

红壤

双季稻田

施肥与可持续利用

高菊生 徐明岗 黄 晶 等 著



科学出版社

红壤双季稻田 施肥与可持续利用

高菊生 徐明岗 黄 晶 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了中国农业科学院红壤实验站水稻综合因子长期定位试验、阴离子长期定位试验的研究成果。主要内容有：施肥对土壤理化及生物学性状的影响，水稻生长及农艺性状对土壤肥力的响应，培肥地力与维持水稻高产稳产的施肥模式，提高水稻品质的肥料类型筛选，不同施肥类型引起的生态环境效应分析。本书为红壤地区农业可持续发展、稻田可持续利用培肥提供了科学依据。

本书可供作物栽培学、土壤学、植物营养学、生态学等专业的科技工作者和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

红壤双季稻田施肥与可持续利用/高菊生等著. —北京：科学出版社，2016. 12

ISBN 978-7-03-051064-8

I. ①红… II. ①高… III. ①红壤—双季稻—施肥 IV. ①S511.406

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 296080 号

责任编辑：王海光 王 好 / 责任校对：李 影

责任印制：张 伟 / 封面设计：北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本：B5 (720×1000)

2016 年 12 月第一次印刷 印张：9 3/4

字数：200 000

定价：118.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

《红壤双季稻田施肥与可持续利用》

著者名单

高菊生 徐明岗 黄 晶 刘立生 张会民 文石林
李冬初 王伯仁 邹长明 孙 楠 曾希柏 董春华
曹卫东 申华平 张晓霞 沈 浦 刘淑军 蔡泽江
张 璐 秦 琳 侯晓娟 郭永礼 黄明英 孟繁华

作者简介



高菊生 男，汉族，中共党员，大学文化。1963 年 12 月生，湖南省祁阳县人，高级农艺师。中国耕作学会理事，湖南省土壤有机质提升补贴项目技术专家组成员，祁阳县第八届政协委员，祁阳县第十七届人大代表。主要从事水稻长期定位试验、红壤生土熟化过程长期定位试验、耕作制度、草山草坡改良研究、红壤退化恢复与重建等研究和农业技术推广。近 10 年来，主持了两项国家重大科研课题公益性行业（农业）科研专项“湘南桂北绿肥作物种质资源创新和应用技术研究及示范”（201103005-01-06）和“粮食主产区土壤肥力演变与培肥技术研究示范”

（201203030-07-05），参加国家高技术研究发展计划（863 计划）专题“红壤旱地肥力退化与复合调理技术”、国家科技支撑计划“中南贫瘠红壤与水稻土地力提升关键技术模式研究与示范”（2006BAD05B09）、“十二五”国家科技支撑计划“湖南中低产稻田有机质提升及淹育瘠薄稻田定向培育技术”（2012BAD05B05-6）等课题 10 项。曾先后在《土壤学报》《生态学报》《中国农业科学》《中国水稻科学》等国内核心刊物发表论文 116 篇，其中作为第一作者或通讯作者 48 篇。主编《刘更另与红壤地区农业发展》一部，参编《农田土壤培肥》等专著 6 部，获得国家级、省部级科技成果奖 16 项。获得国家发明专利 6 项。

前 言

“万物土中生，万物土中长”。土壤是生态系统的重要组成部分，土壤质量好对生态系统质量、人类生命健康与安全和整个社会的稳定与发展具有战略性意义。

土壤肥力是土壤最基本的本质特性。由于土壤具有肥力，才能不断地为作物提供生长所必须的各种土壤环境要素，保持农产品的产量与质量的稳定与提高，因此，提高和保持土壤肥力是农业可持续发展的重要基础。

长期定位试验可以定向培育土壤质量，在研究土壤肥力演化、施肥与环境的关系及土壤生物地球化学循环过程等方面有重要价值。土壤肥料长期定位试验既“长期”又“定位”。它具有时间的长期性和气候重复性，可以回答短期试验无法回答的问题。信息量丰富、准确可靠、解释能力强，能为农业发展提供决策依据，所以它具有常规实验不可比拟的优点。

利用长期定位，可对土壤中养分的平衡、作物对肥料的响应、施肥对土壤肥力的影响、轮作制度的建立等土壤和合理施肥问题进行长期、历史、定位的研究，并作出科学评价。美国和欧洲一些发达国家的四大农业支柱，即单一种植、化肥、机械和农药，其中前两项的实用性和可靠性即来自长期肥料试验的研究结果。

水稻是我国种植面积最大的粮食作物，其产量高低直接影响我国粮食安全和社会稳定。水稻土是我国耕地中面积最大的土类，总面积近 3000 万 hm^2 ，占我国耕地面积的 21.6%。南方双季稻区水稻种植面积为 1549.83 万 hm^2 ，产量为 9631.6 万 t，分别占全国水稻种植面积和产量的 51.6% 和 48%。红壤地区水田占耕地面积的 80% 以上，生产的粮食占 90%，在粮食生产中居重要地位。

本书是基于已故刘更另院士分别于 1975 年、1982 年布置的稻田长期定位试验为研究平台，以试验开始以来稻田施肥长期定位研究成果为基础，对多年研究成果的系统总结，系统论述了长期施用氯离子肥料和硫酸根肥料和长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤肥力的影响。全书分四篇，共十五章。第一篇对红壤双季稻田施肥与利用现状、面临的生产问题等农业生产概况进行了介绍。第二篇系统总结了长期施用有机无机肥红壤双季稻田土壤肥力演变特征，其中第二章介绍了红壤双季稻田长期施用有机无机肥定位试验概况；第三章探讨了长期施用有机无机肥红壤双季稻田土壤有机碳演变规律；第四章、第五章和第六章分别讨论了长期施用有机无机肥红壤双季稻田土壤氮、磷、钾变化规律；第七章重点讨论长期施用有机无机肥红壤双季稻田生物多样性演变规律；第八章和第九章分别探讨了长期施用有机无机肥红壤双季稻水稻养分吸收及生长发育的变化和水稻产量变

化特征及其驱动因素。第三篇系统总结了长期施用氯离子和硫酸根离子肥料红壤双季稻田土壤肥力演变规律，其中第十章介绍了红壤双季稻田氯离子和硫酸根肥料长期定位试验概况；第十一章重点讨论了长期施用氯离子和硫酸根肥料红壤双季稻田土壤有机质及氮、磷、钾养分演变规律；第十二章探讨了长期施用氯离子和硫酸根肥料红壤双季稻田土壤氯、硫养分等演变特征；第十三章探讨了长期施用氯离子和硫酸根肥料红壤双季稻田生物多样性演变规律；第十四章讨论了长期施用氯离子和硫酸根肥料红壤双季稻田水稻养分吸收利用及产量的变化。第四篇即第十五章总结提出了红壤双季稻田可持续利用的施肥技术模式。全书由高菊生、黄晶、刘立生和张会民等撰写和反复修改，最后由徐明岗统稿和定稿。

本书在编写过程中，得到了许多专家的指导和支持，在此表示衷心感谢！本书的出版还要感谢国家公益性行业（农业）科研专项（201103005、201203030）的大力支持！由于著者水平有限，加上时间仓促，不妥之处，敬请批评指正！

著 者

2016年6月18日

目 录

第一篇 红壤双季稻田农业生产概况

第一章 红壤双季稻田农业生产现状及问题	3
第一节 红壤双季稻田施肥与利用现状	3
一、红壤双季稻田概述	3
二、红壤双季稻田施肥模式与利用现状	4
第二节 红壤双季稻田面临的生产问题	5
一、施肥与水稻产量	5
二、施肥与土壤地力	6
三、施肥与自然环境	7
第三节 长期施肥定位试验的作用与意义	8

第二篇 长期施用有机无机肥红壤双季稻田土壤肥力演变

第二章 红壤双季稻田有机无机肥长期试验概况	13
第三章 土壤有机碳演变规律	15
第一节 总有机碳及颗粒有机碳	16
一、土壤总有机碳演变特征	16
二、土壤颗粒有机碳含量及演变特征	18
第二节 红壤稻田有机碳投入与固碳潜力	22
第三节 有机碳组分变化特征	23
一、土壤各有机碳组分变化特征及各组分之间的相互关系	23
二、土壤各有机碳与土壤理化性质和稻谷产量的相互关系	25
第四节 小结	26
第四章 土壤氮养分演变特征	27
第一节 土壤全氮演变特征	27
第二节 土壤碱解氮演变特征	28
第三节 土壤矿物氮变化特征	29
一、长期有机无机肥配施稻田土壤氮矿化参数	31
二、长期有机无机肥配施稻田土壤氮矿化参数的演变特征	31
三、长期有机无机肥配施稻田土壤氮矿化参数与土壤养分及产量的相关性	32

第四节 小结	34
第五章 土壤磷养分变化特征	35
第一节 土壤全磷演变特征	35
第二节 土壤有效磷及磷活化系数演变特征	36
第三节 土壤无机磷组分演变特征	38
一、长期有机无机肥配施下土壤无机磷组分含量变化	38
二、长期有机无机肥配施下土壤无机磷组分占比变化	40
三、长期有机无机肥配施下土壤无机磷组分与有效磷关系	42
第四节 土壤磷表观平衡	42
第五节 小结	44
第六章 土壤钾养分变化特征	46
第一节 长期施肥土壤缓效钾的变化	46
第二节 长期施肥土壤速效钾的变化	47
第三节 长期施肥土壤钾表观平衡	47
第四节 小结	48
第七章 稻田生物多样性演变规律	49
第一节 红壤稻田微生物学特征	49
一、土壤微生物碳、氮、磷变化规律	49
二、施肥对土壤酶活性的影响	51
三、施肥对微生物种群与数量的影响	55
第二节 红壤稻田杂草群落特征	58
一、有机无机肥配施对稻田杂草种类数量和优势杂草的影响	58
二、有机无机肥配施对杂草种类与密度的影响	59
三、有机无机肥配施对稻田杂草干物质质量的影响	59
第三节 长期施肥土壤理化性质与生物性状的关系	63
一、微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷与土壤理化性质的关系	63
二、酶活性与土壤理化性质间的关系	64
三、土壤可培养微生物数量与土壤理化性质间的关系	65
四、长期不同施肥后土壤有效养分及 pH 与杂草生长的关系	65
第四节 小结	67
第八章 施肥对水稻养分吸收利用及生长发育的影响	68
第一节 施肥对水稻生长的影响	68
一、长期有机无机肥配施对水稻病虫害的影响	68
二、长期有机无机肥配施对水稻生育期的影响	68
第二节 长期施肥对水稻农艺性状的影响	69
一、长期施肥对水稻分蘖的影响	69

二、长期施肥对水稻株高的影响	70
三、长期施肥对水稻产量构成因子的影响	71
第三节 小结	72
第九章 水稻产量及驱动因素	73
第一节 长期施肥对稻谷产量的影响	74
第二节 长期施肥对稻草产量的影响	77
第三节 稻谷产量对不同施肥的响应关系	77
一、有机无机肥对稻谷产量的增产贡献率	77
二、有机无机肥配施下稻谷产量对氮磷钾的响应关系	78
第四节 小结	81
第三篇 长期施用氯离子和硫酸根肥料红壤双季稻田土壤肥力演变	
第十章 红壤双季稻田氯离子和硫酸根肥料长期试验概况	85
第十一章 长期施用含硫与含氯化肥土壤有机质及氮磷钾养分演变规律	86
第一节 土壤有机质变化及剖面分布	86
一、施用含硫与含氯化肥土壤有机质变化特征	86
二、施用含硫与含氯化肥土壤有机质剖面分布	86
第二节 土壤氮元素变化及剖面分布	87
一、施用含硫与含氯化肥土壤全氮变化特征及剖面分布	87
二、施用含硫与含氯化肥土壤碱解氮变化特征及剖面分布	88
三、施用含硫与含氯化肥水稻生育期间土壤碱解氮动态变化	89
第三节 土壤磷元素变化及剖面分布	90
一、施用含硫与含氯化肥土壤全磷变化特征及剖面分布	90
二、施用含硫与含氯化肥土壤有效磷变化特征	90
第四节 土壤全钾演变特征	92
一、施用含硫与含氯化肥土壤全钾变化特征	92
二、施用含硫与含氯化肥土壤速效钾变化特征	92
第十二章 长期施用氯离子和硫酸根肥料土壤氯、硫养分等演变特征	94
第一节 土壤氯离子变化	94
一、长期施用含氯肥料后稻田土壤氯积累	94
二、长期施用含氯肥料后稻田土壤 Cl^- 剖面分布状况	95
三、长期施用含氯肥料水稻生育期土壤 Cl^- 动态变化	95
第二节 土壤硫变化特征	96
一、长期施用含硫肥料后稻田土壤硫积累	96
二、长期施用含硫肥料 23 年后土壤剖面分布状况	98

三、长期施用含硫肥料后水稻生育期土壤 SO_4^{2-} -S 动态变化	98
第三节 长期施用含硫和含氯肥料对土壤 pH 及 Eh 的影响	99
第十三章 长期施用氯离子和硫酸根肥料稻田生物多样性演变规律	101
第一节 施用含硫与含氯化肥对稻田杂草多样性的影响	101
一、施用含硫与含氯化肥 34 年后水稻生育期间稻田杂草种类变化 ...	101
二、施用含硫与含氯化肥 34 年后对水稻生育期间稻田杂草总干重的影响	101
第二节 施用含硫与含氯化肥后水稻生育期间稻田浮萍的生长量情况	102
第十四章 长期施用氯离子和硫酸根肥料对水稻养分吸收利用及产量的影响 ...	103
第一节 不同施肥对水稻病虫害的影响	103
第二节 不同施肥作物的养分吸收	104
一、长期施用含硫和含氯肥料水稻对微量元素吸收的影响	104
二、长期施用含硫和含氯肥料对水稻氮吸收的影响	107
三、长期施用含硫和含氯肥料对水稻磷吸收的影响	109
四、长期施用含硫和含氯肥料对水稻钾吸收的影响	111
五、长期施用含硫和含氯肥料对水稻硫吸收的影响	113
六、长期施用含硫和含氯肥料对水稻氯吸收的影响	114
第三节 不同施肥下水稻农艺性状的变化	115
一、长期施肥对水稻分蘖的影响	115
二、长期施肥对水稻株高的影响	116
三、长期施肥对水稻产量构成因子的影响	117
四、施用含硫与含氯化肥 34 年后对水稻品质的影响	118
第四节 不同施肥对水稻产量的影响	119
一、长期施用含硫和含氯肥料对稻谷产量的影响	119
二、长期施用含硫和含氯肥料对稻草产量的影响	120
三、长期施用含硫和含氯肥料水稻产量与其驱动因子的响应关系	120

第四篇 双季稻田可持续利用施肥技术模式

第十五章 红壤双季稻田可持续利用的施肥技术	125
第一节 培肥地力与维持水稻高产稳产的施肥模式	125
第二节 提高水稻品质的肥料类别筛选	128
第三节 不同施肥的生态环境效应分析与可持续技术模式	130
第四节 小结	132

参考文献	134
------------	-----

第一篇 红壤双季稻田农业生产概况

第一章 红壤双季稻田农业生产现状及问题

第一节 红壤双季稻田施肥与利用现状

一、红壤双季稻田概述

水稻是我国种植面积最大、单产最高、总产最多的作物，1961~2013年，中国水稻年均种植面积 3185.7 万 hm^2 ，占我国粮食作物年均种植面积的 35.0%；平均单产 4938 kg/hm^2 ；平均总产 1.56 亿 t，占我国粮食总产的 48.4%，在我国粮食生产中占有极其重要的地位。根据稻作制度的不同，我国水稻可分为单季稻和双季稻，其种植区域取决于种植区的农业气候资源。水稻属喜温好湿的短日照作物，影响水稻分布和分区的主要生态因子有：①热量资源，一般 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2000~4500 $^\circ\text{C}$ 的地方适于种单季稻， $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4500~7000 $^\circ\text{C}$ 的地方适于种双季稻， $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 5300 $^\circ\text{C}$ 是双季稻的安全界限， $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 7000 $^\circ\text{C}$ 以上的地方可以种三季稻；②水分，影响水稻布局，体现在“以水定稻”的原则；③日照时数，影响水稻品种分布和生产能力；④海拔的变化，通过气温变化影响水稻的分布；⑤良好的水稻土壤应具有较高的保水、保肥能力，还应具有一定的渗透性，酸碱度接近中性。因此，我国双季稻主要分为两大区域。第一，华南双季稻稻作区，位于南岭以南，我国最南部，包括南岭以南的广东、广西、福建、海南和台湾等五省区。本区属于热带和亚热带湿润区，水热资源丰富，生长期长，复种指数大，是我国以籼稻为主的双季稻产区。海南等低纬度地区有三季稻的栽培。本区水稻种植面积占全国水稻种植总面积的 17.6%。第二，长江流域双季稻区。包括南岭以北、秦岭-淮河以南的江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、上海等省市和豫南、陕南等地区。本区地处亚热带，热量比较丰富，土壤肥沃，降水丰沛，河网湖泊密布，灌溉方便，历年来水稻种植面积和产量分别占全国水稻种植总面积和总产量的 2/3 左右，是我国最大的水稻产区。本区以长江三角洲、里下河平原、皖中平原、鄱阳湖平原、赣中丘陵、洞庭湖平原、湘中丘陵、江汉平原及成都平原等最为集中。长江以南地区大多种植双季稻，长江以北地区大多实行单季稻与其他农作物轮作。20 世纪 70 年代中期以来，我国双季稻种植面积占全国水稻种植总面积的比例持续下降，从当时的 71%下降到近年的 40%左右。2011 年南方双季稻区水稻种植面积为 1549.83 万 hm^2 ，产量为 9631.6 万 t，分别占全国水稻种植总面积和总产量的 51.6%和 48%。虽然近

30 年来全国双季稻的种植总面积总体呈现逐年减少的趋势，但海南、广西、江西、湖南红壤双季稻集中度指数上升，这说明红壤双季稻种植集中度高，在粮食作物生产中具有一定的比较优势。

二、红壤双季稻田施肥模式与利用现状

水稻是我国种植面积最大的粮食作物，其产量高低直接影响到我国粮食安全和社会稳定。长期以来，为提高水稻产量，人们一直将施肥作为水稻生产最重要的物化技术措施。红壤地区水稻田占耕地面积的 80% 以上，在粮食生产中居重要地位。自 20 世纪 80 年代以来，由于各地重化肥、轻有机肥，有机肥用量逐年减少，致使肥料经济效益下降，土壤肥力恶变。以湖南省为例，1995~2003 年湖南省化肥投入 [氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 总养分投入量] 以平均每年 2.49 万 t 的速度递增。其中，纯 N 施用量以 0.91 万 t/a 的速度增长，主要以复合肥的形式增长，而单养分肥料总 N 量维持在较为稳定的水平。2003 年湖南省总养分施用量达 188.3 万 t，折合 415.8 kg/hm^2 ，纯 N 为 111.5 万 t，折合 215.5 kg N/hm^2 。与全国各地化肥施用量比较，施用的化肥总养分已处于较高水平，高出全国平均水平 314.3 kg/hm^2 (李家康等，2001)。据统计，湖南省主要类型土壤的有机质含量由 20 世纪 80 年代初的 31.7 g/kg 降到了 1992 年的 28.1 g/kg 。土壤监测资料表明，长期施用化肥导致土壤板结、酸化、有机质下降，造成土壤养分不平衡、增产效果不明显、化肥效率下降，同时对环境产生严重污染，农产品品质下降。湖南省邵东县土肥站对双季稻田土壤肥力进行了监测，结果表明，1994~2004 年，土壤养分平衡遭到破坏，土壤有机质含量减少，土壤 pH 降低而土壤碱解氮、有效磷、速效钾等含量增加 (湖南省土壤肥料学会，2006)。

我国传统农业十分重视有机肥的使用，有机肥具有促进作物增产、改善品质、提升土壤质量等作用，但存在肥效慢、养分含量低、施用量大、费劳力及增产效果差等缺点。而化学肥料虽然有增产快、养分高、用量少等优点，但由于人们过度施用，已造成粮食生产成本低、土壤质量退化、农业面源污染严重等问题。因此，如何合理施肥，提高作物产量，维持和提高土壤肥力，是人们长期以来关注的问题。有关长期不同施肥措施，尤其是长期有机肥和化肥配施对农作物产量、土壤肥力的影响，国内外学者已做了大量研究，研究表明，有机肥或有机无机肥配合的长期施用能够较好地维持和提高农作物产量及土壤肥力；硫 (S) 和氯 (Cl) 是植物必需的营养元素，在植物体内的生理功能极为重要。它们都以阴离子形态被作物所吸收利用 (曾希柏和刘更另，2000)。Cl 作为植物 16 种必需营养元素之一，直到 1954 年才被 T. C. Broyer 所确认 (宁运旺等，2001)。长期以来，人们对含氯肥料 (NH_4Cl 与 KCl) 施用抱有疑惧。因为它不但对一些作物 (如烟草、甜菜、果树等) 产生明显的危害，而且大田作物缺氯的情况也很少发生。日本在湿

润地区连续 13 年施用氯化铵不仅肥效稳定,而且 52 个试验中有 46 种土壤无氯残留,另外 6 种土壤氯残留量也仅占当季施氯量的 4%~5%,美国和印度的很多含氯肥料试验也证实氯化铵的肥效等于或好于硫酸铵,氯在土壤中的残留可以忽略不计。硫是蛋白质和氨基酸的重要组成部分,在含硫氨基酸的合成过程中,硫和氮居于同等重要的位置,不仅如此,硫还是一些生物代谢物质的组成部分,在植物体内的新陈代谢中起着不可替代的作用,由于硫在生物体内的极端重要性,有人证明硫是排在氮、磷、钾之后的第四营养元素(刘更另等,1989)。在长期淹水的土壤中,含有大量硫化铁和其他硫化物,如果土壤氧化还原电位(Eh)值极低又缺铁,形成过多的 S^{2+} ,则会对水稻根系产生毒害(陈铭,1991)。各国的经验表明,通过肥料的长期定位试验,可以揭示土壤-作物体系中养分的循环和平衡,寻求出维持和提高土壤肥力的最佳途径。只有通过长期定位试验,才能对连续施肥过程中土壤养分的消耗或累积情况及气象因子对肥效的影响规律进行研究,因此,长期定位试验是建立有效施肥系统的重要方法。

第二节 红壤双季稻田面临的生产问题

一、施肥与水稻产量

由于土壤资源有限和退化,粮食安全是 21 世纪面临的一个日益严峻的问题。对于我国等发展中国家而言,仍然要优先满足粮食需求。随着人口数量的增加,预计到 2030 年我国水稻产量需在现有的基础上增加 20%才能满足人们的需求(程式华和胡培松,2008)。因此,水稻生产对于解决粮食自给、保证广大农民的收益及确保我国粮食安全具有重要意义。一般认为,有三种方式可以提高水稻产量,即扩大耕地面积、提高复种指数和提高单产。然而,受耕地不断减少、土地流转的非粮化、林业对种植业冲击的影响,我国粮食种植规模总体趋于减小的局面难以扭转。复种指数整体上呈下降趋势,在一些经济发达地区下降趋势尤为严重。所以提高单产是增加水稻产量切实可行的途径。国内外的实践已经证明,在所有增产因子中只有施肥与粮食产量呈直线相关关系(曹志洪等,1998)。在我国,施肥对粮食增产的贡献率已达到 50%以上(沈善敏等,1998)。许多研究表明,化肥只有氮、磷、钾平衡施用,才能获得高产、稳产的效果,氮、磷、钾缺失不利于稻田生产力的提高。但随着化学肥料的长期施用及肥料用量的增加,水稻产量并不是呈持续增加趋势。Ladha 等(2003)分析了印度恒河平原和我国的稻-麦轮作长期定位施肥试验中化肥处理下作物产量的变化趋势,结果显示,有 85%的试验点水稻产量稳定,6%的试验点水稻产量则呈显著下降趋势。而化肥与有机肥配合可进一步提高产量。有机无机肥配合施用、化肥单施和有机肥单施,其早稻产量分别比对照提高 68.6%、68.1%和 60.0%,晚稻分别比对照提高 72.0%、69.6%和

34.2% (李菊梅等, 2005)。

合理施肥虽然可以确保作物增产, 但长期施用同一种肥料, 水稻的生产力并不会始终保持持续增长的趋势, 基于长期定位试验产量变化趋势的研究已经受到越来越多的关注。不同施肥措施对水稻产量的变化趋势影响不同。国内外很多长期定位施肥试验的研究结果表明, 长期有机肥处理, 水稻产量变化趋势是上升的, 虽然施用化肥水稻产量在试验早期明显高于施用厩肥, 但试验后期通常有机肥处理水稻产量会达到或超过化肥水平。多数试验点的有机无机肥配合施用水稻产量呈上升趋势, 氮磷钾化肥平衡施用的试验点水稻产量平稳, 不施肥或化肥偏施的试验点水稻产量多数呈显著下降趋势 (Yadav et al., 2000; 黄欠如等, 2006)。水稻产量的变化受很多因素的影响。Sainio 等 (2009) 的研究表明, 品种的改进和施肥等技术的提高是产量上升的主要原因。但同一作物品种的产量在不同施肥制度下也会表现出不同的年际波动。年度之间的生产力 (生物量与籽粒产量) 变异系数, 表示的是年度之间产量变异程度和稳定状况, 反映了农田生态系统对气候变化的适应能力。国内外对不同施肥方式下作物稳产性的报道很多, 很多研究表明, 在不同的施肥方式下, 化肥配施有机肥作物产量变异最小, 更有效地提高了产量的稳定性。磷肥对双季稻生产的稳定性有十分重要的作用, 施磷肥是降低红壤稻田早稻产量波动、提高稳产性能最重要的条件 (王凯荣等, 2004)。由此可见, 合理施肥是保证红壤地区双季稻高产和稳产的重要农田管理措施。

二、施肥与土壤地力

粮食生产的持续发展是人类生存的基础, 而土壤地力的稳定和改善是粮食生产持续发展的关键。利用有机肥料培肥土壤是我国农业的特色之一, 自 20 世纪 80 年代以来, 我国化肥施用量快速增加, 而有机肥用量逐渐减少, 施用化肥成为最主要的粮食增产措施。合理施肥, 不仅能为作物生长创造养分储量丰富、有效性高、储供协调的土壤生态环境, 而且能调节土壤酸碱性, 改善土壤结构和理化性质, 协调土壤水、肥、气、热诸因素, 提高土壤肥力, 从而增加作物产量和改善农产品质量; 但不合理施肥不仅导致肥料利用率低, 而且不利于作物稳产和土壤培肥。因此, 如何合理施肥, 提高作物产量, 维持和提高土壤肥力, 是人们长期以来关注的问题。有关长期不同施肥措施, 特别是长期有机肥和化肥配施对农作物产量、土壤肥力的影响, 国内外学者已做了大量研究。对长期施用有机肥及有机肥与化肥配施对土壤肥力影响的研究结果相对较一致, 即能够较好地维持和提高农作物产量及土壤肥力。在灌溉稻田系统中, 有机肥与化肥配施的土壤容重减小, 有机质含量增加, 导水性提高, 土壤结构改善, 微生物多样性提高 (Munkholm et al., 2002; Haefele et al., 2004)。化肥与有机肥配施的土壤固碳潜力显著高于单施化肥处理, 化肥与有机肥配施是提高稻田生产力和土壤质量、促进土壤固碳