜地重金属污染的标准值分析与治理对策 罗 涛, 黄东风, 何 盈, 等 (244)
- 福州市郊菜地土壤磷素特征及流失潜能分析 黄东风, 邱孝煊, 李卫华, 等 (251)
- 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响
..... 黄东风, 王 果, 李卫华, 等 (259)
- 菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术 黄东风, 王 果, 李卫华, 等 (270)
- 闽西北农田生态系统中大气氮湿沉降研究 郑祥洲, 张玉树, 丁 洪, 等 (285)
- 小白菜叶内叶绿素和抗氧化系统对砒胁迫的动态响应
..... 蔡顺香, 何 盈, 兰忠明, 等 (292)
- 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N_2O 排放的影响
..... 丁 洪, 王跃思, 秦胜金, 等 (300)
- 闽西北烟—稻轮作系统地表氮、磷流失特征研究 张玉树, 丁 洪, 郑祥洲, 等 (307)
- 除草剂对土壤温室气体排放的影响 丁 洪, 郑祥洲, 雷俊杰, 等 (317)
- 土壤中双氰胺降解及与降解菌的关系 罗 涛, 王煌平, 张晓玲, 等 (323)

第五篇 农业微生物

- Isolation, Structure Elucidation and Apoptosis-inducing Activity of New Compounds
from the Edible Fungus *Lentinus striguellus*
..... Zheng Yongbiao, Baobing, Lu Chunhua, *et al.* (332)
- Effects of Open Drainage Ditch Design on Bacterial and Fungal Communities of Cold
Waterlogged Paddy Soils Qiu Shanlian, Wang MK, Wang Fei, *et al.* (342)
- A Comparison of silver Staining Protocols for Detecting DNA in Polyester-backed
Polyacrylamide Gel Qiu Shanlian, Chen Jichen, Lin Si, *et al.* (355)
- 不同培肥模式对茶园土壤微生物活性和群落结构的影响
..... 林新坚, 林 斯, 邱珊莲 等 (360)

第一篇 理论与对策

土壤肥力培育与现代农业发展

翁伯琦

(福建省农业科学院)

摘 要: 土壤是农业生产的重要基础,也是人类赖以生存的保障,其不仅关系食物安全供应,而且直接影响生态环境。土壤肥力是发展现代农业的重要支撑,其有效的培育涉及多学科与多专业,需要系统创新与联合攻关,如今人们对土壤肥力的认识已经从农业生产向环境安全、资源利用、生态健康及全球变化等方向转变与提升。本文从土肥长期定位研究,土壤肥力培育技术,现代农业发展等方面阐述内在关系及其特点,同时分析了现代土壤学研究领域所面临的重要挑战与发展趋势,并提出若干建议与对策。

关键词: 土壤肥力;培育;长期定位研究;现代农业

Soil fertility cultivation and modern agriculture development

Weng Boqi

(Fujian Academy of Agricultural Sciences)

Abstract: Soil is the important foundation for agricultural production, and the guarantee for human survival. Soil quality is closely related with food safety and the ecological environment. Soil fertility is the support of modern agricultural development, multiple disciplines and research fields are involved in cultivation of soil fertility. Nowadays, people's attitudes on soil fertility change from agricultural production to environmental security, resource exploitation, ecological health and global changes. In this study, the characteristics and inherent link between soil and agriculture were comprehensively presented from the aspects of long-term fertilization trials, soil cultivation techniques, and modern agriculture development. Challenges and prospects in soil research field were analyzed, and several countermeasures were proposed for the researches of soil science.

Key words: soil fertility; cultivation; long-term location experiment; modern agriculture

土壤是植物生长的重要基础,是农业生产的基本资料。土壤肥力作为土壤的本质特性,土壤的概念是和它的肥力分不开的。由于土壤具有肥力,并能不断地提供植物(包括农作物)生长所需的各种营养元素,才能保持农产品产量与质量的稳定与提高,才能维护良好的植被与多样性生态环境。因此,土壤肥力是农业持续发展的重要基础^[1]。深入探讨土壤肥力变化规律,系统研究培肥地力配套技术,有效实现种地养地有机统一,这无疑是现代农业的重要组成部分与必不可少的环节。

1 土肥长期定位研究及其意义

土壤作为植物生长提供的天然载体,不仅可以提供基本养分与植根平台,而且其多样功能具有协调营养和环境有机融合的能力。一般认为肥力的特质是土壤区别于成土母质和其他自然体的最本质的特征,也是土壤作为自然资源和农业生产资料的物质基础。土壤肥力是土壤在自然环境和人为活动共同作用下不断发展形成的,它一直处在不断的发展和变

作者简介:翁伯琦(1957—),男,研究员,主要从事区域生态经济与生态农业技术研究

基金项目:福建科技重大专项(2012NZ0002);“十二五”国家科技支撑计划项目课题(2012BAD14B15)

化过程中,有着较长期的发生和演变特征。就此,要研究土壤肥力的形成与演变规律、养分变化动态等一系列问题,就必须要建立土壤肥料长期定位试验,监测土壤肥力的时空变化规律以及人类活动对土壤肥力变化的生态过程及其动态影响与反馈,其理论与实际意义是显而易见的。

上溯至 19 世纪中叶,西方发达国家就已开始开展土壤肥料长期定位试验研究,迄今为止已有上百年的历史。其中,世界上历史最悠久的长期定位试验站当属 Lawes 1843 年在英国洛桑建立的土壤肥力长期定位试验站 (Rothamsted Experimental Station),至今已延续了 170 年,该站先后设置了 9 个长期肥料定位试验,这些“洛桑的经典试验”为农学、土壤学、植物营养学和生态学与环境科学的发展做出了重要贡献^[2]。其后许多国家都先后布置了长达 50 年以上的长期肥料定位试验,对土壤的养分平衡,作物对肥料的响应,施肥对土壤肥力的影响,轮作施肥制度的建立等土壤保育和合理施肥问题进行长期、系统、历史的定位研究,并作出科学的评价。至今尚在进行的试验包括法国贵格纳国立农业研究所的小麦、甜菜肥料试验 (1875 年),小麦连作肥料试验 (1900 年);美国伊利诺斯州立大学的 Morrow 轮作一肥料试验 (1876 年)、Morrow 磷矿石粉肥料试验 (1876 年);德国哥廷根农业研究所的 E-Field 轮作下的肥料试验 (1873 年)和多年生黑麦草肥料试验 (1873 年),林布尔格罗夫农业研究站的化肥对作物产量及产品质量影响试验 (1938 年)以及芬兰、荷兰、挪威、比利时、奥地利、波兰、捷克等国家的相应试验等。亚洲开始最早且持续至今的试验是日本鸿巣县中央农业试验站的水稻连作肥料试验 (1926 年)^[3]。许多试验总结并阐明的肥力变化规律,为科学施肥与地力培育提供了理论依据及技术措施。

就方法论而言,土壤肥料长期定位试验是一种采用既“长期”又“定位”的方法的试验^[4]。它具有时间的长期性和气候的重复性等特点。而农业生态系统中很多过程进展缓慢,外部环境条件也在不断发生改变,短期试验往往不能揭示这种长期的变化趋势。很显然,长期定位试验是不可代替的研究手段。因为长期定位试验能真实地反映出在当地气候条件下土壤、肥料、农作物、其他农耕措施之间的相互关系,而不受个别年份的特殊气候因子或其他自然灾害干扰的影响。

大量长期试验研究得出一些重要的共性结论^[5~6],化肥和有机肥对作物具有相同和持续的增产效果,连续施用化肥并不影响土壤生产力;在相同施肥条件下,作物轮作较连作可获得较高产量;长期试验中养分的利用率显著高于短期试验,厩肥具有远比想象要长久得多的残效;有机肥在提高土壤有机质和改善土壤养分状况方面的作用显著优于化肥,化肥对提高土壤有机碳、有机氮库有微弱作用。依靠从这些土壤肥料长期定位试验中获得的有力证据,欧洲发达国家和美国,以及其他发达国家在近数 10 年内迅速形成了依靠轮作种植、合理施肥、机械耕作和科学用药为 4 大支柱的现代农业方式,其中,前 2 项的实用性和可靠性便来自长期肥料试验的研究结果^[4]。

英国洛桑的经典长期肥料试验被誉为是全世界的瑰宝。我国借鉴国外经验,从 20 世纪 50 年代开始曾几度布置长期肥料试验,但由于种种原因没能坚持下来。现存的长期肥料试验主要是 20 世纪 70 年代后期建立的,1987 建设的“国家土壤肥力与肥料效益长期监测基地网”是目前保护得最为完整、覆盖面最大、具有网络试验特征的大型长期肥料试验群^[4]。我国长期土壤肥力监测研究目前面临的最大问题是经费不足和队伍不稳定,不少试验正在被迫关闭或处于失管状态。国家应对保护完整的、有代表性的大型长期定位监测研

究平台给予重点支持和保护,使之像英国洛桑试验站和美国的 Morrow 长期试验基地一样,受到国家的高度重视,成为国家科技创新体系重要的基础条件平台。

同时,洛桑试验站的经验还表明,随着科学技术的进步,土壤肥力长期定位试验往往还有着许多预想不到的用途,这些用途甚至超出了试验初期的预想。长期土壤肥力试验以长久固定的土壤管理模式使土壤性质按不同的方向不断地改变,从而形成具有不同肥力性状和生物活性的各种土壤类型^[7]。利用这一类试验,有可能对一些十分复杂或似是而非的问题得以深入地认识并给予科学的评价。

就土壤肥力演变过程而言,要重点关注养分动态变化与迁移过程。有机质的分解、积累,元素的迁移和循环转化,微量温室气体在土壤—大气界面上的交换,土壤生物区系及其生物化学行为的发展变化以及发生于土壤中的其他各种物理的、化学的和生物学的变化过程,统称为土壤过程。透彻地认识土壤中许多基本过程的内在实质,也就掌握了土壤性质发展变化的规律^[7]。土壤肥力长期定位试验永久保存下来的不同时期的土壤样品,为后人追踪观测不同管理模式下土壤的发展变化过程以及了解人类农事活动对这些演变过程的影响提供了宝贵的研究对象。

就地球环境化学行为而言,要深入研究土壤对农业生产的持续影响。随着人类的发展以及文化的进步,人类左右自然的能力越来越大。这一过程全球的变化也随之增大诸如温室效应和全球增暖、化肥和杀虫剂的广泛使用所造成的面源污染等,都对我们的地球生态系统造成严重的影响。而长期土壤肥力试验每年记录作物产量,定期采集土壤及作物样品并长期保存,其试验区既可作为环境变迁历史的监测记录,也可用来研究和分析诸如气候变暖、大气中 CO_2 浓度上升以及化肥、农药施用引起的作物、土壤响应等一系列相关问题的实证对象。特别是现存的一些古老的长期定位试验,正好亲历了第二次和第三次工业革命,成为人类生存环境相对清洁时代和之后环境不断恶化和遭受各种污染时的亲历记录者。显而易见,不同时期采集的土壤样品可以成为我们研究定位站所在区域受到各种人类活动影响的最佳样本。此外,通过比较研究不同时期的作物产量记录、气象记录以及可供分析研究的土壤、植物样品,将有助于研究和预测未来出现各种气候环境变化下农作物可能做出的响应,评估未来农业生产可能受到的影响。

就土壤作物交互作用而言,要深入探讨合理调控技术与有效途径。长期土壤肥力试验的处理设计通常着眼于单一因素比较,例如或着重于肥料,或着重于轮作、耕作。但在漫长的试验过程中时常人为或非人为地引入了其他可影响作物生长和产量的因素,从而提供了研究各因素之间交互影响的机会。例如关于水—肥交互影响,长期肥料试验在固定的肥料处理基础上,曾经历了历史上不同的水文气象年景如丰水年、平水年、少雨干旱年等,从而可利用其丰富资料与数据拓展研究不同水文气象年景表现出各施肥处理不同的产量效应以及水分、养分供给之间的交互影响。专家呼吁,要将土壤与环境质量作为现代土壤学的重要研究内容。其根本原因在于土壤、水、大气及生物等一起构建了密切的地表自然环境,各自发挥应有作用,且又息息相关。在此期间,土壤处于各要素相互作用的交界面,表现出土壤圈是地球圈层面系统中最活跃、最富有活力的集合体之一。可以认为,土壤对于环境净化来说既是源又是汇,在其自净能力范围内能起到较强环保效应,一旦超出其净化能力,将导致土壤污染,进而通过污染物迁移而最终影响人类健康^[8]。

2 土壤肥力培育研究及其进展

土壤退化,特别是土壤肥力退化一直是严重制约农业持续发展的关键因素。据统计,当前世界土壤养分退化总面积为 1.5 亿 hm^2 , 占世界耕地面积 20%。而我国现有耕地中,无限制因素、质量上好的优良耕地占 41.33%,存在不同限制因素、质量中等或偏差的耕地占 58.67%;就生产实践意义划分,全国中低产田面积比例为 71.3%。根据全国土壤普查结果,全国中等含磷和缺磷耕地占统计面积的 80% 以上;含钾中 ($60 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、低 ($<60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 水平的耕地占统计面积的 49%。我国耕地开垦历史悠久,耕地土壤有机质含量普遍不高,全国土壤有机质含量水平分 6 个等级,水田和旱田有机质含量在 3 级及以下水平的分别占统计面积的 71.8% 和 83.03%^[9]。而张福锁等^[10]研究指出,土壤肥力是土壤质量的重要特征,是作物高产稳产的保证,土壤的基础地力越高,作物的产量也就越高。因此培肥地力已经成为农业科技工作者十分关注的焦点。

生产实践表明,长期单施化肥,特别是逐年增施化肥,给农业生产和物质循环带来许多不利影响。长期单施化肥,尤其过量单施氮肥,其明显的不足或者影响集中表现在投资多、效益少;土壤酸化板结、养分协调不畅,作物病虫害增多,生理性病害和病理性病害不断发生,且污染严重。针对这一现状,众多学者提出了施用有机肥来部分代替化肥的解决措施^[11]。有机肥料不仅含有作物需要的大量元素、中量元素和微量元素,同时含有大量有机物质,在保持和提高土壤肥力、改善和活化土壤养分库容、促进水肥协调等方面有着特殊作用。

有机肥对土壤养分的影响是综合性的,土壤有机质含量是反映土壤肥力的重要指标之一,在培肥地力、改善作物品质及食品风味、提高农产品国际市场竞争力等方面具有重要作用。腐殖质是土壤有机质的主体,对于土壤中养分的积蓄、良好结构的形成以及土壤中有害物质毒性的消除等均具有重大的意义。施用有机肥和有机无机配施能够增加松结态、稳结态、紧结态腐殖质的总量,提高松/紧比值,而这也正是有机肥能够培肥土壤的重要原因之一^[12]。对此很多学者的研究都指出有机培肥措施不仅能够有效增加土壤氮、磷、钾养分有效性^[13~14],而且对于表层土壤 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 有效养分的增加尤为显著^[15]。

有机肥对土壤结构的影响是综合作用的结果,其诱因是多方面的。研究结果表明,有机肥的施用可增强土壤的保水性和固氮能力,有利于水肥的耦合;增加土壤有机 C、非水稳性团聚体、水稳性团聚体的含量,有效地提高土壤团聚体的稳定性,改良土壤结构。陈茜等^[16]、廖敏等^[17]的研究表明,长期施用有机肥有利于大团聚体的形成和保持,提高大团聚体内微团聚体间有机 C 含量,减缓有机物的分解,使外层的大团聚体更加稳定,有助于有机 C 的累积。龚伟等^[18]研究表明,有机肥有利于增加土壤微团聚体的团聚度,使不同粒级微团聚体的比例更趋合理,进而提高土壤水肥调控能力和土壤肥力水平。还有研究认为,施用有机肥后土壤容重降低,致使有效水分、导热率和气体比例得到改善,促进作物生长发育^[19]。

化学肥料优化平衡施用的效果较为明显。有研究认为,化肥持续大量施用造成近年来土壤肥力下降很快、农产品品质变差、生态环境恶化。究其原因除了贪求便捷及单纯追求产量轻视有机肥的投入以外,施用化肥配比不当亦是重要的一个方面。据有关资料统计^[20],我国氮磷钾适宜的比例应是 $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O}$ 为 $1 : (0.4 \sim 0.45) : (0.25 \sim 0.3)$,

而目前我国施用化肥比例 $N:P_2O_5:K_2O$ 为 $1:0.31:0.011$, 显然磷钾不足, 严重失调。平衡施肥是目前普遍提倡的科学施肥方法, 传统的平衡施肥主要目的是提高作物产量, 主要方法是根据目标产量模型和函数模型施肥, 如近年影响较大的“3414”试验体系^[21], 为我国的粮食增产, 农民增收做出了重大贡献。推广平衡施肥, 除了作物产量与品质之外, 还要关注施肥对土壤生态系统其他因素产生的影响。陈建国^[22]在南方缺磷水稻田上的试验表明, 平衡施肥能够提高土壤肥力, 和不施磷肥和过量施磷处理相比明显增加土壤有机质含量, 显著提高土壤微生物生物量。而王伯仁等^[23]和林新坚等^[24]的研究也都指出, 平衡施肥在提高作物产量及其施肥效益的同时, 还有利于保持和提高红壤旱地的土壤肥力。在增施有机肥的基础上, 科学施用化学肥料, 可以改善耕地养分失调, 同时有利于优化土壤理化性状。增施有机肥, 适当减少化学肥料用量, 改善有机养分与无机养分之间的不平衡; 根据土壤养分状况与作物品种, 推广测土配方施肥, 注意不同地区、不同土壤特点, 并针对作物需求, 提出不同的 N、P、K 比例, 适当控制氮肥, 优化磷肥用量, 加大钾肥的施用量。

优化耕作制度有利于种地养地的有机结合。近十几年在生产实践总结出保护性耕作法是一个成功范例。保护性耕作又称“免耕法”, 专家们将之定义为“以保持水土为中心, 通过对地表进行少耕、免耕、保留作物秸秆残茬覆盖度、合理的种植结构等综合配套设施, 并用作物秸秆覆盖裸露地表, 进而减少风力和水力对农田耕作土壤的侵蚀, 提高土壤肥力和保水能力改善土壤结构的一种新型农业耕作方式”^[25]。大量的研究表明, 保护性耕作减少了土壤的翻动, 加上秸秆覆盖作用, 可以有效地控制土壤侵蚀, 减少水土流失^[26]。除了控制土壤侵蚀, 减少水土流失外, 保护性耕作技术还有利于土壤理化性质的改善, 进而对土壤肥力的提升起到积极的作用。朱文珊^[27]等的研究表明, 免耕土壤的孔隙分布较合理, 在全生育期内都能保持稳定的土壤孔隙度, 且土壤同一孔隙孔径变化小, 连续性强, 有利于土壤上下层的水流运动和气体交换。李登航同时还指出保护性耕作提高了土壤的容重, 使得土壤结构稳定性有所提高^[28]。免耕还可以显著改善土壤化学性状, 土壤有机碳显著提高^[29~30], 同时可提高土壤表层的 N、P 和 K 含量, 但下层土壤变化不大^[31]。此外, 免耕还可增加土壤生物和微生物数量和活性^[32]。由此可见, 实施保护性耕作措施改良了土壤物理结构, 提高了土壤养分水平, 使得土壤团粒稳定, 增加了水分入渗量, 从而减少了径流和土壤流失, 有效提高了土壤肥力。

近年来, 随着农村劳动力的大量转移, 以农户家庭为单元的家畜养殖存栏量的逐渐减少, 导致农民的有机肥积造量急剧下降。如何充分挖掘和利用农业生态系统中的有机肥源, 合理循环使用有机物质已成为了实现有机—无机肥配合施用的物质基础和前提。

在如今小户耕作与经营的条件下, 专家们倡导要大力推广作物秸秆直接还田。事实上, 作物秸秆还田是土壤有机培肥的主要措施之一, 但长期以来, 农学界历来认为, 作物残体等有机物只有充分腐解才易施入土壤, 而今现代农业为直接向土壤施用非腐解作物残体提供了技术条件^[33]。同时, 作物秸秆直接还田还具有低成本、省劳力、来源广等一系列优点, 因此从 20 世纪 80 年代以来, 作物秸秆直接还田培肥土壤的耕作措施就在不断发展。农作物的秸秆含有相当数量的碳、氮、磷、钾等营养元素, 秸秆直接还田必然增加土壤中相应养分的储量。同时, 作物秸秆的施用还能有效减少化学肥料损失。孙星等^[34]发现, 长期采用秸秆还田这一措施能够明显改善了土壤的养分状况, 在红壤性水稻土采用秸