

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.02033

研究简报

## 甬优籼粳杂交稻栽后地上部干物质积累动态与特征分析

韦还和<sup>1</sup> 张徐彬<sup>1</sup> 葛佳琳<sup>1</sup> 孟天瑶<sup>2</sup> 陆 钰<sup>1</sup> 李心月<sup>1</sup> 陶 源<sup>1</sup>  
丁恩浩<sup>1</sup> 陈英龙<sup>1</sup> 戴其根<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 江苏省作物遗传生理重点实验室 / 江苏省作物栽培生理重点实验室 / 江苏省粮食作物现代产业技术创新中心 / 扬州大学水稻产业工程技术研究院, 江苏扬州 225009; <sup>2</sup> 扬州大学教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室 / 扬州大学农业科技发展研究院, 江苏扬州 225009

**摘要:** 2015—2016 年, 以甬优籼粳杂交稻(甬优 1540 和甬优 4540, 全生育期天数 169~171 d), 常规粳稻(镇稻 13 号和武运粳 30, 全生育期天数 159~160 d)和杂交籼稻(两优培九和扬两优 6 号, 全生育期天数 140~141 d)为试材, 比较分析不同类型品种栽后地上部干物质积累特征及其差异。甬优籼粳杂交稻 2 年平均产量为 12.4 t hm<sup>-2</sup>, 较常规粳稻和杂交籼稻分别增产 7.8% 和 23.3%, 差异显著。与常规粳稻和杂交籼稻相比, 甬优籼粳杂交稻穗数、结实率和千粒重较低, 每穗粒数则较高; 籼粳杂交稻成熟期干物质积累量较高, 收获指数较低。成熟期茎鞘和叶部干物重及其所占比例均呈籼粳杂交稻>常规粳稻>杂交籼稻; 穗部干物重以籼粳杂交稻最高、杂交籼稻最低, 穗部干重所占比例则呈相反趋势。甬优籼粳杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻栽后地上部干物质积累动态均以 Gompertz 方程拟合效果较好。不同类型品种栽后地上部干物质积累速率均呈先升后降的单峰曲线变化趋势, 籼粳杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻最大干物质积累速率出现的时间分别在栽后 61~62、64~66 和 63~64 d。籼粳杂交稻栽后最大干物质积累速率较常规粳稻和杂交籼稻分别高 17.7% 和 17.3%。与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻在渐增期、快增期和缓增期阶段平均干物质积累速率均较高; 渐增期和快增期阶段的干物质积累天数较低, 缓增期阶段的干物质积累天数则较高。籼粳杂交稻在渐增期、快增期和缓增期阶段的干物质积累量均高于常规粳稻和杂交籼稻。本研究建立了符合不同类型水稻栽后地上部干物质积累动态特征的 Gompertz 方程; 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻在渐增期、快增期和缓增期阶段的干物质积累量均具优势, 渐增期和快增期较高的干物质积累量主要由于此阶段较高的干物质积累速率, 缓增期较高的干物质积累量是由于较高的干物质积累天数和积累速率。

**关键词:** 甬优系列; 籼粳杂交稻; 地上部干物质积累; Gompertz 方程

## Dynamics in above-ground biomass accumulation after transplanting and its characteristic analysis in Yongyou japonica/indica hybrids

WEI Huan-He<sup>1</sup>, ZHANG Xu-Bin<sup>1</sup>, GE Jia-Lin<sup>1</sup>, MENG Tian-Yao<sup>2</sup>, LU Yu<sup>1</sup>, LI Xin-Yue<sup>1</sup>, TAO Yuan<sup>1</sup>, DING En-Hao<sup>1</sup>, CHEN Ying-Long<sup>1</sup>, and DAI Qi-Gen<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology / Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops / Rice Industry Engineering Technology Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; <sup>2</sup> Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agro-product Safety, Ministry of Education / Institute of Agricultural Science and Technological Development, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

**Abstract:** In this study, two *japonica/indica* hybrids (JIH) (Yongyou 1540 and Yongyou 4540 with the total growth duration ranged from 169 to 171 days) of Yongyou series, two *japonica* conventional (JC) varieties (Zhendao 13 and Wuyunjing 30 with

本研究由江苏省重点研发计划项目(BE2016370, BE2019343), 国家自然科学基金项目(31901448), 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB210004)和江苏高校优势学科建设工程项目资助。

This study was supported by the Key Research and Development Program of Jiangsu Province (BE2016370, BE2019343), the National Natural Science Foundation of China (31901448), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (19KJB210004), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

\* 通信作者(Corresponding author): 戴其根, E-mail: qgdai@yzu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: hhwei@yzu.edu.cn

Received (收稿日期): 2020-05-12; Accepted (接受日期): 2020-10-15; Published online (网络出版日期): 2020-11-02.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201030.1708.012.html>

the total growth duration ranged from 159 to 160 days), and two *indica* hybrids (JIH) varieties (Liangyoupei jiu and Yangliangyou 6 with the total growth duration ranged from 140 to 141 days) were grown to compare the characteristics and differences of above-ground biomass accumulation after transplanting among three variety types in 2015 and 2016. Grain yield of JIH was averaged 12.4 t hm<sup>-2</sup> for two years, and 7.8% and 23.3% higher at  $P < 0.05$  than that of JC and IH, respectively. Compared with JI and IH, JIH had lower panicle per m<sup>2</sup>, filled-grain percentage, and 1000-grain weight, while more spikelets per panicle. JIH also had higher total biomass weight at maturity stage, while lower harvest index. The biomass weight in stem and leaf and their ratio at maturity stage were the highest in JIH and lowest in IH. JIH had the highest panicle weight while IH had the lowest panicle weight, and the opposite trend was observed in the ratio of panicle weight to the total biomass weight at maturity among three variety types. The above-ground biomass accumulation dynamics after transplanting of JIH, JC, and IH were all well fitted by Gompertz equation. The above-ground biomass accumulation rate of different variety types showed a single-peak curve of increasing trend and then a decreasing trend after transplanting. The maximum biomass accumulation rate of JIH, JC, and IH was observed at 61–62, 64–66, and 63–64 days after transplanting, respectively. The maximum biomass accumulation rate of JIH was 17.7% and 17.3% higher than that of JC and IH, respectively. Compared with JC and IH, JIH had higher mean biomass accumulation rate in the early, middle, and late stages; and JIH had lower duration days in the early and middle stages and higher duration days in the late stages. Compared with JC and IH, JIH had higher biomass accumulation in the early, middle, and late stages. In this study, a Gompertz model was established that conformed to the dynamic characteristics of above-ground biomass accumulation after transplanting in different variety types. Compared with JC and IH, JIH had superior biomass accumulation in the early, middle, and late stages; the higher biomass accumulation in the early and middle stages were due to the higher biomass accumulation rate, and higher biomass accumulation in the late stage was due to its higher biomass accumulation period and accumulation rate.

**Keywords:** Yongyou series; *japonica/indica* hybrids; above-ground biomass accumulation; Gompertz equation

近年来,以甬优12、甬优2640、甬优1540等为代表的甬优系列籼粳杂交稻在生产上屡创13.5 t hm<sup>-2</sup>高产纪录<sup>[1-3]</sup>。当前,甬优系列籼粳杂交稻在我国浙江、福建、湖北、江苏、安徽等地推广应用前景良好,具有营养生长旺盛、生物学产量大、茎秆粗壮、单产水平高等特性<sup>[4-6]</sup>。已有研究表明,与常规粳稻和杂交籼稻相比,甬优籼粳杂交稻具有5%~20%的增产优势;并从籽粒灌浆、冠层结构、花后源-库平衡、养分积累与转运、根系形态生理等角度分析了甬优籼粳杂交稻产量优势形成的形态生理基础<sup>[7-11]</sup>。干物质是作物光合作用形成的终产物,直接决定作物产量的高低<sup>[12]</sup>。利用模型方程定量分析干物质积累动态特征是阐明作物产量形成的重要研究手段,在水稻、小麦、玉米、棉花等作物上均有相关研究报道<sup>[13-16]</sup>。如就水稻而言,纪洪亭等<sup>[14]</sup>基于Gompertz方程定量分析了超级杂交稻栽后群体干物质和养分积累特征,与对照相比,超级杂交稻干物质和养分积累的优势主要是由于快增期持续天数较长,中后期尤其是抽穗后干物质和养分积累速率较快。韦还和等<sup>[17]</sup>研究表明,甬优籼粳杂交稻花后较强的干物质积累优势主要体现在花后渐增期,且花后渐增期较强的干物质积累能力主要在于其较长的渐增期持续天数。当前,利用模型方程分析甬优籼粳杂交稻栽后地上部干物质积累与生产特性的研究仍较为缺乏。为此,本研究对甬优籼粳杂交稻、常规粳稻与杂交籼稻栽后地上部干物质积累特性进行比较研究,定量分析不同类型品种栽后地上部干物质积累特征及其差异,为阐明甬优籼粳杂交稻产量优势形成机理及其配套高产栽培措施提供理论与实践支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点、参试材料与栽培管理

试验于2015—2016年在浙江省宁波市鄞州区洞桥镇进行,土壤类型为黄化青紫泥田,pH 5.6,含全氮0.16%、碱解氮84.6 mg kg<sup>-1</sup>、速效磷19.5 mg kg<sup>-1</sup>和速效钾76.5 mg kg<sup>-1</sup>。

以甬优籼粳杂交稻(甬优1540和甬优4540)、常规粳稻(镇稻13号和武运粳30)、杂交籼稻(两优培九和扬两优6号)为参试材料。2年中,甬优籼粳杂交稻全生育期天数169~171 d,常规粳稻全生育期天数159~160 d,杂交籼稻全生育期天数140~141 d。

采取完全随机区组设计,小区面积27 m<sup>2</sup>(6.0 m × 4.5 m),3次重复。小区间作埂隔离,并用塑料薄膜覆盖埂体,保护断独排灌。2年播期均在5月20日,毯苗育秧,秧龄20 d,栽插株行距为30.0 cm × 13.2 cm。籼粳杂交稻和杂交籼稻每穴2苗栽插,常规粳稻每穴4株苗栽插。各小区氮、磷、钾肥施用量与施用比例均一致。施纯氮270 kg hm<sup>-2</sup>,按基蘖肥:穗粒肥=5:5施用;过磷酸钙(含12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)1125 kg hm<sup>-2</sup>,移栽前1 d作基肥全部施用;氯化钾(含60% K<sub>2</sub>O)450 kg hm<sup>-2</sup>,按基蘖肥:穗粒肥=5:5施用。移栽后以湿润灌溉为主,建立浅水层;群体达到目标穗数的80%时搁田,控制无效分蘖发生;抽穗扬花期田间保持3 cm水层,灌浆结实期间歇灌溉,干湿交替,收割前7 d断水搁田。按常规高产栽培要求防治病虫害。

### 1.2 测定项目与方法

2015年,栽后每隔10 d直至成熟期,按参试品种每小区的平均茎蘖数每次取3穴植株。将样株分成叶、茎鞘

和穗 3 个部分,之后将各植株器官放置 105 烘箱杀青 30 min, 75 烘干至恒重, 测定干物质量。

2016 年,于拔节、抽穗、抽穗后 20 d 和成熟期,按参试品种每小区的平均茎蘖数每次取 3 穴植株。将样株分成叶、茎鞘和穗 3 个部分,之后放置 105 烘箱杀青 30 min, 75 烘干至恒重, 测定干物质量。

成熟期每小区取 50 穴调查有效穗数、每穗粒数、结实率和测定千粒重;各小区实产收割面积 6 m<sup>2</sup>, 脱粒后晾晒,并称重。

### 1.3 数据处理

日产量(kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) = 产量(kg hm<sup>-2</sup>)/全生育期天数(d)。

运用 Microsoft Excel 软件录入数据、计算,用 DPS 软件作统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型品种产量及其构成

两年中,甬优籼粳杂交稻较常规粳稻和杂交籼稻分别增产 7.8% 和 23.3%, 差异显著。产量构成因素方面,穗数和结实率均以常规粳稻最高、籼粳杂交稻最低;每穗粒数则以籼粳杂交稻显著高于常规粳稻与杂交籼稻,如 2015 年,籼粳杂交稻每穗粒数较常规粳稻和杂交籼稻分别高 94.2% 和 67.2%;千粒重则呈杂交籼稻>常规粳稻>籼粳杂交稻(表 1)。

表 1 各品种产量及其构成因素

Table 1 Grain yield, total biomass weight, and harvest index of tested varieties

年份 Year	品种类型 Variety type	品种 Variety	产量 Grain yield (t hm <sup>-2</sup> )	穗数 Number of panicles (×10 <sup>4</sup> hm <sup>-2</sup> )	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)
2015	籼粳杂交稻 JIH	甬优 1540 Yongyou 1540	12.4	187	349	87.6	21.9
		甬优 4540 Yongyou 4540	12.4	183	357	88.1	21.5
		平均值 Mean	12.4 a	185 c	353 a	87.9 b	21.7 b
	常规粳稻 JC	镇稻 13 号 Zhendao 13	11.5	303	169	89.2	25.1
		武运粳 30 Wuyunjing 30	11.4	294	176	90.1	24.8
		平均值 Mean	11.5 b	299 a	173 c	89.7 a	25.0 ab
	杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj	10.1	226	204	89.3	25.1
		扬两优 6 号 Yangliangyou 6	10.0	231	198	88.7	26.3
		平均值 Mean	10.1 c	229 b	201 b	89.0 ab	25.7 a
2016	籼粳杂交稻 JIH	甬优 1540 Yongyou 1540	12.5	189	351	87.2	22.2
		甬优 4540 Yongyou 4540	12.3	192	348	87.8	21.8
		平均值 Mean	12.4 a	191 c	350 a	87.5 c	22.0 b
	常规粳稻 JC	镇稻 13 号 Zhendao 13	11.6	287	172	89.6	25.2
		武运粳 30 Wuyunjing 30	11.4	296	174	89.8	24.9
		平均值 Mean	11.5 b	292 a	173 c	89.7 a	25.1 ab
	杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj	10.1	235	197	88.7	25.3
		扬两优 6 号 Yangliangyou 6	10.0	244	191	89.1	26.2
		平均值 Mean	10.1 c	240 b	194 b	88.9 b	25.8 a

标以不同小写字母的值在同一年份 0.05 水平差异显著。

Values followed by different lowercase letters are significantly different at the 0.05 probability level in the same year. JIH: *japonica/indica* hybrids; JC: *japonica* conventional rice; IH: *indica* hybrid rice.

### 2.2 不同类型品种日产量、成熟期干物重与收获指数

日产量方面,籼粳杂交稻 2 年平均为 72.9 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 高于常规粳稻(71.9 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)和杂交籼稻(71.6 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),但差异不显著。不同类型品种成熟期干物重呈籼粳杂交稻>常规粳稻>杂交籼稻,差异显著。如 2015 年,籼粳杂交稻成熟期干物重较常规粳稻和杂交籼稻分别高 11.6% 和 29.1%。籼粳杂交稻收获指数 2 年平均为 0.484,

低于常规粳稻和杂交籼稻(表 2)。

不同类型品种各器官间成熟期干物重均以穗部干重最大、叶片干重最低。不同类型品种成熟期茎鞘、叶片和穗部干物重呈籼粳杂交稻>常规粳稻>杂交籼稻,差异显著;成熟期茎鞘和叶片干重所占比例亦均呈籼粳杂交稻>常规粳稻>杂交籼稻,穗部干重所占比例则呈相反趋势(表 3)。

表2 各品种日产量、干物重与收获指数

Table 2 Grain yield per day, total biomass weight, and harvest index of tested varieties

年份 Year	品种类型 Variety type	品种 Variety	日产量 Grain yield per day (kg hm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	成熟期干物重 at maturity (t hm <sup>-2</sup> )	收获指数 Harvest index	
2015	籼粳杂交稻 JIH	甬优 1540 Yongyou 1540	72.9	22.1	0.484	
		甬优 4540 Yongyou 4540	72.5	22.2	0.481	
		平均值 Mean	72.7 a	22.2 a	0.483 b	
	常规粳稻 JC	镇稻 13 号 Zhendao 13	71.9	20.1	0.493	
		武运粳 30 Wuyunjing 30	71.3	19.7	0.497	
		平均值 Mean	71.6 a	19.9 b	0.495 ab	
	杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj	72.1	17.3	0.502	
		扬两优 6 号 Yangliangyou 6	71.6	17.0	0.505	
		平均值 Mean	71.9 a	17.2 c	0.504 a	
	2016	籼粳杂交稻 JIH	甬优 1540 Yongyou 1540	74.0	22.3	0.482
		甬优 4540 Yongyou 4540	72.4	21.7	0.487	
		平均值 Mean	73.2 a	22.0 a	0.485 b	
	常规粳稻 JC	镇稻 13 号 Zhendao 13	73.0	20.2	0.495	
		武运粳 30 Wuyunjing 30	71.7	20.0	0.491	
		平均值 Mean	72.3 a	20.1 b	0.493 ab	
	杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj	71.6	17.2	0.504	
		扬两优 6 号 Yangliangyou 6	70.9	17.2	0.501	
		平均值 Mean	71.3 a	17.2 c	0.503 a	

缩写同表 1。标以不同小写字母的值表示在同一年份 0.05 水平差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 1. Values followed by different lowercase letters are significantly different at the 0.05 probability level in the same year.

表3 各品种成熟期植株各器官干物重及其比例

Table 3 Biomass weight of rice organs and their ratios of tested varieties at maturity stage

年份 Year	品种类型 Variety type	品种 Variety	成熟期器官干物重 Biomass weight of rice organs at maturity stage (t hm <sup>-2</sup> )			成熟期各器官干物重所占比例 Ratio of biomass weight of rice organs at maturity stage (%)			
			茎鞘 stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	
2015	籼粳杂交稻 JIH	甬优 1540 Yongyou 1540	7.2	3.2	11.7	32.4	14.7	52.9	
		甬优 4540 Yongyou 4540	7.3	3.2	11.7	33.1	14.2	52.7	
		平均值 Mean	7.3 a	3.2 a	11.7 a	32.8 a	14.4 a	52.8 c	
	常规粳稻 JC	镇稻 13 号 Zhendao 13	6.5	2.6	10.9	32.3	13.2	54.5	
		武运粳 30 Wuyunjing 30	6.4	2.5	10.8	32.7	12.5	54.8	
		平均值 Mean	6.5 b	2.6 b	10.8 b	32.5 a	12.9 b	54.7 b	
	杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj	5.6	2.1	9.8	32.0	11.9	56.1	
		扬两优 6 号 Yangliangyou 6	5.4	2.0	9.7	31.6	11.5	56.9	
		平均值 Mean	5.5 c	2.0 c	9.7 c	31.8 b	11.7 c	56.5 a	
	2016	籼粳杂交稻 JIH	甬优 1540 Yongyou 1540	7.2	3.3	11.8	32.5	14.6	52.9
		甬优 4540 Yongyou 4540	7.1	3.1	11.5	32.9	14.1	53.0	
		平均值 Mean	7.2 a	3.2 a	11.7 a	32.7 a	14.3 a	53.0 b	
	常规粳稻 JC	镇稻 13 号 Zhendao 13	6.5	2.7	11.0	32.1	13.6	54.3	
		武运粳 30 Wuyunjing 30	6.5	2.5	11.0	32.3	12.7	55.0	
		平均值 Mean	6.5 b	2.6 b	11.0 b	32.2 a	13.2 b	54.7 ab	
	杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj	5.4	2.0	9.8	31.3	11.8	56.9	
		扬两优 6 号 Yangliangyou 6	5.3	2.1	9.8	30.8	12.0	57.2	
		平均值 Mean	5.3 c	2.0 c	9.8 c	31.1 a	11.9 c	57.1 a	

缩写同表 1。标以不同小写字母的值表示在同一年份 0.05 水平差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 1. Values followed by different lowercase letters are significantly different at the 0.05 probability level in the same year.

### 2.3 不同类型品种栽后地上部干物质积累动态模型方程的建立、检验及应用

2.3.1 水稻栽后地上部干物质积累动态模型方程的建立与检验 不不同类型品种栽后地上部干物质积累动态见图 1。不同类型品种栽后地上部干物质积累基本均呈渐增、快增和缓增的趋势。栽后 30 d 内, 不同类型品种间地上部干物重差异不大; 此后, 粳稻杂交稻地上部干物重均高于常规粳稻和杂交籼稻。

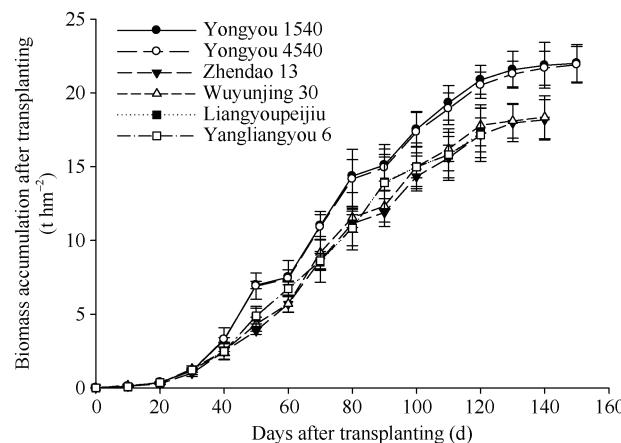


图 1 水稻栽后干物质积累动态(2015)

Fig. 1 Dynamics biomass accumulation of tested varieties after transplanting in 2015

以各品种栽后天数为自变量, 栽后地上部干物质积累量为因变量, 利用 Curve Expert 1.3 软件对各品种栽后天数和地上部干物重之间的关系进行拟合。为筛选出具有生物学意义、能较好反应各参试品种栽后地上部干物质积累动态变化的模型方程, 先以甬优 1540 为例, 得到了包括 Gompertz、MMF、Richards 和 Logistic 等在内的 17 个方程, 取拟合效果较好的 6 个(相关系数均在 0.990 以上)列于表 4, 并对各模型方程取极限值。方程 2 和方程 4 中, 当  $t \rightarrow 0$  时,  $w$  为负值, 无生物学意义; 方程 5 为方程 3 中

$d=1$  时的一个特例。与方程 6 相比, 方程 1 拟合相关系数更高, 拟合效果更好。再以镇稻 13 号为例, 得到了包括 Gompertz、MMF、Richards 和 Logistic 等在内的 16 个方程, 取拟合效果较好的 7 个(相关系数均在 0.990 以上)列于表 5。方程 4 和方程 5 中, 当  $t \rightarrow 0$  时,  $w$  为负值, 无生物学意义; 方程 6 为方程 2 中  $d=1$  时的一个特例, 且方程 2 中的  $b$  值为负值; 方程 3 中, 当  $t \rightarrow \infty$ ,  $w$  不趋向一个固定值, 无生物学意义。与方程 7 相比, 方程 1 拟合相关系数更高。因此, 本研究选用 Gompertz 方程作为各品种栽后地上部干物质积累动态模型, 其表达式为  $w = ae^{-e^{b-ct}}$ , 式中,  $w$  为地上部干物重( $t \text{ hm}^{-2}$ ),  $t$  为移栽后天数(d),  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

利用 2015 年数据建立了各参试水稻品种栽后地上部干物质积累动态模型。由表 6 可知, 不同类型品种栽后地上部干物质积累动态均以 Gompertz 方程拟合的效果较好, 拟合系数一般都在 0.995 左右。

利用 2016 年数据对 Gompertz 方程进行检验, 对 6 个水稻品种关键生育期地上部干物重的模拟值与实测值进行  $y=x$  的线性回归分析。结果表明, 各品种模拟的准确度(以  $k$  表示)均在 1 左右, 且相关性均达极显著水平, 表明 Gompertz 方程可较好地拟合不同水稻品种栽后地上部干物质积累动态特征(图 2)。

### 2.3.2 水稻栽后地上部干物质积累动态模型方程的应用

参照纪洪亭等<sup>[14]</sup>方法对 Gompertz 方程进行求导, 推导出不同类型品种栽后地上部干物质积累速率的变化动态。不同类型品种栽后地上部干物质积累速率均呈先升后降趋势。移栽始期直至栽后 110 d, 粳稻杂交稻地上部干物质积累速率均高于常规粳稻和杂交籼稻。籼稻杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻最大干物质积累速率出现的时间分别在栽后 61~62、64~66 和 63~64 d。籼稻杂交稻栽后最大干物质积累速率较常规粳稻和杂交籼稻分别高 17.7% 和 17.3% (图 3)。

表 4 甬优 1540 栽后地上部干物重积累动态模型(2015)

Table 4 Simulation equations of above-ground biomass accumulation of Yongyou 1540 after transplanting in 2015

编号 Number	模拟方程 Simulation equation	参数 Parameter				相关系数 Correlation coefficient
		a	b	c	d	
1	$w = ae^{-e^{b-ct}}$	23.81	1.94	0.0316		0.998
2	$w = a + bt + ct^2 + dt^3$	-0.24	-0.027	0.004	-0.00002	0.997
3	$w = \frac{a}{(1 + e^{b-ct})^d}$	23.42	0.37	0.035	0.16	0.996
4	$w = \frac{ab + ct^d}{b + t^d}$	-0.44	54,222.0	27.94	2.48	0.995
5	$w = \frac{a}{1 + be^{-ct}}$	22.23	44.63	0.053		0.995
6	$w = ae^{-\frac{(t-b)^2}{2c^2}}$	22.19	133.62	50.61		0.994

表5 镇稻13号栽后地上部干物重积累动态模型(2015)

Table 5 Simulation equations of above-ground biomass accumulation of Zhendao 13 after transplanting in 2015

编号 Number	模拟方程 Simulation equation	参数 Parameter				相关系数 Correlation coefficient
		a	b	c	d	
1	$w = ae^{-b-ct}$	20.56	2.00	0.0302		0.998
2	$w = \frac{a}{(1 + e^{b-ct})^d}$	20.26	-0.025	0.032	0.088	0.998
3	$w = a + b \cos(ct+d)$	9.02	9.10	0.024	2.95	0.997
4	$w = a + bt + ct^2 + dt^3$	-0.16	-0.066	0.004	-0.00002	0.997
5	$w = \frac{ab + ct^d}{b + t^d}$	-0.31	74,337.0	25.52	2.48	0.997
6	$w = \frac{a}{1 + be^{-ct}}$	18.56	56.05	0.054		0.996
7	$w = ae \frac{-(t-b)^2}{2c^2}$	17.99	131.11	46.97		0.996

表6 各品种栽后地上部干物质积累的拟合方程(2015)

Table 6 Stimulation equations of above-ground biomass accumulation of the tested varieties after transplanting in 2015

品种类型 Variety type	品种 Variety	方程参数 Parameter			拟合方程 Stimulated equation
		a	b	c	
籼粳杂交稻 JIIH	甬优1540 Yongyou 1540 甬优4540 Yongyou 4540	23.81 23.66	1.94 1.91	0.0316 0.0311	$W = 23.81e^{-\exp(1.94-0.0316t)}$ , $R^2 = 0.996$ $W = 23.66e^{-\exp(1.91-0.0311t)}$ , $R^2 = 0.997$
常规粳稻 JC	镇稻13号 Zhendao 13 武运粳30 Wuyunjing 30	20.56 20.63	2.00 2.02	0.0302 0.0312	$W = 20.56e^{-\exp(2.00-0.0302t)}$ , $R^2 = 0.996$ $W = 20.63e^{-\exp(2.02-0.0312t)}$ , $R^2 = 0.997$
杂交籼稻 IH	两优培九 Liangyoupeijiuj 扬两优6号 Yangliangyou 6	20.61 20.36	1.96 1.97	0.0307 0.0312	$W = 20.61e^{-\exp(1.96-0.0307t)}$ , $R^2 = 0.995$ $W = 20.36e^{-\exp(1.97-0.0312t)}$ , $R^2 = 0.997$

缩写同表1。Abbreviations are the same as those given in Table 1.

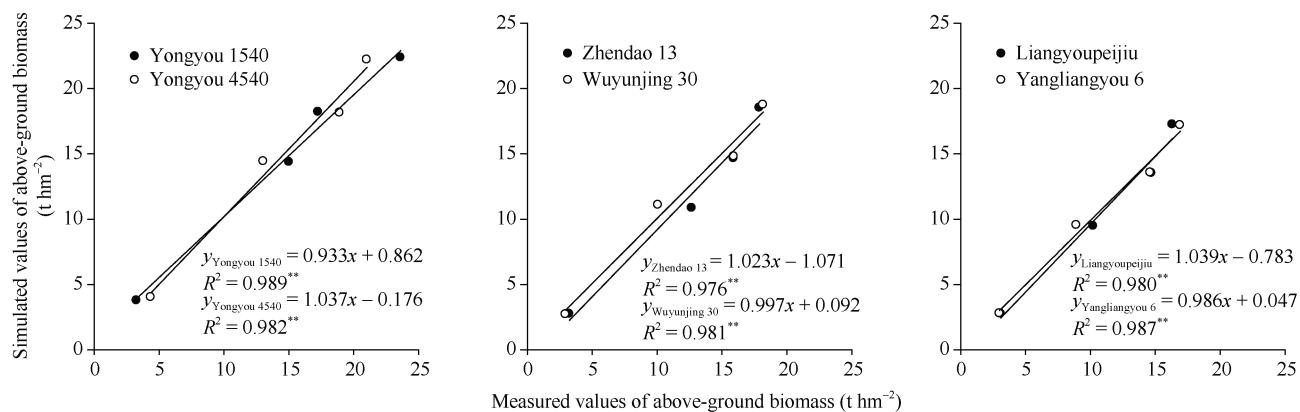


图2 各类品种栽后地上部干物质积累模拟值与实测值的关系

Fig. 2 Relationship between simulated and measured values of above-ground biomass accumulation after transplanting in the tested varieties

\*\* 表示在  $P < 0.01$  水平差异显著。\*\* indicates significant difference at  $P < 0.01$ .

不同类型品种栽后地上部干物质积累动态呈明显的渐增期( $0-t_1$ )、快增期( $t_1-t_2$ )和缓增期( $t_2$ —成熟期)增长趋势, 其中  $t_1$  (d) =  $(b-0.9614)/c$ ,  $t_2$  (d) =  $(b+0.9614)/c$ 。籼粳杂交稻在渐增期和快增期阶段的干物质积累天数均低于常规粳稻和杂交籼稻, 缓增期阶段的干物质积累天数则显著高于常规粳稻和杂交籼稻。与常规粳稻和杂交籼稻相比,

籼粳杂交稻在渐增期、快增期和缓增期阶段的平均干物质积累速率均较高。干物质积累量方面, 渐增期, 籼粳杂交稻干物质积累量高于常规粳稻和杂交籼稻相比, 但差异不显著; 快增期和缓增期, 籼粳杂交稻干物质积累量显著高于常规粳稻和杂交籼稻, 如籼粳杂交稻在缓增期的干物质积累量较常规粳稻和杂交籼稻分别高 38.1% 和

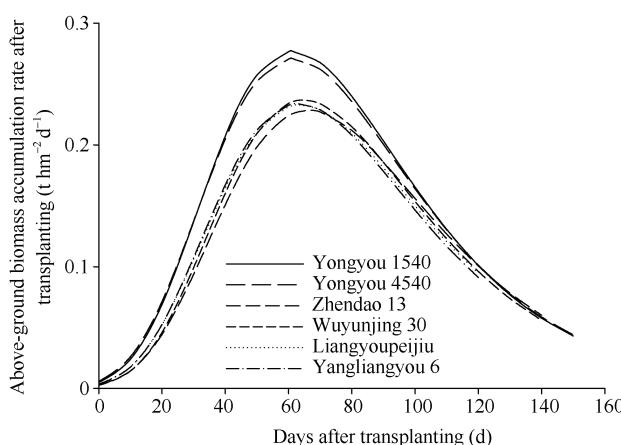


图 3 水稻栽后地上部干物质积累速率变化动态(2015)  
Fig. 3 Dynamics in above-ground biomass accumulation rate of tested varieties after transplanting in 2015

表 7 各品种栽后地上部干物质积累渐增、快增和缓增期 3 个阶段的特征(2015)

Table 7 Characteristics of above-ground biomass accumulation of tested varieties in the early, middle and late stages after transplanting in 2015

品种类型 Variety type	品种 Variety	渐增期 Early stage			快增期 Middle stage			缓增期 Late stage		
		天数 Days (d)	平均积 累速率 ARBA (t hm⁻² d⁻¹)	干物质 积累量 BAA (t hm⁻²)	天数 Days (d)	平均积 累速率 ARBA (t hm⁻² d⁻¹)	干物质 积累量 BAA (t hm⁻²)	天数 Days (d)	平均积 累速率 ARBA (t hm⁻² d⁻¹)	干物质 积累量 BAA (t hm⁻²)
籼粳杂交稻	甬优 1540 Yongyou 1540	31.0	0.056	1.6	60.8	0.238	14.5	78.2	0.074	5.8
JIH	甬优 4540 Yongyou 4540	30.5	0.056	1.7	61.8	0.233	14.4	78.7	0.074	5.8
	平均值 Mean	30.7 c	0.056 a	1.7 a	61.3 a	0.236 a	14.5 a	78.4 a	0.074 a	5.8 a
常规粳稻	镇稻 13 号 Zhendao 13	34.4	0.043	1.5	63.7	0.197	12.5	61.9	0.067	4.2
JC	武运粳 30 Wuyunjing 30	33.9	0.044	1.4	61.6	0.204	12.6	64.4	0.067	4.3
	平均值 Mean	34.2 a	0.043 c	1.5 a	62.6 a	0.200 b	12.5 b	63.2 b	0.067 b	4.2 b
杂交籼稻	两优培九 Liangyoupeijiu	32.5	0.046	1.4	62.6	0.200	12.6	44.8	0.073	3.3
IH	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	32.3	0.046	1.5	61.6	0.201	12.4	46.0	0.071	3.3
	平均值 Mean	32.4 b	0.046 b	1.5 a	62.1 a	0.201 b	12.5 b	45.4 c	0.072 a	3.3 c

标以不同小写字母的值表示在 0.05 水平差异显著。

JIH: *japonica / indica* hybrids; JC: *japonica* conventional rice; IH: *indica* hybrid rice. ARBA: average rate of biomass accumulation; BAA: biomass accumulation amount. Values followed by different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 probability level.

均高于常规粳稻和杂交籼稻。按照生育类型划分,本研究中的籼粳杂交稻生育类型为晚熟型<sup>[20]</sup>,与对照常规粳稻和杂交籼稻相比,甬优晚熟类型籼粳杂交稻全生育期天数和日产量亦均较高(表 2)。上述结果表明,较长的生育期天数和较高的日产量是甬优中熟和晚熟类型籼粳杂交稻产量优势形成的共性特征。

研究表明,目前我国水稻、小麦、玉米等主要禾谷类作物的收获指数进一步提高的空间有限,今后应主要通过增加生物产量来提高禾谷类作物的产量<sup>[21-23]</sup>。本试验条件下,甬优籼粳杂交稻收获指数为 0.484,低于常规粳稻和杂交籼稻;成熟期干物重则较常规粳稻和杂交籼稻分别高 10.5% 和 28.5% (表 2),最终较常规粳稻和杂交籼稻分别增产 7.8% 和 23.3% (表 1),表明较强的干物质生产能力是籼粳杂交稻产量优势形成的重要基础。不同类型品种

75.8%。与常规粳稻和杂交籼稻相比,籼粳杂交稻在渐增期、快增期和缓增期阶段的干物质积累量均较高;渐增期和快增期较高的干物质积累量主要由于此阶段较高的干物质积累速率,缓增期较高的干物质积累量是由于其较高的干物质积累天数和积累速率(表 7)。

### 3 讨论

#### 3.1 甬优系列籼粳杂交稻产量与干物质积累优势

此前较多的研究表明,甬优籼粳杂交稻较常规粳稻和杂交籼稻具有明显的产量优势<sup>[7-11]</sup>。本试验条件下,甬优籼粳杂交稻产量显著高于常规粳稻和杂交籼稻,较常规粳稻和杂交籼稻分别增产 7.8% 和 23.3% (表 1),这与之前的研究结果一致。水稻产量可表述为全生育期天数和日产量的乘积<sup>[18]</sup>。孟天瑶等<sup>[19]</sup>研究表明,甬优中熟类型籼粳杂交稻的全生育期天数和日产量大致为 150 d 和 80 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,

干物质积累分配上差异较大<sup>[24-26]</sup>,如刘琦等<sup>[24]</sup>研究表明,与常规粳稻相比,四川盆地中籼中熟和中籼迟熟杂交稻单产水平高,成熟期叶、茎鞘和穗部干物重亦较高;在干物质积累分配比例上,中籼中熟和中籼迟熟杂交稻穗部干重占比高于常规粳稻,茎鞘干重占比则低于常规粳稻。本试验条件下,与常规粳稻和杂交籼稻相比,甬优籼粳杂交稻成熟期各器官干重均较高;籼粳杂交稻茎鞘和叶干重所占比例较高,穗部干重所占比例则较低(表 3)。该结果表明,甬优籼粳杂交稻在满足大库容灌浆充实需要的同时,仍可保持较强的光合物质生产能力,使其源器官(茎鞘和叶)干重占据较大比例。

#### 3.2 甬优系列籼粳杂交稻栽后干物质积累模型及其特征分析

利用生长模型已成为分析作物干物质与养分积累、籽

粒灌浆以及花后源-库特性的重要研究方法<sup>[14-15,18,27-28]</sup>。就水稻而言, 因各稻作区生态条件以及参试品种类型的差异, Gompertz、Richards 和 Logistic 等方程模型被用于拟合分析干物质积累动态及其特征<sup>[14,24,29]</sup>。就本研究中不同水稻品种类型栽后地上部干物重积累动态的效果而言, Richards 方程参数 b 和 c 在不同品种间变异较大, 而 Gompertz 方程参数在不同品种间变异相对较小; 与 Logistic 方程相比而言, Gompertz 方程拟合系数更高, 拟合效果更好(表 4 和表 5)。并利用 2016 年数据对 Gompertz 方程进行检验, 结果表明, Gompertz 方程可较好地拟合甬优籼粳杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻栽后地上部干物质积累动态特征(表 4、表 5、表 6 和图 2)。前人研究表明, 不同气候条件、播期、灌溉措施、施肥管理等都对水稻干物质积累特征有显著影响<sup>[30-32]</sup>。本研究在一个试验点、同一栽培措施下采用 Gompertz 方程对不同品种类型栽后地上部干物重积累动态进行拟合分析, 定量分析了不同类型品种栽后地上部干物质积累特征及其差异。由于资料有限, 在其他生态区不同栽培措施下, Gompertz 方程拟合分析各品种类型干物质积累特征的可靠性和适用性仍有待于进一步的全面验证。

干物质积累速率是表述群体生长的重要指标。有研究表明<sup>[14,30]</sup>, 水稻栽后群体干物质积累速率随栽后天数呈先升后降的单峰曲线变化趋势。但也有研究指出<sup>[31]</sup>, 水稻栽后群体干物质积累速率会在分蘖后期至穗分化期、穗分化期至开花期和开花后期至生理成熟期出现 3 个峰值, 且以穗分化期至开花期的干物质积累速率最大。本研究结果表明, 不同类型品种栽后群体干物质积累速率均呈单峰曲线变化, 籼粳杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻最大干物质积累速率出现的时间分别在栽后 61~62、64~66 和 63~64 d; 籼粳杂交稻栽后最大干物质积累速率和平均干物质积累速率均高于常规粳稻和杂交籼稻(图 3 和表 7), 这也表明, 籼粳杂交稻栽后较强的干物质积累优势来自于其较长的生育期天数以及较高的干物质积累速率。

纪洪亭等<sup>[33]</sup>研究表明, 快增期是超级杂交稻与对照品种干物质积累量差异较大的时期。此前研究表明, 甬优籼粳杂交稻在花后干物质积累量上较常规粳稻和杂交籼稻具有明显优势, 且其花后较强的干物质积累优势主要体现在花后渐增期<sup>[7,10,17]</sup>。本试验条件下, 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻在栽后在渐增期、快增期和缓增期阶段的干物质积累量上均具有优势, 尤其是快增期和缓增期阶段; 渐增期和快增期较高的干物质积累量主要由于此阶段较高的干物质积累速率, 缓增期较高的干物质积累量是由于其较高的干物质积累天数和积累速率(表 7)。

## References

- [1] 王晓燕, 韦还和, 张洪程, 孙健, 张建民, 李超, 陆惠斌, 杨筠文, 马荣荣, 许久夫, 王珏, 许跃进, 孙玉海. 水稻甬优 12 产量 13.5 t hm<sup>-2</sup>以上超高产群体的生育特征. 作物学报, 2014, 40: 2149~2159.
- [2] 胡雅杰, 朱大伟, 钱海军, 曹伟伟, 邢志鹏, 张洪程, 周有炎, 陈厚存, 汪洪洋, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 籼粳杂交稻甬优 2640 钵苗机插超高产群体若干特征探讨. 作物学报, 2014, 40: 2016~2027.
- [3] Hu Y J, Zhu D W, Qian H J, Cao W W, Xing Z P, Zhang H C, Wei H Y, Zhou Y Y, Chen H C, Wang H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Guo B W. Some characteristics of mechanically transplanted pot seedlings in super high yielding population of *indica-japonica* hybrid rice Yongyou 2640. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 2016~2027 (in Chinese with English abstract).
- [4] 吴文革, 习敏, 许有尊, 陈刚, 周永进, 张洪程, 戴其根, 马荣荣, 王晓燕, 杨飞, 吴晓鹏, 周陶竹, 叶为发, 胡润, 康启中. 籼粳交组合甬优 1540 钵育机插超高产的产量构成及其群体光合特征. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017, 38(1): 73~80.
- [5] Wu W G, Xi M, Xu Y Z, Chen G, Zhou Y J, Zhang H C, Dai Q G, Ma R R, Wang X Y, Yang F, Wu X P, Zhou T Z, Ye W F, Hu R, Kang Q Z. Population photosynthetic characteristics and yield formation of the mechanically transplanted pot seedlings in hybrid rice variety Yongyou 1540 with super high-yield. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci Edn)*, 2017, 38(1): 73~80 (in Chinese with English abstract).
- [6] 曾研华, 张玉屏, 王亚梁, 向镜, 陈惠哲, 朱德峰. 籼粳杂交稻枝梗和颖花形成的播期效应. 中国农业科学, 2015, 48: 1300~1310.
- [7] Zeng Y H, Zhang Y P, Wang Y L, Xiang J, Chen H Z, Zhu D F. Effects of sowing date on formation of branches and spikelets in *indica-japonica* hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 1300~1310 (in Chinese with English abstract).
- [8] 何爱斌, 于朋超, 陈乾, 姜广磊, 王慰亲, 聂立孝. 甬优 4949 和超优 1000 在华中地区再生稻种植的氮肥运筹研究. 中国水稻科学, 2019, 33: 47~56.
- [9] He A B, Yu P C, Chen Q, Jiang G L, Wang W Q, Nie L X. Optimizing the nitrogen management for Yongyou 4949 and Chaoyou 1000 in ratoon rice systems in central China. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 47~56 (in Chinese with English abstract).
- [10] 谢振兴, 张居念, 林祁, 刘锋, 张初长, 卓芳梅, 姜照伟, 卓传营. 植物生长调节剂对再生稻头季抗倒伏能力和两季产量的影响. 中国水稻科学, 2019, 33: 158~166.
- [11] Xie Z X, Zhang J N, Lin Q, Liu F, Zhang C Z, Zhuo F M, Jiang Z W, Zhuo C Y. Effect of plant growth regulators on rice lodging resistance and grain production of main-crop and ratooning rice. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 158~166 (in Chinese with English abstract).
- [12] Wei H H, Meng T Y, Li C, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y, Guo B W, Zhang H C, Dai Q G. Comparisons of grain yield and nutrient accumulation and translocation in high-yielding *japonica/indica* hybrids, *indica* hybrids, and *japonica* conventional varieties. *Field Crops Res*, 2017, 204: 101~109.

- [8] Huang L Y, Yang D S, Li X X, Peng S B, Wang F. Coordination of high grain yield and high nitrogen use efficiency through large sink size and high post-heading source capacity in rice. *Field Crops Res*, 2019, 223: 49–58.
- [9] 姜元华, 许俊伟, 赵可, 韦还和, 孙建军, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 甬优系列籼粳杂交稻根系形态与生理特征. 作物学报, 2015, 41: 89–99.
- Jiang Y H, Xu J W, Zhao K, Wei H H, Sun J J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Root system morphological and physiological characteristics of *indica/japonica* hybrid rice of Yongyou series. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 89–99 (in Chinese with English abstract).
- [10] Wei H H, Yang Y L, Shao X Y, Shi T Y, Meng T Y, Lu Y, Tao Y, Li X Y, Ding E H, Chen Y L, Dai Q G. Higher leaf area through leaf width and lower leaf angle were the primary morphological traits for yield advantage of *japonica/indica* hybrids. *J Inter Agric*, 2020, 19: 483–494.
- [11] 孟天瑶, 李晓芸, 李超, 韦还和, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 张洪程. 甬优系列籼粳杂交稻中熟高产品系的株型特征. 中国水稻科学, 2016, 30: 170–180.
- Meng T Y, Li X Y, Li C, Wei H H, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Zhang H C. Plant-type characteristics of high-yielding lines of *Yongyou japonica/indica* hybrid rice with medium maturity. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 170–180 (in Chinese with English abstract).
- [12] Kumar R, Sarawgi A K, Ramos C, Amarante S T, Ismail A M, Wade L J. Partitioning of dry matter during drought stress in rainfed lowland rice. *Field Crops Res*, 2006, 96: 455–465.
- [13] Mao L L, Zhang L Z, Sun X Z, van der Werf W, Evers J B, Zhao X H, Zhang S P, Song X L, Li Z H. Use of the beta growth function to quantitatively characterize the effects of plant density and a growth regulator on growth and biomass partitioning in cotton. *Field Crops Res*, 2018, 224: 28–36.
- [14] 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 潘剑, 范乐乐, 李云, 武彪, 肖铭, 梁显林. 超级杂交稻群体干物质和养分积累动态模型与特征分析. 中国农业科学, 2012, 45: 3709–3720.
- Ji H T, Feng Y H, He T B, Pan J, Fan L L, Li Y, Wu B, Xiao M, Liang X L. A dynamic model of dry matter and nutrient accumulation in super hybrid rice and analysis of its characteristics. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 3709–3720 (in Chinese with English abstract).
- [15] 肖强, 闫连波, 朱欣雨, 张怀文, 曹兵, 倪小会, 李丽霞, 杨俊刚, 黄德明, 衣文平. 夏玉米植株干物质、氮磷钾养分积累速度和时间的动态分析. 植物营养与肥料学报, 2014, 20: 606–612.
- Xiao Q, Yan L B, Zhu X Y, Zhang H W, Cao B, Ni X H, Li L X, Yang J G, Huang D M, Yi W P. Dynamic analysis of dry matter and NPK accumulation with time in summer maize. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 606–612 (in Chinese with English abstract).
- [16] Yang D Q, Luo Y L, Ni Y L, Yin Y P, Yang W B, Peng D L, Cui Z Y, Wang Z L. Effects of exogenous ABA application on post-anthesis dry matter redistribution and grain starch accumulation of winter wheat with different staygreen characteristics. *Crop J*, 2014, 2: 144–153.
- [17] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 张洪程, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 甬优籼粳杂交稻花后干物质积累模型与特征分析. 作物学报, 2016, 42: 265–277.
- Wei H H, Meng T Y, Li C, Zhang H C, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Dynamic model and its characteristics analysis for dry matter production after heading of *indica/japonica* hybrid rice of Yongyou series. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 265–277 (in Chinese with English abstract).
- [18] 何连华, 陈多, 张弛, 田青兰, 吴振元, 李秋萍, 钟晓媛, 邓飞, 胡剑锋, 凌俊英, 任万军. 机插栽培籼杂交稻的日产量及与株型的关系. 中国农业科学, 2019, 52: 981–996.
- He L H, Chen D, Zhang C, Tian Q L, Wu Z Y, Li Q P, Zhong X Y, Deng F, Hu J F, Ling J Y, Ren W J. The daily yield of medium hybrid in machine transplanting and its relationship with plant type. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 981–996 (in Chinese with English abstract).
- [19] 孟天瑶, 许俊伟, 邵子彬, 葛梦婕, 张洪程, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 郭保卫, 荆培培. 甬优系列籼粳杂交稻氮肥群体最高生产力的优势及形成特征. 作物学报, 2015, 41: 1711–1725.
- Meng T Y, Xu J W, Shao Z B, Ge M J, Zhang H C, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Guo B W, Jing P P. Advantages and their formation characteristics of the highest population productivity of nitrogen fertilization in *japonica/indica* hybrid rice of *Yongyou* series. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1711–1725 (in Chinese with English abstract).
- [20] Wei H H, Li C, Xing Z P, Wang W T, Dai Q G, Zhou G S, Wang L, Xu K, Huo Z Y, Guo B W, Wei H Y, Zhang H C. Suitable growing zone and yield potential for late-maturity type of *Yongyou japonica/indica* hybrid rice in the lower reaches of Yangtze River, China. *J Inter Agric*, 2016, 15: 50–62.
- [21] 陈露, 张伟杨, 王志琴, 张耗, 刘立军, 杨建昌. 施氮量对江苏不同年代中粳稻品种产量与群体质量的影响. 作物学报, 2014, 40: 1412–1423.
- Chen L, Zhang W Y, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C. Effects of nitrogen application rate on grain yield and population quality of mid-season japonica rice cultivars at different decades in Jiangsu province. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1412–1423 (in Chinese with English abstract).
- [22] Tian Z W, Jing Q, Dai T B, Jiang D, Cao W X. Effects of genetic improvements on grain yield and agronomic traits of winter wheat in the Yangtze River Basin of China. *Field Crops Res*, 2011, 124: 417–425.
- [23] Qian C R, Yu Y, Gong X J, Jiang Y B, Zhao Y, Yang Z L, Hao Y B, Li L, Song Z W, Zhang W J. Response of grain yield to plant density and nitrogen rate in spring maize hybrids released from 1970 to 2010 in Northeast China. *Crop J*, 2016, 4: 459–467.
- [24] 刘琦, 胡剑锋, 周伟, 杨志平, 陈勇, 任万军. 四川盆地不同类型水稻品种机插栽培的干物质生产及产量特性分析. 中国水稻科学, 2019, 33: 35–46.
- Liu Q, Hu J F, Zhou W, Yang Z P, Chen Y, Ren W J. Dry matter production and yield characteristics of machine-transplanted rice varieties falling into different types in Sichuan Basin. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 35–46 (in Chinese with English abstract).

- [25] 董桂春, 李进前, 于小凤, 周娟, 田昊, 张燕, 张传胜, 张岳芳. 不同库容量常规籼稻品种物质生产与分配的基本特征. 中国水稻科学, 2009, 23: 639–644.
- Dong G C, Li J Q, Yu X F, Zhou J, Tian H, Zhang Y, Zhang C S, Zhang Y F. Characteristics of dry matter accumulation and distribution in conventional *indica* rice cultivars with different sink potentials. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23: 639–644 (in Chinese with English abstract).
- [26] 龚金龙, 邢志鹏, 胡雅杰, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 粳、粳超级稻光合物质生产与转运特征的差异. 作物学报, 2014, 40: 497–510.
- Gong J L, Xing Z P, Hu Y J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Difference of characteristics of photosynthesis, matter production and translocation between *indica* and *japonica* super rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 497–510 (in Chinese with English abstract).
- [27] Fu J, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice. *Field Crops Res*, 2011, 123: 170–182.
- [28] Shi W J, Xiao G, Struik P C, Jagadish K S V, Yin X Y. Quantifying source-sink relationships of rice under high night-time temperature combined with two nitrogen levels. *Field Crops Res*, 2017, 202: 36–46.
- [29] 李艳大, 汤亮, 陈青春, 张玉屏, 曹卫星, 朱艳. 水稻地上部干物质积累动态的定量模拟. 应用生态学报, 2010, 21: 1504–1510.
- Li Y D, Tang L, Chen Q C, Zhang Y P, Cao W X, Zhu Y. Dry matter accumulation in rice aboveground part: quantitative simulation. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21: 1504–1510 (in Chinese with English abstract).
- [30] 苏李君, 刘云鹤, 王全九. 基于有效积温的中国水稻生长模型的构建. 农业工程学报, 2020, 3(1): 162–174.
- Su L J, Liu Y H, Wang Q J. Rice growth model in China based on growing degree days. *Trans CSAE*, 2020, 3(1): 162–174 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何军, 崔远来, 张大鹏, 郑传举, 王建鹏, 王建漳, 史伟达. 不同水肥耦合条件下水稻干物质积累与分配特征. 灌溉排水学报, 2010, 29 (5): 1–5.
- He J, Cui Y L, Zhang D P, Zheng C J, Wang J P, Wang J Z, Shi W D. Characteristics of rice dry matter accumulation and distribution under different water and fertilizer treatment. *J Irrig Drain*, 2010, 29(5): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- [32] 白光志, 刘寿东, 余焰文, 杨再强, 殷建敏. 花期低温对晚稻干物质积累及分配的影响. 中国农业气象, 2016, 37: 206–212.
- Bai G Z, Liu S D, Yu Y W, Yang Z Q, Yin J M. Effect of low temperature at flowering stage on late rice dry matter accumulation and distribution. *Chin J Agrometeorol*, 2016, 37: 206–212 (in Chinese with English abstract).
- [33] 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 李云, 武彪, 王小燕. 两个超级杂交水稻品种物质生产的特性. 作物学报, 2013, 39: 2238–2246.
- Ji H T, Feng Y H, He T B, Li Y, Wu B, Wang X Y. Dynamic characteristics of matter production in two super hybrid rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 2238–2246 (in Chinese with English abstract).