

作物根际和产量生理研究

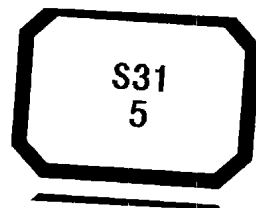
刘 晓 冰 王 光 华 金 剑 张 秋 英 著



科学出版社

www.sciencep.com

S31
5



作物根际和产量生理研究

刘晓冰 王光华 金 剑 张秋英 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者们 20 年来承担国家科技攻关、中国科学院重点项目、国家自然科学基金、黑龙江省杰出青年基金、哈尔滨市重点项目、归国留学基金的研究结果,并汇以国内外相关研究的有关文献撰写而成。全书围绕作物产量这一主题,兼顾产量与品质的关系,主要包括高产品种的根系根际特性、源—库关系及其对产量的影响、作物产量与品质形成过程、干物质积累分配和氮素运转、产量品质形成的生理调节、光富集的产量效应、有益微生物资源的挖掘、水肥耦合与产量、作物群体产量生理及作物高产新理论等,比较详细地分析了限制作物高产、超高产的因素,阐述了挖掘作物潜在产量的生理生态途径,论述了作物高产新理论产生生态学、碳氮互作理论、最大因子定律的内涵、证据及其相应内容。有关章节渗入了分子生物学理论在作物产量形成中的最新成果,各章节都提出了今后应该探讨的问题,可作为从事农业科学、植物科学和应用生态学的研究生和科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

作物根际和产量生理研究/刘晓冰等著. —北京:科学出版社, 2010. 3

ISBN 978 - 7 - 03 - 026841 - 9

I. ①作… II. ①刘… III. ①作物—产量—研究②作物—生理学—研究 IV. ①S31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 030840 号

责任编辑:孟宪奎

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>

长春工程学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2010 年 3 月第一版

开本: 787 × 1 092 1/16

2010 年 3 月第一次印刷

印张: 29 5/8

印数: 1 ~ 1 000

字数: 580 000

定价: 76.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

作物根际、根系和产量生理的研究发展已有近百年的历史。解析根际环境、根系形态和作物产量形成的生理过程,有效利用土壤资源和提高作物产量仍是农学、植物营养学领域研究的议题。

《作物根际和产量生理研究》一书,主要以著作者在该领域近20年的研究积累及国内外公开发表的论文为基础,引用了国内外相关研究论文,分为十四章撰写而成。该书并非论文的简单叠加,而是经过十六人写作团队将已有成果系统化、再创作的结晶。每章都由三个作者共同完成,体现了该研究、写作团队的集体智慧和合作精神。

作物根际及其生态环境的研究,历来受到国内外学者的高度重视。该书利用四个章节就根系与根际的研究方法、根际微环境、根系特性及其根际有益微生物方面取得的进展,重点以大豆为例进行了叙述。第六章分析了源库关系及其对小麦、玉米、大豆产量的影响,第七、八章详细阐述了大豆、小麦产量与品质内含物形成过程,干物质积累分配和氮素同化运转,第九章则深入分析解释了参与产量品质形成的关键生理因素,为进一步开展作物个体产量生理研究工作奠定了理论基础。第十章详细报道了环境生态因子光照富集对大豆的产量效应,这是以往相关专著很少涉及的方向领域。第十一章基于田间条件下的长期水肥耦合设施,解析了水肥互作,量化了不同作物对水肥优化配置响应的差异,提出适合作物高效生产的水肥调控策略。第十二章则从群体角度出发,详细解析了地下部根系时空分布与地上部冠层建成的动态关系,描述了冠层结构—微环境—光合生理的相互作用。第十三章提出了作物有效营养面积新概念,尽管尚不完善,但是作物高产领域研究思路上的新探索和新发展。最后一章引进的最大产量定律和生产生态学概念很有创意,对实现高产优质高效持续农业发展,有重要指导意义。

该书整个章节层次合理,由器官、个体到群体,最后提出作物高产的理论与途径,集知识性、系统性、新颖性于一体,对从事农学、环境科学的科研人员、在校高年级大学生、研究生从事理论研究具有重要的参考价值,同时对农业管理、技术推广部门及直接从事农业一线生产的各类技术人员亦同样具有实际指导意义。

中国农业大学教授 资源与环境学院院长
第十五届国际植物营养委员会主席

張福鎖

2009年12月26日

前 言

作物高产稳产优质是生产者和消费者永远追求的目标。作物科学工作者的首要任务是为生产提供优质高产的品种和相应的栽培管理措施。品种是作物生产的第一生产力,品种产量潜力的发挥有赖于生育过程和生理特性对其所在环境的响应。高产品种有其自身的遗传基础,必有其内在的生理机制。明确生理机制,对挖掘产量潜力,制定相应的栽培措施至关重要。本书在分析了今后 30 年世界粮食需求、作物现实产量及其与作物产量的潜力差距的基础上,重点从产量不同的作物根系根际特性、源-库关系及其对产量的影响、作物产量与品质形成过程、干物质积累分配和氮素运转、产量品质形成的生理调节、光富集的产量效应、有益微生物资源的挖掘、水肥耦合与产量、作物群体产量生理及作物高产新理论等,分析了限制作物高产、超高产的因素,阐述了挖掘作物潜在产量的生理生态途径,论述了作物高产新理论生产生态学、碳氮互作理论、最大因子定律的内涵、证据及其相应内容。

全书共有十四章,第一章由刘晓冰、张秋英、宋春雨编写,第二章由王光华、金剑、刘俊杰编写,第三章由金剑、王光华、刘晓冰编写,第四章由王光华、金剑、徐艳霞编写,第五章由王光华、金剑、周克琴编写,第六章由张秋英、刘晓冰、王光华编写,第七章由宋春雨、刘晓冰、李彦生编写,第八章由宋春雨、刘晓冰、苗淑杰编写,第九章由刘晓冰、金剑、张秋英编写,第十章由刘兵、刘晓冰、王程编写,第十一章由金剑、张秋英、刘晓冰编写,第十二章由金剑、刘晓冰、刘长江编写,第十三章由韩秉进、陈渊、金剑编写,第十四章由张秋英、刘晓冰、李艳华编写。全书统稿由刘晓冰、王光华完成。本书只是基于著作者 20 年来从事相关研究采集的基础数据、发表的 150 多篇论文的研究结果,结合前人的研究成就和国内外作物根际和产量生理生态研究的最新进展综合撰写而成。我们十分感谢科技部、中国科学院、国家自然科学基金委员会、教育部留学服务中心、黑龙江省科技厅、哈尔滨市科技局给予的项目支持,并向本书所引用的论文和著作作者表示谢意。由于著作者的知识深度和积累极为有限,书的结构、内容、观点和文字等方面一定存在缺陷和错讹,敬请各位读者批评指正。

作 者

2009 年 10 月 24 日于哈尔滨

编后语

当我编辑完成我们的手稿时,我已是47岁的人了。屈指算来,从我步入大学接触作物科学知识,尤其是从硕士研究生开始真正从事作物生理学方面的研究工作,已有25年。能有今天的积累,并以作物产量生理学为研究主题编写成一部书籍,我首先要感谢我中国的博士导师东北农业大学的李文雄教授,是他把我领入作物生理的研究领域,让我对作物生育生理的奥妙更有兴趣。我的研究领域能有所拓展,也要感谢我的同事、合作者以及博士硕士研究生们,尤其是王光华博士、金剑博士和张秋英研究员,更要感谢我的美国博士导师、朋友,Stephen J Herbert 博士。是他们的支持、鼓励、合作、引领给予我更多的追求。我也要深深感谢当代我国著名大豆生理学家沈阳农业大学的董钻教授和大豆生理遗传学家黑龙江省农业科学院的杜维广研究员的鼓励,我们的忘年交进一步促进了我对作物生理学研究的兴趣和信心。

中国工程院院士盖钧镒教授、大豆专业委员会名誉会长常汝镇研究员、著名大豆育种专家刘忠堂研究员和孙寰研究员都对我们的研究工作给予了支持与指导,并寄予厚望。

我也要感谢国家科技部、中国科学院、国家自然科学基金委员会、黑龙江省科技厅和哈尔滨市科技局的项目支持。

显然,我们的理解是肤浅的,还不深入,有些观点还需要完善,不能满足日益发展的科学需求。但是,作为科学发展的积累,至少回答了或部分回答了作物产量形成的某些问题,也许会对后人有一定的借鉴作用。

作物科学已从认知外观的表现型,逐步走向基因型和分子水平。我的同事朋友王光华、刘宝辉、金剑博士在这方面已做出了一些成绩。相信,他们会有更加辉煌的成就。坚信5~7年后,一部农田分子生态学将会在王光华博士的主持下出版。

我生来天资一般,但生身父亲刘德新老师留给我的几句话,让我受益终生,那就是:“决心可以粉碎石头”,“人一能知己十知,人十能知己百知”。学术上的第一位导师李文雄教授的身教,也让我受益匪浅。他那“名利场上冷眼客,求索途中孺子牛”的科学精神以及“大千世界无穷,此生志在求索”的诗句,也将继续支持和鼓励我为探索自然奥妙而努力奋斗。

仅以此书,献给我的工作单位、导师、父母、同事和所有关心我的人!

刘晓冰

2009年10月26日

于哈尔滨

目 录

序

前 言

第一章 概 论	1
第一节 世界粮食生产与需求.....	1
第二节 世界人口与人类营养.....	5
第三节 作物的产量及其潜力.....	9
第四节 根系和产量生理的研究历史及范畴	20
第二章 根系和根际及其研究方法	30
第一节 根 系	30
第二节 影响根系生长的因素	30
第三节 根系分泌物	34
第四节 根 际	40
第五节 根系与根际微生物研究方法	42
第三章 不同产量类型大豆根系研究	47
第一节 不同产量类型大豆根系空间分布特征	47
第二节 大豆根系生长动态及与地上部的关系	53
第三节 根系与地上部生长的相关关系分析	62
第四节 磷对大豆根系形态的影响	64
第五节 水磷互作对大豆根系的调节及对产量的影响	72
第四章 大豆根际研究	80
第一节 不同氮肥对大豆根际微环境的影响	80
第二节 不同产量类型大豆根际养分分布及吸收特征	88
第三节 低磷胁迫对大豆根际土壤微生物群落结构影响	95
第四节 不同基因型大豆生殖生长期根际微生物群落结构.....	103
第五章 作物根际有益微生物资源研究	121
第一节 生防细菌产生的拮抗物质及其应用.....	121
第二节 溶磷菌及其应用.....	127
第三节 大豆根际生防细菌研究.....	133
第四节 大豆根际溶磷菌研究.....	142
第六章 源—库关系及其对产量的影响	159
第一节 作物的源库系统.....	159

第二节	作物光合产物的呼吸和运转·····	165
第三节	源库改变对产量及品质的影响·····	170
第七章	产量与品质形成·····	184
第一节	春小麦子粒灌浆过程中淀粉和蛋白质积累规律·····	184
第二节	大豆子粒蛋白质与脂肪积累规律·····	194
第三节	春小麦子粒灌浆过程中蛋白质各种组分积累规律·····	197
第八章	干物质积累分配和氮素同化转运·····	206
第一节	小麦干物质积累分配和氮素同化转运·····	206
第二节	大豆不同基因型氮素积累运转·····	215
第三节	特用玉米的氮素积累与利用率·····	219
第四节	大豆结瘤固氮的分子生理·····	226
第五节	调控措施与小麦产量、蛋白质含量及加工品质的关系·····	232
第九章	产量品质形成的生理调节·····	244
第一节	高产品种的生育特性·····	244
第二节	Rubisco、PEPC 和叶绿素含量以及光合作用·····	246
第三节	产量与品质形成的内源激素调节·····	248
第四节	光合特性、酶活性与产量及蛋白质含量·····	268
第十章	光富集的大豆产量效应·····	278
第一节	群体光照与大豆干物质分配、产量及品质·····	278
第二节	光富集、遮荫与大豆产量构成因素空间分布特征·····	301
第三节	光富集与大豆有效荚数、粒重的节位/粒位效应·····	310
第四节	光富集、遮荫与大豆子粒生长特征·····	320
第十一章	水肥耦合与作物产量·····	324
第一节	水肥耦合基本原理·····	324
第二节	水肥耦合的生理效应·····	327
第三节	水肥耦合对作物产量及品质的影响·····	337
第四节	水肥耦合技术应用·····	345
第十二章	作物群体生理与产量·····	350
第一节	作物群体结构·····	350
第二节	作物群体结构与光合生理特性·····	359
第三节	作物群体冠层的微环境特征·····	369
第四节	作物高产群体结构及其特征·····	378
第五节	栽培措施对作物群体结构及其生理特征的影响·····	382
第六节	作物复合群体结构与生理特征·····	386

第七节	行距对大豆竞争有限资源的影响·····	388
第十三章	作物有效营养面积理论·····	394
第一节	作物有效营养面积的概念·····	394
第二节	作物有效营养面积的研究方法及相关研究·····	396
第三节	不同作物有效营养面积研究·····	399
第十四章	作物持续高产的途径·····	416
第一节	提高产量的战略途径·····	416
第二节	精准农业·····	421
第三节	生产生态学·····	424
第四节	报酬递减律:极限的谬误 ·····	429
第五节	作物产量的最小和最大定律·····	431
第六节	农业持续发展技术措施及其应用·····	437
参考文献 ·····		446
编后语		

第一章 概 论

第一节 世界粮食生产与需求

植物与作物一直是,也将永远是人类至关重要的生命支撑。因为它们是食物、饲料、原材料、能源和休闲的必要源泉(Kern,2002)。作物生产不仅为人类生命活动提供能量和其他物质基础,也为其他以植物为食的动物和微生物的生命活动提供能量,是农业生产中的第一性生产,对保障世界粮食安全、推动各国经济发展具有重要的意义。

20 世纪世界谷物的单位面积产量呈现显著的增加趋势。2007 年,北美洲的谷物单位面积产量平均达到 5.9 t/hm^2 , 遥遥领先于其他大洲。欧洲和亚洲的单产接近,分别为 3.3 t/hm^2 和 3.5 t/hm^2 , 而非洲的单产最低,仅为 1.4 t/hm^2 , 即北美洲的单产分别是欧洲、亚洲、非洲单产的 1.79 倍、1.69 倍和 4.21 倍。从单产的增幅来看,从 1961 年到 2007 年的 46 年间,亚洲单产增幅最高,增加了 1.92 倍;北美洲的增幅为 1.68 倍,欧洲的单产增幅为 1.36 倍;非洲的单产增幅仅为 0.73 倍。即过去 46 年来,亚洲、北美洲、欧洲和非洲每年每公顷增产 50 kg、80.4 kg、41.3 kg 和 13 kg。全球范围内,谷类作物生产力由 1951 年的 1200 kg/hm^2 增加到目前的 3400 kg/hm^2 , 并预测在 2020 年可能达到 4200 kg/hm^2 (Dyson, 1996)。

在过去的 46 年,欧洲和亚洲的谷物产量稳步增长并接近线性(图 1-1)。在美国,过去 50 年来玉米、水稻、小麦的产量分别以每年每公顷 61 kg、54 kg 和 41 kg 速率增长(Cassman, 2006)。详细分析表明,产量的增加一半来自于品种的改良,尤其是半矮秆基因在谷类作物上的广泛引用,一半来自于农艺的改进,包括灌溉、施肥、病虫草防除等(Evans, 1998)。当然,两者也是相互依赖。从世界的角度来看,自从 1990 年以来,土地的生产力增长极其缓慢。1990 年以前的 40 年,世界粮食每公顷每年增加 2.1%,而 1990~2000 年,每年仅增加 1.1% (Brown, 2001)。

单位面积增加的产量与种植面积的增加,补偿了人口增多而致的人均种植面积的减少(图 1-2)。在上世纪 80 年代以前,谷物种植面积最大的地区为亚洲,在 3 亿 hm^2 左右,其次为欧洲,在 1.9 亿 hm^2 左右。北美洲和非洲的面积接近,在 0.8 亿 hm^2 左右。但此后欧洲的种植面积出现了大幅下滑,减少了近 37%。谷类作物总面积非洲增加幅度最大,在过去的 40 多年间稳步增加,增幅为 83%;亚洲的增幅次之,增幅达到 20%。除欧洲外,北美也出现了小幅减少,减少幅度为 4%。

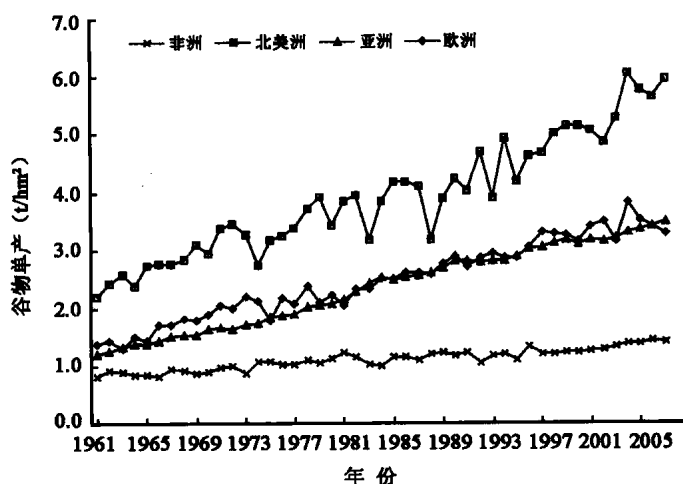


图 1-1 1961~2007 年四大洲谷物单产变化趋势

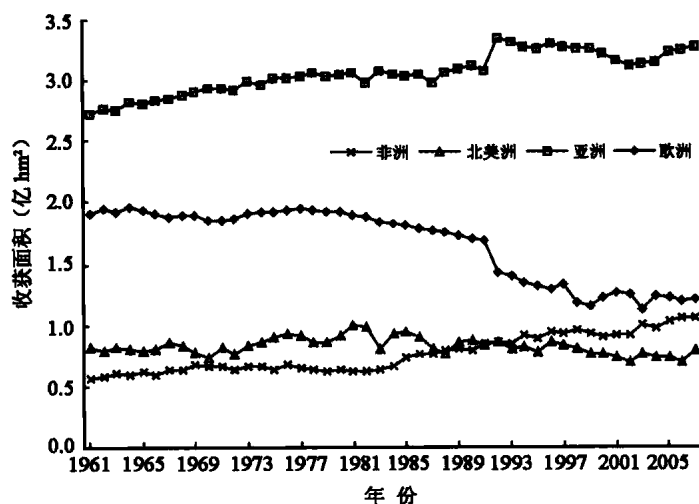


图 1-2 1961~2007 年间四大洲谷物收获面积变化趋势 (FAOSATA database)

谷物的总产量, 全球来看, 亚洲最高, 2007 年达到年产 11.4 亿 t。欧洲和北美洲相近, 为年产 4.5 亿 t。而非洲的年产量最低, 为 1.47 亿 t。但非洲的总产增幅较大, 达 216%, 增幅最大的为亚洲达到 246%, 北美洲第三, 达到 156%, 而欧洲的增幅最小, 为 50% (图 1-3)。

中国谷物的总种植面积上世纪一直保持较高的水平, 约 9 000 万 hm^2 。从 2000 年开始, 种植面积逐渐下滑至 7 700 万 hm^2 , 至 2003 年面积又有所恢复。46 年来, 总收获面积则略有降低, 即从 1961 年的 9 055 万 hm^2 减少到 2007 年的 8 473 万 hm^2 , 减少了 6.4%。单产则保持稳步提高, 从 1961 年的 1.2 t/hm^2 稳步提高的 2007 年的 5.4

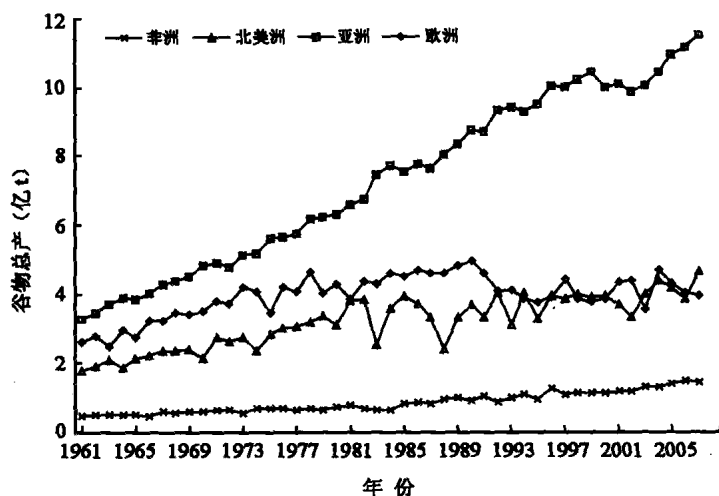


图 1-3 1961~2007 年间四大洲谷物总产变化趋势 (FAOSATA database)

t/hm^2 ，增加了 3.5 倍。总产从 1961 年的 1.1 亿 t 增加到 2007 年的 4.6 亿 t，增加了 3.2 倍。即总产的增加与单产的增加是同步的。尽管总产随着总收获面积在 2000 年出现了下滑，但从 2003 年开始又随着种植面积的恢复而上升（图 1-4）。

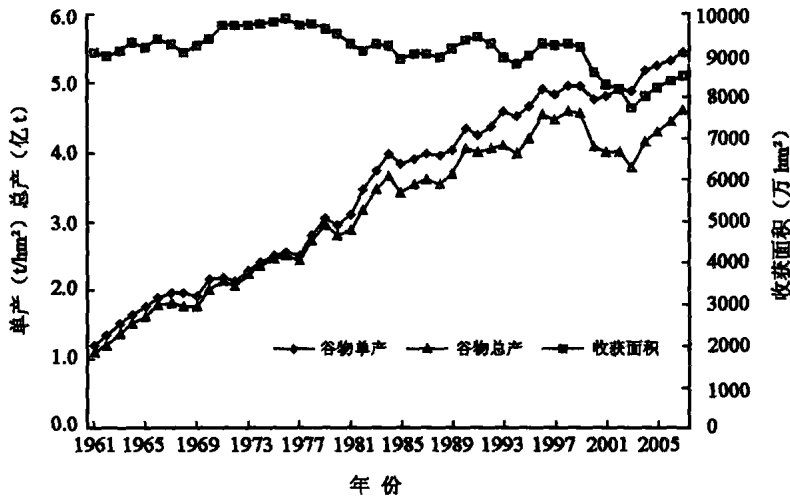


图 1-4 1961~2007 年间中国谷物收获面积、单产及总产变化趋势 (FAOSATA database)

谷物产量的增加带来了显著的社会变化，包括粮食安全的保障，营养不良的减少，更多的食物选择，同时也引起农业结构的改变。尽管西方国家普遍认为粮食生产已经过剩，认为目前存在着的粮食短缺和饥荒主要来自于战争、贫穷、政治体系和分配的不均。然而，当今社会仍然面临着保持必要粮食生产的多种挑战，包括 2025 年预计世界人口将达到 80 亿，富裕的社会对肉类供应需求的增长将增加对粮

食的消费，全球变暖引起的气候异常将增加作物受灾的机遇，现有土地利用的极限，水资源的短缺，土壤侵蚀及其盐渍化等。如果不增加开垦土地的面积，为保障人口的不断增加，今后 50 ~ 100 年世界粮食的增长速率仍需保持绿色革命阶段的速率。因此，保证作物产量增加的趋势，必须依赖于作物科学研究的不断深化。

世界粮食生产经历了不同阶段。第二次世界大战以前，全球粮食总产的增加主要来源于耕地面积的增多，随着人口的不断增长，开垦了更多的土地。第二次世界大战以后，粮食总产的增加，一方面是耕地面积的增多，另一方面是新技术的开发与应用。以 1950 ~ 1986 年为例，此期间全球平均年人均粮食增长率为 2.5%，超过了同期人口增长率 0.6% 的速度。但是，世界粮食生产并不平衡。尽管北美、欧洲、大洋洲和亚洲的粮食生产量不断增加，而非洲的大部分地区却没有增加。1980 ~ 1995 年，非洲人均粮食生产减少 5% ~ 10% (Sanchez 等, 1997)。实际上，过去的 20 年，非洲的粮食生产以每年 1% 的速率下降，而且，第三世界的粮食增加幅度明显的慢，尤其是南亚、西亚和北非及撒哈拉地区的粮食生产不能满足该地区的基本需要。此外，即使正常年份能够满足粮食需求的地区，也因自然灾害如洪水、干旱、地震及其他自然灾害限制了生产，从而出现暂时的粮食短缺。Greenland 等 (1998) 认为，非洲产量的降低是土壤肥力降低的结果，只要资金充分并购买到化肥就能够逆转这一现象。值得指出的是，全球 40% 的作物生产来自于 25% 的灌溉农田。水分的限制以及不规则的水分供应是制约作物生产力的限制因素。与北欧国家比较，地中海地区国家的产量增加缓慢，主要与降雨少、高温缩短生育期以及生态环境差有关。同样，雨养农业的美国小麦产量也远比灌溉农业的玉米、水稻产量增加缓慢。此外，随着较发达国家对于依靠多投入肥料、农药而提高单位面积产量导致环境污染和残毒等问题的越加重视，将会限制化肥、农药的使用量。由此，粮食单产能否保持以前的增长速度是难以确定的。因此，世界的粮食供求在中长期将处于不乐观状态，甚至也可能会出现困难，陷入匮乏困境 (北海道农政, 1999; 中国农业科学院粮食发展研究, 1993; 任天志, 2000)。如何利用现有的有限的土地资源，生产出更多的粮食，是我们人类必须面对的课题。

农业研究的需求受到三方面变化的影响：一是人类对食物及相关农产品不断变化的需求；二是人口的不断增长；三是人类收入的增加和生活水平的不断提高。有关影响作物产量及其相关生理因素的研究是世界各国人民生存的重要议题，这些因素的探讨将在满足人类人口不断增长及其对粮食和其他农产品需求中，起到关键的作用。

粮食的供求关乎着人类的生存和发展。保持粮食的供给与需求的平衡，对每一个国家乃至世界的稳定极为重要。关于世界性的中长期粮食供求，随着以发展中国家为中心的世界人口大幅度增加——联合国推算 2025 年世界人口将达到约 80 亿人

(表 1-1), 并且由于发展中国家收入的增加, 供给能量及畜产品的消费有增加的趋势。因此, 对粮食的需求, 预计今后将会有大幅度增加。由于过度耕作及盐类积聚等, 导致土壤劣化、沙漠化等, 预测包括今后在内收获面积的大幅度扩大是很困难的。人均收获面积, 随着人口的增长, 将明显持续减少。据预测, 到 2020 年, 为满足世界人口的增长, 仅发展中国家对小麦的需求每年就要增长 1.6%, 而同期用于饲料的需求要在每年 2.6%。由此, 全球小麦的平均产量需要从目前的 2.6 t/hm^2 , 提高到 2020 年的 3.5 t/hm^2 , 单产增加 34.6%。如此产量的增加, 需要不断改进的种质资源开发利用和适宜的农艺措施研发 (Ortiz 等, 2008)。

表 1-1 世界人口中长期预测 (单位: 亿人)

类 别	1995 年	2010 年	2025 年	相当于 1995 年 (%)	
				2010 年	2025 年
世界全体	57	69	80	121	141
先进地区	12	12	12	103	104
发展中国家	45	57	68	126	151
非洲	7	11	15	146	202
亚洲	33	40	47	122	141
中国	12	14	15	112	121
印度	9	12	13	124	143

数据来源: 联合国人口预测 (1996 年修订版)

因此, 保持世界, 尤其是发展中国家的主产作物的产量, 以满足人口迅速增长的需求, 仍是发展中国家的主要任务。前美国世界观察研究所所长、现任地球政策研究所所长 Lester Brown (1988) 研究认为, 20 世纪 80 年代中期以前, 世界人口密集的国家如印度、印度尼西亚、墨西哥和中国的粮食生产增产幅度相当高, 然而, 这以后处于平缓趋势。Herd (1988) 指出自从 1965 年以来, 菲律宾国际水稻研究所的水稻最高产量并未增加, 与此相反, 改良后的小麦潜在产量有所增加, 但比起 20 世纪 60 年代初的增产水平要小得多。多数人认为: 绿色革命带来的谷物快速增长的作用已在过去的 20~30 年里基本实现, 而粮食单产的进一步增加则将依赖于生产技术的突破和研究水平的提高与发展。作物生理学应该起到关键作用。一方面可以发展改善作物生产的体系, 另一方面可以与其他学科有效合作综合形成粮食安全的政策。

第二节 世界人口与人类营养

第二次世界大战以前, 尤其是 20 世纪以前, 世界人口增长相当缓慢, 史前时期上万年、上千年增长不到 1%, 17 世纪以后稍有加快, 但年均增长也不过是

0.5%左右。第二次世界大战后,人口增长速度发生了明显的变化,20世纪40年代末到70年代初,世界人口的增长速度接近2%。随后发达国家人口增长速度放慢,而包括中国在内的广大发展中国家由于积极推行计划生育,自1980年以来世界人口增长率趋于下降,1995~2000年世界平均人口增长率为1.3%,2000~2005年进一步下降为1.2%。其中,2000~2005年发达地区平均人口增长率为-0.2%,欠发达地区为1.5%,亚洲为1.3%,非洲为2.2%,欧洲为0.1%,拉丁美洲和加勒比海地区为1.4%,中美洲为1.7%,大洋洲为1.2%,中国为0.7%。目前,全世界每分钟大约出生259人,中国每分钟约出生38人,即平均不到两秒钟出生1个人。

随着世界人口数量的不断增长,人口倍增时间也在不断缩短,即世界人口每增加1倍的年限越来越短,史前时期需要几百万年,古代需要几千年,当代只需要几十年。1804年世界人口为10亿,123年以后即1927年达到20亿人,33年后即1960年达到30亿人,14年后即1974年达到40亿人,而13年后即1987年就上升到50亿人,1999年10月12日“60亿人口日”的到来,显示世界人口增长10亿人的时间已缩短到12年。

到2050年,世界人口将从如今的66亿增加到95亿,联合国报告预测人口的增长主要在发展中国家和新的工业化国家,其中,每三个人中就有一人来自印度或中国(表1-2)。与此相比较,工业化国家的人口仍保持低出生率,如德国,目前

表1-2 世界主要国家人口及其预测

单位:百万

1950年		2002年		2050年	
国家	人口	国家	人口	国家	人口
中国	555	中国	1 281	印度	1 628
印度	358	印度	1 050	中国	1 394
美国	158	美国	287	美国	414
俄罗斯	102	印度尼西亚	217	巴基斯坦	332
		巴西	174	印度尼西亚	316
		巴基斯坦	144	尼日利亚	304
		俄罗斯	144	孟加拉国	205
		孟加拉国	134	巴西	247
		尼日利亚	130	刚果民主共和国	182
		日本	127	埃塞俄比亚	173
		墨西哥	102	墨西哥	151
				菲律宾	146
				越南	117
				埃及	115
				俄罗斯	102
				日本	101

数据来源:美国人口咨询局,2002年。

只有 1.4。尽管如此,保持粮食增产以满足世界人口的不断增加,仍是世界必须解决的重大议题。

尽管世界范围内耕地的数量保持在 14 亿 hm^2 左右,但过去的 30 年来谷物总产量增加 60.9%。同期人口增长的速率为 61%,而同期肉类生产增加 133% (FAOSTAT, 2009)。由于每生产 1 kg 鲜牛肉,需要 43 kg 的植物生物量,这就意味着以肉类为主的食物结构将需要更多的耕地。最近的 10 年中,世界上最重要的两种粮食作物水稻和小麦的综合增长率为 0.8%,而同期全球人口的综合增长率却是 1.25%。20 年以前,发展中国家约有 30% 的人处于营养不良,如今这个比例仅为 18%。联合国粮农组织预测这种趋势仍将以正方向发展。世界范围内,对粮食的需求的增加将会慢于供应。然而,我们必须清醒地看到,今天仍有 8.15 亿人承受着慢性饥饿,每天都有 24 000 人死于营养不良(联合国粮农组织总干事迪乌夫, 2007)。联合国秘书长潘基文指出,到 2030 年,全球粮食产量必须提高 50% 才能满足因人口增长等因素而不断增加的对粮食的需求。到 2025 年,为了满足全球 30 亿新出生人口对食物的需求,并大大改善妇女和儿童营养不良状况,全球主要作物单产必须增加 50%,其中 2/3 来自现有耕地的高度集约化。

过去,世界范围内粮食产量的增加主要来自于更加高效的化学制剂的研制,以及施肥、灌溉和植物品种的改进,这被称之为绿色革命。然而,关于绿色革命有两种不同的意见:一种认为,增加了全球的粮食生产,解决了穷人的营养问题;另一种认为,大量和过分利用了那些不可更新的资源,诸如土地、水、化肥和杀虫剂。然而,大约有 4 亿多由于经济状况不能适应新技术应用的小农,并未从绿色革命中得到益处。事实是,联合国估算大约有 20 亿人,即世界人口的 1/3,主要在发展中国家,不能利用现代农业技术,仍然从事着生计农业的做法。因此,问题出现了:从自然的投入产出关系角度分析,绿色革命和现代技术能够帮助人类最终改善效率吗?

近期来自于恶劣气候、生态和市场因素而致的粮食生产增长速率的降低(有时称为绿色革命的疲惫或滞郁)给上世纪的绿色革命带来了新的挑战,尤其是全球变暖的影响。尽管气候变化会给北纬 55° 以上的地区带来益处,但将给热带和亚热带地区带来有害的影响 (Parry 等, 2004; Stern 等, 2006)。

粮食安全有三个视角:(1) 地方性的饥饿,这主要是由贫困诱导的营养不良或严重不良;(2) 隐藏的饥饿,主要是由微量元素缺乏如饮食中缺铁、碘、锌和维生素 A 等;(3) 暂时的饥饿,主要是由自然灾害或人文或内战冲突。真正意义上的粮食安全,不仅要增加市场中所需要粮食的获得性,同时还要保障人们获得平衡食品的社会、经济和自然的能力,保障饮水清洁、环境卫生、身体健康 (Swaminathan, 2007)。截止到 2025 年,世界人口可能要超过 80 亿,这就需要 20 亿 t 粮

食来满足人口增长的需要。今天的粮食安全挑战不仅是增加生产，同样是提供工作或生计，以及对食品获得的经济可行性，并且在增加粮食产量的同时不会进一步破坏生态环境。因此，农业不仅仅是生产粮食的机器，它同样是人们生计的一个重要产业。增加小型农场的生产力和效益将会减少饥饿和贫穷。

联合国有关今后粮食生产的正向乐观的估计是基于农业生产的进一步集约化。持续农业要成功地解决营养不良和产量的增加以及品质的改良，一方面要依赖于科技的进步，另一方面将取决于资源的管理（主要通过对农民的教育）。全球范围内的现有耕地不可能进一步的扩展，因为大多数肥沃的土地已经利用多年，而且可耕的土地数量很少，而且从生态的角度不能变为耕地。

因此，在适宜的条件下，目前用于生产的土地的产量应从如今的每公顷 2 500 kg 的谷物生产增加到大约 5 000 kg 的水平。如果能达到这个目标，到 2050 年时，地球上的每个人将会每天获得 11 500 J 的热量。一个明显的事实是，中欧目前的平均产量已接近 7 000 ~ 8 000 kg/hm²。然而，对于发展中国家而言，为解决营养不足的问题，增加产量是相当重要的，因为西方世界过多剩余的粮食由于政治和物流等方面的原因，不可能供应给发展中国家。当然，利用更多的和先进的杀虫剂可以进一步增加产量。研究表明，与不用杀菌剂对照比较，现代杀菌剂可以增产 20% ~ 30%。但是，化学物质的应用将达到经济和生态的极限。全球范围内，自从 1980 年到 2000 年，有大约 20% 的耕地土壤质量下降。对于那些刚刚达到工业化程度的国家，改变传统农业战略的影响更为明显。我国的化肥投入从 1960 年至 2000 年增加 20 倍，而且许多负面效应已经显现：如对饮用水和大气环境的影响，包括水田大量温室气体的排放等。

从全球的角度考虑，保持农业生产以维持日益增加的世界人口的战略为：

1. 保护农作物免于杂草、病原菌和微生物病害的侵染；
2. 培育高产作物品种；
3. 尽可能的满足作物所需的矿质营养；
4. 降低因非生物和气候胁迫而导致的产量损失，如干旱和土壤盐渍化；
5. 提高作物的品质，如更高质量的脂肪、蛋白质和维生素等。

以上任何一个战略的实施，都离不开农业科技的进步。

我国是具有 13 亿人口的大国，粮食的供需关系，由于受到耕地减少、水资源短缺、过度开发、施肥不当、地力透支的影响，将长期处于“脆弱的紧平衡”状态。目前，人均耕地面积和粮食占有量不足世界平均水平。尽管改革开放以来我国农业有了长足发展，以占世界 9% 的耕地，养活了占世界 22% 的人口，2007 年全国粮食总产达到了 5 015 亿 kg，基本实现自给水平。然而，我国农业生产走的是以大量消耗资源为特征的高度集约化道路，导致了资源短缺、水肥利用效率低和一系