

# 不同生态条件下氮高效水稻品种干物质积累和产量特性

朱莉<sup>1</sup>, 李贵勇<sup>2†</sup>, 周伟<sup>1</sup>, 朱世林<sup>1</sup>, 李珍珍<sup>1</sup>,  
夏海晓<sup>1</sup>, 陶有凤<sup>1</sup>, 任万军<sup>1</sup>, 胡剑锋<sup>1\*</sup>

(1 四川农业大学农学院/四川省作物生理生态及栽培重点实验室, 四川温江 611130; 2 云南省农业科学院  
粮食作物研究所, 云南昆明 650205)

**摘要:**【目的】研究生态条件和施氮水平及其互作对氮高效水稻品种干物质积累、物质转运和产量的影响, 为不同稻区不同施氮水平下选择适宜的水稻品种提供科学依据。【方法】本试验于 2019 年在四川省大邑县(弱光寡照)和云南省永胜县(光温充足)两个生态点进行, 以西南地区大范围种植的 10 个水稻品种为供试材料, 采用两因素裂区设计, 主区为不施氮(N0)、低氮 120 kg/hm<sup>2</sup>(N120)和高氮 180 kg/hm<sup>2</sup>(N180) 3 个施氮水平, 副区为 10 个品种。分别于拔节期、抽穗期和成熟期测定干物重, 计算不同时期干物质积累和转运量, 于收获后测定水稻产量。【结果】水稻产量和干物质生产特性为生态条件、施氮水平、品种及其互作效应共同作用的结果。大邑生态点宜香优 1108 在 N120 下的产量比 N180 提高 4.68%, 永胜点德优 4923 在 N120 施氮水平下的产量比 N180 提高 113.4 kg/hm<sup>2</sup>, 结合产量和 GGE 模型分析, 大邑生态点宜香优 1108 为低氮高效型, 晶两优 534 和 F 优 498 为高氮高效型; 永胜点德优 4923 为低氮高效型, 中优 295 和丰优香占为高氮高效型。氮高效水稻干物质积累和转运特征因生态条件和施氮量的变化而变化。大邑低氮高效型品种产量主要来自拔节前干物质的积累和抽穗前光合产物的转化, 产量优势在于足量的单位面积有效穗数, 移栽至拔节期的群体生长率与产量( $r=0.70^{**}$ )和有效穗数( $r=0.41^{*}$ )呈显著正相关; 大邑生态点高氮高效型品种抽穗至成熟期群体生长率和穗后干物质积累量对籽粒的贡献率明显高于其它品种, 产量与抽穗至成熟期群体生长率( $r=0.56^{**}$ )和穗后干物质积累量对籽粒的贡献率( $r=0.37^{*}$ )呈显著正相关关系; 永胜低氮高效型品种干物质积累特征在于拔节至抽穗期群体生长率和穗前干物质转化对籽粒的贡献率较高, 千粒重较同处理平均值提高 13.61%; 永胜高氮高效型品种具有拔节至抽穗期高群体生长率的物质生产特性, 产量优势在于较高的每穗颖花数, 该点拔节至抽穗期群体生长率与产量( $r=0.60^{**}$ )和每穗颖花数( $r=0.68^{**}$ )均呈极显著正相关关系。【结论】在大邑等弱光寡照地区, 低氮高效型品种应保证前期较高的生长速率和穗前干物质转化对籽粒的贡献率; 高氮高效型品种应保持抽穗后高群体生长率并增加穗后光合产物的积累。在永胜等光温充足地区, 拔节至抽穗期较高的群体生长率是低氮高效型和高氮高效型品种共同的物质生产特征。

**关键词:** 水稻; 生态条件; 氮肥; 干物质生产; 产量

## Dry matter accumulation and yield characteristics of high-nitrogen efficient rice cultivars under different ecological conditions

ZHU Li<sup>1</sup>, LI Gui-yong<sup>2†</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>, ZHU Shi-lin<sup>1</sup>, LI Zhen-zhen<sup>1</sup>,  
XIA Hai-xiao<sup>1</sup>, TAO You-feng<sup>1</sup>, REN Wan-jun<sup>1</sup>, HU Jian-feng<sup>1\*</sup>

(1 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Wenjiang, Sichuan 611130, China; 2 Institute of Grain Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650205, China)

**Abstract:** 【Objectives】 This study examines the dry matter accumulation, material transportation and yield of N-efficient rice cultivars in response to ecological conditions and N application levels. We aim to provide a

收稿日期: 2021-11-01 接受日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871564); 国家粮食丰产增效科技创新专项(2016YFD03005-06); 四川省育种攻关项目(2021YFYZ0005)。

联系方式: 朱莉 E-mail: 18200440160@163.com †李贵勇为共同第一作者 E-mail: liguiy980200@163.com

\* 通信作者 胡剑锋 E-mail: hjf14578860@163.com

scientific basis for selecting suitable rice cultivars in different ecological regions. **【Methods】** Field experiments were conducted in two ecological sites; one with low light (Dayi County, Sichuan Province, DYS) and the other with sufficient light and temperature (Yongsheng County, Yunnan Province, YSY). Ten rice cultivars were used as test materials. Each cultivar was subjected to three N application levels (0, 120 and 180 kg/hm<sup>2</sup>). The rice dry matter accumulation (DMA) was measured at the jointing, heading, and maturity stages. The dry matter translocation's (DMT) contribution to yield was calculated and the rice yield was evaluated at harvest. **【Results】** The ecological condition, N level, cultivar, and their interaction affected rice yield and dry matter accumulation. Cultivar Yixiangyou 1108 in DYS and Deyou 4923 in YSY recorded higher yield at N120 than at N180. According to GGE model analysis, Yixiangyou 1108 was a low-N-efficient cultivar, Jingliangyou 534 and F-you 498 were high-N-efficient cultivars in DYS. Deyou 4923 was a low-N-efficient cultivar, Zhongyou 295 and Fengyouxiangzhan were high-N-efficient cultivars in YSY. The DMA and DMT of high-N-efficient cultivars were affected by ecological conditions and N levels. In DYS, the yield of low-N-efficient cultivar was driven by DMA and DMT before jointing, depending on the number of effective panicles per unit area. Pre-jointing population growth rate (PGR) was significantly and positively correlated with yield ( $r = 0.70^{**}$ ) and effective panicle number ( $r = 0.41^{*}$ ). In DYS, high-N-efficient cultivars had ( $P < 0.05$ ) higher DMT after heading and growth rate from heading to maturity compared to other cultivars. Rice yield was positively correlated with PGR from heading to maturity ( $r = 0.56^{**}$ ) and DMT after heading ( $r = 0.37^{*}$ ). The low-N-efficient cultivar in YSY had higher PGR from jointing to heading stage, higher DMT before heading, and the 1000-grain weight was 13.61% higher than the average value in the same treatment. In YSY, high-N-efficient cultivars had high PGR from jointing to heading stage. The yield advantage correlated to the high number of spikelets per panicle. The PGR from jointing to heading had a ( $P < 0.05$ ) positive correlation with yield ( $r = 0.60^{**}$ ) and spikelet number ( $r = 0.68^{**}$ ). **【Conclusions】** In low-light areas such as DYS, low-N-efficient cultivars' high yield is dependent on rapid PGR and high DMT before the heading stage. In contrast, high-N-efficient cultivars yield depends on high PGR and dry matter accumulation after the heading stage. In areas with adequate light and temperature, such as YSY, the higher PGR from jointing to heading stage was a common feature of low and high N efficient cultivars.

**Key words:** rice; ecological conditions; nitrogen fertilizer; dry matter production; yield

氮肥的合理施用是调控水稻产量的重要措施, 其在我国水稻增产中发挥了重要作用<sup>[1-2]</sup>。然而盲目投入氮肥不仅导致稻米品质下降、环境污染等问题, 还会降低水稻的产量和氮肥吸收利用率<sup>[3-5]</sup>。目前我国氮肥利用率仅为 34%, 远低于世界平均水平 (46%)<sup>[6-7]</sup>。选育和推广种植高产且氮高效的水稻品种, 是提高氮肥利用率、减少氮肥对环境污染的有效途径。氮肥利用率一般被定义为籽粒产量与供氮量的比值, 目前普遍将籽粒产量高于相同氮处理下平均产量的品种定义为氮高效基因型<sup>[8-9]</sup>。有关氮高效水稻品种的相关特性, 前人已进行了大量研究, 从干物质积累<sup>[10-11]</sup>、光合生理<sup>[12-13]</sup>、基因组学分析<sup>[14-15]</sup>、氮素吸收利用<sup>[16-17]</sup>等方面研究了其营养元素吸收、光合物质生产、产量形成等特点。明确氮高效水稻品种达到高产的原因及其品种特性, 不仅可以为氮高效水稻品种的选育和应用提供科学依据, 还有助于稳定和提高我国粮食生产能力和效益, 保障国家粮

食安全。

水稻籽粒产量的形成实际上是干物质生产与分配的过程, 不同时期的干物质积累量和向穗部的转运量能明显影响水稻产量<sup>[18-19]</sup>。梁健等<sup>[10]</sup>认为氮高效型水稻抽穗后群体生长率和干物质积累量与产量呈正相关。然而不同生态环境下水稻产量和干物质积累特性有明显差异, 高光强地区水稻生育后期光合产物对产量的贡献比例较大且稳定, 适宜的温度和湿度有助于抽穗后干物质的积累和转运, 从而实现水稻高产<sup>[20-22]</sup>。目前有关氮高效水稻品种或不同生态条件对水稻干物质生产和产量形成影响的研究已较为深入, 然而不同氮效率品种产量形成及干物质积累特征与生态条件及施氮水平的互作相关研究还不足。因此, 本研究选取西南地区大邑 (弱光寡照) 和永胜 (光温充足) 两个典型生态稻区, 研究两个生态条件下不同氮效率品种在不同施氮量下的水稻干物质积累、转运和产量形成特性, 以期对不同生态稻

区氮高效品种的选择提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以西南地区近年来主推的籼型三系杂交稻和籼型两系杂交稻共计 10 个品种为供试材料, 具体品种来源见表 1。

1.2 试验点概况

试验于 2019 年分别在四川省成都市大邑县(30°30'30"N, 103°36'15"E)和云南省丽江市永胜县(26°43'31"N, 100°41'27"E)实施, 大邑地处四川盆地西平原区, 海拔 492 m, 属弱光寡照区; 永胜地处

高原稻区, 海拔 1554 m, 属光温充足区。水稻生育期气象资料见表 2。土壤耕层基础肥力如下: 大邑土壤有机质 32 g/kg、碱解氮 151 mg/kg、速效磷 31.3 mg/kg、速效钾 189 mg/kg、pH 为 5.79; 永胜土壤有机质 32 g/kg、碱解氮 146 mg/kg、速效磷 23.1mg/kg、速效钾 210 mg/kg、pH 为 6.74。

1.3 试验设计

各试验点均采用两因素裂区试验设计, 主区为施氮水平, 包括 N 180 kg/hm<sup>2</sup> (N180)、120 kg/hm<sup>2</sup> (N120)、0 kg/hm<sup>2</sup> (N0) 3 个处理; 副区为品种, 共 10 个品种, 每个处理 3 次重复, 共 90 个试验小区, 小区面积 10 m<sup>2</sup>。其中宽度为一个 6 行机作业标准宽度 1.8 m, 为方便机械作业, 区组间预留 2 m 转弯

表 1 供试水稻品种简介  
Table 1 Introduction of rice varieties

| 品种类型<br>Variety type                     | 品种名称<br>Variety name      | 亲本来源<br>Parental source                 | 品种缩写<br>Variety abbreviation |
|------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| 籼型两系杂交稻<br>Two-line indica hybrid rice   | 晶两优华占 Jingliangyouhuazhan | 晶 4155S×华占 Jing 4155S×Huanzhan          | 2-JLYHZ                      |
|                                          | 晶两优 534 Jingliangyou 534  | 晶 4155S×R534 Jing 4155S×R534            | 2-JLY 534                    |
| 籼型三系杂交稻<br>Three-line indica hybrid rice | 宜香优 1108 Yixiangyou 1108  | 宜香 1A×宜恢1108 Yixiang 1A×Yihui 1108      | 3-YXY 1108                   |
|                                          | 川优 6203 Chuanyou 6203     | 川 106A×成恢 3203 Chuan 106A×Chenghui 3203 | 3-CY 6203                    |
|                                          | 宜香优 2168 Yixiangyou 2168  | 宜香 1A×HR2168 Yixiang 1A×HR2168          | 3-YXY 2168                   |
|                                          | 丰优香占 Fengyouxiangzhan     | 粤丰 A×R6547 Yuefeng A×R6547              | 3-FYXZ                       |
|                                          | 中优 295 Zhongyou 295       | 中 9A×禾恢 295 Zhong 9A×Hehui 295          | 3-ZY 295                     |
|                                          | F 优 498 F you 498         | FS3A×蜀恢 498 FS3A×Shuhui 498             | 3-FY 498                     |
|                                          | 宜香优 2115 Yixiangyou 2115  | 宜香 1A×雅恢 2115 Yixiang 1A×Yahui 2115     | 3-YXY 2115                   |
|                                          | 德优 4923 Deyou 4923        | 德香 074A×R4923 Dexiang 074A×R4923        | 3-DY 4923                    |

注: 2—籼型两系杂交稻; 3—籼型三系杂交稻。  
Note: 2—Two-line indica hybrid rice; 3—Three-line indica hybrid rice.

表 2 两生态点气象因子差异  
Table 2 The meteorological factors at the two ecological sites

| 气象因子<br>Meteorological factor      | 移栽—拔节期<br>TS-JS |             | 拔节—抽穗期<br>JS-HS |             | 抽穗—成熟期<br>HS-MS |             | 全生育期<br>Whole growth period |             |
|------------------------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------------------|-------------|
|                                    | 四川大邑<br>DYS     | 云南永胜<br>YSY | 四川大邑<br>DYS     | 云南永胜<br>YSY | 四川大邑<br>DYS     | 云南永胜<br>YSY | 四川大邑<br>DYS                 | 云南永胜<br>YSY |
|                                    |                 |             |                 |             |                 |             |                             |             |
| 积温 (°C)<br>Accumulated temperature | 1145.3          | 1623.7      | 839.2           | 729.6       | 1010.6          | 994.5       | 2997.3                      | 3347.8      |
| 降雨量 (mm)<br>Rainfall               | 266.1           | 422.5       | 485.5           | 252.0       | 733.4           | 339.8       | 1487.6                      | 1014.2      |
| 日照时数 (h)<br>Sunshine hour          | 134.9           | 359.2       | 90.4            | 168.6       | 105.6           | 209.0       | 331.0                       | 736.9       |

注: 水稻生育期大邑为4月20日至9月24日, 永胜为4月5日至10月10日。  
Note: The growth period of rice in Dayi is April 20–September 24, in Yongsheng is April 5–October 10. TS—Transplanting stage; JS—Jointing stage; HS— Heading stage; MS—Maturing stage. DYS—Dayi County of Sichuan Province; YSY—Yongsheng county of Yunnan Province.

道。小区间筑土埂并用塑料薄膜包裹,以防串水串肥,其他管理措施一致。两试验点采用当地育秧方式培育机插壮秧,机插行穴距为 30 cm×20 cm,每穴 2~4 株苗。氮肥按基肥、蘖肥、穗肥比例为 4:3:3 施用;磷肥施用量均为  $P_2O_5$  75 kg/hm<sup>2</sup>,作基肥一次性施用;钾肥施用量为  $K_2O$  150 kg/hm<sup>2</sup>,分基肥和穗肥两次等量施用。其他管理措施同当地常规高产栽培大田管理。

#### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 水稻群体干物质积累与转运特性 于拔节期、抽穗期、成熟期按水稻平均茎蘖数法取样,每小区取 3 穴,去根,分解为茎、叶、穗(拔节期分为茎、叶),装袋,在 105℃ 下杀青 60 min,75℃ 下烘干至恒重并称重,计算各处理植株干物质积累与分配。

1.4.2 产量及其构成因素测定 于成熟期调查 60 穴有效穗数,各小区按平均穗数取 5 穴,考察穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素。各小区剩余植株于成熟期单打单收,去杂称重并测定水分含量,按 13.5% 的标准含水量计算实际收获产量。

##### 1.4.3 相关计算公式

$$\text{群体增长率 } [g/(m^2 \cdot d)] = (M_2 - M_1) / (T_2 - T_1)$$

式中:  $T_1$ 、 $T_2$  为取样时期;  $M_1$ 、 $M_2$  分别为  $T_1$ 、 $T_2$  时间的干物重。

穗前茎鞘干物质输出率 (%) = (抽穗期茎鞘干物重 - 成熟期茎鞘干物重) / 抽穗期茎鞘干物重 × 100

穗前茎鞘干物质转化对籽粒的贡献率 (%) = (抽穗期茎鞘干物重 - 成熟期茎鞘干物重) / 成熟期籽粒干物重 × 100

穗前叶片干物质输出率 (%) = (抽穗期叶片干物重 - 成熟期叶片干物重) / 抽穗期叶片干物重 × 100

穗前叶片干物质转化对籽粒的贡献率 (%) = (抽穗期叶片干物重 - 成熟期叶片干物重) / 成熟期籽粒干物重 × 100

穗前干物质转化对籽粒的贡献率 (%) = 穗前茎鞘干物质转化对籽粒的贡献率 + 穗前叶片干物质转化对籽粒的贡献率

穗后干物质积累量对籽粒的贡献率 (%) = (成熟期干物重 - 抽穗期干物重) / 成熟期籽粒干物重 × 100

#### 1.5 统计分析

用 Microsoft Excel 2016 整理数据。用 SPSS 27.0 系统软件分析数据,用 LSD (least significant difference test) 进行样本平均数的差异显著性比较,基于 R 语言的 R Studio 软件的 GGE BiplotGUI 软件包进行 GGE 模型分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 品种、施氮量、生态点及其互作对水稻干物质生产特性和产量的影响

由表 3 可知,杂交水稻的干物质生产特性和产量是品种、氮肥处理、生态点共同作用的结果。品种、氮肥处理、生态点的主效和三者间的互作以及品种与氮肥间的互作效应极显著影响各时期群体增长率、穗前干物质转化和穗后干物质积累量对籽粒的贡献率,品种与生态点互作效应极显著影响拔节后群体增长率、穗前干物质转化和穗后干物质积累量对籽粒的贡献率,氮肥处理和生态点互作效应则

表 3 品种、氮肥和生态点对产量和干物质生产的作用分析 ( $F$  值)

Table 3 Effect of variety, N application, and location on rice yield and dry matter production ( $F$ -value)

| 变异来源<br>Source of variation | 群体增长率 Population growth rate |                 |                 | CDMTR    | CDMAH    | 产量<br>Yield |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------|----------|-------------|
|                             | 移栽—拔节期<br>TS-JS              | 拔节—抽穗期<br>JS-HS | 抽穗—成熟期<br>HS-MS |          |          |             |
| 品种 Variety (V)              | 3.07**                       | 31.92**         | 3.85**          | 8.77**   | 4.17**   | 7.45**      |
| 氮肥处理 N treatment (N)        | 61.04**                      | 38.76**         | 71.20**         | 21.32**  | 99.69**  | 208.02**    |
| 生态点 Location (L)            | 600.97**                     | 9144.08**       | 568.64**        | 993.66** | 917.97** | 180.02**    |
| V×N                         | 2.44**                       | 8.87**          | 2.84**          | 3.86**   | 3.30**   | 0.99        |
| V×L                         | 1.22                         | 35.83**         | 4.40**          | 3.45**   | 4.43**   | 2.71**      |
| N×L                         | 22.08**                      | 16.18**         | 1.11            | 6.82**   | 0.59     | 5.36**      |
| V×N×L                       | 2.51**                       | 8.29**          | 3.10**          | 7.51**   | 3.58**   | 1.18        |

注: CDMTR—穗前干物质转化对籽粒的贡献率; CDMAH—穗后干物质积累量对籽粒的贡献率; \*\*— $P < 0.01$ 。

Note: TS—Transplanting stage; JS—Jointing stage; HS—Heading stage; MS—Maturing stage; CDMTR—Contribution of dry matter transformation before heading for grain; CDMAH—Contribution of dry matter accumulation after heading for grain. \*\*— $P < 0.01$ .

主要影响抽穗前群体生长率和穗前干物质转化对籽粒的贡献率。此外, 产量受到品种、氮肥处理、生态点的主效和品种与生态点、氮肥处理与生态点互作效应的极显著影响。

## 2.2 生态条件和氮肥处理对水稻产量的影响

两个生态条件下, 不同品种和氮肥处理的产量及其构成因素均有较大差异 (表 4)。在各氮肥处理下永胜的单位面积有效穗数比大邑提高 17.10%~23.47%, 从而产量较大邑提高 12.28%~18.40%。氮肥主要通过增加单位面积有效穗数和每穗颖花数来显著提高产量, N120 和 N180 处理的有效穗数比 N0 提高 16.98%~23.55%, 颖花数比 N0 提高 12.78%~17.15%。不同品种间产量差异显著, 且在两生态点不同氮肥处理下品种间差异有所不同。大邑生态点, N120 处理下以宜香优 1108 和 F 优 498 产量最高, 宜香优 1108 产量优势在于其有效穗数和千粒重较高, 而 F 优 498 则归因于其每穗颖花数和结实率高; N180 处理下 F 优 498 产量最高, 该品种产量优势在于每穗颖花数和结实率较高, 分别比同处理平均值高出 10.27% 和 9.96%; 10 个品种中宜香优 1108 和川优 6203 在 N120 处理下的产量比 N180 处理下分别提高 4.68% 和 7.02%, 而其余品种的产量则随施氮量的增加而增加。永胜生态点, N120 处理下以中优 295 和德优 4923 产量最高, 其中中优 295 的每穗颖花数最高, 德优 4923 籽粒灌浆充实, 千粒重较同处理平均值高 13.61%; N180 处理下中优 295 和丰优香占产量最高, 两个品种的产量优势均在于每穗颖花数较高, 分别比同处理其他品种平均值提高了 22.84% 和 18.33%; 10 个品种中川优 6203、宜香优 2115 和德优 4923 在 N120 下的产量比 N180 处理分别高了 142.95、360.05 和 113.37 kg/hm<sup>2</sup>, 其它品种产量则随施氮量增加而增加。

整体来看, 不同生态条件和氮肥处理下 10 个品种间产量差异显著, 而同一生长条件下产量随品种的改变而变化。因此将生态点和两个施氮处理作为环境, 产量作为一个因素进行 GGE 模型分析 (图 1)。由图 1 可知, 大邑的两个氮处理被分为一组, 品种宜香优 1108、晶两优 534 和 F 优 498 适合在该环境下生长, 其中 F 优 498 在该环境中最高产; 永胜的两个氮肥处理被分为一组, 品种丰优香占、中优 295 和德优 4923 适合在该环境下生长, 其中中优 295 在该环境下产量最高, 这与表 4 的分析结果一致。而在本试验中, 结合表 4 和图 1 可知, 大邑生态点宜香优 1108 低氮处理产量更高, 晶两优 534

和 F 优 498 高氮下产量最高; 永胜德优 4923 则以低氮下产量更高, 丰优香占和中优 295 高氮处理下产量最高。因此, 在大邑生态点宜香优 1108 定义为低氮高效型, 晶两优 534 和 F 优 498 定义为高氮高效型; 在永胜生态点德优 4923 为低氮高效型, 丰优香占、中优 295 为高氮高效型。

## 2.3 氮肥处理对不同水稻品种各生育阶段干物质积累的影响

两个生态条件下, 不同氮肥处理和品种的干物质积累特性均有明显差异 (图 2)。从不同生态点的干物质积累量来看, 拔节期和抽穗期均以大邑更高, 而成熟期永胜比大邑高 22.12%~28.91%。各时期干物质积累量均随施氮量的增加而增加, 且 N0 处理与其余两处理间差异明显。不同品种间干物质积累量亦差异显著, 且两生态点间规律不同。大邑生态点 N120 处理下抽穗期和成熟期均以低氮高效型品种的干物质积累量最高, 抽穗期 N180 处理下高氮高效型品种则偏低; 永胜点 N120 处理拔节期低氮高效型干物质积累量最低, N180 处理下抽穗和成熟期则以高氮高效型偏高。就群体生长率而言, 移栽至拔节期大邑的群体生长率平均值是永胜的 1.6~2.1 倍, 抽穗至成熟阶段则以永胜更高。不同施氮处理间移栽至拔节期和拔节至抽穗期的群体生长率均是随施氮量增加而增加, 抽穗至成熟期则以 N120 处理的群体生长率 (PGR) 最高。不同氮效率品种间各生育时期群体生长率差异显著, 大邑点 N120 处理下移栽至拔节期低氮高效型 PGR 比同处理平均值高 14.73%, 在 N180 处理下抽穗前高氮高效型品种的 PGR 均偏低, 而抽穗至成熟期该类型品种的 PGR 则明显高于其它品种。永胜生态点, N120 处理移栽至拔节期以低氮高效型最低, 而拔节至抽穗期该类型品种的群体生长率比同处理平均值高 12.04%, 拔节至抽穗期 N180 处理下以高氮高效型品种 PGR 最大。

## 2.4 氮肥处理对不同水稻品种中后期不同部位干物重的影响

图 3 表明, 在水稻生育中、后期, 两生态点间干物质在不同部位的分配有明显差异。抽穗期大邑叶片的干物重明显高于永胜, 成熟期两生态点间叶片干物重则无显著差异, 而成熟期茎鞘和穗部的干物重以永胜更高。氮肥处理间比较发现, 除成熟期穗部干物重以 N120 处理的最高外, 其余时期的茎、叶、穗干物重均随施氮量的增加而增加。从供试品种间差异来看, 大邑生态点 N120 处理下低氮高效型品种在抽穗期茎鞘、叶片干物重和成熟期茎鞘干物

表 4 两个生态点不同氮肥用量下 10 个品种水稻产量及产量构成因素  
Table 4 Yield and yield components of ten rice varieties under different N application rates in the Dayi and Yongsheng sites

| 施氮量<br>N application<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 品种<br>Variety | 有效穗数 (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )<br>Effective panicle number |                 | 每穗颖花数<br>Spikelet number per panicle |                 | 结实率 (%)<br>Seed-setting rate |                 | 千粒重 (g)<br>1000-grain weight |                 | 产量 (t/hm <sup>2</sup> )<br>Yield |                 |
|-----------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
|                                               |               | 大邑<br>Dayi                                                            | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                           | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                   | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                   | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                       | 永胜<br>Yongsheng |
|                                               |               | Dayi                                                                  | Yongsheng       | Dayi                                 | Yongsheng       | Dayi                         | Yongsheng       | Dayi                         | Yongsheng       | Dayi                             | Yongsheng       |
| 0                                             | 2-JLYHZ       | 213.7 a                                                               | 262.7 a         | 177.1 ab                             | 152.2 d         | 88.90 cd                     | 94.68 bcd       | 22.24 f                      | 21.02 f         | 6.875 bc                         | 7.934 bc        |
|                                               | 3-YXY 1108    | 173.1 d                                                               | 204.6 cd        | 149.7 c                              | 157.5 c         | 85.49 de                     | 98.30 a         | 30.40 cd                     | 27.93 d         | 7.391 abc                        | 8.812 a         |
|                                               | 2-JLY 534     | 187.0 bc                                                              | 246.2 ab        | 172.1 b                              | 146.8 e         | 89.31 cd                     | 96.06 ab        | 22.57 f                      | 23.07 e         | 7.003 bc                         | 7.990 bc        |
|                                               | 3-CY 6203     | 178.4 cd                                                              | 201.9 cd        | 142.3 cd                             | 140.8 f         | 90.12 bc                     | 95.05 bcd       | 30.90 c                      | 29.19 c         | 7.223 abc                        | 7.849 bcd       |
|                                               | 3-YXY 2168    | 194.9 b                                                               | 193.8 cd        | 118.3 e                              | 145.5 e         | 87.78 cd                     | 91.46 e         | 33.19 b                      | 28.84 c         | 6.633 c                          | 7.365 d         |
|                                               | 3-FYXZ        | 139.4 g                                                               | 175.1 cd        | 196.7 a                              | 183.2 a         | 89.86 bc                     | 93.40 cde       | 29.60 d                      | 28.22 d         | 6.921 bc                         | 8.400 ab        |
|                                               | 3-ZY 295      | 157.8 ef                                                              | 178.2 cd        | 176.1 ab                             | 170.5 b         | 83.61 ef                     | 94.01 bcd       | 28.09 e                      | 27.83 d         | 7.640 ab                         | 7.860 bcd       |
|                                               | 3-FY 498      | 154.8 f                                                               | 168.6 d         | 176.0 ab                             | 171.4 b         | 95.43 a                      | 96.04 ab        | 29.39 d                      | 28.26 d         | 7.868 a                          | 7.815 cd        |
|                                               | 3-YXY 2115    | 168.5 de                                                              | 213.2 bc        | 123.7 de                             | 119.2 g         | 93.30 ab                     | 95.93 abc       | 35.93 a                      | 33.16 a         | 7.068 abc                        | 8.019 bc        |
|                                               | 3-DY 4923     | 169.1 de                                                              | 189.5 cd        | 157.4 bc                             | 159.0 c         | 81.58 f                      | 92.54 de        | 32.59 b                      | 31.71 b         | 7.388 abc                        | 8.809 a         |
| 120                                           | 平均 Mean       | 173.7 B                                                               | 203.4 B         | 158.9 A                              | 154.5 B         | 88.54 A                      | 94.75 A         | 29.49 A                      | 27.92 A         | 7.201 B                          | 8.085 B         |
|                                               | 2-JLYHZ       | 234.7 a                                                               | 331.7 a         | 184.3 cd                             | 169.7 c         | 85.12 cd                     | 90.52 a         | 23.27 e                      | 20.95 g         | 9.046 ab                         | 10.326 abcd     |
|                                               | 3-YXY 1108    | 218.5 ab                                                              | 261.6 bc        | 157.7 ef                             | 172.1 bc        | 88.64 abc                    | 88.62 abc       | 31.72 b                      | 27.87 e         | 9.771 a                          | 10.797 abcd     |
|                                               | 2-JLY 534     | 225.6 ab                                                              | 298.2 ab        | 225.5 a                              | 173.2 b         | 83.66 d                      | 89.93 ab        | 22.27 e                      | 23.02 f         | 9.219 ab                         | 10.371 abcd     |
|                                               | 3-CY 6203     | 213.2 abc                                                             | 228.8 cd        | 155.6 f                              | 163.8 d         | 91.46 a                      | 91.74 a         | 30.73 bc                     | 29.12 c         | 8.723 abc                        | 9.665 d         |
|                                               | 3-YXY 2168    | 221.7 ab                                                              | 256.8 bcd       | 130.1 g                              | 157.4 e         | 88.99 abc                    | 86.73 bc        | 32.48 b                      | 28.77cd         | 7.783c                           | 9.755 cd        |
|                                               | 3-FYXZ        | 178.1 de                                                              | 208.1 d         | 204.5 abc                            | 209.2 a         | 88.76 abc                    | 91.30 a         | 28.70 d                      | 28.15 de        | 8.489 bc                         | 10.825 abcd     |
|                                               | 3-ZY 295      | 172.4 e                                                               | 229.7 cd        | 212.4 ab                             | 210.0 a         | 86.25 bcd                    | 86.50 c         | 28.32 d                      | 27.76 e         | 8.739 abc                        | 11.304 a        |
|                                               | 3-FY 498      | 175.9 de                                                              | 207.6 d         | 196.8 bcd                            | 209.3 a         | 92.10 a                      | 91.81 a         | 29.12 cd                     | 28.13 de        | 9.628 ab                         | 10.882 abc      |
|                                               | 3-YXY 2115    | 190.0 cde                                                             | 237.2 cd        | 151.5 f                              | 144.2 f         | 90.45 ab                     | 91.61 a         | 34.27 a                      | 33.09 a         | 8.799 abc                        | 10.044 bcd      |
|                                               | 3-DY 4923     | 201.4 bcd                                                             | 249.3 bcd       | 177.5 de                             | 160.8 d         | 74.65 e                      | 89.14 abc       | 31.90 b                      | 31.64 b         | 8.487 bc                         | 11.035 ab       |
|                                               | 平均 Mean       | 203.2 A                                                               | 250.9 A         | 179.6 A                              | 177.0 A         | 87.01 A                      | 89.79 B         | 29.28 A                      | 27.85 A         | 8.868 A                          | 10.500 A        |

续表 4 Table 4 continued

| 施氮量<br>N application<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 品种<br>Variety | 有效穗数 (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )<br>Effective panicle number |                 | 每穗颖花数<br>Spikelet number per panicle |                 | 结实率 (%)<br>Seed-setting rate |                 | 千粒重 (g)<br>1000-grain weight |                 | 产量 (t/hm <sup>2</sup> )<br>Yield |                 |
|-----------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
|                                               |               | 大邑<br>Dayi                                                            | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                           | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                   | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                   | 永胜<br>Yongsheng | 大邑<br>Dayi                       | 永胜<br>Yongsheng |
|                                               |               |                                                                       |                 |                                      |                 |                              |                 |                              |                 |                                  |                 |
| 180                                           | 2-JLYHZ       | 240.8 a                                                               | 352.7 a         | 183.2 cd                             | 170.2 e         | 83.35 cd                     | 82.93 c         | 23.40 f                      | 20.82 g         | 9.315 ab                         | 10.326 b        |
|                                               | 3-YXY 1108    | 197.4 bc                                                              | 260.1 bc        | 166.5 de                             | 175.5 d         | 86.78 bc                     | 85.99 bc        | 31.68 c                      | 27.73 e         | 9.334 ab                         | 10.836 ab       |
|                                               | 2-JLY 534     | 235.8 a                                                               | 301.7 b         | 192.7 bc                             | 180.2 c         | 79.35 de                     | 86.09 b         | 22.08 g                      | 22.87 f         | 9.544 ab                         | 10.641 ab       |
|                                               | 3-CY 6203     | 196.5 bc                                                              | 224.6 cd        | 156.5 ef                             | 162.1 f         | 84.16 bcd                    | 90.87 a         | 29.42 d                      | 28.99 c         | 8.151 b                          | 9.522 b         |
|                                               | 3-YXY 2168    | 225.8 a                                                               | 258.9 bc        | 128.6 g                              | 158.1 g         | 87.28 bc                     | 85.52 bc        | 32.90 b                      | 28.64 cd        | 8.068 b                          | 9.992 b         |
|                                               | 3-FYXZ        | 185.3 c                                                               | 209.5 d         | 244.7 a                              | 214.2 b         | 85.48 bc                     | 89.16 a         | 27.97 e                      | 28.09 de        | 9.099 ab                         | 11.215 ab       |
|                                               | 3-ZY 295      | 171.7 c                                                               | 236.6 cd        | 215.0 b                              | 222.4 a         | 87.88 bc                     | 85.82 bc        | 28.32 e                      | 27.63 e         | 9.083 b                          | 12.385 a        |
|                                               | 3-FY 498      | 180.6 c                                                               | 204.6 d         | 197.6 bc                             | 216.3b          | 93.76 a                      | 90.45 a         | 30.47 d                      | 28.06 de        | 10.27 a                          | 11.162 ab       |
|                                               | 3-YXY 2115    | 196.5 bc                                                              | 221.4 cd        | 134.1 fg                             | 148.2 h         | 89.30 ab                     | 90.14 a         | 35.69 a                      | 32.94 a         | 9.809 a                          | 9.684 b         |
|                                               | 3-DY 4923     | 216.8 ab                                                              | 243.3 cd        | 173.5 cde                            | 163.1 f         | 75.40 e                      | 88.08 ab        | 33.01 b                      | 31.52 b         | 8.900 ab                         | 10.922 ab       |
|                                               | 平均 Mean       | 204.7 A                                                               | 251.3 A         | 179.2 A                              | 181.0 A         | 85.27 A                      | 87.51 C         | 29.50 A                      | 27.73 A         | 9.158 A                          | 10.668 A        |

注: 同列数据后不同小写字母表示同一氮肥处理下品种间在5%水平差异显著, 不同大写字母表示氮肥处理间在5%水平差异显著。  
Note: Values followed by different small letters indicate significant difference among varieties under the same N rate ( $P<0.05$ ), and different capital letters indicate significant difference among N treatments ( $P<0.05$ ).

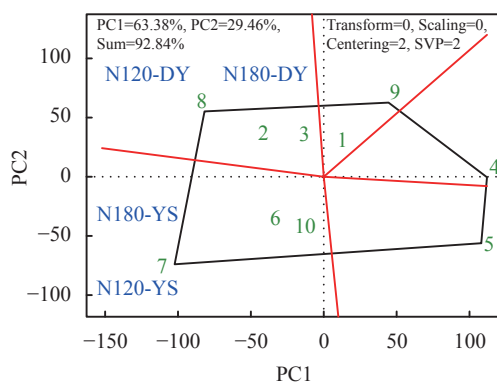


图1 GGE 双标图分析品种在不同环境下的适应性

Fig. 1 Adaptability of varieties in different environments based on GGE biplot

注：此图是基于环境-中心化的 (Centering = 2)、未定标的 (Scaling = 0) 的品种-环境双向表。采用聚焦环境的特征值分配方法 (SVP = 2)。图中数字 1~10 分别代表品种晶两优华占、宜香优 1108、晶两优 534、川优 6203、宜香优 2168、丰优香占、中优 295、F 优 498、宜香优 2115、德优 4923；N120、N180 分别表示施氮量 120、180 kg/hm<sup>2</sup>。

Note: The biplot is based on environment-centered (Centering = 2) and un-scaled data (Scaling = 0), using environment-focused singular value partitioning (SVP = 2) method. The digital 1–10 in the figure represent variety of 2-JLYHZ, 3-YXY 1108, 2-JLY 534, 3-CY 6203, 3-YXY 2168, 3-FYXZ, 3-ZY 295, 3-FY 498, 3-YXY 2115, 3-DY 4923, respectively. N120 and N180 are the nitrogen application rates of 120 and 180 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

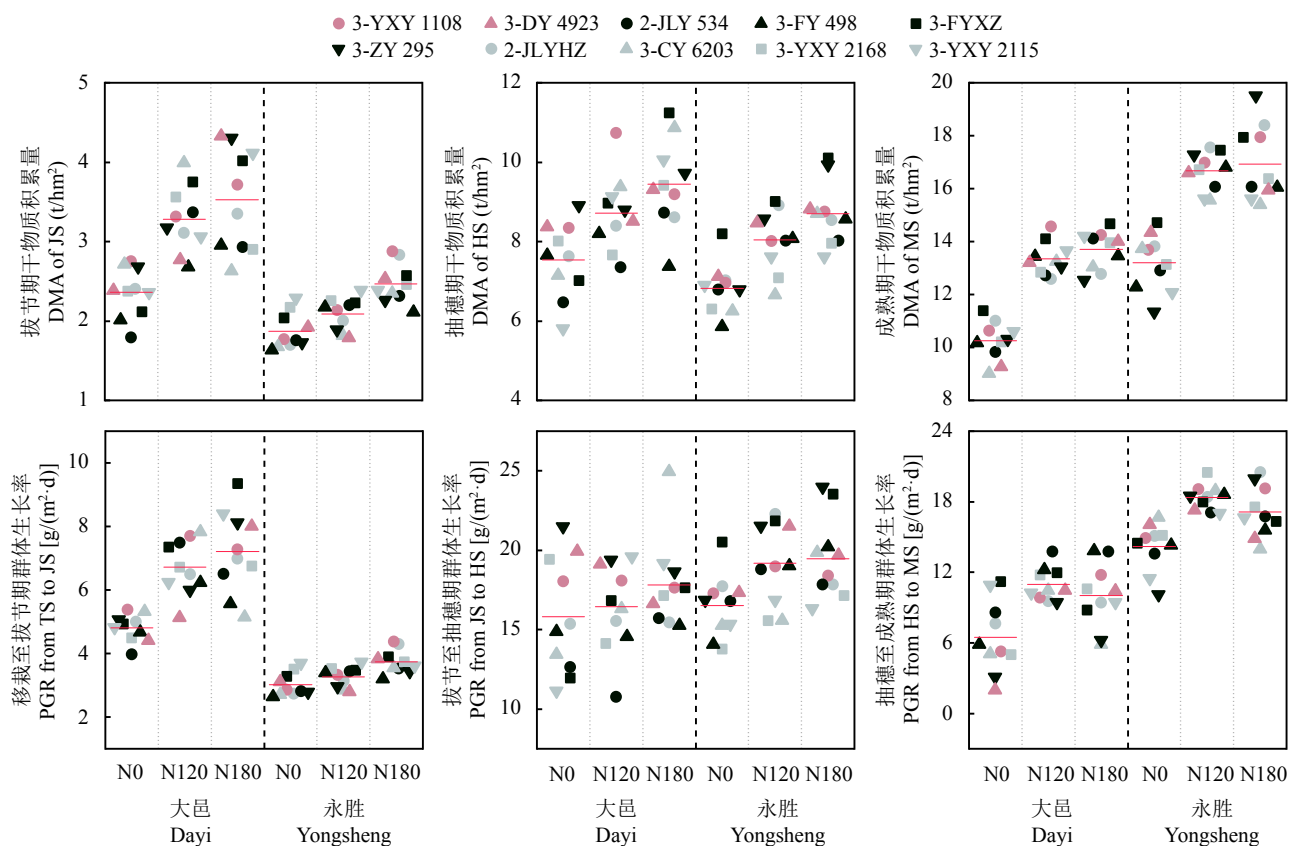


图2 不同施氮量下水稻品种各生育阶段干物质积累量

Fig. 2 Dry matter accumulation of rice varieties across the growth stages under different nitrogen application rates

注：红色图标为低氮高效型，黑色图标为高氮高效型，灰色图标表示其它品种；红色横线为各处理平均值；DMA—干物质积累量，PGR—群体生长率；TS—移栽期；JS—拔节期；HS—抽穗期；MS—成熟期；N0、N120、N180 表示施氮量分别为 0、120、180 kg/hm<sup>2</sup>。

Note: Red icons are low-N-efficient cultivars, and black icons are high-N-efficient cultivars, and gray icons are the left cultivars. The red horizontal line is the average value of each treatment. DMA—Dry matter accumulation; PGR—Population growth rate. TS—Transplanting stage; JS—Jointing stage; HS—Heading stage; MS—Maturing stage. N0, N120, and N180 indicate N application rates of 0, 120 and 180 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

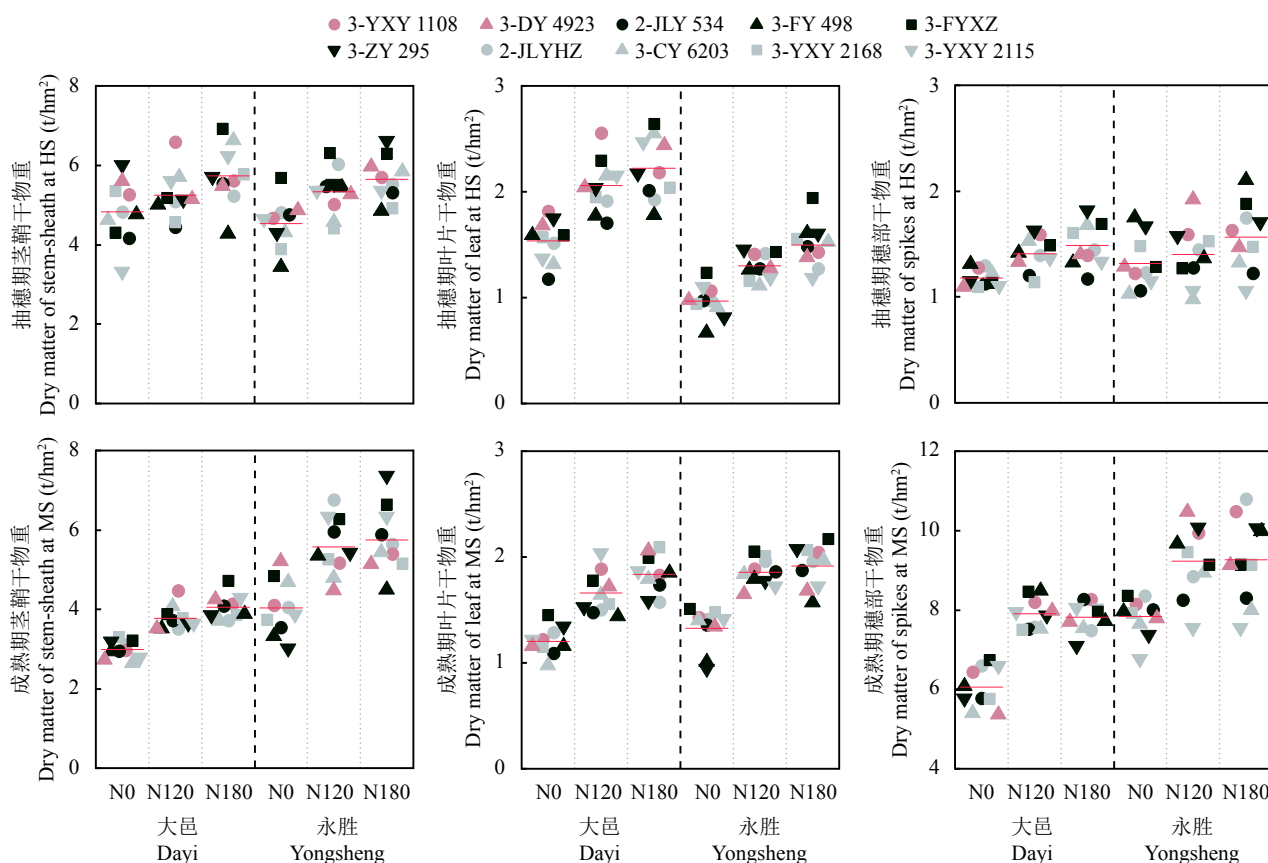


图 3 不同施氮量下各水稻品种抽穗期和成熟期茎鞘、叶片和穗的干物重

Fig. 3 Dry matter weights of stem-sheath, leaf and panicle of various rice varieties at the heading and maturing stages under different nitrogen application rates

注: 红色图标为低氮高效型, 黑色图标为高氮高效型, 灰色图标表示其它品种; 红色横线为各处理平均值; HS—抽穗期, MS—成熟期; N0、N120、N180 表示施氮量分别为 0、120、180 kg/hm<sup>2</sup>。

Note: Red icons are low-N-efficient cultivars, and black icons are high-N-efficient cultivars, and gray icons are the left varieties. The red horizontal line is the average value of each treatment. HS—Heading stage; MS—Maturing stage. N0, N120, and N180 indicate N application rates of 0, 120 and 180 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

重均高于同处理其它品种, N180 处理下高氮高效型品种抽穗期穗部干物重明显偏低。永胜点 N120 处理下抽穗期和成熟期穗部干物重均以低氮高效型品种最高, 分别比同处理其他品种的平均值高 37.14% 和 13.38%, N180 处理下高氮高效型中后期茎鞘干物重则远高于其他品种。

## 2.5 氮肥处理对不同水稻品种后期干物质输出转化的影响

抽穗前茎鞘和叶片积累的光合产物向穗部的转运特性及抽穗后穗部物质的积累直接影响水稻产量。由图 4 可知, 两生态点间物质积累与转化特性有较大差异, 穗前茎鞘和叶片的干物质输出率与穗前茎鞘和叶片干物质转化对籽粒的贡献率均是大邑高于永胜, 而永胜的穗后干物质积累量对籽粒的贡献率比大邑高出 61.91%~87.72%, 表明大邑生态点

成熟期穗部物质主要源于抽穗前茎鞘和叶片积累的干物质的转化, 而永胜生态点主要来自抽穗后光合产物的积累。从氮肥处理来看, 两生态点 N0 处理的穗前茎鞘干物质输出率、穗前茎鞘干物质转化对籽粒的贡献率和穗前干物质转化对籽粒的贡献率均高出两施氮处理 28% 以上。两施氮处理间, 除 N180 处理下大邑生态点穗前叶片干物质输出率与穗前叶片干物质转化对籽粒的贡献率以及大邑和永胜的穗后干物质积累量对籽粒的贡献率低于 N120 外, 其余指标均是 N180 高于 N120。不同品种间比较发现, 大邑 N120 处理下低氮高效型品种的穗前茎鞘和叶片干物质转化对籽粒的贡献率以及穗前干物质转化对籽粒的贡献率均最高, 其穗后干物质积累量对籽粒的贡献率则明显低于其他品种; N180 处理下, 高氮高效型品种穗前茎鞘、叶片的干物质输出率与干物

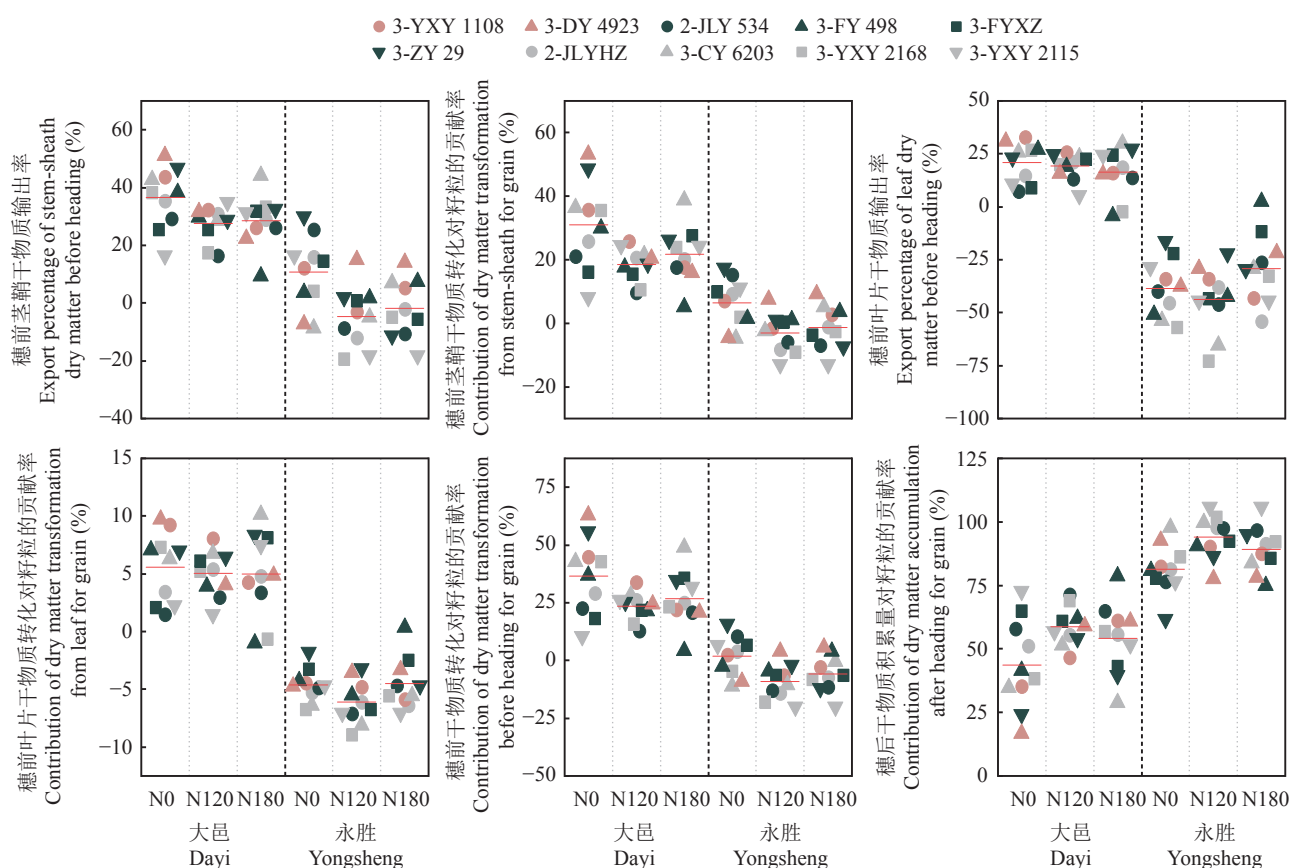


图 4 不同氮肥处理下各水稻品种穗前干物质运转率与穗后干物质积累量

Fig. 4 Dry matter translocation before the heading stage and accumulation after the heading stage of rice varieties under different nitrogen rates

注：红色图标为低氮高效型，黑色图标为高氮高效型，灰色图标表示其它品种；红色横线为各处理平均值；N0、N120、N180 表示施氮量分别为 0、120、180 kg/hm<sup>2</sup>。

Note: Red icons are low-N-efficient cultivars, and black icons are high-N-efficient cultivars, and gray icons are the left varieties. The red horizontal line is the average value of each treatment. N0, N120 and N180 indicate nitrogen application rates of 0, 120 and 180 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

质转化对籽粒的贡献率以及穗前干物质转化对籽粒的贡献率均偏低，而穗后干物质积累量对籽粒的贡献率则最高，分别为 78.30% 和 64.88%。永胜生态点 N120 处理下低氮高效型品种的穗前茎鞘干物质输出率与穗前茎鞘干物质转化对籽粒的贡献率、穗前干物质转化对籽粒的贡献率均为最高，而该品种穗后干物质积累量对籽粒的贡献率则低于其他品种。

## 2.6 产量及产量构成因素与物质生产的相关性分析

从表 5 可以看出，两生态点的物质生产和产量及产量构成因素间的相关性不尽相同。大邑点产量与移栽至拔节期和抽穗至成熟期群体生长率、穗后干物质积累量对籽粒的贡献率呈极显著或显著正相关，而与穗前干物质转化对籽粒的贡献率呈显著负相关。对产量构成因素而言，仅有效穗数与移栽至拔节期和抽穗至成熟期 PGR 呈显著正相关。永胜点产

量与各时期群体生长率呈显著或极显著正相关，与穗前干物质转化对籽粒的贡献率呈负相关，与穗后干物质积累量对籽粒的贡献率呈正相关，但未达显著水平。有效穗数与移栽至拔节和抽穗至成熟期 PGR、穗后干物质积累量对籽粒的贡献率呈显著正相关，每穗颖花数与拔节至抽穗和抽穗至成熟期 PGR 呈显著正相关，结实率与移栽至拔节和抽穗至成熟期群体生长率、穗后干物质积累量对籽粒的贡献率呈极显著或显著负相关，与穗前干物质转化对籽粒的贡献率呈显著正相关。综合来看，两个生态点的产量和有效穗数均与移栽至拔节和抽穗至成熟期的群体生长率、穗后干物质积累量对籽粒的贡献率呈正相关关系，与穗前干物质转化对籽粒的贡献率呈负相关，永胜点产量和每穗颖花数还与拔节至抽穗期 PGR 呈极显著正相关。

表 5 品种、氮肥和生态点与产量和干物质生产的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between variety, N application, yield, yield components and dry matter production at different ecological sites

| 项目<br>Item              | 群体生长率 Population growth rate (PGR) |         |          | CDMTR   | CDMAH   |
|-------------------------|------------------------------------|---------|----------|---------|---------|
|                         | 移栽—拔节期                             | 拔节—抽穗期  | 抽穗—成熟期   |         |         |
|                         | TS-JS                              | JS-HS   | HS-MS    |         |         |
| 大邑 Dayi                 |                                    |         |          |         |         |
| 产量 Yield                | 0.700**                            | 0.111   | 0.555**  | -0.366* | 0.365*  |
| 有效穗数 Effective panicle  | 0.414*                             | -0.058  | 0.400*   | -0.287  | 0.305   |
| 每穗颖花数 Spikelets per ear | 0.334                              | -0.126  | 0.270    | -0.210  | 0.173   |
| 结实率 Seed-setting rate   | -0.132                             | -0.339  | 0.060    | -0.184  | 0.146   |
| 千粒重 1000-grain weight   | 0.034                              | 0.277   | -0.117   | 0.108   | -0.090  |
| 永胜 Yongsheng            |                                    |         |          |         |         |
| 产量 Yield                | 0.447*                             | 0.596** | 0.659**  | -0.329  | 0.303   |
| 有效穗数 Effective panicle  | 0.387*                             | 0.094   | 0.531**  | -0.352  | 0.383*  |
| 每穗颖花数 Spikelets per ear | 0.101                              | 0.680** | 0.366*   | -0.012  | -0.048  |
| 结实率 Seed-setting rate   | -0.653**                           | -0.206  | -0.691** | 0.410*  | -0.362* |
| 千粒重 1000-grain weight   | 0.066                              | -0.186  | -0.195   | -0.037  | 0.014   |

注: CDMTR—穗前干物质转化对籽粒的贡献率; CDMAH—穗后干物质积累量对籽粒的贡献率。\*— $P<0.05$ ; \*\*— $P<0.01$ 。

Note: TS—Transplanting stage; JS—Jointing stage; HS—Heading stage; MS—Maturing stage; CDMTR—Contribution of dry matter transformation before heading for grain; CDMAH—Contribution of dry matter accumulation after heading for grain. \*— $P<0.05$ ; \*\*— $P<0.01$ .

3 讨论

3.1 氮高效品种的干物质生产和产量形成特征

关于如何提高水稻对氮素的吸收与利用来有效增产并减少氮肥施用, 目前已有大量的研究<sup>[23-24]</sup>, 对于水稻干物质生产与高产的协同机制, 前人也有较多阐述<sup>[10, 25-26]</sup>。梁健等<sup>[10]</sup>和李敏等<sup>[25]</sup>研究认为, 抽穗前适当控制群体生长, 抽穗后保持较高的群体生长水平及较高的收获指数和干物质积累量, 是氮高效型品种达到高产的重要物质生产特性。也有研究者认为水稻产量与抽穗前干物质转运量呈显著正相关, 或决定于抽穗至成熟阶段的光合生产能力<sup>[27]</sup>。本研究结果显示, 大邑点低氮高效型品种移栽至拔节期群体生长率和穗前干物质转化对籽粒的贡献率较高, 结合产量构成因素(表 4)分析, 该类型品种产量优势在于较高的有效穗数, 相关分析(表 5)表明移栽至拔节期的 PGR 与产量( $r = 0.70^{**}$ )和有效穗数( $r = 0.41^{*}$ )呈显著正相关关系。因此, 在大邑等“弱光寡照”地区低氮肥条件下, 保证水稻前期的生长速度是提高单位面积有效穗数、实现水稻高产的主要途径。本研究中大邑点高氮高效型品种抽穗后群体生长率和穗后干物质积累量对籽粒的贡献率明显

高于其它品种, 而水稻抽穗后干物质积累速率直接影响抽穗后群体生长率和籽粒灌浆情况<sup>[18]</sup>。相关分析结果显示, 抽穗至成熟期 PGR 与产量( $r = 0.56^{**}$ )呈极显著正相关, 穗后干物质积累量对籽粒的贡献率与产量( $r = 0.37^{*}$ )呈显著正相关关系。缪小建等<sup>[28]</sup>认为, 大穗型品种齐穗期茎鞘和叶片非结构性碳水化合物积累较少, 且在主要输出期的转运量低, 生长后期出现非结构性碳水化合物再积累现象, 而本研究中高氮高效型品种产量优势在于每穗颖花数较高, 这表明在弱光寡照地区高氮肥处理下, 应在保证足量群体颖花数的情况下提高抽穗后水稻干物质生长速率和穗部光合产物的积累, 以确保较高的结实率和千粒重, 提高库容量进而增加产量。永胜生态点低氮高效型品种具有拔节至抽穗期 PGR 高和穗前光合产物转化率高的物质生产特性, 同时千粒重较同处理平均值高 13.61%。前人研究认为光照较强的地区实现高产的关键是足穗大穗<sup>[29]</sup>, 因此在永胜等“光照充足、湿度较小”的生态环境和低氮肥处理下, 应提高水稻在拔节期至抽穗期间的干物质积累速率, 并在保证足够单位面积有效穗数的情况下, 促进籽粒充实灌浆, 从而有效提高水稻产量。前人研究结果显示, 增施氮肥能提高水稻各时期干物质

积累速率, 并提高穗粒数进而促进产量的增加<sup>[30]</sup>。本研究中, 永胜点高氮高效型品种在高氮肥处理下拔节至抽穗期的群体生长率较高, 且每穗颖花数较大, 相关分析也显示该点拔节至抽穗期 PGR 与产量 ( $r=0.60^{**}$ ) 和每穗颖花数 ( $r=0.68^{**}$ ) 呈极显著正相关。表明在永胜等光温充足的地区, 高氮肥处理下应提高水稻拔节至抽穗期的干物质积累速率, 以促进抽穗后光合产物在籽粒中的积累, 确保较高的群体颖花量, 从而增加产量。

### 3.2 不同氮效率品种对施氮量和生态条件的响应

水稻干物质的生产特性是光合产物在植株不同器官中积累与分配的结果, 而基因型、栽培措施、生态条件及其互作效应对水稻干物质生产特性存在极显著的影响<sup>[20,31]</sup>。本研究结果显示, N0 处理的穗前茎鞘干物质输出率、穗前茎鞘干物质转化对籽粒的贡献率和穗前干物质转化对籽粒的贡献率均高出两施氮处理 28% 以上 (图 4), 而缪小建等<sup>[32]</sup>、陈丽楠等<sup>[33]</sup>研究指出氮素穗肥的施用显著降低抽穗后茎鞘非结构性碳水化合物的转运量和转化率, 本试验中低氮高效型呈现穗前干物质转化对籽粒的贡献率高, 高氮高效型呈现穗后干物质积累量对籽粒的贡献率高的特征, 说明氮高效品种在低氮处理下能更多的将茎鞘和叶片中储存的非结构性碳水化合物转运到籽粒中, 而氮高效型品种在高氮肥处理下能有效利用穗肥, 延缓叶片衰老, 提高穗后冠层光合能力, 更利于穗后物质的生产与转运<sup>[34]</sup>。

有关生态环境对水稻干物质生产的影响, 虽有多报道<sup>[23,35-36]</sup>但结论不一。王勋等<sup>[35]</sup>研究认为光照充足、昼夜温差大的生态环境能提高水稻抽穗后干物质积累量及全生育期生长速度。徐春梅等<sup>[22]</sup>报道, 不同生态条件对水稻干物质生产的影响因品种而异, 温光条件好的地区提高籼稻品种齐穗前群体生长率, 提高杂交粳稻齐穗后群体生长率。在本研究中, 各类氮高效品种群体生长率特性在不同生态点表现不同, 永胜氮高效品种拔节至抽穗期 PGR 高, 结合气象因子分析结果 (表 2), 永胜点拔节至抽穗期降雨量低于大邑, 日照时数较大邑更高, 且拔节至抽穗期 PGR 与该时期降雨量呈显著负相关 ( $r=0.66^{*}$ ), 因此水稻生长中期低降雨量有利于干物质的生产和积累, 保证群体生物量的快速提高。大邑生态点低氮高效型品种和高氮高效型品种干物质积累特征分别为拔节前 PGR 高和抽穗后 PGR 高, 气象因子显示这两个时期大邑的日照时数均低于永胜点 49% 以上,

而黄丽芬等<sup>[37]</sup>的光氮互作对水稻干物质积累影响试验结果表明, 拔节期和成熟期遮光均能最大限度地增加水稻地上部干物质积累量, 但都是在高氮处理下, 这与本试验结果有所不同, 分析其原因可能是由于气象因子、氮肥处理以及品种间互作效应导致。对于氮肥、气象因子与品种间互作对水稻干物质积累的影响和反应机理等问题, 尚需今后进一步深入研究。

## 4 结论

不同生态条件下低氮高效型和高氮高效型品种实现高产的途径不同。大邑等弱光寡照地区, 对于低氮高效型品种应保证水稻前期的生长速度, 提高抽穗前茎鞘和叶片干物质的转运率, 以增加单位面积有效穗数实现高产; 对于高氮高效型品种, 应在抽穗前适当控制群体生长, 抽穗后保持较高的群体生长率并提高穗后光合产物的积累, 保证足够的每穗颖花数以提高产量。在永胜等光温充足的地区, 对于低氮高效型品种, 应保持拔节至抽穗期较高的群体生长水平及较高的穗前干物质转化对籽粒的贡献率, 在保证适当单位面积有效穗数的情况下, 促进籽粒充实; 对于高氮高效品种, 拔节至抽穗期较高的群体生长率及较高的每穗颖花数是实现高产高效生产的重要特征。

## 参 考 文 献:

- [1] 梁健, 李军, 李晓峰, 等. 淮北地区水稻品种氮肥群体最高生产力及氮素吸收利用特性[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1188-1200.  
Liang J, Li J, Li X F, et al. Yield, nitrogen absorption and utilization of rice varieties with the highest population productivity of nitrogen fertilization in Huaibei area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(8): 1188-1200.
- [2] 李俊周, 邵鹏, 彭廷, 等. 施氮量对杂交水稻Y两优886产量、稻米品质及氮肥吸收利用的影响[J]. 杂交水稻, 2017, 32(6): 50-54.  
Li J Z, Shao P, Peng T, et al. Effects of nitrogen rate on grain yield, quality and nitrogen uptake and utilization of hybrid rice Y-liangyou 886[J]. Hybrid Rice, 2017, 32(6): 50-54.
- [3] 魏海燕, 王亚江, 孟天瑶, 等. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 488-496.  
Wei H Y, Wang Y J, Meng T Y, et al. Response of yield, quality and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer from mechanical transplanting super japonica rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 488-496.
- [4] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124: 119-130.
- [5] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.

- Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783–795.
- [6] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [7] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85–156.
- [8] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4770–4781.
- Ji L, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y. Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4770–4781.
- [9] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价[J]. *土壤学报*, 2008, 45(2): 267–273.
- Zhang Y L, Fan J B, Duan Y H, *et al.* Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 267–273.
- [10] 梁健, 赵晨, 韩超, 等. 淮北地区氮高效高产型粳稻品种群体生长特征研究[J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(4): 400–408.
- Liang J, Zhao C, Han C, *et al.* Characteristics of population growth in japonica rice varieties with high nitrogen use efficiency and high yield in Huaibei area[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(4): 400–408.
- [11] 李娜, 杨志远, 代邹, 等. 不同氮效率水稻根系形态和氮素吸收利用与产量的关系[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2683–2695.
- Li N, Yang Z Y, Dai Z, *et al.* The relationships between root morphology, N absorption and utilization and grain yield in rice with different N use efficiencies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2683–2695.
- [12] 安久海, 刘晓龙, 徐晨, 等. 氮高效水稻品种的光合生理特性[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 29–38, 45.
- An J H, Liu X L, Xu C, *et al.* Photosynthetic physiological characteristics of rice varieties with high nitrogen use efficiencies[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 29–38, 45.
- [13] Zhu Y C, Li T, Xu J, *et al.* Leaf width gene LW5/D1 affects plant architecture and yield in rice by regulating nitrogen utilization efficiency[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 157: 359–369.
- [14] Wu K, Wang S S, Song W Z, *et al.* Enhanced sustainable green revolution yield via nitrogen-responsive chromatin modulation in rice[J]. *Science*, 2020, 367: 2046.
- [15] Tang W J, Ye J, Yao X M, *et al.* Genome-wide associated study identifies NAC42-activated nitrate transporter conferring high nitrogen use efficiency in rice[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5279.
- [16] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 等. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(24): 4745–4756.
- Sun Y J, Sun Y Y, Jiang M J, *et al.* Effects of fertilizer levels on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(24): 4745–4756.
- [17] 胡香玉, 钟旭华, 彭碧琳, 等. 减氮条件下高产水稻品种的产量形成和氮素利用特征[J]. *核农学报*, 2019, 33(12): 2460–2471.
- Hu X Y, Zhong X H, Peng B L, *et al.* Yield formation and characteristics of nitrogen utilization in high-yielding rice varieties under reduced nitrogen input[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(12): 2460–2471.
- [18] 邓飞, 王丽, 刘利, 等. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1930–1942.
- Deng F, Wang L, Liu L, *et al.* Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10): 1930–1942.
- [19] 刘琦, 胡剑锋, 周伟, 等. 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[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(1): 37–48.
- Liu Q, Hu J F, Zhou W, *et al.* Dry matter production and yield characteristics of machine-transplanted rice varieties falling into different types in Sichuan basin[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(1): 37–48.
- [20] 张驰, 何连华, 廖爽, 等. 不同生态条件下播期对机插杂交水稻日产量的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(10): 1579–1590.
- Zhang C, He L H, Liao S, *et al.* Effect of sowing date on daily yield of mechanical indica hybrid rice under different ecological conditions [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(10): 1579–1590.
- [21] Wang D P, Laza M, Cassman K G, *et al.* Temperature explains the yield difference of double-season rice between tropical and subtropical environments[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 303–311.
- [22] 徐春梅, 袁立伦, 陈松, 等. 长江下游不同生态区双季优质晚稻生长特性和温光利用差异[J]. *中国水稻科学*, 2020, 34(5): 457–469.
- Xu C M, Yuan L L, Chen S, *et al.* Difference in growth characteristics, utilization of temperature and illumination of double-cropping high quality late rice in different ecological regions of the lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(5): 457–469.
- [23] Sun H Y, Qian Q, Wu K, *et al.* Heterotrimeric G proteins regulate nitrogen-use efficiency in rice[J]. *Nature Genetics*, 2015, 46(6): 652–656.
- [24] Hu B, Wang W, Ou S J, *et al.* Variation in NRT1.1B contributes to nitrate-use divergence between rice subspecies[J]. *Nature Genetics*, 2015, 47(7): 834–838.
- [25] 李敏, 张洪程, 杨雄, 等. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性[J]. *作物学报*, 2013, 39(1): 101–109.
- Li M, Zhang H C, Yang X, *et al.* Characteristics of dry matter accumulation and translocation in rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(1): 101–109.
- [26] Wu L L, Yuan S, Huang L Y, *et al.* Physiological mechanisms underlying the high-grain yield and high-nitrogen use efficiency of elite rice varieties under a low rate of nitrogen application in China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1024.
- [27] 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[J]. *中国农业科学*, 1993, 26(6): 1–11.

- Ling Q H, Zhang H C, Cai J Z, *et al.* Investigation on the population quality of high yield and its optimizing control programme in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1993, 26(6): 1–11.
- [28] 缪小建, 王绍华, 李刚华, 丁艳锋. 大中穗型水稻品种灌浆期非结构性碳水化合物运转特征[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(2): 1–4.
- Miao X J, Wang S H, Li G H, Ding Y F. Translocation of non-structural carbohydrates in large and medium panicle rice cultivars during grain filling stage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(2): 1–4.
- [29] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 773–781.
- Li X Y, Sun Y J, Cheng H B, *et al.* Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4): 773–781.
- [30] 孙永健. 水氮互作对水稻产量形成和氮素利用特征的影响及其生理基础[D]. 四川成都: 四川农业大学博士学位论文, 2010.
- Sun Y J. Effects of water- nitrogen interaction on yield formation and characteristics of nitrogen utilization in rice and its physiological basis[D]. Chengdu: PhD Dissertation of Sichuan Agricultural University, 2010.
- [31] 解保胜, 赵黎明, 那永光, 等. 温光条件与寒地水稻产量和源库特征的关系[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 917–924.
- Xie B S, Zhao L M, Na Y G, *et al.* Effects of temperature and sunlight conditions on yield and source / sink characteristics of rice in cold region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 917–924.
- [32] 缪小建, 王绍华, 李刚华, 丁艳锋. 疏花对杂交水稻灌浆期非结构性碳水化合物运转及稻米品质的影响[J]. *杂交水稻*, 2008, 23(5): 55–59.
- Miao X J, Wang S H, Li G H, Ding Y F. Effects of spikelet-removing on non-structural carbohydrate translocation in filling stage and grain quality of hybrid rice[J]. *Hybrid Rice*, 2008, 23(5): 55–59.
- [33] 陈丽楠, 彭显龙, 刘元英, 等. 养分管理对寒地水稻干物质积累及运转的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(5): 52–56.
- Chen L N, Peng X L, Liu Y Y, *et al.* Effect of nutrient management on dry matter accumulation and translocation of rice in cold area[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(5): 52–56.
- [34] Zhou W, Yang Z P, Wang T, *et al.* Environmental compensation effect and synergistic mechanism of optimized nitrogen management increasing nitrogen use efficiency in indica hybrid rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 245.
- [35] 王勋, 戴廷波, 姜东, 等. 不同生态环境下水稻基因型产量形成与源库特性的比较研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 615–619.
- Wang X, Dai T B, Jiang D, *et al.* Yield-formation and source-sink characteristics of rice genotypes under two different eco-environments [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 615–619.
- [36] 岳伟, 陈金华, 阮新民, 等. 安徽省沿江地区双季稻光热资源利用效率变化特征及对气象产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(6): 929–940.
- Yue W, Chen J H, Ruan X M, *et al.* Variation in characteristics of light and heat resource utilization efficiency of double-season rice and its impact on meteorological yield along the Yangtze River in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 929–940.
- [37] 黄丽芬, 全晓艳, 张蓉, 等. 光氮及其互作对水稻干物质积累与分配的影响[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(2): 167–176.
- Huang L F, Quan X Y, Zhang R, *et al.* Interactive effects of light intensity and nitrogen supply on dry matter production and distribution of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(2): 167–176.