



华夏英才基金学术文库

逢焕成 著

节水节肥型多熟 超高产理论与技术



科学出版社

www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

节水节肥型多熟超高产理论与技术

逢焕成 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在全面系统地论述了国内外作物群体高产与超高产理论及实践研究现状的基础上,重点阐述了作者在黄淮海平原的豫东黄泛区和豫北平原区四年两地多熟超高产种植模式以及超高产下的水肥优化管理理论与技术。全书共分7章,包括绪论、多熟超高产模式试验设计与研究方法、多熟超高产模式产量与资源利用效率、多熟种植模式的超高产理论机制、多熟超高产模式关键调控技术、多熟超高产复合群体结构的构建规则、多熟超高产模式下的水肥优化管理等主要内容。

本书可供作物栽培学、耕作学、农田生态学、农业水资源利用学、植物营养与施肥等专业的科技工作者、大专院校师生,以及广大农业技术推广科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

节水节肥型多熟超高产理论与技术/逢焕成著. —北京:科学出版社, 2010

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-028016-9

I. ①节… II. ①逢… III. ①作物-栽培-研究 IV. S31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 114522 号

责任编辑:李秀伟/责任校对:纪振红

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年6月第一次印刷 印张:9 3/4

印数:1—1 500 字数:186 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

中国农业有其固有的特殊性：一是人多耕地少，粮食相对紧缺；二是国大地大，不能主要依靠进口粮食维持十多亿人的生计；三是水肥资源缺乏，必须珍惜并合理利用。为此，就要设法不断提高土地、水肥利用率和生产率，力争做到既要高产高效，又要持续发展。因此，走可持续的集约农业是中国农业发展的一条主要道路。

目前我国人口以年均 1500 万的速度递增，2020 年将达 15 亿，2050 年将增至 17 亿~18 亿。据测算，到 2030 年，要保证 16 亿人口达到中等发达国家的生活水平，粮食作物单产至少要在现有产量水平上再提高 60%，否则，就会像西方某些人士预言的那样，中国要把世界市场的粮食都买光。人多地少，促使我国农业的发展必然要走一条劳动和技术密集相结合的道路，在这方面发展间、套、复种是一条必由之路和重要措施。据有关专家研究，从现实情况来看，目前我国农作物复种指数为 158%，而理论复种指数可达 198%，还有 40% 的潜力，而近期可挖潜力为 10%~15%。

实行间、套、复种，一地多熟的种植制度是集约持续农业的一个重要方面与体现，这是千百年来勤劳智慧的中国农民的辛勤创造与现代科学技术相互融合的结晶。目前我国有近 8 亿亩^①的土地复种、5 亿亩以上的土地间套作，对我国农业生产起着举足轻重的作用，也是对世界农业科学技术宝库的一项重要贡献。随着国民经济与农业生产的不断发展，这项以精耕细作为特征的集约技术还在进一步朝着高产高效化、机械化、化学化、自动化与农业发展持续化的方向发展，科学家们不断探求适合各地的新的模式与技术。

20 世纪 90 年代以来，吨粮田开发发展迅速，1995 年全国已有 6000 多万亩耕地实现亩产吨粮，有 35 个县（市）先后跨进整建制吨粮田开发的行列。高产高效吨粮田开发是我国农业生产的一项创举，把农业生产提高到一个新水平。吨粮田是现代科学技术与传统精耕细作农艺相结合的成果，显示耕地有很大的增产潜力。那么，能否在亩产吨粮的基础上再创新高？在目前农业生产技术条件下，耕地的最大生产潜力到底还有多少？这些都是需要回答的问题。

目前，粮食的平均单产仍较低。世界稻谷、小麦、玉米平均亩产分别只有 221.3kg、154.3kg 和 213kg，但所创造的高产纪录已经达到很高的水平。澳大

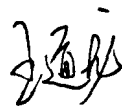
^① 1 亩≈666.7m²，全书同。

利亚、美国和日本先后创造了亩产稻谷 1097kg、1089.6kg 和 876.6kg 的纪录；美国的灌溉小麦和旱地小麦亩产最高分别达到 940.5kg 和 607.5kg；我国青海省诺木洪农场曾创造了春小麦亩产 792.7kg（1973 年）的国内最高纪录；新疆生产建设兵团 131 团在 1103.7 亩土地上创造了玉米平均亩产 1031kg 的全国纪录（1990 年）；世界玉米最高亩产达到 1554kg（1985 年）。所有这些都向人们展示了粮食作物提高单产的巨大潜力。为进一步挖掘潜力，作物栽培科学现代化将起重要作用。据科学家计算，我国各地单季粮食作物的光温生产潜力如下：长江以南地区，早稻亩产 1100kg，晚稻亩产 1400kg；黄淮海平原地区，冬小麦亩产 780~960kg，夏玉米亩产 1100~1350kg；西北地区，春小麦亩产 1300kg，春玉米亩产 2100kg；东北地区，春玉米亩产 2200kg。小面积高产纪录单季稻亩产 1006kg，春小麦 1013kg，冬小麦 871kg，春玉米 1064kg，夏玉米 1096kg。2008 年我国黄淮南部河南小麦、玉米两熟，50 亩连片小麦平均亩产 695.8kg、夏玉米平均亩产 872.7kg，在同一块土地上连片 15 亩小麦、夏玉米一年两熟平均亩产达到 1733.66kg，其中小麦平均亩产 668.88kg、玉米 1064.78kg，创造了我国黄淮海地区同面积小麦、玉米一年两熟的最高产量纪录。科技进步不断挖掘耕地的增产潜力，为农田生产潜力的开发创造了可能性。

逢焕成博士自“九五”以来，主持承担了国家攻关课题“黄淮海多熟高产种植制度研究”（项目编号：95-004-01-14）、“豫北平原中产田综合治理与农业持续发展研究”，国家农业综合开发科技示范项目“河南省封丘小麦玉米间套复种高产科技示范推广”，公益性行业（农业）科研专项课题“资源节约型农作制技术研究”（项目编号：200803028）等。上述研究工作形成了颇具中国特色的节水节肥多熟超高产理论与技术体系。

该专著是逢焕成博士多年从事多熟超高产模式与水肥集约利用的研究成果，是一部全面系统研究通过集约多熟与集约栽培相结合达到超高产的全新著作，不仅填补了我国该研究方面的空白，而且对世界气候相似的国家地区的多熟超高产也具有重要参考价值。除此之外，本书将多熟超高产模式与水肥资源节约及集约利用研究相结合，内容相互衬托，共成体系。

我相信该书的出版对我国多熟超高产和节水节肥理论与技术的发展必将起到积极的促进作用。



2010 年 2 月 1 日

前 言

由于全球性的人口剧增和耕地水肥资源紧缺，农作物高产与水肥高效利用问题一直是世界性的重大课题。无论是发达国家还是发展中国家，都致力于持续提高农作物单产水平及其资源利用效率的研究与实践，以在有限的耕地上生产出尽可能多的为人类所需要的农产品。20 世纪 80 年代以来，许多国家及研究组织相继开展了围绕提高作物生产力为中心的研究项目，如日本的“作物高产工程”、美国的“作物生产力开发研究”、以色列的“水资源高效利用与高产”、国际水稻研究所（International Rice Research Institute, IRRI）“突破产量限制”新研究计划等。这些均反映出人类开发农作物产量潜力的信心和勇气，势必推动农业产量水平不断向新的台阶迈进。中国人多地少，资源相对不足的矛盾更为突出，食物压力甚大，高产要求的迫切性更为强烈。美国学者莱斯特·布朗“谁来养活中国”观点的提出，更使农作物高产问题受到更多关注。我国以占世界 7% 的耕地养活占世界 22% 的人口，而且要保证人们生活水平与消费水平持续提高，粮食高产的任务异常艰巨。尽管从 1949 年到 2007 年，粮食总产从 1132 亿 kg 增加到 5015 亿 kg，单产从 57kg 增加到 316kg，人均粮食从 250kg 增加到 379kg，取得了巨大的成就，但与世界发达国家相比，差距还是很大。随着我国经济的不断发展和人口的继续增加，耕地日益缩减的趋势已不可逆转，增加粮食产量只能选择提高单产的途径，即走低产变中产、中产变高产、高产再高产之路。

农作物高产的核心是提高光能资源利用率，即“向太阳光要粮”、“收获太阳能”。为此，众多学者与研究人员从不同角度、理论、实践等多方面对提高光能利用率进行了长期不懈的探索。从理论上讲，作物的光能利用率可达 5%~6%，并在某些作物（玉米、水稻、小麦）的短期生长过程中得到验证，但从整个作物生产过程看，实际的光能利用率远远低于理论潜力值。目前，世界农田平均年光能利用率只有 0.2%，我国为 0.3%~0.4%；国际生物学课题（IBP）在试验中最高得到 2.18%。由此看出，提高光能利用率及作物单产水平的潜力仍是巨大的，高产再高产的希望并非幻想。于是，各国科学家从作物品种选育，作物高产群体调控，新材料、新技术运用等多个角度，不断创造作物高产新纪录。如美国 1973 年创造了亩产玉米 1288.5kg 的纪录，1985 年又在伊利诺伊州出现亩产 1548.3kg 的新纪录。小麦与水稻等作物在国内外都有亩产超过 1000kg 的报道，展示出高产再高产的广阔前景。

相比较而言，采用间、套、复种等多熟种植形式在挖掘高产潜力上也是非常

有效的手段之一,尤其是在人多地少的国家或地区,通过多熟种植不但可以协调作物争地矛盾,提高集约化种植水平,而且是实现超高产的重要技术途径。早在1978年我国著名劳动模范陈永康在江苏2.95亩试验田上,通过“麦—稻—稻”三熟模式年亩产达1526kg,其中小麦446.2kg,前季稻537.2kg,后季稻542.6kg;Brady报道IRRI科学家在菲律宾地区,通过一年种4次水稻,获得年亩产1553kg的超高产水平;1990年我国云南祥云县创造了小麦、夏玉米、马铃薯套种年亩产1861.53kg的超高产纪录,其中小麦734.64kg、夏玉米912.7kg、马铃薯856.74kg(折粮214.19kg);2008年我国黄淮南部河南小麦、玉米两熟,丰产高效技术创造了50亩连片年亩产1568.5kg的超高产纪录,其中小麦平均亩产695.8kg,夏玉米平均亩产872.7kg。在黄淮海平原地区,各种各样的多熟种植模式一直是种植制度的主体,从20世纪80年代以“小麦—玉米”为主的种植形式的吨粮田开始较大面积出现,已经涌现出大量的“吨粮乡”,甚至“吨粮县”,而且通过间、套、复等种植形式,也出现了小面积的超吨粮农田,如近年来在黄淮平原的山东、河南等地示范推广的“冬小麦//春玉米/夏玉米”(//代表间作,/代表套作)、“冬小麦//春玉米/夏玉米//秋玉米”及“冬小麦/夏玉米/夏花生(谷子、大豆、甘薯)”等种植模式,资源利用效率与土地生产率很高,其产量和效益都超过一般的吨粮水平,得到当地政府与农民的欢迎。

由此可见,间、套、复种等多熟种植技术,对实现超高产意义重大。我国多熟种植历史悠久,不仅是传统农业的精华所在,同时也是现代农业的重要组成部分。截至目前,我国采用各种多熟模式的耕地已占全国总耕地的一半以上,播种面积占到2/3以上,而生产粮食则占到3/4以上。因此,开发多熟超高产种植模式与水肥节约高效利用技术,对促进我国农业增产增收,保护生态环境意义重大,尤其面对人均耕地即将减少到1亩的严峻局面,探索、开发超前性和储备性的多熟超高产模式与水肥节约高效利用技术意义更为深远。随着传统农业技术与现代农业新技术、新材料的有机结合,农业机械化水平的逐步提高,新的品种不断涌现,将会使我国多熟超高产与水肥节约高效利用的发展不断向前推进,更上一个新的台阶。

长期以来,我国政府十分重视农田高产与节水节肥研究,先后设立过许多作物高产技术的项目,如“区域持续高效农业综合技术与示范”、“粮食丰产科技工程”、“黄淮海多熟高产种植制度研究”、“豫北平原中产田综合治理与农业持续发展研究”和“资源节约型农作制技术与示范”等。多熟超高产和水肥节约利用理论与技术体系已经成为我国农业的研究热点与发展需求。

本书是以我在博士与博士后期间的研究内容为主体形成的,在本书出版之际,对我的导师——中国农业大学刘巽浩教授、陈阜教授,中国科学院南京土壤研究所徐富安研究员表示最衷心的感谢。本书的编写得到中国农业科学院农业资

源与农业区划研究所任天志研究员、王道龙研究员、黄鸿翔研究员、白丽梅处长的大力支持与鼓励。我们研究团队的李玉义博士、王婧博士，研究生于天一、刘高洁、王海霞、董鲁浩、赵永敢、刘欣惠为本书的图表编辑付出了很多努力。本书的出版得到华夏英才基金和公益性行业（农业）科研专项项目“现代农作制模式构建与配套技术研究”（项目编号：200803028）经费的资助。对这些无私的支持，在此一并表示深深的感谢！

由于著者水平有限，错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正！

逢焕成

2010年1月1日

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 作物群体高产与光能利用	1
第二节 我国粮田高产研究进展	6
第三节 我国多熟超高产模式的探索	11
第四节 高产与水肥关系研究进展	12
参考文献	17
第二章 多熟超高产模式试验设计与研究方法	22
第一节 研究区域背景	22
第二节 多熟超高产模式试验设计	24
第三节 超高产模式下的水肥运筹试验设计	30
第四节 研究方法	32
参考文献	33
第三章 多熟超高产模式产量与资源利用效率	34
第一节 多熟超高产模式产量结果	34
第二节 多熟超高产模式干物质积累量与季节分布特征	39
第三节 年光能利用率状况分析	42
第四节 资源利用效率分析	43
第五节 经济效益状况分析	45
参考文献	46
第四章 多熟种植模式的超高产理论机制	48
第一节 合理增加光合面积,充分利用生长时间	48
第二节 提高照光叶面积	51
第三节 提高全年叶日积	52
第四节 空间利用层次加厚	53
第五节 均匀用光	57
第六节 提高光截获能力	62
第七节 棉田多熟增产机理分析	63
参考文献	66

第五章 多熟超高产模式关键调控技术	68
第一节 复合群体种间时空竞争关系	68
第二节 时空积——评价作物在复合群体中竞争态势的新概念	74
第三节 复合群体种内竞争关系	77
第四节 光在水平方向上的分布与边际优势、边际劣势的形成	79
第五节 多熟超高产模式的关键性调控技术对策	81
参考文献	92
第六章 多熟超高产复合群体结构的构建规则	93
第一节 不间断型复合伞形结构规则	93
第二节 复合群体的主客换位规则	94
第三节 时空统一规则	97
参考文献	99
第七章 多熟超高产模式下的水肥优化管理	100
第一节 不同肥料运筹对冬小麦生长发育、产量及养分利用的影响	100
第二节 不同肥料运筹对春玉米产量及养分利用的影响	105
第三节 不同肥料运筹对夏玉米产量及养分利用的影响	114
第四节 不同肥料运筹对秋玉米产量及养分利用的影响	121
第五节 不同肥料运筹对多熟模式全年总产量以及土壤肥力的影响	125
第六节 不同水分运筹对冬小麦、夏玉米、春玉米产量及水分利用的影响	129
参考文献	135
展望	136
图版	

第一章 绪 论

第一节 作物群体高产与光能利用

农业生产的主要目的是通过提高光能利用率获得高额的经济产量。为了达到上述目的，国内外的农业科学家们对此从不同角度、不同途径进行了深入而有效的研究，取得了大量的研究成果。

一、单作群体高产与光能利用

Loomis 和 Williams (1963) 以光作为基本的限制因素，估算作物的最大生产率约为 $77\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，其效率为总辐射能的 5.3%。之后，Evans (1975) 和 Monteinth (1965) 将最大的作物生产率与实际测定的短期的作物生产率比较发现，在理想条件下，某些作物能够达到估算的最大值的 60% 以内，C4 作物玉米最高，为 $52\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ；C3 作物大豆最低，为 $17\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。玖村敦彦等 (1973) 研究报道，在短期超密植、高肥栽培时，玉米作物生产率最大值达到 $54.7\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在长期栽培的情况下，最大值也可达到 $51.6\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，一年的净生产值可高达 $2651\text{g}/\text{m}^2$ (IBP, 1969)。

1. 作物群体结构与光能利用

由于作物栽培条件和栽培技术不同，作物生长和作物群体结构类型也不同，而且作物每个生育阶段的长势和长相有别，群体和群体中光分布也有差异。殷宏章等 (1959)、王天铎 (1961)、顾慰连等 (1985)、王金陵 (1982) 分别对水稻、小麦、玉米、大豆、甘蔗群体与光分布进行了比较细致的分析和研究，认为作物各生育期的群体结构不同，群体中的光分布也不同。群体大小比例适中，光分布良好，穗粒产量比较高。群体过大、过小均不利于产量的提高。

作物群体叶面积指数 (leaf area index, LAI) 影响光分布、光能利用和作物产量的问题越来越被人们所重视。殷宏章等 (1959) 应用大田切片法分析了三类麦田，得出群体密度高、LAI 大、群体下层光分布少的结论。关于群体光合与光强的关系，门司正三和左伯敏郎 (1980) 提出了一种计算方法，首次把光合作用与光强关系和群体中光分布情况结合起来，建立了光—光合成关系：

$$P = \frac{AbI}{A + bI} \quad (1-1)$$

式中, P 为光合速率; A, b 均为特定常数, I 为光强。

之后, 殷宏章等 (1959) 对此作了进一步修正, 将呼吸作用考虑在内, 得到群体总光合强度为:

$$P_n = \frac{b}{ak} \cdot \ln \frac{1 + aI_0}{1 + aI_0 e^{-kF}} - rE$$

式中, P_n 为净光合速率; a, b, r 均为特定常数; I_0 为自然光强; k 为消光系数; F 为累积叶面积系数; E 为呼吸速率。

这说明单叶的光合强度与光强并不呈线性关系。当光强达到一定强度, 光合强度不再上升, 甚至还有下降的趋势, 但群体的光合强度, 则随光强上升有增加的趋势 (王天铎, 1961), 然而两者不再呈直线关系 (胡昌浩和董树亭, 1993)。

作物群体有一定的适宜 LAI 范围。在一定范围内, 随着 LAI 的增加, 群体光合速率不断增强。Brougham (1965) 将太阳辐射截获达到 95% 时的 LAI 称为临界 LAI, Kasanaga 和 Monsi (1954) 将达到最大作物生产率时的 LAI 称为最适 LAI, 并将这两个概念引入群体研究中。之后, 许多学者对不同冠层的最适 LAI 进行了研究, 发现最适 LAI 对水平叶冠层是低的, 一般 $LAI \leq 3$, 而对冠层的垂直叶则是最高的, $LAI \geq 4$ 时才比水平叶冠层的作物生产率明显提高。因此在低 LAI 的情况下, 水平叶冠层比垂直叶冠层叶表面的辐射角度稍微有利; 在高 LAI 的情况下, 垂直叶冠层有利于太阳光更加均匀地分布于冠层的所有叶面上。对于同一作物不同类型品种, 群体光合所要求的最适 LAI 也不同, 胡昌浩 (1990) 测定, 平展型玉米品种 ‘沈单 7 号’ 最适 LAI 约为 4, 而紧凑型品种 ‘掖单 4 号’ 最适 LAI 约为 6。同时发现, 紧凑型品种只有在 LAI 达到较高的情况下, 群体光合才显出优势, 当 LAI 维持在 3~4 的水平上, 群体光合速率反而低于同样 LAI 的平展型品种, 因此紧凑型玉米比平展型玉米需要较高的 LAI 去获取光能。这些研究启示我们, 实现作物所需要的最适 LAI、完成光截获率的 95%、获得较高的光合速率是作物高产的保证。关于如何通过作物种植获得农田适宜的叶面积生长动态, Gardner (1985) 指出, 农业科学家目前所面临的挑战是要求作物在辐射能高峰出现之前就获得足够的叶面积, 并在这一太阳能高峰的主要时期保持有效的叶面积, 即辐射量最大值与 LAI、光截获最大值相吻合, 这是农业科学家所追求的理想光截获模式。为了达到上述目的, 育种学家们正在选择温带作物的抗寒品种, 使其可较早地种植, 以便在适期的季节中较早地达到最大 LAI, 截获较多的能量。栽培学家正致力于早发晚收的栽培技术措施, 寻求延长高 LAI 时间的管理途径。我国学者李登海亩产过吨粮的夏玉米抽雄后最大 $LAI > 5$, 成熟时 LAI 仍然保持在 3 以上的事实充分证明了这一点。从目前来看, 以上两种方法有一定的效果, 但在生产实践中仍显难度较大。因为对于大多数一年生作物来说, 其固有的生活周期特性决定了它不可能无限制地延长生长时间来

适应这种季节性光分配特点。而为了进一步充分利用生长时间,采用间、套、复种多熟种植则是适应这种自然现象的一种现实而有效的途径。

2. 作物群体冠层几何学结构与冠层光分布、光能利用

不同作物种类各有适合的叶倾斜角度模型。叶片倾斜影响辐射能的截获和在冠层的分布,因此不同作物、品种其临界 LAI 不同。陆定志(1984)在水稻上的测定结果表明,水稻作物群体叶片挺直比叶片披垂的光强分布良好,尤以倒 1、倒 2 叶接受太阳光多,辐射能强,说明叶姿、叶倾斜角大小直接影响光强分布和光合效率,这对育种家早有启示。20 世纪 50 年代以来,育种学家一直在选择叶片挺直、株型紧凑的水稻、玉米等作物新品种。田中于 1972 年通过人工改变叶角的方法,阐明了叶角对群体光合作用与物质生产具有重要作用,徐庆章等(1995)、李登海和黄舜阶(1992)也通过人工改型的方法证明了同一基因型不同叶角对玉米群体光合效率的显著影响,且其效应随密度增大而加强,紧凑型比平展型光能利用率高 18.06%。Loomis 和 Williams(1969)利用计算模式估计叶片倾斜角度和叶片数量对玉米及三叶草的作物生长率的影响,也表明叶面积越大、叶角越小,作物生长率越高。对于叶片在植株体上的空间排列,裴炎等(1988)引入角度指数参数研究发现,适度增大棉花上层主茎节距,降低角度指数和上层叶所占比例,有助于冠层消光系数的减小和整体透光条件的改善,上层叶在强光下光合速率高,中下层叶在低光下高,也可有效地利用光能。

总之,群体干物质质量取决于作物冠层对光能的截获和利用效率。从光能截获来看,Gardner(1985)总结得出,对作物辐射截获影响因素的大小顺序是: LAI>叶分布(包括叶片在植株上的配置与植株在田间的配置)>叶角>叶片的光吸收特性。

3. 产量构成与作物群体高产关系的研究

方精云(1995)通过水稻密度试验总结出所谓“最终产量一定法则”,即在一定条件下,密度不断提高,而水稻产量则受其条件决定,植物体最终干物质产量就出现了接近某一定值的现象。这一法则,应用于水稻成立,而对小麦、玉米、大豆、高粱等,其总干物质质量确实符合此法则,但籽粒产量则不符合。在某种密度下,产量最高,超过这种密度又降低,是一种抛物线的关系(Donald, 1963),这是作物群体自动调节和反馈现象共同作用的结果。对此,我国许多学者围绕着作物产量构成的三因素的自动调节与人工调控展开了大量的研究工作,综合其研究成果,主要包括:①对稻、麦等分蘖作物来说,在由低产变中高产过程中,应采用大播量、大群体,以提高亩穗数为中心获得高产;②在高水肥条件下,应以攻穗大、粒多、粒重,提高群体质量为突破口夺取更高产量,而不是扩

大以苗、茎数为中心的群体结构。与此同时,各地也创造出相应的高产栽培技术,例如,山东的小麦精播高产技术(余松烈,1990),江苏的小麦“小、壮、高”生产模式(凌启鸿等,1983),浙江的水稻“稀、少、平”高产模式等。在水稻高产、超高产育种方面,杨守仁等(1996)在系统总结其40年育种工作的基础上,提出了协调水稻亩穗数与穗粒重的“三优假说”,即最佳株高、最佳穗重、最适分蘖性能,通过协调三因素的关系培育超高产水稻良种。玉米高产栽培上则采取利用紧凑型高产品种,在适宜高密度的基础上,提高整齐度,增加单株生产力,取得了亩产800~1000kg的高额产量(李登海,1994;胡昌浩,1990),由上可见,产量水平不同,提高产量的主攻方向也不尽相同。

4. 源库关系的协调与作物群体高产

1928年,Mason和Maskell通过对碳水化合物在棉株内分配方式的研究首先提出了作物的源库学说,但大量的关于作物源库对籽粒产量作用的研究成果是20世纪60年代以后不断涌现出来的。关于源库理论的研究,概括起来主要有以下内容:①源库流对作物产量的限制;②群体、个体水平上源库关系的比值分析;③源库端的生理特性和装入与卸出的机理;④激素对源、库及两者关系的调控等。关于作物源库理论在实际应用上意义较大的研究有如下4项。一是Thorne(1974)在分析了源库对产量形成的两种不同观点的试验材料后指出,日照量较强、作物能充分进行光合作用的澳大利亚由库容决定产量,而在日照较弱、光合作用不充分的英国,则由产量内容物的生产决定产量。二是曹显祖和朱庆森(1987)按源库特征与产量的关系将水稻品种分为增源增产、增库增产以及库源互作3种类型。三是Lafitte和Travis(1984)及凌启鸿和杨建昌(1986)指出可用粒/叶[颖花(粒)/叶(cm^2)]、实粒/叶(cm^2)、粒重(mg)/叶(cm^2)作为衡量和反映水稻群体源库是否协调的一个指标,并推断当叶面积发展到一定限度时,可通过提高“粒叶比”来继续提高产量。四是研究表明胚乳细胞数目与籽粒体积、灌浆速率及粒重均呈高度正相关。胚乳细胞分裂发生在停滞期,该阶段一旦结束,籽粒质量和体积的潜力便被决定了,因而人们更应注意早期影响库的因素。综上所述,源库关系在品种间不是单一的类型,且会随着环境条件的变化而变化。总体来说,我国地域辽阔,生态条件复杂,作物品种繁多,要想概括出一个统一模式是不现实的,而弄清在一定具体生态条件、栽培条件下品种的源库特征,找出限制产量的因素则是可能的,这对于因种栽培及设计新品种选育方案都是有重要指导意义的。如张毅和顾慰连(1992)认为低产田的主要因素是源,应通过土壤改良、合理施肥扩源增产;曹靖生和曹大伟(1989)认为在黑龙江地区,由于积温少、光合作用时间短,玉米生产上应采用增源增产型品种。山东省则概括出“增库促源”与“增穗保叶”的高产栽培理论与技术体系并正在推广

中。对于今后的发展,生理学家、育种学家、栽培学家共同的认识是进一步提高生物产量应从育种栽培等途径入手,走提高源、库、流的水平及在较高水平上使其协调之路。

以上是从单作群体的光合性能、产量构成和源库关系三个不同角度来探讨群体高产的途径。其中光合性能主要是从冠层光截获、光合成的角度研究高产的形成;产量构成主要是从收获产品组成性状的形成和结果进行数量分析;而源库关系则是从物质的分配来认识产量的形成,由于三者均是以产量最高为目标,则必然在时间和空间上存在着诸多联系,同时三者又各具特色,互相弥补。因此要全面系统地认识产量形成,必然需要三者的结合。

二、复合群体高产与光能利用

复合群体是指由两种或两种以上的作物共同组成的复合种群。与单作群体相比,其最主要的特点是田间配置上的非均一性分布。除构成单作群体结构的因素之外,还有带型、幅宽、间距、共生作物的时间差、空间差等因素。

1. 多熟复合群体的增产效果

间套作是否增产,各国学者对此问题看法不一。美国有些试验认为间套作并不比单作增产,甚至反而减产(Gallaher, 1975; Mckibben, 1970)。但是世界各地的大量研究一致表明,合理的间套作有利于增产(Fisher, 1980; Beets, 1977; Evans, 1975; Enyi, 1973)。以 LER (land equivalent ratio, 土地当量比)作为衡量间套作产量的一种指标,LER 一般都超过 1.0。Francis (1986)在玉米与菜豆间作试验,LER 高达 1.63~1.69;国际水稻研究所研究报道,一般合理的间套作增产幅度为 30%,好的达 50%。国内有关间套作的试验研究表明,与单作或复种相比,间套作均有不同程度的增产效果(邹超亚和陈颖, 1991; 李凤超等, 1988; 张训忠和李伯航, 1987; 杨春峰和成升魁, 1986; 董宏儒和邓振镛, 1981; 刘巽浩等, 1981; 熊凡, 1980; 侯中田, 1978)。成升魁(1990)从理论上对我国北方麦田多熟研究表明,麦玉两熟的光温生产力大致为 1300~1500kg/亩,其中麦/玉米>麦—玉米>麦//玉米,与一熟单作平均产量相比,麦玉两熟在北方地区的光温增量率为 60%~120%,光温水土增量率为 50%~100%,光温水土灌增量率为 70%~120%。可见,多熟复合群体的增产潜力是比较大的。

2. 复合群体增产机理

由多种作物组成的复合群体结构,各个作物都要占据一定的生态空间,同时又要吸收利用一定量的营养元素,由此也导致了作物与环境、作物与作物之间在

生存过程中复杂的行为关系。Gause (1934) 提出了竞争排斥原理, 认为两个生态位完全相同的物种生活在一起必然会引起激烈竞争甚至导致某一方的死亡。之后 Vandermeer (1989) 对此进行了修正, 提出了竞争生产原理 (competitive production principle), 指出竞争生产原理的机制实质上是指在弱竞争下的物种共存, 且相对于单一种群结构而言, 具有增益效果的机制。实际上两个物种共存时通常会产生生态位分异、生态位重叠或产生环境异质性, 其中对光环境因子的竞争是最直接、最明显的。当间套在一起的两个作物组成群体冠层时, 复合冠层的多层次光截留造成不同于单作群体的光环境。Trenbath 和 Angns (1975) 曾对间作系统的光利用效率作过详细的讨论, 概括为以下几点: ①间作第二种耐阴或对光照要求不高生长阶段的作物有利于提高光转化效率; ②复合群体间作形成的多层群体结构可有效地提高截光率, 减少漏光损失; ③多种作物形成的复层结构有利于提高冠层的净同化率, 并增加间作系统内的 LAI; ④采用间套作可以延长高效能光合作用时间。对于在作物共生过程中的相互作用, 大体可分为三个阶段: 一是密度很小, 种群间不构成竞争; 二是竞争产生, 产量降低, 但不构成致死威胁, 如间套作共生盛期阶段; 三是竞争激烈, 构成致死威胁。对于第一阶段即无竞争存在, 通常可采用单种群 Logistic 生长模型。在竞争出现的第二、第三种类型中, 即两个种群处于有竞争的共存环境中, 则是带有时滞的竞争模型。在人工复合群体中, 可通过以下措施来减少竞争, 促进互补。①作物合理搭配: 如通过不同形态、生态型、生育期作物的搭配, 以形成不同的空间、时间与生育上的生态位; ②合理的田间作物结构: 即选用适当的密度和作物株行距、带距、间距、高度差、行向; ③改善生态环境与栽培管理措施, 以满足群体内不同作物的需要。对此, 国内外许多学者从间套作复合群体的异质互补效应、时间效应、空间效应、边际效应、种植方式的生态适应性等角度进行了大量研究 (杨春峰, 1990; 邓振镛和董宏儒, 1986; 熊凡, 1985; 刘巽浩, 1982; 梁争光, 1975; 北京市农业科学院农业气象研究室, 1974; 沈阳农学院农学系大豆科研组, 1973; Bhatt and Rao, 1981; Singh and Singh, 1981; Trenbath, 1974)。这些研究对于不同地区选择合理的间套方式、构建合理的群体结构、充分发挥间套作的优势、尽可能减少或克服劣势以及提高复合群体的总体功效具有重要意义。

第二节 我国粮田高产研究进展

一、中国的粮食问题: 挑战与希望并存

自美国世界观察研究所所长莱斯特·布朗发表《谁来养活中国》一文以后, 关于中国粮食问题的争论掀起了轩然大波。许多学者在冷静地分析后认为, 在中国粮食问题上, 既不能像布朗那样低调, 也不能囿于民族情绪而盲目乐观。从影

响我国粮食生产和供需平衡的内外因素看,在今后很长时期内将一直存在着潜在的粮食危机。一方面,随着工业化推进以及人口增长和民生状况的日趋改善,粮食需求总量将持续扩张,同时由于工业建设和其他非农侵占,农用耕地也在不断减少,这种逆向发展的不可移易之势给我国粮食生产造成巨大压力;另一方面,尽管从理论上说,粮食短缺可以由进口来弥补,但靠海外供应基本生活必需品对我国这样一个大国毕竟不是一个稳妥的办法,而且容易受到意识形态和政治因素的干扰,因此我国必须在粮食上保持相当水平的自给。因而,粮食问题是我国社会经济发展中政府所面临的最富挑战性的艰巨任务,也是政府应首先予以关注并为之奋斗的重大战略问题。

从我国农业现状来看,技术潜力巨大。科技进步在我国粮食增产中的贡献率份额大体在 35% 左右,而发达国家已达 60%~80%。在粮食单产方面,我国粮食作物单位面积产量虽然高于世界平均水平,但与发达国家相比,还有较大差距。水稻平均每亩低 60~80kg,小麦平均每亩低 100~200kg,玉米平均每亩低 200~300kg。在资源利用效率方面我国化肥利用率仅为 30%~40%,灌溉水利用率为 40% 左右。对此,科技挖潜增产的前景广阔。据范秀荣和彭珂珊(1998)报道,2010~2030 年的 20 年间,应保证 1.2% 的粮食增长速度,力争 1.4% 的粮食增长速度,这样才能有把握做好粮食供需总量基本平衡(表 1-1)。从我国粮食增产的潜力来看,中低产田改造、提高水肥资源利用率、选育推广良种、推广现有实用技术、提高复种指数等手段均有一定潜力。其中提高水肥资源利用率和提高复种指数是现实而有效的增产手段。

表 1-1 2010~2030 年我国粮食供需平衡状况 (单位: 亿 kg)

年份	需求量	供给量					
		1.0%增长速度		1.2%增长速度		1.4%增长速度	
		生产量	差额	生产量	差额	生产量	差额
2010	5628	5267	-361	5413	-215	5562	-66
2020	6176	5794	-382	6062	-114	6340	+164
2030	6818	6373	-445	6789	-29	7227	+409

资料来源: 范秀荣和彭珂珊, 1998。

二、集约化栽培与集约化种植: 中国农业的特色

我国是当今世界上人均资源甚少的国家之一,人均耕地、林地、草地和水资源分别相当于世界平均水平的 1/3、1/8、1/3 和 1/4,我国人均化肥量为 21kg,而世界平均人均 27.4kg,美国人均 75.4kg,原苏联人均 85.4kg。人口众多、资源相对匮乏的国情决定了中国必须选择以提高土地利用率为中心的集约化栽培与集约化种植的农作制度。