

CO₂ 浓度增高对北方水稻籽粒灌浆特性的影响

姜 乐¹,赵洪亮¹,谢立勇¹,王惠贞¹,冯永祥²

(1. 沈阳农业大学 农学院 辽宁 沈阳 110866;2. 黑龙江八一农垦大学 农学院,黑龙江 大庆 163319)

摘要:利用 FACE (Free air CO₂ enrichment) 试验平台,选取北方主栽品种松粳 9 号和稻花香 2 号为试材,研究 CO₂ 浓度增高 (600 μmol/mol) 对不同水稻品种籽粒灌浆特性的影响。在 FACE 条件下,松粳 9 号的籽粒最大灌浆速率增幅为 18.0%,平均灌浆速率增幅为 17.6%,灌浆前期延长 0.88 d,灌浆中期和后期缩短了 2.04,1.44 d,总灌浆时间缩短 2.60 d。稻花香 2 号经过 FACE 处理后到达最大灌浆速率的时间比对照晚 4.27 d,并且最大灌浆速率低于对照 6.8%,平均灌浆速率低于对照 7.7%,灌浆前期比对照延长 2.45 d,中期延长 3.63 d,后期延长 2.56 d。千粒质量和籽粒灌浆参数的相关性分析表明,粒重和灌浆速率的关系更为密切。说明不同水稻品种的灌浆特性对 CO₂ 浓度升高的响应存在差异,松粳 9 号的主要响应方式是灌浆速率的提高,而稻花香 2 号则是灌浆持续时间的延长。

关键词:大气 CO₂ 富集系统;水稻;灌浆特性;CO₂ 浓度增高

中图分类号:S511.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2014)03-0136-06

Effect of CO₂ Enrichment on Rice Grain Filling under FACE System in North China

JIANG Le¹, ZHAO Hong-liang¹, XIE Li-yong¹, WANG Hui-zhen¹, FENG Yong-xiang²

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Effects of elevated (600 μmol/mol) CO₂ concentration on grain-filling characteristics of different japonica rice cultivars were investigated using Songjing 9 and Daohuaxiang 2 by mini FACE (Free air CO₂ enrichment) experimental platform. In blossom, we chose 100 stalks and put a notice plate with date on each one. From five days after blossom, each treatment was randomly taken 5 to 8 tassels, sampling time in the morning 10-12, a total of five times. After sampling 105 °C heating 30 min, then 70 °C drying to constant weight, get rid of the empty grain and ill grain, select 200 grains' weight converted into thousand-grain weight. Using the logistic equation for the filling process of dynamic fitting analysis. The results showed that the maximum and average grain-filling rate of Songjing 9 was increased by 18% and 17.6% under mini FACE. The duration of early grain-filling of Songjing 9 was prolonged for 0.88 d, while the duration of total grain-filling was shortened by 2.60 d under mini FACE. The day of maximum grain-filling rate of Daohuaxiang 2 was delayed for 4.27 d, and the maximum and average grain-filling rate was decreased by 6.8% and 7.7%. The duration of early, middle and late grain-filling was prolonged for 2.45, 3.63, 2.56 d. The results indicated that grain-filling characteristics of different rice varieties respond to elevated CO₂ concentration difference. The filling rate of Songjing 9 will be quickly and the filling stage of Daohuaxiang 2 will be longer. The results of the study can improve and genetic improvement of rice cultivation measures to provide certain theory reference and practice basis.

Key words: FACE; Rice; Grain filling properties; CO₂ enrichment

自工业革命以来,化石燃料的大量使用导致大气中 CO₂ 浓度在不断升高。CO₂ 浓度水平自工业

革命后升高了近 40%,如不采取限制措施,预计到 2050 年 CO₂ 的浓度将达到 550 μmol/mol,21 世纪

收稿日期:2014-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41175097)

作者简介:姜 乐(1988-),男,辽宁沈阳人,在读硕士,主要从事气候变化与农业的研究。

通讯作者:谢立勇(1969-),男,辽宁铁岭人,副教授,博士后,主要从事农业气象和气候变化对农业影响的研究。

赵洪亮(1980-),男,河北徐水人,讲师,博士,主要从事气候变化与作物生理生态研究。

末,将高达 700 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ^[1],在改变全球气候及环境的同时,也对绿色植物的生长发育产生深远的影响。水稻作为我国最主要的粮食作物,是我国单产最高、总产最多的粮食作物。在我国有 65% 以上人口以稻米为主食,生产的 85% 以上稻米作为口粮消费。一旦稻米供给不足,人民的生活就会受到影响,稻米供求的细小变化都会导致粮食价格乃至整个物价波动。水稻丰歉直接关系到粮食丰歉,水稻安全直接关系到国家粮食安全。

水稻作为 C₃ 植物,高水平的 CO₂ 提高了其单位叶面积光合速率,增加了光合产物的积累,进而提高有效穗数、小穗数、穗粒数或每穗结实率,有利于提高产量^[2-5]。CO₂ 浓度是产量构成因素中粒重的关键影响因素之一,研究表明:高浓度 CO₂ 显著促进武香粳 14 结实早期籽粒伸长、增宽和灌浆的速度,使籽粒大小(长宽积)和灌浆速度均提前 3 d 达到最大值^[1],但使后期灌浆速度显著下降^[2],加上中、后期的灌浆历期缩短^[2],导致充实不良^[2-4](表现稻米垩白增加^[3]),收获期粒重亦没有随库容加大而显著增加^[1]。在生育进程方面,日本粳稻品种 Akitakomachi 抽穗和成熟期分别提前了 2,3 d^[5],中国粳稻品种武香粳 14 抽穗和成熟期分别提前了 3.4,5.8 d^[6],而对杂交组合汕优 63^[7]和两优培九生育期^[8]几乎没有影响。不同基因型的水稻千粒重对 FACE (Free air CO₂ enrichment) 的响应存在明显差异^[9],但是在高浓度 CO₂ 条件下对我国北方稻米籽粒灌浆过程的变化及品种间差异的研究较少。

迄今为止,研究作物在 CO₂ 浓度升高后的响应中相对理想的试验设施为开放式大气 CO₂ 富集系统(FACE),其开放式的研究由于在大田条件下进行,FACE 圈内没有任何隔离设施,CO₂ 可以自由流动,既可保证试验的 CO₂ 浓度,还可以使植物的地上部和地下部的环境条件与自然条件一致。因此,国际上普遍认为,这是目前研究植物对大气 CO₂ 浓度响应的最理想的研究方法。本研究通过在 FACE 条件下对松粳 9 号和稻花香 2 号的籽粒灌浆进行研究,动态记录 2 个品种的籽粒重量的变化,利用 Logistic 方程拟合 2 个品种的灌浆过程,分析其在高浓度 CO₂ 环境下灌浆特性的变化。旨在探讨未来 CO₂ 浓度升高后水稻籽粒灌浆过程的变化特征和趋势,为水稻适应气候变化提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

中国农业科学院昌平试验基地位于北京市昌平

南部(北纬 40°13',东经 116°14'),京昌公路的西侧。土壤类型属褐潮土,土壤有机质 18.27 g/kg,全氮 1.08 g/kg,碱解氮含量 94.83 mg/kg,速效钾 140.28 mg/kg。

1.2 试验材料

供试材料为北方水稻主栽品种松粳 9 号和稻花香 2 号。松粳 9 号平均生育期 134 d,需活动积温 2 650℃。株高 95 ~ 100 cm,穗长 20 cm。稻花香 2 号平均生育期 147 d,株高 105 cm,穗长 21.6 cm,需活动积温 2 800℃。

1.3 试验设计

利用中国农业科学院北京昌平 FACE 试验系统进行。Mini FACE 试验系统构成、系统控制等见郝兴宇等^[10]方法。该试验设 3 个 FACE 圈,3 个对照圈,采用盆栽试验(盆长 55 cm,宽 40 cm,深 30 cm),每圈内共 60 盆,每个品种各 30 盆。每盆播种 6 穴,每穴播种精选苗 4 株。试验设 2 个处理,3 次重复。设定自由大气 CO₂ 浓度(对照,CO₂ 浓度平均为 (389 ± 40) $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 左右)与 FACE 高 CO₂ 浓度(为 (600 ± 60) $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 左右)2 个水平,控制误差为 10%。

1.4 取样和测定方法

于抽穗开花期,各处理选择同日始穗的单茎挂牌 100 个并标注日期,将中部颖花盛花期定为全穗的开花期,开花后 5 d 开始每个处理随机取 5 ~ 8 个穗,取样时间在上午 10:00 - 12:00 时,共取 5 次。取样后 105℃ 杀青 30 min 后 70℃ 烘干至恒重,每个处理手工剔除空粒,病粒,选取 200 粒测定粒重并换算成千粒质量。

用 Logistic 方程 $w = A/(1 - Be^{kt})$, t 代表花后天数, w 代表千粒质量, A 是理论的终极生长量, k 为生长速率参数, B 为初值参数。对 Logistic 方程的拟合过程及参数的确定参阅文献[11],其中主要用的初级参数有: R_{max} 为最大灌浆速率($\text{g}/(\text{千粒} \cdot \text{d})$); T_{max} 为灌浆速率达最大时的时间(d); R_{mean} 为整个灌浆过程的平均灌浆速率($\text{g}/(\text{千粒} \cdot \text{d})$); T 为整个灌浆过程持续天数(d)。次级参数主要有 T_1 、 T_2 、 T_3 ; R_1 、 R_2 、 R_3 ; W_1 、 W_2 、 W_3 ; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为灌浆的前中后 3 个时期的持续天数、灌浆速率、积累的粒重和所占比例, Y 为实际测定千粒质量。

1.5 统计分析方法

试验分别在 2012 和 2013 年 2 个年度进行,试验设计和处理相同,2 年的数据结果基本一致。对所获得的数据进行方差分析,并且采用 LSD 法检验显著性。Logistic 曲线拟合和图的绘制采用 Origin

8.0 进行,表格的制作采用 Microsoft office 组件中的 Excel 2003 进行。

2 结果与分析

2.1 FACE 处理下不同粳稻品种的粒重变化

从表 1 中的松粳 9 号在花后 5~25 d 的千粒质量变化可以看出:在灌浆前期 FACE 处理的水稻千粒质量明显少于对照,但是在 15 d 的时候,FACE 处理水稻的千粒质量超出对照的 11.2%。通过对测定数据进行拟合后得到的灌浆特性参数(表 4)可以看出 FACE 处理延长了松粳 9 号灌浆前期 0.88 d,

缩短了灌浆中期 2.04 d 和后期 1.44 d,整个灌浆时间缩短了 2.60 d。

从表 1 中的稻花香 2 号在花后 5~25 d 的千粒质量变化可以看出:在 20 d 之前,经过 FACE 处理的稻花香 2 号千粒质量少于对照,但是在 25 d 的时候经过 FACE 处理的稻花香 2 号千粒质量高于对照 1.0%。通过对测定数据进行拟合后得到的灌浆特性参数(表 4)可以看出,FACE 处理的水稻灌浆前期比对照延长 2.45 d,中期延长 3.63 d,后期延长 2.56 d,整个灌浆期总体延长 8.64 d。

表 1 两个品种 FACE 条件下的籽粒重变化

Tab.1 Brown rice weight of two varieties under ambient CO₂ (AMB) and free-air CO₂ enrichment (FACE) at different stages

| 品种 Varieties | 处理 Treatment | 5 d | 10 d | 15 d | 20 d | 25 d |
|---------------|--------------|----------|----------|-----------|----------------------|----------------------|
| 松粳 9 号 | AMB | 3.998 | 7.140 | 11.448 | 17.473 | 20.248 |
| Songjing 9 | FACE | 3.130 ** | 5.863 ** | 12.730 ** | 17.655 ^{ns} | 21.330 * |
| 稻花香 2 号 | AMB | 3.730 | 6.195 | 12.198 | 18.153 | 20.770 |
| Daohuaxiang 2 | FACE | 3.243 ** | 5.228 ** | 10.450 ** | 15.040 ** | 20.970 ^{ns} |

注:表中数值均为千粒质量;* 代表差异显著;** 代表差异极显著;^{ns}代表差异不显著。表 5,6 同。

Note:The data in the table are the 1 000-grain weight,unit; *. Difference is significant at the 0.05 level; **. Difference is significant at the 0.01 level;^{ns}. Represents the difference was not significant. The same as Tab. 5,6.

2.2 FACE 处理下不同粳稻品种的 Logistic 曲线拟合结果

根据试验测得的粒重采用 Origin 8.0 对籽粒生长过程进行了 Logistic 曲线模拟(表 2、图 1)。拟合

结果显示,决定系数均在 0.98 以上,拟合效果良好。拟合的结果可以用来解释水稻籽粒的增长过程,进一步可以依此进行详细分析。

表 2 FACE 处理下不同粳稻品种的 Logistic 曲线拟合结果

Tab.2 Logistic curve fit results of different rice cultivars under FACE

| 品种 Cultivars | 处理 Treatment | R ² | A | SE | B | SE | K | SE | T1 | T2 | T3 |
|---------------|--------------|----------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 松粳 9 号 | AMB | 0.983 4 | 23.00 | 2.48 | 16.43 | 5.48 | 0.19 | 0.04 | 7.68 | 13.65 | 9.64 |
| Songjing 9 | FACE | 0.992 4 | 23.05 | 1.43 | 26.05 | 7.97 | 0.23 | 0.03 | 8.56 | 11.61 | 8.20 |
| 稻花香 2 号 | AMB | 0.988 8 | 22.94 | 1.76 | 22.32 | 7.59 | 0.22 | 0.03 | 8.24 | 12.14 | 8.58 |
| Daohuaxiang 2 | FACE | 0.986 6 | 27.69 | 5.03 | 22.25 | 5.91 | 0.17 | 0.03 | 10.69 | 15.77 | 11.14 |

注:A. 理论千粒质量;B. 初值参数;K. 速率参数;SE. 标准误;T1、T2、T3 灌浆的前中后 3 个时期的持续天数(d)。

Note:A. The 1 000-grain weight;B. The initial parameter;K. Rate parameter;SE. Standard error;T1, T2, T3. Means the three periods of grain filling.

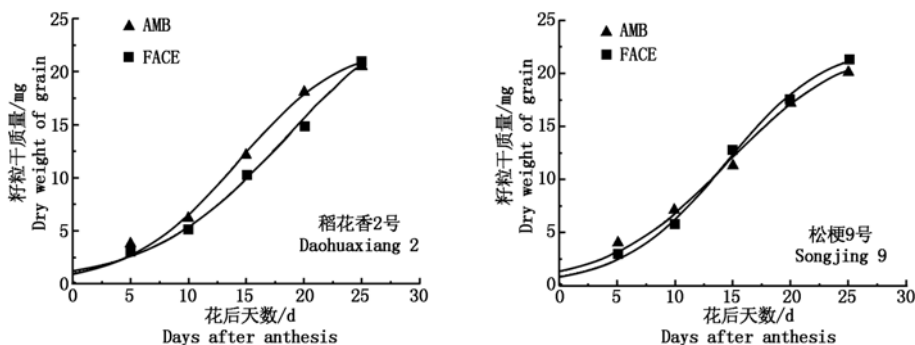


图 1 FACE 处理下不同粳稻品种籽粒灌浆的 Logistic 拟合曲线

Fig.1 Logistic curve of grain filling of different rice cultivars under FACE

2.3 FACE 处理下不同粳稻品种的籽粒灌浆初级参数分析

对 2 个水稻品种的粒重进行了曲线拟合后,通

过对其求导,得出了粳稻籽粒灌浆的一系列参数(表 3)。从表 3 可以看出,理论千粒质量 A 在 FACE 处理下 2 个品种均有所提高,但稻花香 2 号

增加的幅度明显高于松粳 9 号。其他参数则出现了品种不一致的变化趋势。到达最大灌浆速率时间:松粳 9 号在 FACE 处理下有所提前,但是差异不显著;而稻花香 2 号则明显延后,延后了 4.27 d。活跃生长期 D 和籽粒灌浆时间 T 也呈现出相同的趋势,FACE 处理下松粳 9 号的 D 和 T 均缩短,而稻花香 2 号则延长。灌浆持续过程中的平均灌浆速率(Rmean),松粳 9 号在 FACE 处理下增大,稻花香 2 号则减小。

正常环境下稻花香 2 号到达最大灌浆速率的时间要早于松粳 9 号 0.19 d,最大灌浆速率高于松粳 9 号 0.13 g/d,平均灌浆速率高于松粳 9 号 0.09 g/d。

经过 FACE 处理后,松粳 9 号的到达最大灌浆速率的时间提前 0.14 d,最大灌浆速率提高 0.20 g/d,增幅为 18%,平均灌浆速率加快 0.13 g/d,增幅为 17.6%;稻花香 2 号到达最大灌浆速率的时间推迟 4.27 d,最大灌浆速率降低 0.08 g/d,降幅为 6.8%,平均灌浆速率减慢 0.06 g/d,降幅为 7.7%。

从以上参数的变化趋势可以看出,FACE 处理对松粳 9 号的影响主要集中在灌浆速率方面,而对稻花香 2 号的影响则主要体现在灌浆时间的长短,而且两者都是朝着正面的方向影响,也就是说都能对粒重的积累产生明显的促进作用。

表 3 FACE 处理下不同粳稻品种的籽粒灌浆初级参数分析

| Tab. 3 Elementary parameters of grain filling of different rice cultivars under FACE | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|-------------------|-------------|
| 品种 Cultivars | 处理 Treatment | 理论千粒 质量/g A | 到达最大灌浆 速率时间/d Tmax | 最大灌浆 速率/(g/d) Rmax | 平均灌浆 速率/(g/d) Rmean | 活跃生 长期/d D | 籽粒灌浆 时间/d T | 起始势/g Co |
| 松粳 9 号 | AMB | 23.00 | 14.50 | 1.11 | 0.74 | 31.09 | 30.97 | 1.32 |
| Songjing 9 | FACE | 23.05 | 14.36 | 1.31 | 0.87 | 26.44 | 28.37 | 0.85 |
| 稻花香 2 号 | AMB | 22.94 | 14.31 | 1.24 | 0.83 | 27.65 | 28.96 | 0.98 |
| Daohuaxiang 2 | FACE | 27.69 | 18.58 | 1.16 | 0.77 | 35.93 | 37.61 | 1.19 |

2.4 FACE 处理下不同粳稻品种的阶段灌浆参数分析

依据前述的方法,将不同粳稻品种的籽粒灌浆过程分成 3 个阶段(表 4)。不同阶段的籽粒积累状况对粒重的影响不同。水稻籽粒灌浆前期的时间在增高 CO₂ 处理下均有所延长,稻花香 2 号的延长幅度高于松粳 9 号。松粳 9 号在 FACE 处理下灌浆中期和后期的时间缩短,而稻花香 2 号的中期后期时

间均延长,综合起来看,稻花香 2 号的总灌浆时间长于松粳 9 号。虽然松粳 9 号的中后期灌浆时间缩短,但是积累的粒重却有所提高,这和松粳 9 的灌浆速率提高有一定的关系。2 个水稻品种在正常 CO₂ 大气浓度和增高的大气 CO₂ 浓度条件下前中后 3 个时期的籽粒积累比例表现趋于一致,分别为前期和后期约占 20%,中期积累量占到 60% 左右。

表 4 FACE 处理下不同粳稻品种的籽粒灌浆阶段参数分析

| Tab. 4 Phase parameters of grain filling of different rice cultivars under FACE | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 品种 Cultivars | 处理 Treatment | T1 | T2 | T3 | W1 | W2 | W3 | R1 | R2 | R3 | P1 | P2 | P3 |
| 松粳 9 号 | AMB | 7.68 | 13.65 | 9.64 | 3.54 | 13.28 | 3.94 | 0.46 | 0.97 | 0.41 | 0.17 | 0.64 | 0.19 |
| Songjing 9 | FACE | 8.56 | 11.61 | 8.20 | 4.02 | 13.31 | 3.95 | 0.47 | 1.15 | 0.48 | 0.19 | 0.63 | 0.19 |
| 稻花香 2 号 | AMB | 8.24 | 12.14 | 8.58 | 3.86 | 13.24 | 3.93 | 0.47 | 1.09 | 0.46 | 0.18 | 0.63 | 0.19 |
| Daohuaxiang 2 | FACE | 10.69 | 15.77 | 11.14 | 4.66 | 15.99 | 4.74 | 0.44 | 1.01 | 0.43 | 0.18 | 0.63 | 0.19 |

表 5 水稻籽粒灌浆参数和千粒质量的相关分析

| Tab. 5 Correlativity between grain weight and grain filling parameters | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|-------------|---------|
| | 到达最大灌浆 速率时间/d Tmax | 最大灌浆 速率/(g/d) Rmax | 平均灌浆 速率/(g/d) Rmean | 活跃生 长期/d D | 起始势/g Co | Y |
| 到达最大灌浆速率时间/d Tmax | 1.000 0 | | | | | |
| 最大灌浆速率/(g/d) Rmax | -0.394 1 | 1.000 0 | | | | |
| 平均灌浆速率/(g/d) Rmean | -0.394 1 | 1.000 0 | 1.000 0 | | | |
| 活跃生长期/d D | 0.901 0 | -0.753 6 | -0.753 6 | 1.000 0 | | |
| 起始势/g Co | 0.363 9 | -0.998 6 ** | -0.998 6 ** | 0.731 9 | 1.000 0 | |
| Y | 0.410 6 | -0.996 4 ** | -0.996 4 ** | 0.764 9 | 0.997 8 ** | 1.000 0 |

2.5 FACE 处理下不同粳稻品种千粒质量的影响因素分析

水稻的籽粒灌浆过程受到各种因素的影响,千粒质量的最终形成和籽粒灌浆过程中的各项参数之间存在着一定的关系。根据以上得出的水稻籽粒灌浆参数和阶段参数,与最终的千粒质量进行相关分析得出表 5 和表 6。从表中可以看出,水稻的最终千粒质量形成和起始势呈极显著正相关关系,与籽

粒平均灌浆速率呈极显著负相关关系,和籽粒灌浆时间的相关性弱于灌浆速率。

籽粒灌浆过程的阶段性参数中,中期和后期的灌浆时间和最终千粒质量的相关性较强。所以在栽培措施的实施中应该予以考虑。同时,千粒质量和中期、后期的积累物质和灌浆速率相关性较强,说明籽粒积累的过程中,要注重加强中后期的营养供应,保证其获得较高的粒重。

表 6 水稻籽粒灌浆阶段参数和千粒质量的相关分析

Tab.6 Correlativity between grain weight and grain filling phases parameters

| | T1 | T2 | T3 | W1 | W2 | W3 | R1 | R2 | R3 | Y |
|----|-----------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|-------------|-------------|---------|
| T1 | 1.000 0 | | | | | | | | | |
| T2 | 0.723 8 | 1.000 0 | | | | | | | | |
| T3 | 0.723 8 | 1.000 0 | 1.000 0 | | | | | | | |
| W1 | 0.987 7 * | 0.607 3 | 0.607 3 | 1.000 0 | | | | | | |
| W2 | 0.962 2 * | 0.884 4 | 0.884 4 | 0.907 9 | 1.000 0 | | | | | |
| W3 | 0.962 2 * | 0.884 4 | 0.884 4 | 0.907 9 | 1.000 0 | 1.000 0 | | | | |
| R1 | -0.869 3 | -0.969 6 * | -0.969 6 * | -0.781 5 | -0.970 8 * | -0.970 8 * | 1.000 0 | | | |
| R2 | -0.092 4 | -0.753 6 | -0.753 6 | 0.063 8 | -0.360 1 | -0.360 1 | 0.570 2 | 1.000 0 | | |
| R3 | -0.092 4 | -0.753 6 | -0.753 6 | 0.063 8 | -0.360 1 | -0.360 1 | 0.570 2 | 1.000 0 | 1.000 0 | |
| Y | 0.110 6 | 0.764 9 | 0.764 9 | -0.045 8 | 0.376 8 | 0.376 8 | -0.587 4 | -0.996 4 ** | -0.996 4 ** | 1.000 0 |

3 结论和讨论

水稻产量由单位面积成穗数、每穗颖花数、结实率和千粒质量等因素构成,籽粒灌浆状况对产量的形成至关重要。大量研究表明,籽粒灌浆不仅决定于品种的遗传特性,也受到土壤水分、温光条件、氮素营养^[12-20]等环境因素的影响。

本研究结果表明,FACE 处理主要对水稻灌浆前期的籽粒灌浆进程有显著影响,这与李军营等^[1]的研究结果一致。李军营^[1]、胡健^[15]等在江苏无锡利用 FACE 平台对武香粳 14 籽粒灌浆早期强势粒发育特性的研究表明:花后 9 ~ 35 d,FACE 粒重明显高于对照。水稻籽粒灌浆进程具有品种差异性,本研究也得出了类似的结果。松粳 9 号和稻花香 2 号在同样的 FACE 处理下,灌浆速率表现出不同的影响特征,从籽粒灌浆的特性参数分析来看,CO₂ 浓度升高后,松粳 9 号的灌浆初期时间延长,最大和平均灌浆速率均有所提高,稻花香 2 号对 CO₂ 增高的反应相对平缓,其最大和平均灌浆速率降低,灌浆时间延长,最后收获粒重均高于对照。结果说明 CO₂ 浓度增高对不同的水稻品种影响不一,尤其是在具体的灌浆过程中特征参数的反应不一,松粳 9 号的灌浆速率反应较为敏感,而稻花香 2 号的灌浆持续时间较为敏感。这与水稻品种的特性有一定的关系,松粳 9 号是典型的高产品种,稻花香 2 号是优质品种,可见大气 CO₂ 浓度增高对水稻产量和品

质的影响存在差异。

CO₂ 是作物光合作用的主要原料,其浓度增高必然对作物光合作用有明显的促进作用,大量研究表明,CO₂ 浓度升高会增加作物产量。粒重是产量重要的构成要素之一,CO₂ 是光合作用底物,CO₂ 浓度升高对作物生理以及产量形成具有重要影响^[20],其原因可能是增加了光合原料的供应,保证和提高光合作用的效率,增加光合产物的生成,其生理生化机制尚待进一步的深入研究。

本研究结果表明,CO₂ 浓度增高对水稻籽粒灌浆有明显的影响,而且品种间存在一定差异。这就说明,在未来大气中 CO₂ 继续升高的背景和预期下,应该根据品种的特性进行相应的栽培技术筛选和研究。对于育种工作来说,应该先确定品种的特性再进行相应的研究,如松粳 9 号前期灌浆受 CO₂ 影响较大,而且灌浆速率受到的影响较大,所以在进行栽培措施选择时,更加关注前期的水肥供应和保持较大的叶面积,以保证其灌浆速率的持续性和稳定性。对于稻花香 2 号而言,则需要一定范围内尽可能地延长其灌浆时间,在温度许可和没有下茬作物的情况下,适当早播和延长收获时间,对于稻花香 2 号的产量提高具有重要的现实意义。

作物对 CO₂ 浓度升高的响应存在显著差异,同一种作物之间又存在显著的品种差异,虽然从最终结果看,2 个品种的千粒质量都具有明显的增高趋势,但是其内在的增高因素不一致,这就为作物的栽

培育和育种提出了新的问题,在适应气候变化育种研究中,应该首先了解和深刻认识品种的特性,然后才能有针对性的采取栽培和育种改良措施,以利于作物生产更好地适应气候变化的总体趋势和发展方向,保证在可预见的气候变化背景下,对农业生产的负面影响降低到最小程度,气候变化对农业生产的积极作用更大程度上予以展现和发挥。

参考文献:

- [1] 李军营,徐长亮,谢 辉,等. CO₂ 浓度升高加快水稻灌浆前期籽粒的生长发育进程[J]. 作物学报,2006,32(6):905-910.
- [2] 杨连新,王云霞,朱建国,等. 十年水稻 FACE 研究的产量响应[J]. 生态学报,2009,29(3):1486-1497.
- [3] 杨连新,王云霞,朱建国,等. 开放式空气中 CO₂ 浓度增高(FACE)对水稻生长和发育的影响[J]. 生态学报,2010,30(6):1573-1585.
- [4] Yang L, Wang Y, Huang J, *et al.* Responses of rice growth and development to free-air CO₂ enrichment (FACE): A research review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(7):1331-1337.
- [5] Shimono H, Okada M, Kanda E, *et al.* Low temperature-induced sterility in rice: evidence for the effects of temperature before panicle initiation[J]. Field Crops Research, 2007,101(2):221-231.
- [6] Huang J Y, Yang L X, Yang H J, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment(FACE) on rowth duration of rice (*Oryza sativa* L.) and its cause[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005,31(7):882-887.
- [7] Liu H J, Yang L X, Wang Y L, *et al.* Yield formation of CO₂-enriched hybrid rice cultivar Shanyou 63 under fully open-air field conditions[J]. Field Crops Research, 2008,108(1):93-100.
- [8] Yang L X, Liu H J, Wang Y X, *et al.* Yield formation of CO₂-enriched inter-subspecific hybrid rice cultivar Lianyoupeijiu under fully pen-air field condition in a warm sub-tropical climate[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009,129(1-3):193-200.
- [9] 范桂枝,蔡庆生,王春明,等. 水稻千粒质量对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 作物学报,2005,31(6):706-711.
- [10] 郝兴宇,李 萍,杨宏斌,等. 大气 CO₂ 浓度升高对绿豆生长及 C、N 吸收的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):794-798.
- [11] 赵洪亮,马瑞昆,刘恩财,等. 不同冬小麦品种籽粒灌浆特性参数对供水的反应[J]. 华北农学报,2008,23(1):75-80.
- [12] Kim H Y, Lieffering M, Kobayashi K, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops[J]. Field Crops Research, 2003,83(3):261-270.
- [13] 王 维,蔡一霞,杨建昌,等. 结实期土壤水分亏缺影响水稻籽粒灌浆的生理原因[J]. 植物生态学报,2011,35(2):195-202.
- [14] 丁四兵,朱碧岩,吴冬云,等. 温光对水稻抽穗后剑叶衰老和籽粒灌浆的影响[J]. 华南师范大学学报:自然科学版,2004(1):117-121,128.
- [15] 胡 健,杨连新,周 娟,等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE)对水稻灌浆动态的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(11):2443-2451.
- [16] Hirose T, Takano M, Terao T. Cell wall invertase in developing rice caryopsis: molecular cloning of OsCIN1 and analysis of its expression in relation to its role in grain filling[J]. Plant & Cell Physiol, 2002,43(4):452-459.
- [17] 张亚洁,许德美,孙 斌,等. 种植方式对陆稻和水稻籽粒灌浆及垩白的影响[J]. 中国农业科学,2006,39(2):257-264.
- [18] Sipaseuth, Basnayake J, Fukai S, *et al.* Opportunities to increasing dry season rice productivity in low temperature affected areas[J]. Field Crops Research, 2007,102(2):87-97.
- [19] 谢光辉,杨建昌,王志琴,等. 水稻籽粒灌浆特性及其与籽粒生理活性的关系[J]. 作物学报,2001,27(5):557-565.
- [20] 胡 健,王余龙,杨连新,等. FACE 对武香粳 14 各生育期功能叶片及根系可溶蛋白含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(5):1117-1121.