

## 自由空气中 CO<sub>2</sub> 浓度和温度增高对水稻种子活力的影响

高厚玉<sup>1</sup> 景立权<sup>2</sup> 陈龙<sup>1</sup> 居静<sup>1</sup> 王云霞<sup>1,\*</sup> 朱建国<sup>3</sup> 杨连新<sup>2</sup> 王余龙<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; <sup>2</sup> 扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; <sup>3</sup> 中国科学院 南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; \* 通讯联系人, E-mail: yxwang@yzu.edu.cn)

### Effects of Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub> and Temperature on Seed Vigor of Rice under Open-air Field Conditions

GAO Hou-yu<sup>1</sup>, JING Li-quan<sup>2</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>, JU Jing<sup>1</sup>, WANG Yun-xia<sup>1,\*</sup>, ZHU Jian-guo<sup>3</sup>, YANG Lian-xin<sup>2</sup>, WANG Yu-long<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; <sup>2</sup> Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/ Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; <sup>3</sup> State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; \* Corresponding author, E-mail: yxwang@yzu.edu.cn)

GAO Houyu, JING Liquan, CHEN Long, et al. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on seed vigor of rice under open-air field conditions. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(4): 371-379.

**Abstract:** The increases in atmospheric carbon dioxide concentration and air temperature are two important features of global climate change. The present study was conducted to reveal how rice seed vigor will be affected by these two important environmental factors when rice plants were grown under future environment conditions. By using the rice Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) system, an inbred japonica rice Wuyunjing 23 was grown under four different combinations of CO<sub>2</sub> concentration and temperature treatments, i.e. ambient air (Ambient), elevated [CO<sub>2</sub>] (EC, Ambient+200 μmol/mol), elevated temperature (ET, Ambient+2°C) and elevated [CO<sub>2</sub>] + elevated temperature (EC+ET). At maturity, seeds were harvested and subjected to the standard germination trial in laboratory. The results indicated that compared with seeds obtained from ambient air, the seeds from EC plants showed higher value (+16.5%) in the electrical conductivity of deionized water in which seeds have been soaked for 24 hours. However, EC decreased the sprouting rate, germination rate, germination potential and germination index by 7.8%, 10.0%, 17.4% and 8.9%, respectively. The effects of ET and EC+ET on the above parameters followed the similar patterns, but in most cases the effects became smaller and were statistically insignificant. Compared with the ambient temperature, high temperature during growth reduced high CO<sub>2</sub> effects on the electrical conductivities of seed soaking solution, sprouting rate, germination rate, germination potential and germination index, which was shown by certain degree of interaction between CO<sub>2</sub> concentration and temperature. The characteristics of sprout and root of the germinated seed were not changed by CO<sub>2</sub> concentration or/and temperature increases during plant growth. The above results indicated that the sprouting rate, germination rate, germination potential and germination index of the seed of inbred japonica rice Wuyunjing 23 were significantly decreased when the seeds were produced in the high CO<sub>2</sub> concentration environment. But such negative effects of high CO<sub>2</sub> concentration on seed germination capacity of rice might be ameliorated by simultaneously moderate increase of air temperature during plant growth.

**Key words:** rice; carbon dioxide; air temperature; FACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment); seed vigor

高厚玉, 景立权, 陈龙, 等. 自由空气中 CO<sub>2</sub> 浓度和温度增高对水稻种子活力的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30(4): 371-379.

**摘要:** 大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度和气温增高是全球气候变化的重要特征,本研究旨在揭示未来气候变化条件下生长的水稻,其种子活力是否受这两个重要环境因子的影响。利用稻田 FACE(Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment)系统,以常规水稻武运粳 23 为供试材料,设置对照(Ambient,环境空气)、CO<sub>2</sub> 浓度增高(比 Ambient 高 200 μmol/mol)、温度增高(比 Ambient 高 2°C)和 CO<sub>2</sub> 浓度与温度同时增高四个处理,成熟期收获种子进行实验室标准发芽实验。结果表明,与对照相比,单独 CO<sub>2</sub> 浓度增加使成熟种子浸种 24 h 浸出液电导率平均增加 16.5%,但使种子露白率、发芽率、发芽势和发芽指数分别下降 7.8%、10.0%、17.4% 和 8.9%。相似地,单独温度增高或 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同时增高处理对上述参数影响的方向一致,但影响的幅度变小,多

收稿日期: 2015-12-29; 修改稿收到日期: 2016-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(31261140364);国家自然科学基金资助项目(31571597 和 31171460);中国博士后科学基金资助项目(2015M581870);江苏高校优势学科建设工程资助项目。

未达显著水平。与环境生长温度相比,高温环境下全生育期  $\text{CO}_2$  浓度升高使成熟种子浸种 24 h 浸出液电导率、露白率、发芽率、发芽势和发芽指数的影响变小,表现在  $\text{CO}_2$  浓度与温度处理间存在一定程度的交互作用。种子发芽后芽和根系性状对高  $\text{CO}_2$  浓度或高温均无显著响应。以上结果说明,大气  $\text{CO}_2$  浓度增高 200  $\mu\text{mol/mol}$  环境条件下,常规粳稻武运梗 23 成熟种子露白率、发芽率、发芽势和发芽指数等指标均明显下降,但在同时适度增温的生长环境下这种负面影响有减弱的趋势。

**关键词:** 水稻; 二氧化碳; 温度; FACE(Free Air  $\text{CO}_2$  Enrichment); 种子活力

**中图分类号:** S181.6; S511.01

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7216(2016)04-0371-09

随着经济和工农业的飞速发展,以及世界人口的不断增加,大气二氧化碳( $\text{CO}_2$ )浓度已经增加到 395  $\mu\text{mol/mol}$ ,比工业革命前的 280  $\mu\text{mol/mol}$  增加了 41%<sup>[1]</sup>,预计到 2050 年将达到 550  $\mu\text{mol/mol}$ <sup>[2]</sup>。大气  $\text{CO}_2$  和其他温室气体浓度升高对环境的一个主要影响就是全球暖化趋势<sup>[3]</sup>。在过去的 100 年间,大气温度平均升高了 0.78℃,预计到 2050 年将继续上升 0.8℃~3.2℃<sup>[2]</sup>。从人类直接消费的食物而言,水稻是全世界最重要的粮食作物。大气  $\text{CO}_2$  浓度和温度都是影响水稻生长发育的关键因子,全球气候变化情景中的两者同时升高将对稻作生产产生重大影响。中国是世界最大的稻米生产国,贡献了全球稻米总产量的 30%,水稻对保障我国粮食安全举足轻重<sup>[4]</sup>,研究未来  $\text{CO}_2$  浓度和温度共同升高对我国水稻生产的影响,对我国乃至世界中长期粮食安全保障具有重要的参考价值。

目前国际上已有大量  $\text{CO}_2$  浓度<sup>[5,6,7]</sup>或气温<sup>[8,9]</sup>单独升高对水稻生长发育影响的报道,近年来两因子之间的交互作用对水稻生长发育影响的研究也日益增多<sup>[10]</sup>。但与之形成鲜明对照, $\text{CO}_2$  浓度升高或温度升高对水稻种子发芽特性的研究甚少<sup>[11]</sup>,两者互作对水稻种子发芽特性的影响更是空白。种子活力是种子在一定田间条件下各方面的综合表现<sup>[12]</sup>。前期研究表明,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高或/和温度升高均会导致水稻籽粒物理和化学性状的改变<sup>[7,10]</sup>,这种变化可能影响水稻的种子活力和发芽特性,进而对水稻秧苗生长及其与杂草的竞争关系产生影响<sup>[13]</sup>,因此有必要推进大气  $\text{CO}_2$  浓度升高或温度升高特别是两者交互作用对水稻种子萌发特性的研究。

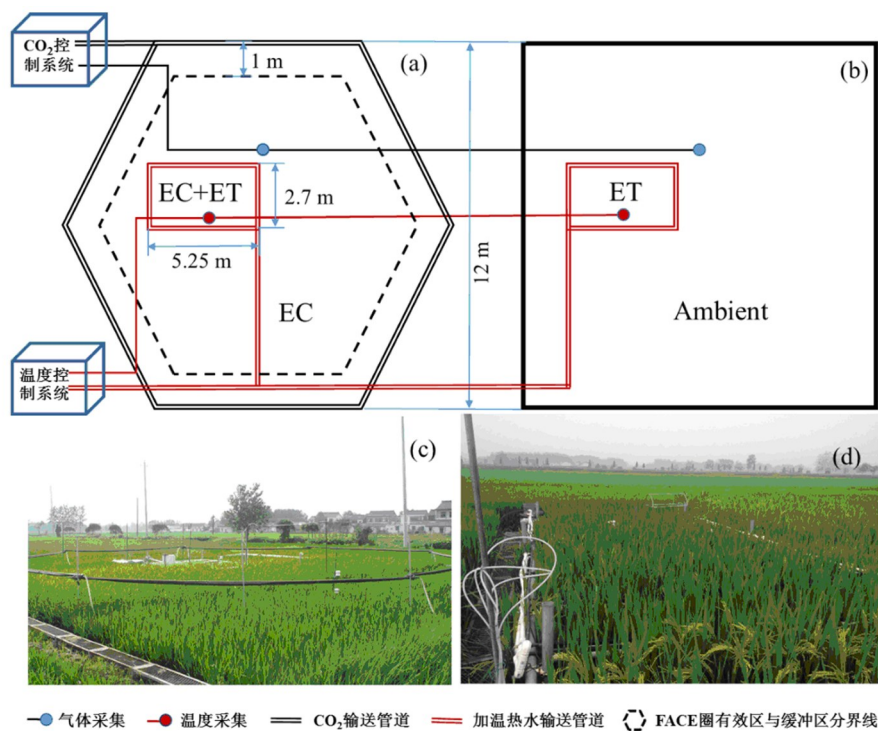
水稻  $\text{CO}_2$  熏蒸系统主要包括温室、温度梯度气室、开顶式气室以及后来发展起来的稻田开放式空气中  $\text{CO}_2$  浓度增高(Free Air  $\text{CO}_2$  Enrichment, FACE)<sup>[5]</sup>。其中,FACE 技术基于标准的作物管理措施,在空气自由流动的大田条件下对作物表现进行原位研究,提供了对未来作物生长环境的真实模

拟<sup>[14]</sup>。2013 年,中国科学家通过技术攻关,将原有的稻田 FACE 系统<sup>[15]</sup>升级改造为 T-FACE 试验平台,用于同时升高水稻冠层空气的  $\text{CO}_2$  浓度和温度<sup>[10]</sup>。本研究依托这一开放平台,以当地大面积推广的高产优质品种武运梗 23 为供试材料,设置对照(Ambient,环境空气)、 $\text{CO}_2$  浓度增高(比 Ambient 高 200  $\mu\text{mol/mol}$ )、温度增高(比 Ambient 高 2℃)和  $\text{CO}_2$  浓度与温度同时增高四个处理,各处理成熟期收获种子进行实验室标准发芽实验<sup>[16]</sup>,旨在比较不同  $\text{CO}_2$  浓度或/和高温环境生长的常规粳稻种子活力和发芽特性的差异。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验平台

试验于 2014 年在中国 T-FACE 研究技术平台上进行。该平台位于江苏省扬州市江都区小纪镇良种场试验田,试验田气象条件、土壤理化性质以及平台控制详见赖上坤等<sup>[17]</sup>和 Jing 等<sup>[10]</sup>。平台共有 3 个 FACE 试验圈和 3 个对照(Ambient)圈。FACE 圈设计为正八角形,直径 12 m,平台运行时通过 FACE 圈周围的管道向中心喷射纯  $\text{CO}_2$  气体,并在 FACE 和 Ambient 圈中特定位置加装热水增温管道,以热辐射形式向增温区域进行增温处理, $\text{CO}_2$  放气管的高度距作物冠层 50 cm 左右。利用计算机网络对平台  $\text{CO}_2$  浓度和水稻冠层温度进行监测和控制,根据大气中的  $\text{CO}_2$  浓度、风向、风速、作物冠层高度的  $\text{CO}_2$  浓度和温度自动调节  $\text{CO}_2$  气体的释放速度和方向以及增温管道中热水流速,使水稻主要生育期 FACE 圈内  $\text{CO}_2$  浓度保持比大气环境高 200  $\mu\text{mol/mol}$ ,所有圈内增温区域水稻冠层空气温度比大气环境温度高 2℃。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔>90 m,以减少  $\text{CO}_2$  释放对其他圈的影响。对照田块没有安装 FACE 管道,所有田块非增温区域没有安装热水增温管道,其余环境条件与自然状态一致(图 1)。



(a)－FACE 圈结构；(b)－Ambient 圈结构；(c)－FACE 圈全景；(d)－增温区域；Ambient－环境空气(对照)；EC－大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高；ET－温度升高；EC+ET－大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。  
(a), Structure of FACE ring; (b), Structure of ambient ring; (c), FACE plot; (d), Elevated temperature plot; Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature.

图 1 中国稻田 T-FACE 平台总体运行环境

Fig.1. Sketch map of China T-FACE platform in paddy field.

1.2 试验材料和处理

供试品种为高产优质常规粳稻品种武运梗 23，大田早育秧，5 月 20 日播种，6 月 21 日移栽，24 穴/m<sup>2</sup>，每穴栽 2 株，秧苗均为 1 蘖苗。总施氮量为 22.5 g/m<sup>2</sup>，其中基肥占 40% (6 月 20 日施用)；30% 作分蘖肥 (6 月 28 日)，30% 作穗肥 (7 月 25 日)。P、K 肥用量均为 9 g/m<sup>2</sup>，全作基肥施用。6 月 21 日－7 月 20 日保持水层 (约 3 cm)，7 月 21 日－8 月 10 日多次轻搁田，8 月 11 日－收获前 10 日间隙灌溉之后断水至收获。及时防治病虫害，保证水稻正常生长。试验为裂区设计，主区为 CO<sub>2</sub> 处理，设大气背景 CO<sub>2</sub> 浓度 (AC, ambient CO<sub>2</sub>，约 395 μmol/mol) 和高 CO<sub>2</sub> 浓度 (EC, elevated CO<sub>2</sub> concentration，比大气背景 CO<sub>2</sub> 浓度高 200 μmol/mol) 2 个水平。裂区为温度处理，设大气环境温度 (AT, ambient temperature) 和高温 (ET, elevated temperature，比环境温度高 2℃) 2 个水平。CO<sub>2</sub> 熏气和温度开始于 6 月 28 日，结束于 10 月 15 日。FACE 圈每日熏气时间及温度处理时间为日出至日落。

1.3 测定内容与方法

各小区于成熟期连续割取 2~3 m<sup>2</sup> 水稻，经脱粒机脱粒后风干，用于标准实验室种子发芽实验。随机挑选干燥健康饱满大小相同的种子，每个小区 100 粒，称重 (W<sub>1</sub>)。然后将种子分别倒入 100 mL 的小烧杯内，加入浓度为 1% 的次氯酸钠 50 mL 消毒 5 min，再用清水冲洗。彻底洗干净后，在小烧杯内加入 50 mL 的自来水，在常温环境中浸种 24 h，同时设置 2 个空白对照，用保鲜膜将烧杯口封住防止水分蒸发。24 h 后 (此时为试验第 1 天)，用电导率仪测定浸出液和空白对照中的电导率。

浸出液电导率 (μS/cm) = 测定值 - 空白对照值。

然后取出种子，用吸水纸擦干表面水分，再次称量 (W<sub>2</sub>)。以每 g 干种子的吸水量衡量吸胀速度。

吸胀速度 (g/g) = (W<sub>2</sub> - W<sub>1</sub>) / W<sub>1</sub>，W<sub>1</sub> 为种子干质量，W<sub>2</sub> 为浸种 24 h 后种子的质量。

之后将浸种 24 h 后的种子放入垫有两层滤纸的培养皿 (直径 15 cm) 中，培养皿中水分的高度达

到种子的 1/3,平铺(每粒种子间距相同),加盖(防止水分散失过快),放在实验室内常温培养。

从第 2 天开始每天统计露白个数和发芽个数(以根长达到种子长度,芽长达到种子长度一半作为发芽的标准)。第 3 天将达到发芽标准的种子转移到蓝色周转箱内(实验室常温水培),剩下的继续在培养皿内培养,继续统计露白和发芽个数。

露白率(%)=(5 d 露白种子总数/供试种子总数)×100;

发芽率(%)=(5 d 发芽种子总数/供试种子总数)×100;

发芽势(%)=(萌发前 3 d 的发芽数之和/供试种子总数)×100;

发芽指数  $GI=\sum(G_i/D_i)$ ,式中  $G_i$  为在不同时间内的发芽数, $D_i$  为对应的发芽日数。

第 5 天从蓝色周转箱内的每个重复分别随机挑选具有代表性的 10 粒种子,用数字化扫描仪(STD1600 Epson USA)将全部种子的根和芽的图像扫入计算机内,之后采用与扫描仪配套的 WinRHIZO (Version 5.0a) 根系分析系统(WinRhizo Regent Instruments, Canada)分析,获得芽(芽长、芽表面积、芽平均直径和芽体积)和根系(根长、根表面积、根平均直径和根系体积)性状。

活力指数  $AGR=GI\times SL$ ,GI 代表第 5 天发芽指数,SL 代表第 5 天的芽长与根长之和。

1.4 统计分析方法

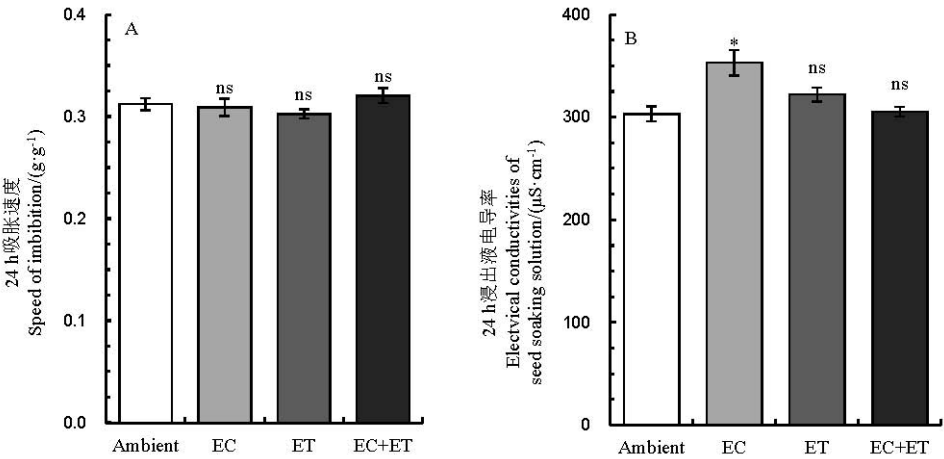
本研究所有数据均以 Excel 2010 进行处理和图表绘制。以 SPSS 18.0 进行二因素裂区方差分析,采用一般线性模型,以 CO<sub>2</sub>、温度为固定因子,以小区重复为随机因子。各处理的比较均采用最小显著差法(LSD),凡超过 LSD<sub>0.01</sub>、LSD<sub>0.05</sub> 和 LSD<sub>0.1</sub> 水平的视为极显著(或 0.01 显著)、显著(或 0.05 显著)和接近显著(或 0.1 显著)。

2 结果与分析

2.1 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻种子 24 h 吸胀速度和浸种 24 h 的浸出液电导率的影响

大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对常规稻武运粳 23 种子 24 h 吸胀速度的影响示于图 2-A。与环境空气相比,单独 CO<sub>2</sub> 浓度升高、温度升高使种子 24 h 吸胀速度略降,CO<sub>2</sub> 浓度和温度同时升高使种子 24 h 吸胀速度略增,但均未达显著水平。方差分析表明,CO<sub>2</sub> 浓度和温度处理对该粳稻品种种子 24 h 吸胀速度均无显著影响,但 CO<sub>2</sub> 与温度间存在微弱的互作效应( $P<0.15$ ,表 1)。

CO<sub>2</sub> 和温度处理对武运粳 23 种子浸种 24 h 浸



Ambient—环境空气(对照); EC—大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高; ET—温度升高; EC+ET, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。ns—不显著; \*—表示与对照相比差异达 0.05 显著水平。最小显著法( $n=3$ )。下同。

Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature. ns, No significant difference; \*, Significant difference at 0.05 level compared with ambient air by LSD( $n=3$ ). The same as below.

图 2 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子浸种 24 h 吸胀速度(A)和浸种 24 h 浸出液电导率(B)的影响

Fig. 2. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on seed imbibition speed(A) and electrical conductivities of seed soaking solution(B) for Wuyunjing 23 after 24 hour soaking.

表 1 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子活力参数的显著性检验

Table 1. Analysis of variance for seed vigor properties of Wuyunjing 23 in response to elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature.

项目 Items	来源 Source	自由度 <i>df</i>	总均方 Total MS	均方 Mean square	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
浸种 24 h 吸胀速度 Speed of imbibition (24h)	CO <sub>2</sub>	1	0.0	0.0	1.3	0.288
	温度 Temperature	1	0.0	0.0	0.0	0.886
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	0.0	0.0	2.6	0.145
浸出液电导率 Electrical conductivities of seed soaking solution	CO <sub>2</sub>	1	833.3	833.3	4.1	0.077
	温度 Temperature	1	616.3	616.3	3.1	0.119
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	3333.3	3333.3	16.5	0.004
露白率 Sprouting rate	CO <sub>2</sub>	1	60.8	60.8	8.3	0.021
	温度 Temperature	1	18.8	18.8	2.6	0.148
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	18.8	18.8	2.6	0.148
发芽率 Germination rate	CO <sub>2</sub>	1	108.0	108.0	10.5	0.012
	温度 Temperature	1	0.3	0.3	0.0	0.861
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	21.3	21.3	2.1	0.187
发芽势 Germination potential	CO <sub>2</sub>	1	85.3	85.3	5.3	0.051
	温度 Temperature	1	0.0	0.0	0.0	1.000
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	65.3	65.3	4.0	0.080
发芽指数 Germination index	CO <sub>2</sub>	1	187.0	187.0	8.7	0.019
	温度 Temperature	1	0.3	0.3	0.0	0.906
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	64.7	64.7	3.0	0.122
活力指数 Seed vigor index	CO <sub>2</sub>	1	63372.8	63372.8	3.3	0.109
	温度 Temperature	1	12948.9	12948.9	0.7	0.439
	CO <sub>2</sub> × 温度 CO <sub>2</sub> × Temperature	1	1202.9	1202.9	0.1	0.810

出液电导率的影响示于图 2-B。与环境空气相比，单独 CO<sub>2</sub> 浓度升高使种子浸出液电导率平均增加 16.5%，达显著水平。单独温度升高以及 CO<sub>2</sub> 浓度与温度同时升高使种子浸种 24 h 浸出液电导率平均分别增加 6.3% 和 0.8%，均未达显著水平。方差分析表明，高温处理对种子浸出液电导率没有影响，但 CO<sub>2</sub> 处理及其与温度处理的互作对该参数的影响分别达 0.1 和 0.01 显著水平(表 1)。

2.2 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻种子露白率、发芽率和发芽势的影响

图 3 为武运粳 23 种子露白率、发芽率和发芽势的测定结果。与环境空气相比，CO<sub>2</sub> 浓度升高、温度升高以及两者同时升高使上述三个参数均呈下降趋势。其中，CO<sub>2</sub> 浓度升高使武运粳 23 种子露白率、发芽率和发芽势分别下降 7.8% ( $P = 0.02$ )、10.0% ( $P = 0.03$ ) 和 17.4% ( $P = 0.02$ )，温度升高使露白率、发芽率和发芽势分别下降 5.6% ( $P = 0.03$ )、3.9% ( $P = 0.19$ ) 和 8.1% ( $P = 0.07$ )，CO<sub>2</sub> 浓度和温度同时升高使对应参数分别下降 7.8% ( $P = 0.06$ )、7.3% ( $P = 0.12$ ) 和 9.3% ( $P = 0.23$ )。方差分析表明，CO<sub>2</sub> 处理对武运粳 23 种子露白率，发芽率和发芽势的影响均达显著水平，温度处理仅

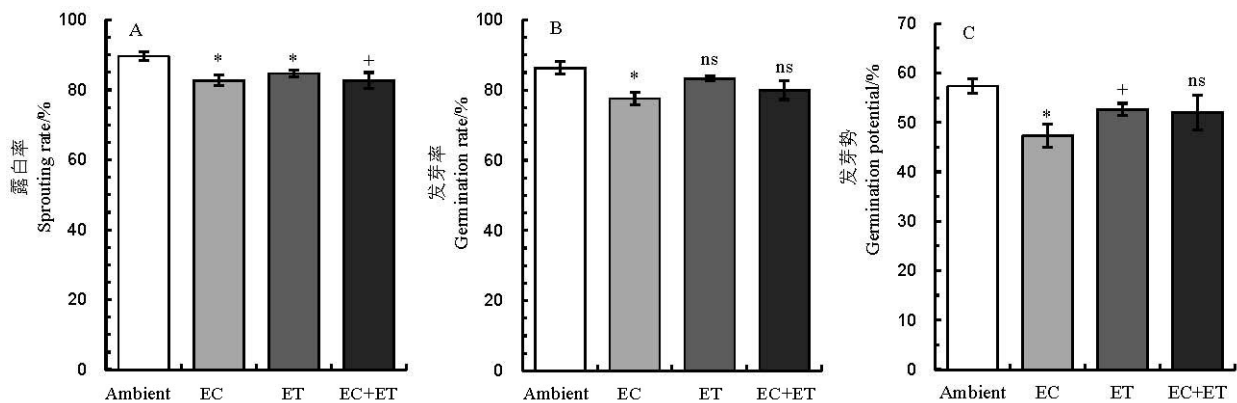
对种子露白率有微弱的影响( $P = 0.15$ )，而两处理的互作对以上三个参数均有一定程度的影响(表 1)。

2.3 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻种子发芽指数的影响

武运粳 23 种子发芽指数对 CO<sub>2</sub> 和温度处理的影响示于图 4。与环境空气相比，CO<sub>2</sub> 浓度升高以及 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同时升高使发芽指数分别下降 3.1 和 1.2，降幅分别为 8.9% ( $P = 0.17$ ) 和 3.6% ( $P = 0.50$ )，而高温处理对种子发芽指数几乎没有影响。方差分析表明，CO<sub>2</sub> 处理对种子发芽指数的影响达显著水平，CO<sub>2</sub> 与温度处理间亦存在微弱的互作效应( $P = 0.12$ )，但温度处理对该参数没有影响(表 1)。

2.4 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻种子活力指数的影响

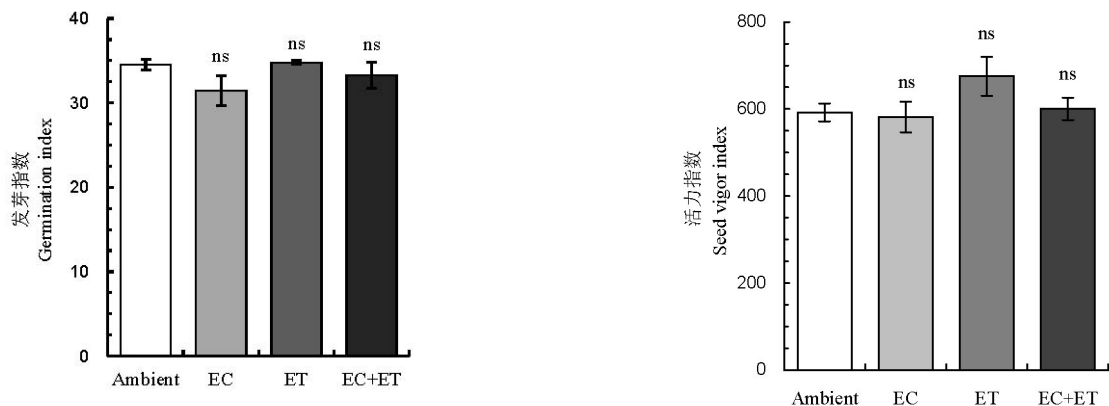
大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子活力指数的影响见图 5。与环境空气相比，CO<sub>2</sub> 浓度升高、CO<sub>2</sub> 浓度与温度同时升高使种子活力指数平均分别下降 1.8% 和 1.4%，未达显著水平。相反，温度升高使种子活力指数平均增加 14.0% ( $P = 0.17$ )。方差分析表明，CO<sub>2</sub> 处理对种子活力指数的



Ambient—环境空气(对照); EC—大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高; ET—温度升高; xEC+ET—大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。ns—不显著; +, \* 分别表示与对照相比差异达 0.1, 0.05 显著水平。

Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature. ns, No significant difference; + and \* indicate significant difference at 0.1 and 0.05 levels compared with ambient air, respectively.

图 3 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子露白率(A)、发芽率(B)和发芽势(C)的影响  
Fig. 3. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on sprouting rate(A), germination rate(B) and germination potential(C) of Wuyunjing 23.



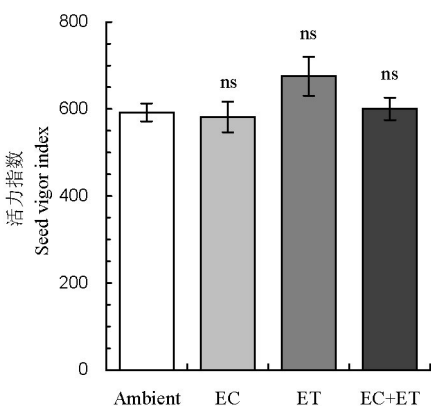
Ambient—环境空气(对照); EC—大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高; ET—温度升高; EC+ET—大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。ns 表示与对照相比无显著差异。

Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature; ns, No significant difference compared with ambient air.

图 4 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子发芽指数的影响

Fig. 4. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on germination index of Wuyunjing 23.

影响接近显著水平,但温度处理以及 CO<sub>2</sub> 浓度的互作对活力指数均无显著影响(表 1)。



Ambient—环境空气(对照); EC—大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高; ET—温度升高; EC+ET—大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。ns 表示与对照相比无显著差异。

Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature; ns, No significant difference compared with ambient air.

图 5 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子活力指数的影响

Fig. 5. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on seed vigor index of Wuyunjing 23.

2.5 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻种子发芽后根系和芽生长的影响

大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子根



表 2 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子发芽后根系参数的影响

Table 2. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on root parameters of Wuyunjing 23 after germination.

处理 Treatment	根长 Root length /cm	根表面积 Root surface area /cm <sup>2</sup>	根平均直径 Root average diameter/mm	根系体积 Root volume /cm <sup>3</sup>
Ambient	13.93±0.77	0.64±0.06	0.48±0.04	0.024±0.004
EC	15.01±0.67	0.70±0.02	0.46±0.01	0.025±0.000
ET	16.06±1.04	0.67±0.04	0.42±0.01	0.022±0.002
EC+ET	14.86±0.08	0.64±0.04	0.43±0.02	0.022±0.002
ANOVA 结果 ANOVA results				
CO <sub>2</sub>	0.733	0.720	0.836	0.744
温度 Temperature	0.356	0.582	0.804	0.789
CO <sub>2</sub> ×温度 CO <sub>2</sub> ×Temperature	0.103	0.085	0.272	0.108

Ambient—环境空气(对照);EC—大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高;ET—温度升高;EC+ET—大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。  
Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature.

表 3 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对武运粳 23 种子发芽后芽参数的影响

Table 3. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on sprout parameters of Wuyunjing 23 after germination.

处理 Treatment	芽长 Sprout length /cm	芽表面积 Sprout surface area/cm <sup>2</sup>	芽平均直径 Sprout average diameter/mm	芽体积 Sprout volume /cm <sup>3</sup>
Ambient	3.25±0.15	0.26±0.01	0.79±0.01	0.016±0.001
EC	3.50±0.05	0.28±0.00	0.81±0.01	0.018±0.000
ET	3.35±0.14	0.27±0.02	0.81±0.02	0.017±0.001
EC+ET	3.18±0.09	0.25±0.01	0.80±0.03	0.016±0.001
ANOVA 结果 ANOVA results				
CO <sub>2</sub>	0.938	0.733	0.978	0.761
温度 Temperature	0.212	0.712	0.063	0.242
CO <sub>2</sub> ×温度 CO <sub>2</sub> ×Temperature	0.157	0.378	0.472	0.837

Ambient—环境空气(对照);EC—大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高;ET—温度升高;EC+ET—大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度同步升高。  
Ambient, Ambient air (Control); EC, Elevated CO<sub>2</sub> concentration; ET, Elevated temperature; EC+ET, Elevated CO<sub>2</sub> concentration and elevated temperature.

系性状的影响示于表 2。与环境空气相比,CO<sub>2</sub> 浓度升高、温度升高以及两者同时升高处理使种子根长、根表面积均呈增加趋势,使根平均直径略降,但对根体积的影响因处理而异,上述影响均未达显著水平。方差分析亦表明,CO<sub>2</sub> 处理、温度处理及其互作效应对上述参数的影响均未达显著水平。

大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对种子芽长、芽表面积、芽平均直径和芽体积的影响列于表 3。方差分析表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度、高温以及两者互作对这些生长参数的影响均未达显著水平。

3 讨论

种子浸出液的电导率可以反映种子质量的好坏,质量好的电导率相对较小,而质量差的电导率则较高<sup>[18]</sup>。作物种子浸出液的电导率一般和发芽率负相关<sup>[19]</sup>。Saha 等<sup>[20]</sup> 报道,580 μmol/mol CO<sub>2</sub> 浓

度使鹰嘴豆种子浸出液电导率增加了 10%~17%,而发芽率降低了 45%~47%。相似地,本研究发现,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高 200 μmol/mol 使粳稻武运粳 23 种子在浸种 24 h 后,细胞膜的通透性增大,导致浸出液电导率增加了 17%(图 2),发芽率相应地降低了 10%(图 3),这与前人在其他作物上研究结果一致<sup>[20]</sup>。

种子的露白率、发芽势、发芽指数和活力指数是种子活力的几个重要指标,可以反映种子的生长潜力。前人研究发现,种子活力的下降必然伴随发芽势和发芽率的下降<sup>[21]</sup>。孙仁毅等<sup>[22]</sup> 报道,种子的活力指数与发芽率和发芽指数呈正相关。高 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[11,20]</sup> 和高温<sup>[23,24]</sup> 都有可能影响种子的活力指数。例如 Saha 等<sup>[20]</sup> 报道,CO<sub>2</sub> 浓度升高使鹰嘴豆的发芽率降低了 45%~47%,但亦有不同的报道<sup>[11]</sup>。在本研究中,高 CO<sub>2</sub> 浓度使武运粳 23 种子的露白率

(-8%)、发芽势(-17%)、发芽指数(-9%)和活力指数(-2%)均呈下降趋势,前两者达差异显著水平。结合种子浸出液电导率和发芽率的变化可知,未来高 CO<sub>2</sub> 浓度环境下生长的水稻,其种子活性明显下降。我们对该品种谷壳厚度的测定结果表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度使这一参数平均增加了 30.8%,达显著水平。与谷壳较薄的种子相比,厚壳种子会影响氧气的扩散,导致呼吸作用减弱,进而影响种子萌发时胚乳养分和蛋白的释放和利用<sup>[25]</sup>。另一方面,高 CO<sub>2</sub> 浓度环境下生长的水稻籽粒通常微量元素和蛋白质均呈明显的下降趋势<sup>[7]</sup>,而这些物质在促进细胞分裂和扩展以及幼苗生长中均有重要作用<sup>[13]</sup>。同季米质测定发现,高 CO<sub>2</sub> 浓度使武运粳 23 糙米总蛋白、清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白浓度均显著下降<sup>[10]</sup>。因此,高 CO<sub>2</sub> 浓度环境条件下水稻种子发芽能力明显下降可能主要与谷壳变厚但种子蛋白和微量元素浓度变小密切相关。需要指出的是,高 CO<sub>2</sub> 浓度对水稻种子物理和化学性状的影响存在基因型差异<sup>[6,7]</sup>,因此,本研究结果还需多年多品种研究的验证。

关于高温对作物种子发芽特性的影响,结实期温度升高使种子的发芽率和发芽势显著下降与前人对春小麦<sup>[23,24]</sup>和春大豆<sup>[26]</sup>报道一致。本研究表明,与环境空气相比,高温条件下生长的水稻,其露白率、发芽率、发芽势和发芽指数均呈下降趋势,但降幅小于 CO<sub>2</sub> 处理,只有露白率和发芽势的降幅分别达 0.05 和 0.1 显著水平(图 3)。这一现象,可能与高温处理影响籽粒灌浆,使淀粉酶等与种子发芽相关酶的活性降低,进而导致种子质量下降有关<sup>[9]</sup>。与单独增温相似,将水稻同时暴露于高 CO<sub>2</sub> 浓度和高温环境中,生产出来的种子露白率、发芽率、发芽势和发芽指数均呈下降趋势,但这些降幅略大于单独增温处理。

本研究同时设置了高 CO<sub>2</sub> 浓度、高温和两者同时增高的处理,因此可以了解 CO<sub>2</sub> 浓度和温度间的互作效应。方差分析表明,对种子浸种 24 h 浸出液电导率、露白率、发芽率、发芽势和发芽指数而言,CO<sub>2</sub> 浓度与温度处理间均表现出一定程度的互作效应。例如,高 CO<sub>2</sub> 浓度使环境生长温度下种子浸出液电导率显著增加,但高温条件下略有下降(图 2);对种子露白率、发芽率和发芽势而言,高 CO<sub>2</sub> 浓度使环境温度下生长的水稻显著下降,但对高温胁迫水稻的影响未到显著水平(图 3)。可见,一定范围

内的增温可减轻高 CO<sub>2</sub> 浓度对水稻种子发芽的负面影响,这一现象可能与高 CO<sub>2</sub> 浓度和高温互作对水稻籽粒生长的影响有关。如前所述,高 CO<sub>2</sub> 浓度通常促进水稻籽粒灌浆,使籽粒增大增重<sup>[6,11]</sup>,但高温胁迫条件下高 CO<sub>2</sub> 浓度的这种促进作用减弱,导致高 CO<sub>2</sub> 浓度的“稀释效应”减小(表现在稻米微量元素和蛋白质浓度降幅减小)<sup>[27]</sup>,进而减轻对种子发芽的负面影响。当然这一推论还需进一步的试验证实。有趣的是,尽管高 CO<sub>2</sub> 浓度对环境温度下水稻的发芽活性有明显的影响,但对芽和根系相关性状均无显著影响(表 2 和表 3),这与 Edwards 等<sup>[28]</sup>对牧草种子的研究结果基本一致,但这一结果是否与本研生长周期较短有关,尚需进一步探明。

本研究利用最新的稻田 T-FACE 熏蒸技术,同时增高水稻冠层空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度和温度,首次研究了粳稻品种武运粳 23 种子活力是否受高 CO<sub>2</sub> 浓度和/或高温的影响。结果发现,大气 CO<sub>2</sub> 浓度增高 200 μmol/mol 使粳稻成熟种子露白率、发芽率、发芽势、发芽指数和种子活力指数均呈明显的下降趋势,但气温同时增高条件下这种负面影响变小,表现在 CO<sub>2</sub> 浓度与温度间存在一定程度的互作效应。需要指出的是,这只是一个品种种子活力对大气 CO<sub>2</sub> 和气温升高的响应,还需要更多的研究工作去明确这种响应的基因型差异及其内在生理机制,目前这些工作正在进行之中。

致谢:感谢中国科学院南京土壤研究所刘钢和唐昊冶老师对 FACE 系统的日常维护;感谢赖上坤博士为本文提供 FACE 平台图片。

## 参考文献:

- [1] NOAA. Trends in atmospheric carbon dioxide. [30.12.14]. <http://www.ersl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.
- [2] Change C. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Houghton J T, Meira F L G, Callander B A, et al. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.
- [4] FAO. FAOSTAT database 2010. [14.07.10]. <http://www.fao.org/fishery/org/GlobalRecord/en>.
- [5] 杨连新, 王云霞, 朱建国, 等. 十年水稻 FACE 研究的产量响应. 生态学报, 2009, 29 (3): 1486-1497.  
Yang L X, Wang Y X, Zhu J G, et al. What have we learned from 10 years of Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) experi-



- ments on rice CO<sub>2</sub> and grain yield. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29 (3): 1486-1497. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨连新, 王云霞, 朱建国, 等. 开放式空气中 CO<sub>2</sub> 浓度增高 (FACE) 对水稻生长和发育的影响. *生态学报*, 2010, 30(6): 1573-1585.
- Yang L X, Wang Y X, Zhu J G, et al. What have we learned from 10 years of Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) experiments on Growth and development. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30 (6): 1573-1585. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wang Y X, Frei M, Song Q L, et al. The impact of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration enrichment on rice quality -A research review. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31: 277-282.
- [8] 段骅, 杨建昌. 高温对水稻的影响及其机制的研究进展. *中国水稻科学*, 2012, 26(4): 393-400.
- Duan Y, Yang J C. Research advances in the effect of high temperature on rice and its mechanism. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(4): 393-400. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang Y X, Michael F. Stressed food: The impact of abiotic environmental stresses on crop quality (review). *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 141: 271-286.
- [10] Jing L Q, Wang J, Sheng S B, et al. The impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on grain quality of rice grown under open-air field conditions. *J Agric Food Chem*, 2016, 96: 3658-3667.
- [11] Chen C, Qian J, Lewis H Z, et al. Seed vigor of contrasting rice cultivars in response to elevated carbon dioxide. *Field Crop Res*, 2015, 178: 63-68.
- [12] Hampton J G, Boelt B, Rolston M P, et al. Producing quality seed: The problem of seed vigour. *Spec PublAgr Soc NZL*, 2000(12): 53-61.
- [13] Rajjou L, Duval M, Gallardo K, et al. Seed germination and vigor. *Annu Rev Plant Biol*, 2012, 63: 507-533.
- [14] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for Thought: Lower than expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science*, 2006, 312: 1918-1921.
- [15] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台: I. 系统结构与控制. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1253-1258.
- Liu G, Han Y, Zhu J G, et al. Rice-wheat rotational Face platform: I. System structure and control. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(10): 1253-1258. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘子凡. 种子学实验指南. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- Liu Z F. Seed Science: A Laboratory Manual. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 赖上坤, 庄时腾, 吴艳珍, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对超级稻生长发育的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1253-1262.
- Lai S K, Zhuang S T, Wu Y Z, et al. Impact of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on growth development of super rice. *Chin J Ecol*, 2015, 34(5): 1253-1262. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张玉荣, 贾少英, 周显青. 糙米储藏品质评价数学模型的建立. *河南工业大学学报*, 2011, 32(6): 1-7.
- Zhang Y R, Jia S Y, Zhou X Q. Establishment of a mathematical model for evaluating the storage quality of brown rice. *J Henan Tech Univ*, 2011, 32(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李永刚, 王正旭, 杨民峰, 等. 电导率法测定烟草种子发芽率的研究. *安徽农业科学*, 2008, 36(34): 15052, 15058.
- Li Y G, Wang Z X, Yang M F, et al. Study on method of tobacco seeds germination rate test by electrical conductivity. *J Anhui Agric Sci*, 2008, 36(34): 15052, 15058. (in Chinese with English abstract)
- [20] Saha S, Chakraborty D, Sehgal V K, et al. Rising atmospheric CO<sub>2</sub>: Potential impacts on chickpea seed quality. *AgrEcosyst-Environ*, 2015, 203: 140-146.
- [21] 章华仙. 水稻种子活力, 生活力检测方法 & 计算机视觉的应用研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- Zhang H X. Research on vigor, viability testing methods of rice (*Oryza Sativa L*) seed and computer vision application. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孙仁毅. 杂交水稻制种条件下种子活力影响因素的初步研究[学位论文]. 海口: 海南大学, 2013.
- Sun R Y. Preliminary study of the influence factors on seed vigor in hybrid rice seed production. Haikou: Hainan University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [23] 姚珊, 康建宏, 王学龙, 等. 花后不同时段高温对春小麦籽粒活力的影响. *西北农业学报*, 2013, 22(9): 41-47.
- Yao S, Kang J H, Wang X L, et al. The impact of different high temperature on grain viability after anthesis of spring wheat. *Acta Agric Bor-Occid Sin*, 2013, 22(9): 41-47. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李昱, 吴宏亮, 康建宏, 等. 花后高温干旱对春小麦种子活力的影响. *种子*, 2014, 33(2): 12-19.
- Li Y, Wu H L, Kang J H, et al. The effect of high temperature and drought after flowering on the seed viability of the spring wheat. *Seed*, 2014, 33(2): 12-19. (in Chinese)
- [25] Sun Q, Wang J, Sun B. Advances on seed vigor physiological and genetic mechanisms. *Agric Sci China*, 2007, 6(9): 1060-1066.
- [26] 舒英杰, 王爽, 陶源, 等. 生理成熟期高温高湿胁迫对春大豆种子活力、主要营养成分及种皮结构的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1380-1386.
- Shu Y J, Wang S, Tao Y, et al. Effects of high temperature and humidity stress at the physiological maturity stage on seed vigor, main nutrients and coat structure of spring soybean. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(5): 1380-1386. (in Chinese with English abstract)
- [27] 景立权, 赖上坤, 王云霞, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度互作对水稻生长发育的影响研究进展. *生态学报*, 2016, 36(14): 10. 5846/stxb201412272588.
- Jing L Q, Lai S K, Wang Y X, et al. Combined effect of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on growth and development of rice: A research review. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(14): 10. 5846/stxb201412272588. (in Chinese with English abstract)
- [28] Edwards G R, Clark H, Newton P C D. The effects of elevated CO<sub>2</sub> on seed production and seedling recruitment in a sheep-grazed pasture. *Oecologia*, 2001, 127: 383-394.