

# 水稻超高产栽培模式及系统理论的研究进展

龚金龙<sup>1</sup> 张洪程<sup>1,2,\*</sup> 李 杰<sup>1</sup> 戴其根<sup>1,2</sup> 霍中洋<sup>1,2</sup> 许 轲<sup>1,2</sup> 李德剑<sup>3</sup> 华正雄<sup>3</sup>  
沙安勤<sup>3</sup> 周有炎<sup>3</sup> 罗学超<sup>3</sup> 刘国林<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; <sup>2</sup>扬州大学 农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏 扬州 225009; <sup>3</sup>江苏省兴化市农业局, 江苏 兴化 225700; \* 通讯联系人, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

## Progress in Research on Patterns and Systematic Theories of Super-High-Yielding Cultivation in Rice

GONG Jin-long<sup>1</sup>, ZHANG Hong-cheng<sup>1, 2, \*</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, DAI Qi-gen<sup>1, 2</sup>, HUO Zhong-yang<sup>1, 2</sup>, XU Ke<sup>1, 2</sup>, LI De-jian<sup>3</sup>, HUA Zheng-xiong<sup>3</sup>, SHA An-Qin<sup>3</sup>, ZHOU You-yan<sup>3</sup>, LUO Xue-chao<sup>3</sup>, LIU Guo-lin<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; <sup>2</sup>Innovation Center of Rice Cultivation Technology in the Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; <sup>3</sup>Bureau of Agriculture of Xinghua County of Jiangsu Province, Xinghua 225700, China; \* Corresponding author, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

GONG Jinlong, ZHANG Hongcheng, LI Jie, et al. Progress in research on patterns and systematic theories of super-high-yielding cultivation in rice. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(4): 417-424.  
**Abstract:** The development of the patterns of super-high-yielding cultivation in rice was reviewed. Several new patterns of super-high-yielding cultivation in rice were highlighted and the systematic theories and approaches of the formation of super-high-yielding were analyzed. Moreover, the problems existed in the course of large-scale extension and production of super-high-yielding were discussed and the solutions were then put forward. Finally, the development of super-high-yielding cultivation pattern in the future was forecasted.  
**Key words:** rice; super-high-yielding cultivation; pattern; systematic theory

龚金龙, 张洪程, 李 杰, 等. 水稻超高产栽培模式及系统理论的研究进展. 中国水稻科学, 2010, 24(4): 417-424.  
**摘 要:** 围绕着超高产, 回顾了水稻超高产栽培模式的发展, 并重点介绍了其中几种水稻超高产栽培模式, 进而分析了水稻超高产形成的系统理论和途径, 探讨了水稻超高产栽培在大面积推广和生产中存在的问题并提出了解决途径, 最后展望了水稻超高产栽培模式的未来发展。  
**关键词:** 水稻; 超高产栽培; 模式; 系统理论  
**中图分类号:** S318; S511.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7216(2010)04-0417-08

水稻是我国主要粮食作物之一, 水稻生产在我国农业和农村经济发展过程中占有极其重要的战略地位, 也是我国农业可持续发展的一个永恒主题<sup>[1]</sup>。在 2004—2007 年连续 4 年的粮食增产中, 播种面积扩大的贡献率为 40%, 单产提高的贡献率为 60%。据联合国粮农组织预测<sup>[2]</sup>, 未来世界粮食增产总量约 20% 来自播种面积的增加, 约 80% 来自单产的提高。育种和栽培犹如两个轮子, 推动着水稻单产的提高。良种需“良法”, 如果没有与之相适应的新的栽培模式, 它们在生产上的作用将受到极大的限制<sup>[3]</sup>。

### 1 水稻超高产栽培模式的回顾

关于水稻超高产栽培途径, 国内外学者提出了多种构想<sup>[4-14]</sup>。日本学者川田<sup>[4]</sup>提出改良土壤的

途径, 松岛<sup>[5]</sup>提出塑造理想株型的途径, 凌启鸿<sup>[6]</sup>提出提高群体质量的途径, 陶诗顺等<sup>[7]</sup>提出超多蘖壮秧超稀植的途径。同时也总结出很多超高产栽培理论和技术, 如“水稻逆 V 字型减氮栽培”<sup>[8]</sup>、“三高一稳栽培”<sup>[9]</sup>、“稀少平栽培”<sup>[10]</sup>等。邹应斌<sup>[11]</sup>认为选用当地推广的品种采用超高产栽培比传统栽培增产 15%~20%。袁隆平<sup>[12]</sup>认为超稀植是通过移植乳苗, 充分扩大水稻地上部和地下部的生长与生存空间, 达到壮个体、促大穗、得高产的目的。肖桂凡等<sup>[13]</sup>提出了超级稻垄体环型健根稀植栽培法, 扩

收稿日期: 2009-08-27; 修改稿收到日期: 2009-10-24。  
**基金项目:** 国家粮食丰产科技工程资助项目(2006BAD02A03); 农业部超级稻专项资助项目; 江苏省农业科技攻关项目(BE2009399); 江苏省重点实验室开放课题资助项目(HZHL0806)。

大地下生长空间,在充分发挥大穗优势的基础上,行环型垄栽,比对照增产5.0%~14.7%,尤以宽窄行环型垄栽的增产效果极显著。白洪松等<sup>[14]</sup>认为采用“三超栽培”方法育秧,45~50 d可培育出5.5~6.5叶的大龄壮苗,可提早抽穗成熟7~10 d,实现持续寒地超高产的目标。

## 2 水稻超高产栽培新型模式

### 2.1 强化栽培

水稻强化栽培体系(system of rice intensification, SRI)是20世纪80年代由Henri de Laulanie神父在马达加斯加(Madagascar)提出的一种新的栽培方法<sup>[12]</sup>。在马达加斯加应用多年获得了很好的增产效果,近年在其他国家试验也显示较大的增产潜力<sup>[12,15]</sup>。2001年以来,我国也掀起水稻强化栽培的研究热潮<sup>[15-17]</sup>。强化栽培的特点是超高产、超稀植、省工、省种,但并非任何生态稻区都适宜推广。

强化栽培通过嫩秧早栽,配合稀植和湿、晒、浅、间灌溉技术,可以促进分蘖大量早生快发,有利于强健根系的建成和植株的健壮生长;采用有机无机肥配合与减前增后施肥技术,可延缓生育后期水稻根、叶早衰,显著提高生育后期的光合强度和光合产物积累,从而达到足穗、大穗、大粒、高产的目的,且有利于改善稻米品质和节省稻田灌溉水,从而形成超高产。

与传统栽培技术比较,水稻“三围立体”强化栽培<sup>[18]</sup>的主要技术有以下优点:1)嫩秧早栽。与传统栽培技术相比,移栽秧苗减少了2~4片叶,有利于早生快发,以充分发挥水稻的大田分蘖优势;2)稀植壮株。SRI的核心是方型单苗栽培,株窝距=株高/3.15<sup>[19]</sup>,根据不同气候条件调整有“方型3本”、双三角、条型小三角等<sup>[20]</sup>;3)通风透光性好。较大的株行距有利于通风透光,改善农田小气候,减少病虫害的发生;4)重穗。强化栽培主要利用水稻的低位分蘖,分蘖早而壮,形成大穗,增加每穗实粒数。

郑家国等<sup>[20]</sup>研究指出,虽然强化栽培有效穗数和千粒重均有所降低,但穗着粒数、实粒数显著增加,这是产量突破的关键。

### 2.2 旱育垄作栽培

垄作栽培法作为我国农业耕作上的两大体系之一<sup>[21]</sup>,约始创于西周时期,初步发展于春秋战国,大发展于秦汉至隋唐五代,到宋元明清达到成熟阶段,并一直延续到现在,我国东北至今仍是普遍实行垄作的地区<sup>[22-24]</sup>。从近年来国内外垄作技术发展来

看,垄作栽培呈现出由原来雨量稀少而多暴雨的半干旱地区扩大到热带草原<sup>[25]</sup>,由中耕作物扩大到麦类作物,由旱地农业扩展到灌溉农业的发展趋势<sup>[26-31]</sup>。由于垄作栽培法在节水、节能、省时、省工及保护环境和提高土壤肥力、水分利用率及光能利用率等方面具有显著的效果,因而它也是实现农业可持续发展的重要途径<sup>[32-33]</sup>。

垄作在提高群体总根量以及根系活力上有显著正效应,最大根干物质质量增量达48.4%,根系下扎深<sup>[34-36]</sup>;茎蘖动态和叶面积指数均表现为前期上升较快,中期保持稳健,后期下降缓慢的趋势,延长了后期光合时间;干物质积累动态表现为前期增加较缓慢,后期增加较快,且在成熟期保持较高的干物质积累量。垄作栽培利于改善群体的受光姿态,茎生上3叶受光姿态较好,剑叶叶基角和披垂度小;植株高度矮化,群体节间配置基部缩短,穗茎节长,基部节间粗壮;群体物质重心下移,器官垂直分布更趋合理,容纳较大的穗部库容,抗倒伏能力强<sup>[37]</sup>。

垄作栽培法在一定程度上缓解了我国南方水稻常发倒伏以及群体中后期生长量过大,根系早衰,库容得不到有效充实等问题,增产效应显著,较平作增产达8.3%<sup>[37]</sup>。

### 2.3 寒地“三超”栽培

寒地“三超”栽培<sup>[38]</sup>是在水稻超稀植技术的基础上发展起来的<sup>[39]</sup>,主要针对目前寒地稻作存在的热量资源差、生育期短、播种量大、秧苗素质差、弱苗密植早插、返青期过长、施肥方法不当、无效分蘖过多、停滞生长期长、灌水量过多等诸多限制水稻个体生长而影响群体质量的障碍性因素,其主要内容:一是选用优质超级稻;二是宽行、单双本超稀植;三是持续超高产。归纳起来就是以选用优质超级稻品种为前提,多蘖壮秧为基础,宽行单双本为核心,深施肥、控灌水为关键,以防止病、虫害为保证,以培肥地力持续高产为目标的一种综合栽培模式。

水稻的产量最终来自于光合产物的积累,尤其是抽穗后的光合作用。为此,除选用产量目标的水稻品种,合理确定插秧规格、肥、水这3个影响水稻产量的主要因子之外,还必须把握住稻作高产态势,并积极塑造高产群体,以宽行超稀植的方式提高通风透光能力,最大限度地提高光合效率,提高成穗率和结实率,增加植株的抗性,使之克服病重、早衰、倒伏三大弊病,从而达到预期的产量目标。1999—2005年,该技术在黑龙江省50多个市、县、农场110个点累计示范推广了54.5万hm<sup>2</sup>,平均产量

9.4995 t/hm<sup>2</sup>，比稀植栽培（7.5 t/hm<sup>2</sup>）增产 1.9995 t/hm<sup>2</sup>（增产 26.2%），新增收入 18.801 亿元（增收 16.35 亿元+节本 2.451 亿元），取得了显著的社会、经济效益<sup>[40]</sup>。

2.4 “旺壮重”栽培

旺根、壮秆、重穗（简称“旺壮重”）栽培是通过培育旺健根系，促进大穗发育和茎秆增粗，以低群体、大个体、高积累，创造大穗、大粒、高结实率而获得超高产<sup>[41]</sup>。

“旺壮重”栽培条件下，水稻生育前期生长速度加快，以增加叶面来截获较多的光能，积累较多的光合产物，促进中、后期的穗大、粒多、粒重。同时，在旺壮重栽培条件下，孕穗期和乳熟期群体净同化率比传统栽培提高 8.53%~18.9%，<sup>14</sup>C 同化产物分配于穗部的比例提高 1.16~2.78 个百分点，根系吸收表面积比对照提高 9.13%和 4.55%，活跃吸收表面积提高 6.57%和 7.73%，表现出超高产的生理优势<sup>[11]</sup>。双季早稻前期早发群体成穗率高（75.7%~76.8%），群体内部通风透光好，顶层下 30 cm 透光率为 50.8%，光合产物积累多，成熟期地上部干质量为 14.1662~14.3339 t/hm<sup>2</sup>，库容量大（颖花量为 3.87 万~3.94 万/m<sup>2</sup>），最终表现为籽粒产量高（8.3820~8.4945 t/hm<sup>2</sup>）。早稻 V402 单产 7.9815~8.4945 t/hm<sup>2</sup>，晚稻 V198 为 8.4815~8.9805 t/hm<sup>2</sup>，分别比传统栽培增产 11.7%和 13.3%<sup>[42]</sup>。

2.5 群体质量栽培

群体质量栽培通过压缩群体起点，为个体创造优越的生长条件，为群体进一步挖掘生产潜力，使个体与群体的生育动态合理，分蘖穗的比例提高到 60%以上，显著改善群体质量，有效地增加了灌浆成

熟期的生物量，提高了群体的生产力和经济产量。充分发展个体，构建合理群体，走“小（群体）、壮（个体）、高（积累）”的栽培途径<sup>[43]</sup>。

水稻超高产群体应是高光效群体，应具有优质的形态空间结构和生理功能，具有最大的光合生产积累能力，具有良好的群体生育指标（表 1<sup>[44]</sup>）。对群体光合积累和产量形成起决定作用的形态和生理指标称为群体质量指标<sup>[45]</sup>，包含结实期群体光合生产积累量、群体适宜叶面积指数、群体总颖花量、粒/叶比、有效和高效叶面积比例、抽穗期单茎茎鞘质量和颖花根活量等 7 个指标。群体质量超高产栽培模式基于群体质量理论和叶龄模式，以茎蘖成穗率作为群体动态诊断指标，观测群体生育动态并适时进行精确调控和栽培管理，使得栽培技术由经验型转向精确化和科学化。

采用群体质量超高产栽培模式，2006 年协优 107 在云南省永胜县产量达 19.305 t/hm<sup>2</sup>，创造了单产世界新记录<sup>[46]</sup>；2006 年和 2007 年陵香优 18 在江苏省兴化市产量分别达 12.2265 t/hm<sup>2</sup>和 13.3035 t/hm<sup>2</sup><sup>[47]</sup>。

2.6 超级稻栽培

从广义来说，超级稻在各个主要性状方面如产量、米质、抗性等均显著超过现有品种（组合）的水平；从狭义来说，超级稻是指在抗性和米质与对照品种（组合）相仿的基础上，产量有大幅度提高的新品种（组合）。随着我国水稻矮化育种和杂种优势利用的深入，在矮化基础上寻求产量的突破需要构建理想的株型并与强杂种优势利用相结合，研究单产大幅提高、品质优良、抗性较强的新型水稻品种，这就是超级稻现阶段的特定涵义。超级稻品种具有分蘖

表 1 中粳稻超高产群体生育指标  
Table 1. Growth indexes of super-high-yielding mid-season japonica rice.

性状 Trait	指标 Index
总颖花量 No. of total spikelets/( $\times 10^4 \cdot m^{-2}$ )	>4.5
结实率 Seed-setting rate/%	>90
千粒重 1000-grain weight/g	26~28
分蘖成穗率 Rate of productive tillers/%	>80
抽穗期叶面积指数 Leaf area index at the heading stage	7.5~8.0
总光合势 Total photosynthetic potential/( $m^2 \cdot d \cdot hm^{-2}$ )	> $5 \times 10^6$
成熟期干物质质量 Dry matter weight at the maturity stage/( $t \cdot hm^{-2}$ )	>22
抽穗至成熟干物质积累量 Accumulation of dry matter from heading to maturity/( $t \cdot hm^{-2}$ )	>8
粒叶比 Grain-leaf ratio/(No. $\cdot cm^{-2}$ )	>0.58
茎鞘物质运转率 Translocation ratio of matter from stems and sheaths/%	>11
抽穗期根冠比 Root-shoot ratio at the heading stage	>0.25
抽穗期根系伤流量 Root exudates at the heading stage/( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	>5
收获指数 Harvest index	>0.51

适中、剑叶挺直、植株矮中求高、茎秆坚韧抗倒、穗大粒多的形态特征。同时,具有光合效率高、根系活力强、源库流协调的生理机能,具有高产、优质、抗逆、抗病性状聚合的遗传基础(<http://baike.baidu.com/view/589392.htm?fr=ala0>)。

超高产育种与超高产栽培都是取得稻谷最高产量指标的途径,前者侧重基因型改良,后者侧重环境改善,没有品种(组合)生理活性的改善,即使栽培技术、环境条件很好,也不能达到理想的产量,没有良好的栽培技术,品种、组合的内在增产潜力也不能得到发挥,两者关系紧密,缺一不可<sup>[3]</sup>。中国水稻研究所牵头主持的“超级稻配套栽培技术开发与集成”研究重点攻关研发“双超”(超级稻超高产)配套栽培模式与途径,在综合应用稀播壮秧、宽行窄距移栽、合理稀植、好气灌溉、精确施肥、病虫草害防治等技术的基础上,根据具体品种(特性)采用实地氮肥管理<sup>[48-49]</sup>、测土配方施肥<sup>[50]</sup>、控释氮肥<sup>[51]</sup>等国内外先进超高产栽培技术,并在“稳前优中”的基础上进一步探索“稳前优中强后”的施肥模式,通过“强根促蘖、匀穗匀粒和增穗增粒”从而促进超高产的形成,取得良好的经济效益、社会效益和生态效益。

吴文革等<sup>[52]</sup>通过对兴化和常熟“双超”栽培示范区分析发现,虽然生产成本有不同程度提高,但随着产量大幅度增加,在目前稻谷价格稳定提高的情况下,单位面积净产值可达 8985~9510 元/hm<sup>2</sup>,比对照的 6465~7530 元/hm<sup>2</sup> 平均增长 33.7%;纯收益从对照的 2250 元/hm<sup>2</sup> 增加到 4050 元/hm<sup>2</sup> 左右,增幅达 80%;劳动生产率与物质投资利润也同步提高。

3 水稻超高产栽培的系统理论模式

凌启鸿等<sup>[53]</sup>从水稻不同生育时期的光合产物和产量形成的关系发现,水稻不同生育时期的光合产物是为建成当时正在生长的器官服务的,在抽穗以前,光合产物是为建成抽穗期的群体服务的,抽穗以后的光合产物才集中主要输向穗,输向稻谷。根据这一研究新成果,他们将作物生理学家沿用几十年的“经济产量=生物产量×收获系数”的理论公式,修改为“经济产量=花后光合积累量+花前贮藏物质×运转率”。

3.1 充分发挥花后叶片的光合积累量

3.1.1 提高最适叶面积指数

水稻最适叶面积指数(LAI)与稻谷产量呈极显著正相关<sup>[54]</sup>。因此,在水稻高产栽培研究中首先应

考虑如何尽可能地提高最适叶面积指数。

3.1.1.1 选择 LAI 高的品种

陈温福等<sup>[54]</sup>研究表明,在同一生态条件下,不同类型水稻品种最适叶面积指数有显著差异。甬优 8 号是在长江中下游地区可获得超高产的品种,株型较好,为浓穗型株型,株高 113.3 cm 左右;根系发达,茎秆粗壮坚韧,叶型长、厚、挺、笃;倒 3 叶功能期长,穗型长,着粒均匀稠密,谷粒团圆,谷色黄亮,熟相清秀,2007 年江苏省姜堰市超高产示范方平均产量达 13.5495 t/hm<sup>2</sup>。由此可见,最适 LAI 与株型有关,冠层 1~3 叶直立,叶长而窄,穗型直立、茎叶夹角小的品种,有利于下部叶片受光,其高产最适 LAI 较高,甬优 8 号孕穗期的最大 LAI 达 8.0~8.5。

3.1.1.2 安排好灌浆结实期

水稻最适 LAI 与灌浆结实期的光照强度呈极显著正相关<sup>[55]</sup>。杨海生等<sup>[56]</sup>研究发现粳稻都表现为日平均气温 25℃ 左右时抽穗开花的产量最高。据江西赣州地区农业局观察,早稻于 6 月 20 日前后抽穗,日均温 24℃ 左右,可以避免灌浆结实期 35℃ 以上高温热害;晚稻 9 月 20 日前后抽穗,日均温 28℃ 可避免结实期低温(<22℃)障碍<sup>[53]</sup>。因此,应因地制宜地将水稻灌浆结实期安排在温光条件优越且适宜的月份。

3.1.2 提高高效叶面积率和有效叶面积率

凌启鸿等<sup>[45]</sup>的研究结果指出,在叶面积指数相近情况下,高效、有效叶面积率越高,群体粒叶比、总颖花量及产量也越高;杨建昌等<sup>[57]</sup>的研究表明,水稻抽穗后,无效分蘖越少越有利于高产;蒋彭炎等<sup>[58]</sup>认为,成穗率越高的群体光合效率越高。因此,在较高的 LAI 时,要尽可能提高有效叶面积指数。其途径有:一是控制无效分蘖,措施是当水稻分蘖苗数达到高产所需有效穗数 80% 时进行深水控蘖<sup>[59-60]</sup>;二是尽量减轻倒 4 叶以下叶片的荫蔽程度,措施是本田适当密植、减少施氮量、氮肥重底肥结合穗粒肥、等行距栽插等,以显著减小上部 3 片叶叶面积,提高其有效叶面积率,同时改善下部叶片的光照条件而增产<sup>[61]</sup>。

3.1.3 提高叶片光合速率

在水稻 LAI 一定条件下,光合速率与产量呈显著正相关<sup>[62]</sup>,提高光合速率的途径如下。

3.1.3.1 提高单叶光合速率

叶片是水稻的主要光合器官,比叶重、叶厚、叶绿素含量和含氮量在一定范围内与光合速率呈显著

正相关<sup>[62]</sup>。栽培上通过减数分裂期(叶龄余数 0.4/0.3~0)及齐穗期追施适量氮肥,能有效地提高叶绿素含量和含氮量,进而提高单叶光合速率。

### 3.1.3.2 提高群体光合速率

水稻大面积种植,要获取持续超高产,必然要求群体生长良好,群体光合能力强,以下分 4 个方面进行分析和总结:

1)光照强度与光合速率呈极显著正相关<sup>[55]</sup>,因此,首先应将灌浆结实期安排于一年中光照强度最大、日照时间最长的季节。

2)松岛省三等<sup>[63]</sup>认为,水稻顶部 3 叶应挺、短、厚而直立;杨守仁等<sup>[64]</sup>则认为松岛省三的“短、厚、直立”之说中的“短”要慎重对待;凌启鸿等<sup>[65]</sup>主张在保持各叶挺立情况下,顶部 3 叶应长一些,特别是倒 2 叶的长度。徐富贤等<sup>[61]</sup>研究发现,在群体叶面积指数基本相同情况下,单茎叶面积和单茎顶 3 叶叶面积均分别与产量呈显著正相关。关于齐穗后倒 4 叶以下叶的功能,杨建昌等<sup>[57]</sup>认为倒 4、倒 5 叶在中粳、中粳及杂交粳稻上都表现为与单茎产量呈显著或极显著正相关。万安良等<sup>[66]</sup>则认为倒 4 叶以下叶对灌浆结实几乎没有作用。徐富贤等<sup>[61]</sup>研究表明,齐穗期倒 4 叶以下叶对穗重的贡献与群体基部光照强度呈极显著正相关,即群体过密、稻株基部荫蔽严重时作用甚微。综上所述,水稻抽穗后最佳冠层结构为:顶 3 叶应长、直立、窄,既可提高顶 3 叶光合速率,又能改善倒 4 叶以下叶片的光照条件而提高光合速率。相应的栽培措施是:底肥增施硅肥、N 肥重施底肥结合施穗粒肥、圆秆拔节期烤田,可达到改善上述株型冠层结构的目的<sup>[61,67-68]</sup>。

3)从源库关系看,曹显祖等<sup>[69]</sup>研究认为,有的品种源是限制因素,有的品种库是主要限制因素,有的品种源库均是限制因素,这是以往这方面研究结论不一致的原因之一。朱庆森等<sup>[70]</sup>进一步指出增源增产型多为大穗型高产品种,属异步灌浆型。提高源的供应能力,使源库关系在更高水平上协调起来,将有可能进一步提高产量。凌启鸿等<sup>[71]</sup>认为,在最适 LAI 条件下,提高粒叶比可显著提高叶片光合速率而增产。蒋彭炎等<sup>[58]</sup>的研究结果表明,中期高成穗率群体后期必须是高光效群体,其实质也就是提高了粒叶比。总之,在最适 LAI 条件下,粒叶比的高低是评价库源关系的综合指标<sup>[45]</sup>。提高粒叶比的栽培路线,一是在获得形成高产所必需有效穗数条件下,把无效分蘖控制得越少越好<sup>[57,60]</sup>;二是对每个有效茎蘖上的叶片生长进行控制调节,适

当促进与形成大穗密切相关的叶片生长,尽可能控制与颖花数关系不密切叶片的生长,同时保持叶片挺拔,具有良好的受光姿态<sup>[60,72-73]</sup>。

4)从穗的形态与功能关系看,早在 20 世纪 60 年代初殷宏章等<sup>[74]</sup>就发现水稻穗子弯曲影响群体光能利用,但由于过去栽培的品种都是弯穗的,人们对这个问题没有深入研究。20 世纪 80 年代以来育成的辽粳 5 号等高产品种,在株型上的一个重要特点就是穗直立直到成熟,对此人们褒贬不一。徐正进等<sup>[75]</sup>的研究表明,直立穗型群体光照状况改善,半直立和弯曲穗型穗对光的拦截程度相近,但弯曲穗型在一定程度上降低了穗在群体中的相对位置,有利穗位以上叶片的光合作用。因此,从光能利用角度看,直立穗型优于弯曲穗型,弯曲穗型又优于半直立穗型。齐藤等<sup>[76]</sup>也发现穗的遮光程度存在显著的品种间差异。在栽培上可通过选择直立或弯曲穗型改善群体光照条件,栽培措施对穗型的影响目前尚无研究报道。

### 3.1.4 延长光合时间

光合时间与光合产量呈正相关<sup>[77]</sup>,栽培上延长光合时间有两条措施:一是采用东西行向宽窄行条栽<sup>[78]</sup>;二是将灌浆结实期安排于一年中日照最长的季节。

## 3.2 充分利用花前贮藏于茎鞘的光合物产量潜力

一般认为水稻产量的 80% 以上来自抽穗后叶片的光合作用,来自茎鞘早期贮藏的物质积累较少<sup>[73]</sup>。因此,对水稻抽穗前茎鞘中光合产物对穗部灌浆结实的贡献研究极少。徐富贤等<sup>[79]</sup>对齐穗期不同去叶处理的研究结果表明,全去叶处理穗重为对照的 25.2%~28.9%,说明茎鞘中贮藏的光合产物有较大的增产潜力,应引起研究与生产的高度重视。

### 3.2.1 提高抽穗期单茎鞘干物质量

在最适叶面积指数相近时,单茎鞘干物质量高的群体,最适叶面积指数保持的时间较长。因此,在合理群体条件下,提高单茎鞘干物质量有利于改善群体的冠层结构,提高抽穗后的光合量、净同化率及茎鞘物质向穗部的运输率,显著提高产量<sup>[80]</sup>。

### 3.2.2 提高花前茎鞘中光合产物向穗部的运转率

徐富贤等<sup>[81]</sup>研究表明,随着粒叶比的提高,尽管叶片光合强度提高,提高了光合速率,仍不能完全满足“库”所需要的灌浆物质。随着粒叶比的提高,茎鞘干物质量显著下降,茎鞘对穗部的灌浆作用程度与粒叶比值呈显著正相关<sup>[82]</sup>。因此,在保持最适

叶面积指数条件下,提高粒叶比可较好地利用茎鞘中光合产物的产量潜力。

4 水稻超高产的问题讨论及解决途径

在当今形势下,追求产量、保障国家粮食安全的同时,必须探讨满足“高产、优质、高效、生态、安全”五个方面综合要求的、先进的、比较轻简的栽培技术,简称“十字”栽培方针<sup>[53]</sup>。纵观目前各种超高产栽培模式,其中仍然存在一些不足和问题。

4.1 超高产重演性差

由于水稻超高产目标比较难获得,即使获得超高产,超高产记录重演性也差,导致高产目标难以实现,仅在小面积以及特定年份和生态环境下取得。解决途径:探讨品种与栽培措施配套技术体系和与之相适应的生态环境,建立稻田地力恢复体系,做到稻田肥力收支平衡,同时研究水稻超高产的生态适应性规律和产量形成机制,提高稻田可持续生产力。

4.2 超高产栽培与环境保护协调性差

随着水稻产量的进一步提高,氮肥的用量也将进一步加大,环境也将有进一步恶化的趋势。如何在保证高产、优质的前提下协调好水稻超高产栽培技术与环境友好之间的关系,已经成为栽培学上一个亟待解决的重大问题。协调途径:建立土壤养分指标标准体系和配套的地力恢复、农田环境保护机制,探明水稻养分吸收规律和最佳施肥技术,为实现水稻超高产可持续发展提供保障。

4.3 降低水稻生产成本和提高稻田经济效益

实现高产和高效的统一是“十字”栽培方针的一个重要原则。其实质就是如何以尽可能少的物化投入和劳力投入去取得尽可能高的产量。水稻是一种高产作物,但是也是一种投入较多的作物。特别是水稻从播种至收获时间较长,农事活动多,劳动力投入量高于一般大田作物,且劳动强度较大。随着农村经济的发展,农业劳动力逐渐升值,劳动力投入在水稻生产投入中的比例越来越大。种稻经济效益偏低在不少地方已成为严重影响农民种稻积极性的一个重要原因。这无疑也是水稻超高产栽培中应充分重视的问题。协调途径:将各地的超高产经验加以推广,让超高产措施经历市场化运作,保证持续超高产和高效,在解决和保障国家粮食安全的同时又能有效地提高农民收入。

4.4 水稻超高产实用栽培技术应用问题

近十年关于水稻超高产栽培研究较多。但是,目前我国关于水稻超高产的栽培技术措施比较复

杂,难度较大,不利于农民接受。协调途径:必须改善栽培技术的可操作性问题,也就是说研究出一条操作简便、成本较低、农民能够接受的,并且能保证水稻生产力水平较好发挥的轻简栽培道路。

5 水稻超高产模式的研究展望

纵观各种水稻超高产栽培模式,目前研究大多是围绕着“稀植化”展开。人们对水稻稀植优化栽培的探索已取得了瞩目的进展,随着相关研究的不断深入和生产实践的证实,稀植优化栽培必将成为我国杂交水稻超高产栽培的主要方向。

同时,水稻超高产栽培需要在宏观上利用电子计算机模拟技术,将定性研究与定量研究相结合,在微观上要利用分子生物学关于植物激素与基因调节的技术,将传统的精耕细作与化学调控相结合,以达到水稻稳定持续超高产,从而使我国水稻单产发生第三次质的飞跃。

参考文献:

[1] 高旺盛,杨光立. 粮食安全与农作制度建设. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2004.

[2] 黄成娟. 利用农业资源保障我国粮食安全的思路. 经济纵横, 2008 (7): 71-13.

[3] 陶诗顺,马 均. 杂交水稻超高产栽培技术路线的探讨. 作物杂志, 2001(3): 25-28.

[4] 川田信一郎. 稻の根. 东京: 日本农山渔村文化协会, 1982: 102.

[5] 松岛省三. 稻作の改善と技术. 东京: 日本养贤堂, 1973: 211.

[6] 凌启鸿. 水稻高产高效理论与新技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1996: 124-135.

[7] 陶诗顺,马 均. 杂交中稻超多蘖壮秧超稀栽培高产原理探讨. 西南农业学报, 1998, 11(增): 37-43.

[8] 李立华,李静英,熊朝晖,等. 湘晚籼 11 号逆 V 字型减氮栽培示范. 作物研究, 2006, 20(4): 351-352.

[9] 蒋彭炎,洪晓富. 水稻三高一稳栽培法( I ). 农技服务, 1996 (9): 10-12.

[10] 蒋彭炎,姚长溪,任正龙. 春粮田早稻稀少平促高产栽培法的研究. 浙江农业科学, 1980(2): 51-55.

[11] 邹应斌. 水稻超高产栽培的理论与技术策略——兼论壮秆重穗栽培法. 农业现代化研究, 1997, 18(1): 31-35.

[12] 袁隆平. 水稻强化栽培技术. 杂交水稻, 2001, 16(4): 1-3.

[13] 肖桂凡,袁聘卿. 超级稻茎秆环型健根稀植栽培法研究初报. 湖南农业科学, 2003(4): 31-32.

[14] 白洪松,冯志春,任元利. 水稻“三超栽培”品种及移栽规格研究. 垦殖与稻作, 2005(5): 15-17.

[15] 彭既明,罗润良. 国际水稻强化栽培会议在三亚召开. 杂交水稻, 2002, 17(3): 59.

[16] 徐富贤,郑家奎,朱永川,等. 冬水田杂交中稻小苗超稀栽培

对水稻生长的影响. 杂交水稻, 2003, 18(3): 40-43.

[17] 马 均, 陶诗顺, 田彦华, 等. 水稻强化栽培试验初报. 杂交水稻, 2002, 17(5): 42-44.

[18] 何金旺. 实现水稻超高产的重要途径——三围立体强化栽培技术. 科学种养, 2009(1): 12-13.

[19] 马 均. 水稻超高产强化栽培技术规程. 中国农技推广, 2005(5): 24-25.

[20] 郑家国, 姜心禄. 水稻超高产的突破技术. 种植技术, 2002(10): 11-12.

[21] 沈昌蒲, 尹嘉峰. 国内外研究垄作区田的情况. 水土保持科技情报, 1995(2): 62-64.

[22] 郭文韬. 再论中国古代的垄作耕法. 中国农史, 1992(2): 77-80.

[23] 刘巽浩, 牟正国. 中国耕作制度. 北京: 农业出版社, 1993: 365-369.

[24] 刘先宁, 苏树声. 水稻半旱式垄作栽培及综合利用技术. 农技服务, 1991(2): 5-8.

[25] 蔡典雄, 王小彬. 关于持续性保持耕作体系的探讨. 土壤学进展, 1993, 21(1): 1-8.

[26] 王法宏, 刘世军. 小麦垄作栽培技术的生态生理效应. 山东农业科学, 1999(4): 4-7.

[27] 韩秉进. 不同规格垄作覆膜对甜菜产质量的影响. 中国糖料, 1998(2): 30-31.

[28] 兰树臣, 刘凤海, 唐成霞. 玉米大双覆立体栽培的增产作用及技术要点. 黑龙江农业科学, 1996(1): 35-36.

[29] 董合林, 刘美荣. 垄作与地膜覆盖对麦套春棉产量和霜前花率的影响. 中国棉花, 1997, 24(3): 19-20.

[30] 张荣华, 何 庸. 大豆宽台栽培与垄作耕层温度调查. 现代化农业, 1996(7): 13-14.

[31] 黄义德. 大别山区冷浸田水稻旱秧垄作栽培早熟增产的生理学基础. 安徽农业科学, 1998, 26(1): 5-7.

[32] 黄庆裕. 水稻垄作栽培的关键技术及其效应分析. 广西农业科学, 1995(4): 151-152.

[33] 戴 德. 高寒山区冷浸田水稻半旱式免耕垄作增产机理. 安徽农业, 1998(3): 7.

[34] 黄建国, 袁 玲. 垄作对再生稻产量品质的影响. 耕作与栽培, 1990(3): 27-28.

[35] 贾玉柱, 王长生. 小麦垄作栽培试验. 现代化农业, 1993(12): 13.

[36] 高 明, 车福才, 魏朝富, 等. 垄作免耕稻田水稻根系生长状况的研究. 土壤通报, 1998, 29(5): 236-238.

[37] 王怡红. 南方水稻垄作栽培高产形成的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.

[38] 金学泳. 寒地水稻三超技术. 中国稻米, 2000(6): 21-22.

[39] 金学泳, 金正勋, 李荣田, 等. 寒地水稻宽中深控超高产栽培技术. 中国稻米, 1999(5): 23-24.

[40] 金学泳. 寒地水稻“三超”栽培的效应与技术. 中国稻米, 2006(2): 35.

[41] 屠乃美. 双季“旺壮重”栽培技术. 农村百事通, 2007(7): 18-19.

[42] 邹应斌, 黄见良, 屠乃美, 等. “旺壮重”栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响. 作物学报, 2001, 27(3): 343-350.

[43] 凌启鸿, 张洪程, 程庚会. IR24 大面积高产栽培技术途径. 江苏农业科学, 1982(9): 1-10.

[44] 杨建昌, 杜 永, 吴长付, 等. 超高产梗型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1336-1345.

[45] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1-11.

[46] 李刚华, 丁艳锋, 王绍华, 等. 水稻超高产栽培的精确量化——设计与实现//水稻精确栽培理论与技术研讨会论文集. 扬州: [出版者不详], 2006.

[47] 李 杰, 张洪程, 钱银飞, 等. 水稻超高产栽培研究进展. 杂交水稻, 2008(5): 1-6.

[48] 刘立军, 吴长付, 张 耗, 等. 实地氮肥管理对稻米品质的影响. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 625-630.

[49] 刘立军, 徐 伟, 吴长付, 等. 实地氮肥管理下的水稻生长发育和养分吸收特性. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 167-173.

[50] 汪 平. 测土配方施肥技术与应用. 安徽农业科学, 2006, 34(13): 3127-3128.

[51] 罗兰芳, 郑圣先, 廖育林, 等. 控释氮肥对杂交水稻糙米蛋白质品质和氮代谢关键酶活性的影响. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 403-410.

[52] 吴文革, 张洪程, 吴桂成, 等. 超级稻超高产技术经济效益分析. 江苏农业科学, 2007(1): 16-21.

[53] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻精确定量栽培理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2007.

[54] 陈温福, 徐正进. 不同株型粳稻品种的冠层特征和物质生产关系的研究. 中国水稻科学, 1991, 5(2): 67-71.

[55] 田中孝幸. 水稻的基础生理和生态. 朱庆森, 沈德余, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 5-7.

[56] 杨海生, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻生育进程与季节进程优化同步理论及区域化应用//水稻精确栽培理论与技术研讨会论文集. 扬州: [出版者不详], 2006.

[57] 杨建昌, 朱庆森, 曹显祖, 等. 水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究. 中国农业科学, 1992, 25(4): 7-14.

[58] 蒋彭炎, 洪晓富, 冯来定, 等. 水稻中期群体成穗率与后期群体光合效率的关系. 中国农业科学, 1994, 27(6): 8-14.

[59] 蒋彭炎, 马跃芳, 洪晓富, 等. 水稻分蘖芽的环境敏感期研究. 作物学报, 1994, 20(3): 290-296.

[60] 蒋彭炎. 水稻三高一稳栽培法的理论与技术. 山东农业大学学报, 1992, 23(增): 18-24.

[61] 徐富贤, 洪 松. 杂交中稻各叶面积与叶效率的关系及其高产栽培途径. 西南农业学报, 1995, 8(增): 110-116.

[62] 徐正进. 水稻超高产研究中的几个生理学问题//全国首届青年农学学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 55-58.

[63] 松岛省三. 水稻栽培新技术. 肖连成, 译. 长春: 吉林人民出版社, 1973: 18-30.

[64] 杨守仁, 张龙步, 王进民. 水稻理想株型育种的理论和方法初论. 中国农业科学, 1984, 17(3): 6-13.

[65] 凌启鸿, 苏祖芳, 蔡建中, 等. 水稻壮秧指标的研究. 江苏农学院学报, 1982, 5(2): 116-119.

[66] 万安良, 钟永模. 水稻品种叶面积与穗重关系的研究. 中国农业科学, 1981, 14(6): 21-28.

[67] 凌启鸿, 陆卫平, 蔡建中, 等. 水稻根系分布与叶角关系的研究初报. 作物学报, 1989, 15(2): 123-131.

[68] 王一凡. 水稻高产株型研究. 山东农业大学学报, 1992, 23(增): 34-40.

[69] 曹显祖, 朱庆森. 水稻品种的库源特征及类型划分的研究. 作物学报, 1987, 13(4): 265-272.

[70] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析. 作物学报, 1988, 14(3): 182-193.

[71] 凌启鸿, 杨建昌. 水稻群体“粒叶比”与高产栽培途径. 中国农业科学, 1986, 19(3): 1-8.

[72] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻不同叶龄期施用穗肥的研究. 江苏农学院学报, 1985, 6(3): 11-19.

[73] 凌启鸿, 苏祖芳, 张洪程, 等. 水稻品种不同生育类型的叶龄模式. 中国农业科学, 1983, 16(1): 9-18.

[74] 殷宏章, 雷宏俦, 王天铎. 稻麦群体研究论文集. 上海: 上海科学技术出版社, 1961: 33-50.

[75] 徐正进, 陈温福, 张龙步, 等. 水稻不同穗型群体光分布的比較研究. 中国农业科学, 1990, 23(4): 10-16.

[76] 斎藤邦行, 下田博之, 石原邦. 水稻多収性品種の乾物生産特性の解析: 第 2 報 早生・中生数品種間の比較. 日作紀, 1990, 59(2): 303-311.

[77] 肖世和, 陈 孝, 吴兆苏. 小麦花后生物产量及其组分的动态分析. 作物学报, 1995, 21(2): 155-160.

[78] 洪 松, 徐富贤. 泸州市气象条件和双季晚稻栽培. 西南农业学报, 1993, 6(3): 106-108.

[79] 徐富贤, 洪 松. 杂交中稻各叶位叶片对头季稻及再生稻产量形成作用的研究. 作物研究, 1993, 7(2): 22-26.

[80] 苏祖芳, 李永丰, 张洪程, 等. 水稻单茎鞘重与产量形成关系及其影响因素的研究. 山东农业大学学报, 1992, 23(增): 79-85.

[81] 徐富贤, 熊 洪. 水稻超高产栽培的系统理论与途径. 绵阳经济技术高等专科学校学报, 2000, 17(3): 1-4.

[82] 徐富贤, 熊 洪. 再生稻穗部性状与母茎叶片的关系. 西南农业学报, 1995, 8(1): 8-12.