

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.02160

## 水稻甬优 12 不同产量群体的株型特征

韦还和<sup>1</sup> 李超<sup>1</sup> 张洪程<sup>1,\*</sup> 孙玉海<sup>1</sup> 马荣荣<sup>2</sup> 王晓燕<sup>3</sup> 杨筠文<sup>4</sup>  
戴其根<sup>1</sup> 霍中洋<sup>1</sup> 许轲<sup>1</sup> 魏海燕<sup>1</sup> 郭保卫<sup>1</sup>

<sup>1</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>2</sup>浙江省宁波市农业科学院作物研究所, 浙江宁波 315101; <sup>3</sup>浙江省宁波市种子分公司, 浙江宁波 315101; <sup>4</sup>浙江省宁波市鄞州区农业技术服务站, 浙江宁波 315100

**摘 要:** 以籼粳交超级稻甬优 12 为试材, 比较研究高产(10.5~12.0 t hm<sup>-2</sup>)、更高产(12.0~13.5 t hm<sup>-2</sup>)、超高产(>13.5 t hm<sup>-2</sup>) 3 个群体的株型特征。结果表明, 穗长、穗粒数、一次和二次枝梗数, 超高产群体分别为 21.56、356.34、20.46 和 73.98 (两年平均值), 均高于对应的高产和更高产群体, 但一次和二次枝梗的结实率略微降低。超高产群体上部三叶的长、宽以及卷曲率高, 倒一、倒二、倒三叶的卷曲率分别为 1.84、1.47、1.26, 叶基角和披垂度小, 抽穗后的主茎绿叶数多。超高产群体株高为 143.50 cm, 分别较更高产、高产群体高 1.98%和 3.83%, 上部第一、第二、第三节间长度增加, 穗长加穗下节间长占株高比例、穗下节间占秆长比例高, 分别为 39.84%和 37.75%; 基部第一、第二、第三节间长度缩短, 茎秆粗度和茎壁厚度增加, 茎、鞘干物重以及 K、Si 含量高, 提高了基部节间的抗折力同时降低了倒伏指数。

**关键词:** 甬优 12; 超高产; 株型特征

## Plant-type Characteristics in Populations with Different Yield of Yongyou 12

WEI Huan-He<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, ZHANG Hong-Cheng<sup>1,\*</sup>, SUN Yu-Hai<sup>1</sup>, MA Rong-Rong<sup>2</sup>, WANG Xiao-Yan<sup>3</sup>, YANG Jun-Wen<sup>4</sup>, DAI Qi-Gen<sup>1</sup>, HUO Zhong-Yang<sup>1</sup>, XU Ke<sup>1</sup>, WEI Hai-Yan<sup>1</sup>, and GUO Bao-Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; <sup>2</sup> Crop Research Institute, Ningbo Academy of Agricultural Sciences of Zhejiang Province, Ningbo 315101, China; <sup>3</sup> Ningbo Seed Company of Zhejiang Province, Ningbo 315101, China; <sup>4</sup> Agricultural Technology Extension and Service, Yinzhou District, Ningbo City, Zhejiang Province, Ningbo 315100, China

**Abstract:** Using *indica-japonica* super rice Yongyou 12, we compared the plant-type characteristics among three types of populations (high yield: 10.5–12.0 t ha<sup>-1</sup>; higher yield: 12.0–13.5 t ha<sup>-1</sup>; super-high yield: >13.5 t ha<sup>-1</sup>). The main results indicated that in super-high yield population, the mean values of panicle length, total grains per spike, number of the primary and secondary rachises were 21.56, 356.34, 20.46, and 73.98, respectively, being higher than those in the high and higher yield populations. However, the seed-setting rate in the primary and secondary rachises showed slight reduction. Super-high yield population had longer length, larger width and higher rolling rate, smaller leaf basic angle and dropping angle, more green leaves after heading for the top-most three leaves in comparison with the other two populations. Compared with the other two populations, super-high yield population had higher plant height, longer length of top three internodes, higher ratio of sum of panicle and neck internode to plant height 39.84% and ratio of neck internode to stalk length 37.75%. The decreased length of basal three internodes, increased culm diameter, culm wall thickness and dry weight of culm and sheath made higher anti-broken strength and lower lodging index in super-high yield population.

**Keywords:** Yongyou 12; Super-high yielding; Plant-type characteristics

株型一直是农业领域研究的热点<sup>[1]</sup>。水稻作为人类最重要的粮食作物之一<sup>[2]</sup>, 其株型研究备受关注。注。良好的株型结构可以协调和改善群体、个体内的形态和机能, 有利于产量潜力的发挥<sup>[3]</sup>。株型不仅

本研究由农业部超级稻新品种选育与示范项目(02318802013231), 国家公益性行业(农业)科研专项(201303102)和宁波市重大科技项目(2013C11001)资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 张洪程, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 920964110@qq.com

Received(收稿日期): 2014-04-02; Accepted(接受日期): 2014-09-16; Published online(网络出版日期): 2014-10-16.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20141016.1535.008.html>

与基因型有关, 而且与环境、栽培措施等更密切相关。众多的研究表明, 生态环境<sup>[4]</sup>、株行距配置<sup>[5]</sup>、肥水管理<sup>[6]</sup>以及栽插方式<sup>[7]</sup>等均可影响株型结构, 进而影响产量。为进一步挖掘水稻产量潜力, 我国于 1996 年启动了“超级稻”计划<sup>[8]</sup>, 目前, 中国超级稻育种和栽培已取得重要进展, 育成了一批具有超高产潜力的品种和组合, 并且就其配套的超高产栽培技术进行了较广泛的试验与研究<sup>[9-10]</sup>, 曾多次报道产量纪录超  $13.5 \text{ t hm}^{-2}$ 。但是, 大多数超级稻品种在生产推广过程中, 因年度、地区间以及栽培管理等方面的差异, 往往产量差异较大<sup>[11-12]</sup>。超级稻产量差异群体在产量构成因素、株型等方面具有哪些变化, 这些变化对育种和优化栽培措施具有哪些启示, 超高产 ( $>13.5 \text{ t hm}^{-2}$ ) 群体的株型特征如何, 尚缺乏较为系统的比较研究。为此, 本研究以籼粳交超级稻甬优 12 为材料, 在创造单产超  $13.5 \text{ t hm}^{-2}$  的丰产方上进行株型等方面的系统测定, 同时以丰产方外产量水平在  $10.5 \sim 12.0 \text{ t hm}^{-2}$  的群体为对照, 比较其株型性状, 以期进一步了解甬优 12 超高产群体的形成机理, 为籼粳交品种的育种和栽培管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

籼粳交超级稻甬优 12, 主茎总叶数为 17, 伸长节间数为 7。

### 1.2 栽培管理与试验设计

2012—2013 年, 于浙江省宁波市鄞州区洞桥镇百梁桥村种粮大户许跃进田中设置超高产攻关试验方, 连片面积为  $6.67 \text{ hm}^2$ , 该种粮大户连续两年创造连片丰产方平均产量超  $13.50 \text{ t hm}^{-2}$  的超高产记录 (两年分别为  $14.45 \text{ t hm}^{-2}$  和  $13.92 \text{ t hm}^{-2}$ )。前作小麦, 土壤类型为黄化青紫泥田, 耕层含有机质  $38.37 \text{ g kg}^{-1}$ 、水溶性盐  $0.13 \text{ g kg}^{-1}$ 、速效磷  $20.14 \text{ mg kg}^{-1}$ 、速效钾  $78.45 \text{ mg kg}^{-1}$ 。两年播种期均在 5 月中上旬 (2012 年为 5 月 18 日、2013 年为 5 月 6 日和 5 月 15 日), 毯苗育秧, 秧龄 20 d 左右, 移栽叶龄 4.1 叶左右 (带蘖  $0.51 \sim 0.62$  个), 栽插密度为  $12.45 \text{ 万穴 hm}^{-2}$  ( $30.0 \text{ cm} \times 26.7 \text{ cm}$ ), 每穴二至三本栽插。总施氮量  $300 \sim 330 \text{ kg hm}^{-2}$ , 其基肥 穗肥为 6 4, 穗肥分栽后 7 d 和 14 d 等量施用; N P K=2.0 1.0 2.5, 其中磷肥 (过磷酸钙含 12%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 按基肥 穗粒肥 =5 5 施用; 钾肥 (含 60%  $\text{K}_2\text{O}$ ) 按基肥 穗粒肥

=4 6 施用。同时基肥中加施  $300 \sim 450 \text{ kg hm}^{-2}$  硅肥 (含 70%  $\text{SiO}_2$ )。分蘖期采用湿润灌溉, 建立 3 cm 浅水层; 群体茎蘖数达目标穗数的 80%~90% 后自然断水搁田; 抽穗扬花期田间保持 3 cm 水层, 此后至成熟期都采用间歇灌溉, 干干湿湿, 收割前 7 d 断水搁田。按超高产栽培要求防治病虫害。

在丰产方外选取部分甬优 12 田块作为对照 (CK), 对照田块以毯苗育秧, 秧龄 20 d 左右, 移栽叶龄 4.1 叶左右, 栽插株行距为  $30 \text{ cm} \times 26.7 \text{ cm}$ , 每穴 2~3 个种子苗。N P K=2 1 2, 施纯氮  $270 \text{ kg hm}^{-2}$ , 基肥 穗粒肥=7 3; 磷肥全部基施; 钾肥 (含 60%  $\text{K}_2\text{O}$ ) 按基肥 穗粒肥=5 5 施用。当茎蘖数达到预期穗数时排水搁田, 拔节至成熟期实行湿润灌溉, 干湿交替, 按常规高产栽培要求防治病虫害。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 穗部性状与产量测定 于成熟期, 在不同产量水平群体中按平均穗数取 20 穴考种, 考察分穗长、一次枝梗数、二次枝梗数等指标。采用 5 点割方法测定产量, 每方  $20 \text{ m}^2$ , 收割稻种晾晒, 称重。连片丰产方的实产由专家组验收。

1.3.2 上三叶的叶基角和叶披垂度 于齐穗期, 从不同生长水平群体田块选取生长基本一致的 15 穴, 选定主茎, 测量叶基角 (茎秆与叶片基部夹角) 和披垂角 (茎秆与叶枕至叶尖连线的夹角), 披垂度等于披垂角与叶基角之差。

1.3.3 上三叶的大小和卷曲率 于齐穗期, 从不同生长水平群体田块选取生长基本一致的 15 穴, 选定主茎, 测量上三叶的长度、宽度 (分别测量叶片完全展平时的宽度和未失水自然状态下的宽度), 卷曲率=叶片完全展平时的宽度/未失水自然状态下的宽度。

1.3.4 茎秆性状与倒伏性状 于乳熟期, 从不同生长水平群体选取生长基本一致的植株 20 穴, 选定主茎, 测定株高、秆长、各节间长度、基部第一、第二、第三节间的茎壁厚度和茎秆粗度等茎秆性状。植株倒伏性状主要指茎秆物理力学指标, 参照李红娇等<sup>[13]</sup>的方法测定。即在保留叶鞘、叶片和穗子, 并保持不失水的情况下将待测节间置测定器上, 令该节间中点与测定器中点对应, 在中点挂一盘子, 向盘中逐渐加入砝码至茎秆要折断还未折断时, 再加入沙子直至茎秆折断, 此时砝码、沙子和盘子的重量即为该节间的抗折力。弯曲力矩=节间基部至穗顶鲜重 (g) × 该节间基部至穗顶鲜重 (g), 倒伏指数=弯

曲力矩/抗折力 $\times 100$ 。

1.3.5 茎鞘 K、Si 含量测定 烘干后的茎、鞘样品,经万能粉碎机粉碎,过 80 目筛,采用火焰分光光度法测定 K 含量,采用重量差减法测定 Si 含量<sup>[14]</sup>。

#### 1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 软件录入数据、计算,用 DPS 软件统计分析。两年试验的重复性较好,各指标变化趋势一致,因此,本文中若无特殊年份说明,均取 2 年数据的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同产量群体穗部性状的差异

由表 1 可知,连续两年 3 种产量群体的产量差异均极显著,如 2013 年超高产群体的产量分别较更高产和高产群体高 10.16% 和 23.35%。穗长、单穗重、着粒密度、总粒数均在产量增加的群体中更高,如 2012 年超高产群体的总粒数分别较更高产和高产群体高 9.38% 和 13.42%,一次和二次枝梗的枝梗数和粒数也呈同样趋势,但结实率呈相反趋势。

### 2.2 上三叶的形态特征及抽穗后期的主茎绿叶数差异

高产、更高产和超高产群体的上三叶叶长呈倒二叶>倒三叶>倒一叶,其中倒二叶和倒三叶的叶长差距逐渐增大,上三叶叶宽呈倒一叶>倒二叶>倒三叶,倒一、倒二、倒三叶的叶长、宽和卷曲率也呈增加趋势。就上三叶的叶片受光姿态而言,以上各群体的倒一、倒二、倒三叶的叶基角和叶披垂度均减小,如高产群体的倒一叶的叶基角和叶披垂度较更高产群体高 8.19% 和 13.88%,与超高产群体相比,更高产群体也表现类似趋势(表 2);超高产群体上三叶的叶基角和披垂度较小,叶片更为挺立,有利于生育后期群体下部的透光,从而使得超高产群体主茎绿叶数在生育后期一直高于更高产和高产群体(表 3)。

### 2.3 不同产量群体的茎秆特征

由表 4 可知,在产量上升的群体中,株高、秆长、重心高度、相对重心高度以及上部第一、第二、第三节间的长度均增加,如超高产群体的株高分别较更高产和高产群体高 1.98% 和 3.83%。穗长加穗下节间的长度占株高的比例以超高产群体最高,较更高产和高产群体高 4.95% 和 8.07%,穗下节间占秆长的比例也以超高产群体最高,差异极显著。

### 2.4 不同产量群体茎鞘干重及化学成分含量、基部节间特性的差异

3 种产量群体的茎秆、鞘及单位节间干重均以超高产群体最高,如超高产群体的鞘干重分别较更高产和高产群体高 8.97% 和 15.38%,差异极显著,茎、鞘中的 K 和 Si 的含量也呈同样增加趋势(表 5)。就基部节间的物理特性和抗倒性而言,基部第一、第二、第三节间的长度以高产群体最高,较更高产群体高 32.7%,基部第一、第二、第三节间的茎秆粗度和茎壁厚度呈增大趋势,如超高产群体第一节间的茎秆粗度分别较更高产和高产群体高 2.16% 和 6.00%。基部第一、第二、第三节间的弯曲力矩和抗折力也呈增加趋势,而倒伏指数呈减小趋势(表 6)。

## 3 讨论

### 3.1 甬优 12 超高产群体的叶片形态特征

良好的叶片形态特征(长、宽、卷曲率及受光姿态等)是超高产群体产量形成的重要保障<sup>[15-16]</sup>。当前通过扩大库容提高水稻产量已成为育种和栽培界的共识<sup>[17]</sup>,与此同时作为抽穗后主要光合场所的上部三叶也需要增加受光面积满足库容充实的需要<sup>[18]</sup>。但过分增大单叶叶面积会带来叶片披垂、群体透光差等问题<sup>[19]</sup>。在这一问题上,人们发现卷叶性状可以解决这一矛盾,马荣荣等<sup>[20]</sup>研究甬优 6 号叶片特性表明,其叶片适度卷曲不仅可以两面受光,而且减少叶片重叠投影的影响,从而延长叶片功能期。郎有忠等<sup>[21]</sup>、李磊等<sup>[22]</sup>的研究表明,卷叶性状可显著降低叶片披垂度,但卷曲过大会降低光合速率,因此应根据不同类型品种确定适宜的卷曲率。本试验条件下,与高产和更高产群体相比,甬优 12 超高产群体上三叶叶面积大(长度分别为 44.60、54.08 和 52.18 cm,宽度分别为 2.22、2.02 和 1.90 cm),上三叶的卷曲率也以超高产群体最高,分别为 1.84、1.47 和 1.26,并且叶基角和披垂度更小、植株更为直挺。这种叶型配置有利于提高光合物质生产、增加群体中、下层的透光率,提高光能利用率,对于维持后期根系活力以及防止叶片早衰意义重大。

### 3.2 甬优 12 超高产群体的茎秆特征及抗倒伏性状

茎秆是提高光合生产力的冠层结构的基础。一般而言,茎秆性状包括株高、秆长、各节间长度及抗倒强度等。茎秆各节间长度的配比与产量密切相关,凌启鸿<sup>[18]</sup>认为 5 个伸长节间品种的高产群体,

表 1 不同产量群体的产量及其穗部性状  
Table 1 Yield and panicle traits in the different yield populations

类型 Type	穗长 PL (cm)	单穗重 GWPP (g)	着粒密度 GD (grain cm <sup>-1</sup> )	总粒数 TG	一次枝梗 Primary branch			二次枝梗 Secondary branch			产量 Yield (t hm <sup>-2</sup> )
					枝梗数 NB	粒数 TG	结实率 SSR (%)	枝梗数 NB	粒数 TG	结实率 SSR (%)	
2012											
高产 High yield (n=4)	20.75 Bb	6.29 Cc	15.04 Bb	312.14 Cc	19.23 Cc	113.25 Cc	92.89 Aa	69.56 Cc	198.89 Cc	85.39 Aa	11.61 Cc
更高产 Higher yield (n=4)	21.15 Aa	6.55 Bb	15.45 Bb	326.70 Bb	19.65 Bb	115.18 Bb	91.23 Aa	71.63 Bb	211.52 Bb	83.16 Aa	13.12 Bb
超高产 Super-high yield (n=5)	21.59 Aa	6.82 Aa	16.70 Aa	360.55 Aa	21.12 Aa	124.34 Aa	90.51 Aa	74.71 Aa	236.21 Aa	82.64 Aa	14.29 Aa
2013											
高产 High yield (n=5)	20.54 Bb	5.80 Cc	14.23 Bb	292.33 Cc	18.54 Cc	108.84 Cc	91.87 Aa	66.01 Cc	183.49 Cc	84.07 Aa	10.86 Cc
更高产 Higher yield (n=8)	21.09 Aa	6.29 Bb	15.28 Bb	322.23 Bb	19.45 Bb	114.30 Bb	90.98 Aa	69.21 Bb	207.93 Bb	83.39 Aa	12.73 Bb
超高产 Super-high yield (n=7)	21.54 Aa	6.77 Aa	16.35 Aa	352.14 Aa	19.81 Aa	116.45 Aa	90.24 Aa	73.25 Aa	235.69 Aa	81.94 Aa	14.17 Aa

标以不同字母的值分别在 1% (大写字母)和 5% (小写字母)水平差异显著。

Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. PL: panicle length; GWPP: grain weight per panicle; GD: grain density; TG: total grains; NB: No. of branches; SSR: seed-setting rate.

表 2 不同产量群体的上三叶大小及叶姿  
Table 2 Size and leaf posture of the top-most three leaves in different yield populations

叶位 Leaf position	类型 Type	长 Length (cm)	宽 Width (cm)	卷曲率 Rolling rate	叶基角 Leaf basic angle	披垂度 Dropping angle
倒一叶 First leaf to top	高产 High yield (n=5)	41.32 Cc	2.06 Bb	1.49 Cc	6.71 Aa	1.80 Aa
	更高产 Higher yield (n=8)	42.91 Bb	2.14 Aa	1.66 Bb	6.16 Bb	1.55 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	44.60 Aa	2.22 Aa	1.84 Aa	5.50 Cc	1.25 Cc
倒二叶 Second leaf to top	高产 High yield (n=5)	50.10 Cc	1.77 Cc	1.18 Cc	10.07 Aa	3.02 Aa
	更高产 Higher yield (n=8)	52.02 Bb	1.84 Bb	1.36 Bb	9.24 Aa	2.67 Aa
	超高产 Super-high yield (n=7)	54.08 Aa	2.02 Aa	1.47 Aa	8.25 Bb	2.25 Bb
倒三叶 Third leaf to top	高产 High yield (n=5)	50.02 Bb	1.62 Cc	1.03 Cc	14.04 Aa	4.55 Aa
	更高产 Higher yield (n=8)	51.04 Aa	1.70 Bb	1.13 Bb	12.88 Bb	4.07 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	52.18 Aa	1.90 Aa	1.26 Aa	11.50 Cc	3.50 Cc

标以不同字母的值分别在 1% (大写字母)和 5% (小写字母)水平差异显著。  
Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively.

表 3 不同产量群体的抽穗后的主茎绿叶数  
Table 3 Number of green leaves in main stem at different days after heading in different yield populations

类型 Type	抽穗期 Heading	抽穗后 10 d 10 DAH	抽穗后 20 d 20 DAH	抽穗后 30 d 30 DAH	抽穗后 40 d 40 DAH	抽穗后 50 d 50 DAH	抽穗后 60 d 60 DAH	成熟期 Maturity
高产 High yield (n=5)	7.0	6.0	5.5	5.2	5.0	4.3	3.4	3.2
更高产 Higher yield (n=8)	7.0	6.2	5.7	5.4	5.2	4.4	3.6	3.3
超高产 Super-high yield (n=7)	7.0	6.3	5.8	5.6	5.3	4.6	3.8	3.5

DAH: days after heading.

表 4 不同产量群体的茎秆特征  
Table 4 Culm traits in different yield populations

类型 Type	株高 Plant height (cm)	穗高 Panicle height (cm)	秆长 Stalk length (cm)	重心高度 Gravity center height (cm)	相对重心高度 Relative gravity center height (%)
高产 High yield (n=5)	138.00 Bb	116.60 Bb	91.70 Cc	49.20 Cc	42.20 Bb
更高产 Higher yield (n=8)	140.65 Aa	117.56 Aa	92.78 Bb	51.56 Bb	43.86 Aa
超高产 Super-high yield (n=7)	143.50 Aa	118.40 Aa	94.30 Aa	52.40 Aa	44.26 Aa

类型 Type	上部节间长 Top internode length (cm)			穗长+穗下节间长/株高 Sum of panicle and neck internode to plant height (%)	穗下节间/秆长 Neck internode to stalk length (%)
	第一节 First node	第二节 Second node	第三节 Third node		
高产 High yield (n=5)	29.89 Cc	19.50 Cc	14.29 Cc	36.62 Cc	32.60 Cc
更高产 Higher yield (n=8)	32.13 Bb	19.67 Bb	14.50 Bb	37.86 Bb	34.63 Bb
超高产 Super-high yield (n=7)	35.60 Aa	20.32 Aa	14.95 Aa	39.84 Aa	37.75 Aa

标以不同字母的值分别在 1% (大写字母)和 5% (小写字母)水平差异显著。  
Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively.

穗下节间加穗的长度为株高的 50%较为适宜, 6 个伸长节间的为 40%~45%。苏祖芳等<sup>[23]</sup>、张庆等<sup>[6]</sup>研究认为高产群体(10.5 t hm<sup>-2</sup>左右)的穗下节间占秆长的适宜比例为 32%~35%。本试验条件下, 甬优 12 的伸长节间为 7 个, 穗下节间加穗的长度占株高比例随着产量增加而上升, 比例在 36%~40%; 穗下节间占秆长比例也随产量增加而上升, 高产和更高产群体

比例在 32%~35%, 而超高产群体的比例为 37.75%。  
株高是水稻重要的农艺性状之一, 从近几十年的水稻高产育种历程看, 稻株高度大致经历了由高变矮再变高的过程。杨建昌等<sup>[24]</sup>以江苏省近 60 年生产上应用的早期高秆、改良高秆、矮秆、半矮秆和超级稻等不同株高基因型为材料, 研究发现随着株高变化及品种改良, 籽粒产量逐步提高。程式华等<sup>[25]</sup>

表 5 不同产量群体的茎、鞘干重以及 K、Si 含量  
Table 5 Dry weight and K, Si contents of culm and sheath in different yield populations

类型 Type	茎秆干重 Dry weight of culm (g stem <sup>-1</sup> )	鞘干重 Dry weight of sheath (g stem <sup>-1</sup> )	单位节间干重 Dry weight per unit internode (g cm <sup>-1</sup> )	茎 Culm		鞘 Sheath	
				K 含量	Si 含量	K 含量	Si 含量
				K content (%)	Si content (%)	K content (%)	Si content (%)
高产 High yield (n=5)	1.81 Bb	1.32 Cc	0.0766 Cc	1.82 Bb	4.28 Cc	1.33 Cc	8.86 Bb
更高产 Higher yield (n=8)	1.93 Bb	1.42 Bb	0.0960 Bb	2.04 Aa	4.68 Bb	1.45 Bb	9.32 Aa
超高产 Super-high yield (n=7)	2.06 Aa	1.56 Aa	0.1090 Aa	2.23 Aa	4.96 Aa	1.63 Aa	9.83 Aa

标以不同字母的值分别在 1% (大写字母)和 5% (小写字母)水平差异显著。  
Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively.

表 6 不同产量群体的基部节间的物理特性和抗倒性  
Table 6 Physical lodging characteristics of the basal internode in different yield populations

特征 Characteristics	类型 Type	第一节 N1	第二节 N2	第三节 N3
基部节间长 Culm length (cm)	高产 High yield (n=5)	4.80 Aa	6.00 Aa	7.68 Aa
	更高产 Higher yield (n=8)	3.23 Bb	5.75 Bb	6.90 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	2.40 Cc	4.30 Cc	5.60 Cc
基部节间茎秆粗度 Culm diameter(cm)	高产 High yield (n=5)	0.9570 Cc	0.8930 Cc	0.7944 Cc
	更高产 Higher yield (n=8)	0.9941 Bb	0.9294 Bb	0.8302 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	1.0181 Aa	0.9529 Aa	0.8527 Aa
基部节间茎秆壁厚 Culm thickness (mm)	高产 High yield (n=5)	1.36 Cc	1.22 Cc	1.06 Cc
	更高产 Higher yield (n=8)	1.49 Bb	1.35 Bb	1.20 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	1.76 Aa	1.62 Aa	1.47 Aa
弯曲力矩 Bender moment (cm g)	高产 High yield (n=5)	5134.46 Cc	4673.54 Cc	3803.99 Cc
	更高产 Higher yield (n=8)	5289.17 Bb	4875.25 Bb	3936.47 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	5675.50 Aa	5175.50 Aa	4315.50 Aa
抗折力 Anti-broken strength (g)	高产 High yield (n=5)	5121.34 Cc	3701.49 Cc	2128.95 Cc
	更高产 Higher yield (n=8)	5312.87 Bb	4010.89 Bb	2341.66 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	6004.17 Aa	4448.25 Aa	2669.76 Aa
倒伏指数 Lodging index (cm g g <sup>-1</sup> )	高产 High yield (n=5)	100.26 Aa	126.26 Aa	178.68 Aa
	更高产 Higher yield (n=8)	99.55 Aa	121.55 Bb	168.11 Bb
	超高产 Super-high yield (n=7)	94.53 Bb	116.35 Cc	161.64 Cc

标以不同字母的值分别在 1% (大写字母)和 5% (小写字母)水平差异显著。  
Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively.

认为单产水平达12 t hm<sup>-2</sup>以上的杂交水稻的株高应达115~125 cm。袁隆平<sup>[26]</sup>认为在保持收获指数为0.5左右的前提下，生物学产量随株高的增加而增加，并且提出未来产量潜力达18~20 t hm<sup>-2</sup>的超级杂交水稻的株高将达1.8~2.0 m。可见增加植株高度是进一步提高水稻产量的重要途径，但株高过高也增大了植株倒伏的风险。茎秆作为植株的支撑，其节间配置及质量直接影响茎秆的抗倒性。较多研究认为<sup>[27]</sup>，基部节间长度、粗度、充实度以及化学成分等与茎秆抗倒性紧密相关，K 和 Si 元素参与细胞壁的木质化和硅质化，利于增加茎秆强度<sup>[28]</sup>。本试验条件下，

株高随着产量上升而增加，基部节间长度随之缩短，同时甬优12超高产群体基部节间的茎秆粗度、厚度、单位节间干重以及茎鞘中 K、Si 含量均高于更高产和高产群体，改善了茎秆质量，并且降低了倒伏指数，这也与张洪程等报道的甬优8号和常优1号超高产群体的茎秆特征一致<sup>[29]</sup>。因此，在收获指数达到较高水平(0.5左右)时，增加植株高度是今后进一步提升水稻产量潜力的可行途径，同时更应注重强化茎秆质量，合理配置节间长度，提高茎秆抗倒性，促进高产乃至超高产与茎秆抗倒性间的协调统一。

### 3.3 甬优 12 不同产量群体的株型特征

良好的株型结构是发挥产量潜力的基础。胡雅杰等<sup>[30]</sup>的研究认为,与毯苗机插群体相比,钵苗机插高产群体的株型特点为穗型显著增大、上部三叶叶面积大、比叶重高、叶基角和披垂度小、叶系配置优,同时茎秆粗壮。曾勇军等<sup>[31]</sup>研究长江中下游地区双季稻高产株型特征发现,早稻高产群体库容量大,倒二、倒三叶片较长,叶片披垂角相对较大,而晚稻高产群体叶片长度适中,披垂角相对较小,茎秆粗壮。苏祖芳等<sup>[32]</sup>研究武运粳 8 号和汕优 63 的密度和氮肥组合的株型特征发现,产量最高组合群体的上部三叶叶角和弯曲度小、穗下节间较长、基部节间粗短。本试验条件下,与高产和更高产群体相比,甬优 12 超高产群体的穗型更大,依靠更多穗粒数(350~360)以及发达的一次、二次枝梗,群体颖花量高达 73 500 万  $\text{hm}^{-2}$  以上(数据未列出);“源”强,单叶叶面积大的上部高效叶促进了光合物质生产,且依靠良好的受光姿态(叶基角、披垂度小及适宜卷曲率)增强群体中下层的通风透光,延缓叶片衰老、延长光合功能期,为大库容群体提供充足且平稳的光合物质输出;抗倒性强,尽管株高、单穗重增加,弯曲力矩大,但依靠合理的节间配置,短、粗、厚且充实度高的基部节间,仍提高了群体的抗折力,降低了倒伏风险。

## 4 结论

与一般高产群体相比,甬优 12 超高产群体“穗大粒多”;上部三叶大(更长、更宽)且卷曲率高,叶基角和披垂度小,受光姿态好;植株高大,上部第一、第二、第三节间长度增加,基部第一、第二、第三节间长度缩短,同时基部节间的茎秆粗度、厚度和充实度有所增强,茎秆强度大,倒伏指数小。

## References

- [1] 杜立丰,高丽锋,周荣华,宋彦霞,赵东成,贾继增,任正隆. 基于重组自交系群体的小麦光温生产效率分析及新品系培育. 中国农业科学, 2013, 46: 1523–1532  
Du L F, Gao L F, Zhou R H, Song Y X, Zhao D C, Jia J Z, Ren Z L. Characters and varieties screening based on recombinant inbred lines populations. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 1523–1532 (in Chinese with English abstract)
- [2] 李鸿伟,杨凯鹏,曹转勤,王志琴,杨建昌. 稻麦连作中超高产栽培小麦和水稻的养分吸收与积累特征. 作物学报, 2013, 39: 464–477  
Li H W, Yang K P, Cao Z Q, Wang Z Q, Yang J C. Characteristics of nutrient uptake and accumulation in wheat and rice with continuous cropping under super-high-yielding cultivation. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 464–477 (in Chinese with English abstract)
- [3] 李红宇,侯昱铭,陈英华,权成哲,闫平,刘梦红,武洪涛,陈温福,徐正进. 东北地区水稻主要性状比较分析. 作物学报, 2009, 35: 921–929  
Li H Y, Hou Y M, Chen Y H, Quan C Z, Yan P, Liu M H, Wu H T, Chen W F, Xu Z J. Comparison of rice plant types in northeast region of China. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 921–929 (in Chinese with English abstract)
- [4] 金峰,王鹤潼,徐海,江奕君,赵明珠,杨莉,徐正进,陈温福,郑家奎. 不同生态区籼粳杂交  $F_2$  代亚种属性与株型性状的特点. 作物学报, 2013, 39: 1240–1247  
Jin F, Wang H T, Xu H, Jiang Y J, Zhao M Z, Yang L, Xu Z J, Chen W F, Zheng J K. Characteristics of plant type traits and subspecies characteristics in  $F_2$  generations of cross between *indica* and *japonica* rice under different ecological regions. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1240–1247 (in Chinese with English abstract)
- [5] 闫川,丁艳锋,王强盛,李刚华,黄丕生,王绍华. 行株距配置对水稻茎秆形态生理与群体生态的影响. 中国水稻科学, 2007, 21: 530–536  
Yan C, Ding Y F, Wang Q S, Li G H, Huang P S, Wang S H. Effects of row-spacing on morphological and eco-physiological characteristics in rice. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21: 530–536 (in Chinese with English abstract)
- [6] 张庆,殷春渊,张洪程,魏海燕,马群,杭杰,李敏,李国业. 水稻氮高产高效与低产低效两类品种株型差异研究. 作物学报, 2010, 36: 1011–1021  
Zhang Q, Yin C Y, Zhang H C, Wei H Y, Ma Q, Hang J, Li M, Li G Y. Differences of plant-type characteristics between rice cultivars with high and low levels in yield and nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1011–1021 (in Chinese with English abstract)
- [7] 雷小龙,刘利,刘波,黄光忠,郭翔,马荣朝,任万军. 机械化种植对杂交籼稻 F 优 498 产量构成与株型特征的影响. 作物学报, 2014, 40: 719–730  
Lei X L, Liu L, Liu B, Huang G Z, Guo X, Ma R C, Ren W J. Effects of mechanized planting methods on yield components and plant type characteristics of *indica* hybrid rice Fyou 498. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 719–730 (in Chinese with English abstract)
- [8] 张洪程,吴桂成,李德剑,肖跃成,龚金龙,李杰,戴其根,霍中洋,许轲,高辉,魏海燕,沙安勤,周有炎,王宝金,吴爱国. 杂交粳稻 13.5  $\text{t hm}^{-2}$  超高产群体动态特征及形成机制的探讨. 作物学报, 2010, 36: 1547–1558  
Zhang H C, Wu G C, Li D J, Xiao Y C, Gong J L, Li J, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Sha A Q, Zhou Y Y, Wang B J, Wu A G. Population characteristics and formation mechanism for super-high-yielding hybrid *japonica* rice (13.5  $\text{t ha}^{-1}$ ). *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1547–1558 (in Chinese with English abstract)
- [9] 张洪程,赵品恒,孙菊英,吴桂成,徐军,端木银熙,戴齐根,霍中洋,许轲,魏海燕. 机插杂交粳稻超高产形成群体特征. 农业工程学报, 2012, 28(2): 39–44  
Zhang H C, Zhao P H, Sun J Y, Wu G C, Xu J, Duan-Mu Y X, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Population characteristics of super high yield formation of mechanical transplanted *japonica* hybrid rice. *Trans CSAE*, 2012, 28(2): 39–44 (in Chinese with English abstract)

- [10] 张洪程, 朱聪聪, 霍中洋, 许轲, 蒋晓鸿, 陈厚存, 高尚勤, 李德剑, 赵成美, 戴齐根, 魏海燕, 郭保卫. 钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点. 农业工程学报, 2013, 29(21): 50–59  
Zhang H C, Zhu C C, Huo Z Y, Xu K, Jiang X H, Chen H C, Gao S Q, Li D J, Zhao C M, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Advantages of yield formation and main characteristics of physiological and ecological in rice with nutrition bowl mechanical transplanting. *Trans CSAE*, 2013, 29(21): 50–59 (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39: 1336–1345  
Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 1336–1345 (in Chinese with English abstract)
- [12] 张洪程, 吴桂成, 吴文革, 戴齐根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 黄幸福, 龚金龙. 水稻“精苗稳前、控蘖优中、大穗强后”超高产定量化栽培模式. 中国农业科学, 2010, 43: 2645–2660  
Zhang H C, Wu G C, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Huang X F, Gong J L. The SOI model of quantitative cultivation of super-high yielding rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 2645–2660 (in Chinese with English abstract)
- [13] 李红娇, 张喜娟, 李伟娟, 徐正进, 徐海. 不同穗型粳稻品种抗倒性的比较. 中国水稻科学, 2009, 23: 191–196  
Li H J, Zhang X J, Li W J, Xu Z J, Xu H. Lodging resistance in japonica rice varieties with different panicle types. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23: 191–196 (in Chinese with English abstract)
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. pp 285–286  
Agro-Chemistry Specialty Committee of the Soil Science Society of China. General Analysis Methods in Soil Agro-Chemistry. Beijing: Science Press, 1983. pp 285–286 (in Chinese)
- [15] 吴自明, 赵伟, 石庆华, 潘晓华. 双季水稻叶片温度变化规律及其与产量关系的研究. 中国农学通报, 2012, 28(18): 86–92  
Wu Z M, Zhao W, Shi Q H, Pan X H. The study on double-season rice leaves temperature change law and its relationships with yield. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(18): 86–92 (in Chinese with English abstract)
- [16] 周丽慧, 赵春芳, 赵凌, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 姚姝, 于新, 王才林. 利用染色体片段置换系群体检测水稻叶片形态 QTL. 中国水稻科学, 2013, 27: 26–34  
Zhou L H, Zhao C F, Zhao L, Zhang Y D, Zhu Z, Chen T, Zhao Q Y, Yao S, Yu X, Wang C L. QTL detection for leaf morphology of rice using chromosome segment substitution lines. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27: 26–34 (in Chinese with English abstract)
- [17] 韦还和, 姜元华, 赵可, 许俊伟, 张洪程, 戴齐根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郑飞. 甬优系列杂交稻品种的超高产群体特征. 作物学报, 2013, 39: 2201–2210  
Wei H H, Jiang Y H, Zhao K, Xu J W, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Zheng F. Characteristics of super-high yield population in Yongyou series of hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 2201–2210 (in Chinese with English abstract)
- [18] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000. pp 42–120  
Ling Q H. Quality of Crop Population. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. pp 42–120 (in Chinese)
- [19] 郎有忠, 张组建, 顾兴友, 杨建昌, 朱庆森. 水稻卷叶性生理生态效应的研究: IV. 叶片姿态、群体构成及光分布特征. 作物学报, 2004, 30: 739–744  
Lang Y Z, Zhang Z J, Gu X Y, Yang J C, Zhu Q S. Physiological and ecological effects of crimp leaf character in rice (*Oryza sativa* L.): IV. Leaf orientation, canopy structure and light distribution. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 739–744 (in Chinese with English abstract)
- [20] 马荣荣, 许德海, 王晓燕, 禹盛苗, 金千瑜, 欧阳由男, 朱连峰. 籼粳亚种间杂交稻甬优 6 号超高产株型特征与竞争优势分析. 中国水稻科学, 2007, 21: 281–286  
Ma R R, Xu D H, Wang X Y, Yu S M, Jin Q Y, Ou-Yang Y N, Zhu L F. Heterosis on plant morphology of Yongyou 6, an indica-japonica inter-subspecific super high-yielding hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19: 280–284 (in Chinese with English abstract)
- [21] 郎有忠, 张组建, 顾兴友, 杨建昌, 朱庆森. 水稻卷叶性生理生态效应的研究: II. 光合特性、物质生产与产量形成. 作物学报, 2004, 30: 883–887  
Lang Y Z, Zhang Z J, Gu X Y, Yang J C, Zhu Q S. Physiological and ecological effects of crimp leaf character in rice (*Oryza sativa* L.): II. Photosynthetic character, dry mass production and yield forming. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 883–887 (in Chinese with English abstract)
- [22] 李磊, 薛芎, 左思敏, 陈宗祥, 张亚芳, 李前前, 朱俊凯, 马玉银, 潘学彪, 潘存红. 抑制 *OsAGOLa* 基因的表达导致水稻叶片近轴面卷曲. 中国水稻科学, 2013, 27: 223–230  
Li L, Xue X, Zuo S M, Chen Z X, Zhang Y F, Li Q Q, Zhu J K, Ma Y Y, Pan X B, Pan C H. Suppressed expression of *OsAGOLa* leads to adaxial leaf rolling in rice. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27: 223–230 (in Chinese with English abstract)
- [23] 苏祖芳, 张亚洁, 孙成明. 水稻高产株型指标的研究. 中国稻米, 2003, 9(4): 5–6  
Su Z F, Zhang Y J, Sun C M. Study on plant type index of high-yield rice. *China Rice*, 2003, 9(4): 5–6 (in Chinese)
- [24] 杨建昌, 王朋, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 中籼水稻品种产量与株型演进特征研究. 作物学报, 2006, 32: 949–955  
Yang J C, Wang P, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Evolution characteristics of grain yield and plant type for mid-season indica rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 949–955 (in Chinese with English abstract)
- [25] 程式华, 翟虎渠. 水稻亚种间超高产杂交组合若干株型因子的比较. 作物学报, 2000, 26: 713–718  
Cheng S H, Zhai H Q. Comparison of some plant type components in super high-yielding hybrids of inter-subspecies rice. *Acta Agron Sin*, 2000, 26: 713–718 (in Chinese with English abstract)
- [26] 袁隆平. 选育超高产杂交水稻的进一步设想. 杂交水稻, 2012, 27(6): 1–2  
Yuan L P. Conceiving of breeding further super-high-yield hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2012, 27(6): 1–2 (in Chinese with English abstract)
- [27] 李国辉, 钟旭华, 田卡, 黄农荣, 潘俊峰, 何庭蕙. 施氮对施氮茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理. 中国农业科学, 2013, 46: 1323–1334



- Li G H, Zhong X H, Tian K, Huang N R, Pan J F, He T H. Effect of nitrogen application on stem lodging resistance of rice and its morphological and mechanical mechanisms. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 1323–1334 (in Chinese with English abstract)
- [28] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 不同氮利用效率基因型水稻茎秆特性比较. 作物学报, 2012, 38: 1277–1285
- Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Comparison of culm characteristics with different nitrogen use efficiencies for rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1277–1285 (in Chinese with English abstract)
- [29] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 桂玉清, 吴文革, 吴桂成, 端木银熙, 孙菊英, 赵品恒, 徐军, 李杰, 王艳, 龚金龙, 姚义, 沙安勤, 周有炎, 李德剑, 肖跃成, 王宝山, 吴爱国, 钱宗华, 於永杰, 李华. 水稻超高产栽培研究与探讨. 中国稻米, 2012, 18(1): 1–14
- Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Gui Y Q, Wu W G, Wu G C, Duan-Mu Y X, Sun J Y, Zhao P H, Xu J, Li J, Wang Y, Gong J L, Yao Y, Sha A Q, Zhou Y Y, Li D J, Xiao Y C, Wang B J, Wu A G, Qian Z H, Yu Y J, Li H. Study and discussion on super high-yielding cultivation. *China Rice*, 2012, 18(1): 1–14 (in Chinese)
- [30] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 刘国涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林. 钵苗机插水稻群体动态特征及高产形成机制的探讨. 中国农业科学, 2014, 47: 865–879
- Hu Y J, Xing Z P, Gong J L, Liu G T, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Liu G L. Study on population characteristics and formation mechanisms for high yield of pot-seeding mechanical transplanting rice. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 865–879 (in Chinese with English abstract)
- [31] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 韩涛. 长江中下游双季稻高产株型特征初步研究. 作物学报, 2009, 35: 546–551
- Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Han T. Preliminary study on the plant type characteristics of double cropping rice in Middle and Lower Reaches of Changjiang River. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 546–551 (in Chinese with English abstract)
- [32] 苏祖芳, 许乃霞, 孙成明, 张亚洁. 水稻抽穗后株型指标与产量形成关系的研究. 中国农业科学, 2003, 36: 115–120
- Su Z F, Xu N X, Sun C M, Zhang Y J. Study on the relationship between rice plant type indices after heading stage and yield formation. *Sci Agric Sin*, 2003, 36: 115–120 (in Chinese with English abstract)