

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.007

张继双, 陶冶, 宋练, 等. 年际环境温度变化驱动水稻产量及其构成对 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应差异. 土壤, 2022, 54(2): 262–269.

# 年际环境温度变化驱动水稻产量及其构成对 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应差异<sup>①</sup>

张继双<sup>1,2</sup>, 陶 冶<sup>1,2</sup>, 宋 练<sup>1</sup>, 蔡 创<sup>1</sup>, 刘 钢<sup>1</sup>, 朱春梧<sup>1\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 大气 CO<sub>2</sub> 浓度([CO<sub>2</sub>])和温度升高是未来气候变化的主要情境, 阐明水稻产量及其构成对[CO<sub>2</sub>]和温度升高的响应, 是助力农业生产应对气候变化的重要组成部分。本文基于开放式[CO<sub>2</sub>]和温度升高(elevated temperature and CO<sub>2</sub>-free air controlled enrichment, T-FACE)试验平台的多年水稻生产数据, 探讨了未来[CO<sub>2</sub>]和温度升高对水稻产量和产量构成的影响。结果表明: 与对照(CT)相比, 高[CO<sub>2</sub>] (C<sup>+</sup>T) 处理提高了水稻有效穗数和结实率, 使水稻增产 11.1% 左右(5 年平均); 增温(CT<sup>+</sup>) 1 ~ 2℃ 减少了有效穗数和穗粒数, 使水稻产量下降 10% ~ 25%; 高[CO<sub>2</sub>]和增温互作 (C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>)处理使水稻产量下降约 10%, 即高[CO<sub>2</sub>]并未完全抵消温度升高带来的负效应。多年试验数据比较发现, 相同处理对产量的影响趋势较为一致, 但年际差异明显。随着年际生育期环境温度的不断升高, 水稻产量均呈不断下降趋势, 且增温处理(CT<sup>+</sup>、C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>)进一步降低水稻产量, 但环境温度较低年份水稻产量比环境温度较高年份降幅低, 因此环境温度的年际波动可能是影响水稻产量变化的重要因素。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 浓度升高; 温度升高; 水稻; 产量

**中图分类号:** S511 ; Q143 **文献标志码:** A

## Interannual Ambient Temperature Shift Caused Varied Responses of Rice Yield and Its Components to Elevated CO<sub>2</sub> and Temperature

ZHANG Jishuang<sup>1,2</sup>, TAO Ye<sup>1,2</sup>, SONG Lian<sup>1</sup>, CAI Chuang<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, ZHU Chunwu<sup>1\*</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The rising of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration([CO<sub>2</sub>])and temperature are the main scenarios for future climate change. Clarifying the response of rice yield and its components to elevated [CO<sub>2</sub>] and temperature is an important part of agricultural production to cope with climate change. In this study, the effects of elevated [CO<sub>2</sub>] and temperature on rice yield and its components were discussed based on the multi-year rice production data from a fully open-elevated temperature and CO<sub>2</sub>-free air-controlled enrichment (T-FACE). The results showed high [CO<sub>2</sub>] treatment (C<sup>+</sup>T) increased rice yield by about 11.1% (5-year average) through enhancing the panicle number and seed setting rate. Increasing temperature (CT<sup>+</sup>) by 1–2℃ reduced the panicle number and spikelet number per panicle, resulting in a decrease of rice yield by 10%–25%. Rice yield decreased by about 10% under the combination of elevated CO<sub>2</sub> and temperature (C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>), indicating that the negative effect of elevated temperature was not completely offset by elevated [CO<sub>2</sub>]. Comparing the multi-year experimental data, it was found that the effect trend of the same treatment on yield was relatively consistent. However, the response of yield differed between years. With the increase of interannual ambient temperature during rice-growing, rice yield showed a decreasing trend, and warming treatment (CT<sup>+</sup>, C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>) further reduced rice yield, which increased the risk of grain yield reduction. Still, rice yield in the year with lower ambient temperature declined less than that in the year with higher ambient temperature. These findings suggest that the interannual shift of ambient temperature might be an important factor affecting rice yield.

**Key words:** Elevated CO<sub>2</sub>; Elevated temperature; Rice; Yield

①基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32001191; 31800359)和江苏省自然科学基金项目(BK2018402)资助。

\* 通讯作者(cwzhu@issas.ac.cn)

作者简介: 张继双(1990—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要研究气候变化对作物产量的影响。E-mail: jszhang@issas.ac.cn

自工业革命以来, 由于化石燃料的过度开采利用, 以及大规模的滥砍滥伐, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度([CO<sub>2</sub>]) 迅速增加, 温室效应加剧。美国国家海洋和大气管理局(NOAA) 监测数据显示, 目前大气[CO<sub>2</sub>] 已经达到约 415 μmol/mol, 较工业革命以前增加了约 100 μmol/mol<sup>[1]</sup>。IPCC 第五次评估报告指出, 全球平均地表气温较工业革命前增加了 0.85 °C<sup>[2]</sup>。预计到 21 世纪末, 大气[CO<sub>2</sub>] 将达到 421 ~ 936 μmol/mol, 全球平均地表气温将上升 0.3 ~ 4.8 °C<sup>[2]</sup>。

水稻作为最重要的粮食作物之一, 为全世界半数以上特别是亚洲地区人口提供食物。有研究表明, 预计到 2050 年, 水稻产量需要增加近 30%, 才能满足人口增长引起的粮食需求<sup>[3]</sup>。然而, 未来全球气候变化的不确定性将会对水稻生产产生深刻的影响<sup>[4]</sup>, 特别是大气[CO<sub>2</sub>] 和地表平均温度的升高会对水稻生长和生理过程产生直接影响<sup>[5-7]</sup>。大量研究表明, 高[CO<sub>2</sub>] 有利于提高水稻的光合速率, 促进碳水化合物的合成和产量的提高<sup>[8-10]</sup>。Lv 等<sup>[11]</sup>发现, 大气[CO<sub>2</sub>] 升高 200 μmol/mol 可以使粳稻、籼稻和杂交稻产量分别提高 13.5%、22.6% 和 32.8%, 而水稻品种类型是决定穗粒数响应的主要因素。另一方面, 温度升高可加速水稻生育进程<sup>[12]</sup>, 降低水稻叶片光合速率, 增强气孔导度和呼吸作用, 加快对光合产物的消耗, 进而导致水稻减产<sup>[13]</sup>。此外, 在水稻籽粒数量决定时期(幼穗分化期和/或花期) 发生高温胁迫会导致小穗不孕, 造成谷粒数量下降<sup>[14]</sup>; Zhao 等<sup>[15]</sup>认为全球地表温度每升高 1 °C 会使水稻产量下降 3.2% ± 3.7%; 而王斌等<sup>[16]</sup>的研究结果表明, 在环境温度增加 2 °C 的情况下, 早稻产量会减少, 晚稻产量则呈增加的趋势, 但晚稻空秕率增加, 千粒重下降<sup>[17]</sup>。因此, 气候变暖可能有利于环境温度较低地区的水稻生产<sup>[18]</sup>。水稻生产对气候变暖的响应有必要考虑不同物候期的环境温度条件的影响。

未来大气[CO<sub>2</sub>] 和温度升高是协同发生的<sup>[2]</sup>, 单独[CO<sub>2</sub>] 或温度升高不足以解释全球气候变化对水稻生产的影响。关于[CO<sub>2</sub>] 和温度交互作用对水稻生产的影响已有报道, 但两者的综合效应及其与环境温度的关系尚未有明确结论<sup>[6, 17, 19]</sup>。且目前多数研究是在封闭或者半封闭式气室进行<sup>[20-23]</sup>, 仍缺乏自由大气[CO<sub>2</sub>] 和温度同时升高条件下的田间模拟试验。在未来全球气候变化下, 这类基础数据的不足会增加模型评估和预测的不确定性。因此, 需要更多的田间试验来模拟未来气候变化对水稻生产的影响, 为稻作生产实践提供合理性建议。

本研究依托自由大气[CO<sub>2</sub>] 和温度升高 (elevated temperature and CO<sub>2</sub>-free air controlled enrichment, T-FACE) 试验平台: 江都 T-FACE 平台和常熟 T-FACE 平台(两个台站环境条件类似), 以粳稻(*Oryza sativa* L.) 武运粳 23 和南粳 9108 为试验材料, 控制 FACE 圈[CO<sub>2</sub>] 始终比对照圈[CO<sub>2</sub>] 高 200 μmol/mol, 利用两种不同的增温方式(热水管道冠层增温和红外辐射冠层增温), 结合各站点多年试验背景温度, 探讨水稻生产对[CO<sub>2</sub>] 和温度升高交互作用的响应程度及其与环境温度的关系, 以期评估我国粮食安全提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区及平台设计

田间试验在两个 T-FACE 平台开展, 包括试验 I 和试验 II。

试验 I: 试验地点位于江苏省扬州市江都区小纪镇宗村(32°35'5"N, 119°42'0"E), 该地海拔高度 5 m, 属于典型的亚热带季风区, 年降水量 980 mm 左右, 年均蒸发量大于 1 100 mm, 年均温度 15 °C, 年均日照时长大于 2 100 h, 无霜期约 220 d。该区土壤类型为砂姜黑土, 土壤质地为砂壤, 耕作方式采用水稻-冬小麦轮作。耕层土壤基本理化性质为: 有机碳 18.4 g/kg, 全氮 1.45 g/kg, 有效磷 10.1 mg/kg, 速效钾 70.5 mg/kg。试验平台于 2004 年建成, 设有 3 个大气[CO<sub>2</sub>] 升高圈(FACE) 和 3 个对照圈(Ambient), 各圈间隔大于 90 m, 以减少 CO<sub>2</sub> 释放对其他圈的影响。FACE 圈设计为正八边形, 直径 14 m, 占地约 80 m<sup>2</sup>, 系统运行期间通过 FACE 圈周边管道向中心喷射纯 CO<sub>2</sub> 气体, 保持 FACE 圈白天[CO<sub>2</sub>] 比对照环境[CO<sub>2</sub>] 高 200 μmol/mol, CO<sub>2</sub> 放气管道距水稻冠层 50 cm 左右, 该平台的详细设计原理、运行模式等参见文献<sup>[24]</sup>。另外在 FACE 圈和对照圈特定位置设置增温管道(长 2.7 m, 宽 0.75 m), 增温管道距水稻冠层 20 cm 左右, 通过热水(60 ~ 70 °C) 的能量置换来增加冠层空气温度, 使白天增温区域温度比对照环境温度高 1 °C 左右<sup>[25]</sup>。对照圈没有铺设 CO<sub>2</sub> 放气管道和增温装置。本试验采用裂区设计, 主区为 CO<sub>2</sub> 处理, 裂区为温度处理, 共有 4 个不同的控制处理: ①正常大气[CO<sub>2</sub>] (C) 和温度处理(T), CT; ②高[CO<sub>2</sub>] (C<sup>+</sup>) 和正常温度处理(T), C<sup>+</sup>T; ③正常大气[CO<sub>2</sub>] (C) 和增温处理(T<sup>+</sup>), CT<sup>+</sup>; ④高[CO<sub>2</sub>] (C<sup>+</sup>) 和增温处理(T<sup>+</sup>), C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>, 每个处理 3 个重复。试验期间 T-FACE 平台实际布气和增温

处理时间如表 1 所示<sup>[25-26]</sup>。

试验Ⅱ：试验地点位于江苏省苏州常熟市古里镇康博村(31°30'N, 120°33'E)，该地海拔高度 6 m，典型的亚热带季风气候，年降水量 1 100~1 200 mm，年均温度 16℃，年均日照时长大于 2 100 h，无霜期大于 200 d。该区土壤类型为乌栅土，耕作方式为水稻-冬小麦轮作。耕层土壤基本理化性质为：有机碳 16 g/kg，全氮 1.9 g/kg，有效磷 12.3 mg/kg，速效钾 94.3 mg/kg。试验平台 2010 年建成，共设有 12 个试验小区，各小区均为正八边形，直径 8 m，占地约 50 m<sup>2</sup>。FACE 圈内 CO<sub>2</sub> 放气管道距水稻冠层 60 cm

左右，系统根据风速、风向和环境[CO<sub>2</sub>]来调整 FACE 圈[CO<sub>2</sub>]，使 FACE 圈白天[CO<sub>2</sub>]始终比对照环境[CO<sub>2</sub>]高 200 μmol/mol，该平台的设计原理、运行模式和性能等参见 Cai 等<sup>[6]</sup>。本试验的升温方式为红外辐射升温，每个增温圈均布设有 12 个红外辐射灯，红外辐射灯位于冠层 1.2 m 处，以避免对水稻造成灼伤。通过红外辐射升温，使增温圈昼夜冠层温度比对照环境温度高 2℃左右<sup>[6]</sup>。考虑环境的一致性，每个试验圈均布设红外灯罩和 CO<sub>2</sub> 放气管道。本试验共设置 4 个处理，同试验Ⅰ。试验期间该平台实际布气和增温处理时间如表 1 所示。

表 1 田间管理计划  
Table 1 Schedule of field management practice

| 农田管理措施 |     | 试验Ⅰ_江都    |           |           |           | 试验Ⅱ_常熟    |
|--------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|        |     | 2013 年    | 2014 年    | 2015 年    | 2016 年    | 2020 年    |
| 熏气设置   | 开始  | 7 月 19 日  | 6 月 27 日  | 6 月 25 日  | 6 月 25 日  | 6 月 24 日  |
|        | 结束  | 10 月 10 日 | 10 月 25 日 | 10 月 19 日 | 10 月 19 日 | 10 月 10 日 |
| 增温设置   | 开始  | 7 月 20 日  | 6 月 29 日  | 7 月 1 日   | 6 月 28 日  | 6 月 24 日  |
|        | 结束  | 10 月 10 日 | 10 月 25 日 | 10 月 19 日 | 11 月 2 日  | 10 月 10 日 |
| 水稻种植计划 | 育秧  | 5 月 21 日  | 5 月 20 日  | 5 月 20 日  | 5 月 20 日  | 5 月 27 日  |
|        | 移栽  | 6 月 22 日  | 6 月 21 日  | 6 月 17 日  | 6 月 17 日  | 6 月 23 日  |
|        | 收获  | 10 月 10 日 | 10 月 25 日 | 10 月 19 日 | 11 月 2 日  | 10 月 15 日 |
| 施肥方案   | 基肥  | 6 月 21 日  | 6 月 20 日  | 6 月 16 日  | 6 月 16 日  | 6 月 22 日  |
|        | 分蘖肥 | 6 月 28 日  | 6 月 28 日  | 7 月 1 日   | 6 月 29 日  | 7 月 4 日   |
|        | 穗肥  | 7 月 25 日  | 8 月 1 日   | 7 月 26 日  | 7 月 28 日  | 8 月 9 日   |

注：试验Ⅰ每日熏气时间为 6:00—18:00，每日增温时间为 9:00—18:00。

1.2 供试材料与栽培管理

试验Ⅰ：分别于 2013—2016 年水稻季进行，其中 2013—2014 年供试水稻(*Oryza sativa* L.)品种为武运粳 23 (WYJ-23)，2015—2016 年供试水稻品种为南粳 9108 (NG-9108)。4 个水稻季育秧和移栽日期如表 2 所示，种植密度为 24 穴/m<sup>2</sup>，2 株/穴。稻季总施氮量 22.5 g/m<sup>2</sup>，采用复合肥(有效成分 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=15-15-15)和尿素(含氮 467 g/kg)配施，其中基肥：分蘖肥：穗肥占比为 4：3：3；磷钾肥采用复合肥，均作为基肥施用，总施用量为 9 g/m<sup>2</sup>，于移栽前一天施用，施肥方案详见表 1。其他田间管理参照当地种植模式统一管理(水分、除草和病虫害防治)。

试验Ⅱ：于 2020 年水稻季进行，供试品种为武运粳 23 (WYJ-23)，5 月 27 日播种，6 月 23 日移栽，种植密度和试验Ⅰ保持一致，移栽后 12 d 和 48 d 分别施用复合肥(有效成分 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=15-15-15)，施肥方案详见表 1，并按照当地田间管理措施统一进行小区管理。

1.3 产量测定

试验Ⅰ：在成熟期，每个小区选取 48 穴或 50 穴水稻植株调查单位面积有效穗数并实收测产。根据平均有效穗数，另取有代表性 5 穴进行常规考种，测定每穗粒数、结实率和千粒重。其中结实率用水漂法来测定。试验Ⅱ：测量方法同试验Ⅰ。

1.4 数据处理

应用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析，采用单因变量多因素方法(univariate analysis of variance)研究[CO<sub>2</sub>]、温度和年份等对水稻产量与产量构成因素的影响，显著性水平为  $P<0.05$ 。利用 Microsoft Excel 2016 和 Origin pro 2021b 软件进行数据处理和作图。

2 结果与分析

2.1 试验期间田间环境条件

表 2 为试验期间水稻田内自然环境数据，包括水稻生长周期内最高空气温度、最低空气温度、平均空

气温度以及降雨量数据。从表 2 数据可以发现，试验 I 中年际间环境温度差异较大，最大温差达到 3℃，其中 2014 年和 2015 年稻季温度较低。2013—2016 年稻季降雨量分别为 326.7、172.9、604.6、635.7 mm，降雨天数分别为 31、52、45、36 d。造成年际间温度差异的原因很多，其中 2014 年和 2015 年在水稻生育期内阴雨天气较为普遍、降雨频率高，这可能是造成 2014 年和 2015 年环境温度偏低的原因之一。

表 2 试验期间气象数据  
Table 2 Meteorological data during the test

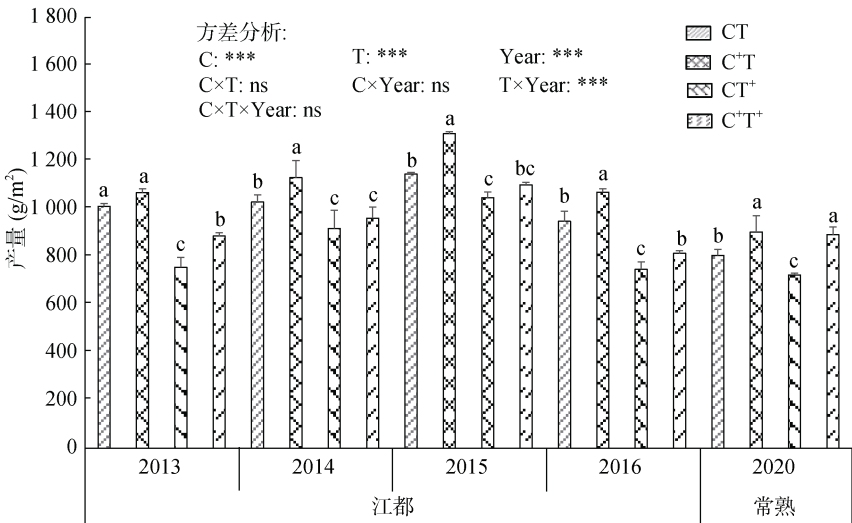
| 气象条件      |         | 试验 I_江都     |             |              |              | 试验 II_常熟     |
|-----------|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
|           |         | 2013 年      | 2014 年      | 2015 年       | 2016 年       | 2020 年       |
| 田间环境温度(℃) | 平均温     | 24.0(5.7)   | 21.5 (4.8)  | 21.7 (4.5)   | 24.7 (4.3)   | 25.1 (4.0)   |
|           | 最高温     | 28.0 (5.5)  | 25.0 (4.5)  | 25.5 (4.2)   | 28.0 (4.8)   | 29.1 (4.5)   |
|           | 最低温     | 20.3 (6.3)  | 18.3 (5.6)  | 18.1 (5.2)   | 21.7 (4.0)   | 22.0 (4.1)   |
| 田间实际降雨情况  | 降雨(mm)  | 326.7 (7.4) | 172.9 (4.9) | 604.6 (14.1) | 635.7 (15.9) | 571.4 (12.4) |
|           | 降雨天数(d) | 31          | 52          | 45           | 36           | 44           |

注：表中数值为“平均值(标准偏差)”，下同。

2.2 T-FACE 下水稻的产量及产量构成变化

2.2.1 水稻产量 由图 1 可以看出，水稻产量对各处理响应存在差异。与对照(CT)相比，高[CO<sub>2</sub>] (C<sup>+</sup>T) 处理增加了水稻产量，增幅为 11.1% (5 年平均)；试验 I 中增温(CT<sup>+</sup>)1℃减少了水稻产量 16.1%，试验 II 中增温 2℃减少水稻产量 10.2%，均达到显著差异水平，两试验平均即增温 1~2℃，水稻产量下降 15.1% (图 1)；而[CO<sub>2</sub>]和温度升高互作(C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>)处理条件下，试验 I 和试验 II 中水稻产量分别下降了 9% 和

10.7%，[CO<sub>2</sub>]升高的积极作用并未完全抵消由于温度升高带来的负效应，甚至加剧了温度升高的负效应。各试验季水稻产量的变化趋势基本一致(图 1)，除 2020 年 C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>处理大于 CT 处理外，水稻产量增幅遵循 C<sup>+</sup>T>CT>C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>>CT<sup>+</sup>，但年际间水稻产量变化仍存在差异，这种变化可能与年际间环境条件差异有一定关系。从表 2 中可以看出，年际环境温度存在较大变化，而温度是影响水稻生产的关键因素，因此，下文着重从环境温度与水稻产量的关系入手进行探讨。



(柱图上方不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )；方差分析中，C、T、Year 分别表示[CO<sub>2</sub>]处理、温度处理和年份；\*、\*\*、\*\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$  水平影响显著，ns 表示无显著影响( $P>0.05$ )，下同)

图 1 大气[CO<sub>2</sub>]和温度升高下水稻的产量变化

Fig. 1 Changes in rice yield under elevated CO<sub>2</sub> and temperature

2.2.2 水稻产量构成 由表 3 可知，大气[CO<sub>2</sub>]和温度升高对水稻产量构成产生一定影响，虽年际间差异明显，但不同处理间变化趋势较为相似(表 3)。5 年平均结果显示，高[CO<sub>2</sub>]提高了水稻有效穗数，为

11.5%，对水稻千粒重(提高约 2.7%)、结实率(提高约 3.9%)以及穗粒数(减少约 2.8%)影响较小；增温主要通过减少有效穗数(约 10.1%)和穗粒数(约 3.5%)，显著减少了水稻产量(图 1 和表 3)；大气[CO<sub>2</sub>]和温度升

表 3 大气[CO<sub>2</sub>]和温度升高下水稻产量构成  
Table 3 Rice yield components under elevated CO<sub>2</sub> and temperature

| 年份   | 处理                            | 有效穗数(穗/m <sup>2</sup> ) | 穗粒数(粒/穗)      | 千粒重(g)      | 结实率(%)       |
|------|-------------------------------|-------------------------|---------------|-------------|--------------|
| 2013 | CT                            | 292.0 (11.5)a           | 120.3 (10.6)a | 29.1 (1.3)a | 86.2 (3.9)a  |
|      | C <sup>+</sup> T              | 310.0 (7.2)a            | 114.2 (1.83)a | 30.2 (0.4)a | 90.1 (1.9)a  |
|      | CT <sup>+</sup>               | 262.7 (12.0)a           | 103.8 (4.1)a  | 27.8 (0.8)a | 91.0 (0.04)a |
|      | C <sup>+</sup> T <sup>+</sup> | 264.0 (21.4)a           | 105.98 (3.4)a | 32.3 (3.6)a | 84.0 (6.1)a  |
| 2014 | CT                            | 257.2 (7.6)b            | 147.5 (5.3)b  | 24.9 (0.2)b | 85.2 (2.3)a  |
|      | C <sup>+</sup> T              | 289.0 (2.7)a            | 152.3 (4.8)ab | 26.1 (0.3)a | 84.0 (1.4)a  |
|      | CT <sup>+</sup>               | 211.0 (9.5)c            | 167.6 (6.4)a  | 25.7 (0.2)a | 82.2 (3.9)a  |
|      | C <sup>+</sup> T <sup>+</sup> | 249.0 (8.7)b            | 162.8 (3.4)ab | 26.4 (0.1)a | 78.7 (0.8)a  |
| 2015 | CT                            | 290.0 (5.3)b            | 161.0 (12.7)a | 25.3 (0.3)a | 85.1 (1.8)a  |
|      | C <sup>+</sup> T              | 313.0 (3.9)a            | 152.0 (4.4)a  | 25.6 (0.5)a | 86.1 (0.4)a  |
|      | CT <sup>+</sup>               | 256.0 (4.0)c            | 154.0 (4.1)a  | 25.3 (0.3)a | 88.1 (1.9)a  |
|      | C <sup>+</sup> T <sup>+</sup> | 296.0 (8.1)bc           | 144.0 (5.8)a  | 25.5 (0.1)a | 88.9 (1.2)a  |
| 2016 | CT                            | 266.0 (20.9)b           | 147.0 (20.9)a | 23.5 (0.1)a | 82.4 (2.0)a  |
|      | C <sup>+</sup> T              | 335.0 (15.1)a           | 144.0 (15.1)b | 23.0 (0.3)a | 82.7 (3.8)a  |
|      | CT <sup>+</sup>               | 234.0 (10.1)c           | 139.0 (10.1)a | 23.6 (0.2)a | 83.5 (0.9)a  |
|      | C <sup>+</sup> T <sup>+</sup> | 271.0 (5.8)b            | 136.0 (5.8)c  | 23.0 (0.3)a | 79.9 (2.2)a  |
| 2020 | CT                            | 256.0 (7.9)b            | 118.5 (0.7)a  | 27.5 (0.2)b | 80.2 (1.0)c  |
|      | C <sup>+</sup> T              | 280.0 (21.2)ab          | 116.0 (0.9)a  | 28.9 (0.2)a | 81.4 (1.2)a  |
|      | CT <sup>+</sup>               | 263.3 (2.9)b            | 104.9 (4.0)b  | 27.2 (0.5)b | 71.3 (1.8)b  |
|      | C <sup>+</sup> T <sup>+</sup> | 306.0 (2.0)a            | 115.4 (0.2)a  | 27.3 (0.1)b | 73.2 (4.7)ab |
| 方差分析 | C                             | ***                     | *             | ns          | ns           |
|      | T                             | ***                     | ns            | ns          | ns           |
|      | Year                          | ***                     | ***           | ***         | ***          |
|      | C×T                           | ns                      | ns            | ns          | ns           |
|      | C×Year                        | ns                      | ns            | ns          | ns           |
|      | T×Year                        | ***                     | ***           | ns          | *            |
|      | C×T×Year                      | ns                      | ns            | ns          | ns           |
|      |                               |                         |               |             |              |

注：表中同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

高互作条件下, 水稻穗粒数下降 6.0%, 对水稻有效穗数(提高约 1%)、千粒重(提高约 3.2%)以及结实率(减少约 1%)影响较小。

### 2.3 T-FACE 下冠层温度与水稻产量的耦合关系

图 2 展示了各处理水稻生长温度与水稻产量线性回归分析的结果, 可以发现, 随着环境温度的升高, 不管是对照组还是处理组, 水稻产量都呈下降趋势, 其中 C<sup>+</sup>T 和 CT<sup>+</sup>处理水稻产量下降较快, C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>处理水稻产量下降较慢。这种相关关系说明试验期间水稻生长的环境温度对其产量的形成有着较大的影响, 高 [CO<sub>2</sub>]在一定程度上可以抵消温度升高带来的负效应, 但并不能完全消除温度升高负效应的影响。另外, 将所有数据进行线性回归, 如图 3 所示, 水稻产量同样随着环境温度的升高呈现下降趋势, 且增温处理 (CT<sup>+</sup>、C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>)多处于回归线下方, 说明在不同生长温

度下, 增温处理会加剧水稻产量的损失。

## 3 讨论

本研究结果表明, [CO<sub>2</sub>]升高 200 μmol/mol 通过提高水稻有效穗数和结实率, 使水稻产量增加 11.1% (图 1 和表 3); 增温 1~2 °C 减少了水稻有效穗数和穗粒数, 水稻产量下降为 10%~25% (图 1 和表 3), 这与以往研究结果一致<sup>[6, 11, 27-28]</sup>。未来大气[CO<sub>2</sub>]和温度升高协同发生, 单独升高[CO<sub>2</sub>]或温度并不能很好说明全球气候变化对水稻生产的影响, 本试验结果显示, [CO<sub>2</sub>]升高 (约 200 μmol/mol)和温度升高(约 1~2 °C)互作条件下, 水稻产量平均下降约 10%, 与 Wang 等<sup>[29]</sup>的研究结果类似, 同时也说明在长江中下游地区高[CO<sub>2</sub>]并不能完全抵消由于温度升高带来作物产量下降的负效应。

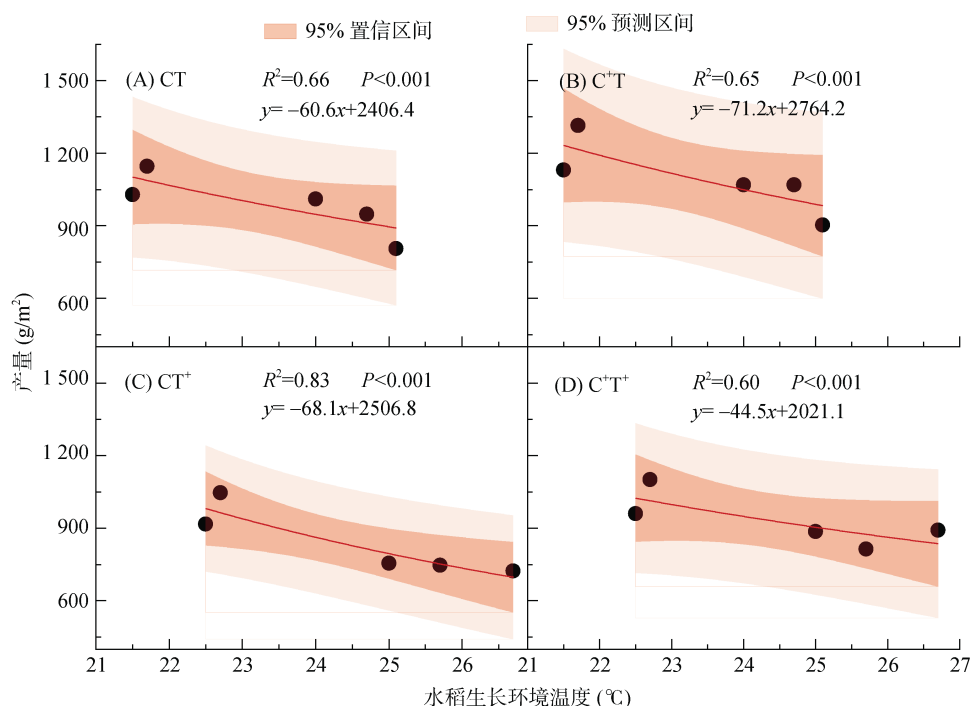


图2 大气[CO<sub>2</sub>]和温度升高下环境温度与水稻产量的拟合关系(区分对照组和处理组)

Fig. 2 Correlation between ambient temperature and rice yield under elevated CO<sub>2</sub> and temperature (The control group and treatment group were separated)

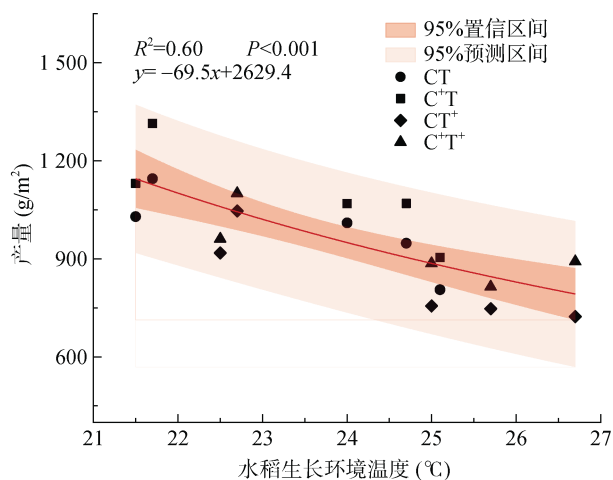


图3 大气[CO<sub>2</sub>]和温度升高下环境温度与水稻产量的拟合关系(不区分对照组和处理组)

Fig. 3 Correlation between ambient temperature and rice yield under elevated CO<sub>2</sub> and temperature (The control group and treatment group were not separated)

从图1和表3可以发现,与对照相比,不同处理间水稻产量及其构成变化趋势较为一致,但年际间差异明显,这种现象可能与水稻生长的环境温度有关。目前大部分研究只关注试验处理本身,较少考虑水稻生长期环境温度的年际差异对水稻生产的影响<sup>[10, 26]</sup>。因此,本研究侧重在 T-FACE 条件下,利用多年连续的田间试验数据来探究长江中下游地区环境温度与水稻产量的耦合关系。通过对水稻产量

和生长温度进行线性回归分析发现(图2),不同处理下(CT、C<sup>+</sup>T、CT<sup>+</sup>和C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>),水稻产量与环境温度具有较好的拟合关系,与对照相比,高[CO<sub>2</sub>]显著提高了水稻的产量,增温显著减少了水稻的产量,大气[CO<sub>2</sub>]和温度同时升高在一定程度上缓解了水稻产量大幅下降,但并不能完全消除温度升高负效应的影响。另外,从图2还可以发现,不管对照处理还是控制处理,随着环境温度的持续升高,水稻产量都表现为下降的趋势。通过拟合所有数据发现(图3),与不增温处理(CT、C<sup>+</sup>T)相比,增温处理(CT<sup>+</sup>、C<sup>+</sup>T<sup>+</sup>)下水稻产量整体偏低,说明增温处理加剧了水稻产量损失的风险。上述试验结果说明,温度对水稻的生长具有较大的影响,不同年份环境温度的差异是导致水稻产量年际差异的主要原因之一。从表2中可以看出,5年试验期内环境温度的波动性较大,最大温差达3℃,试验期间增加温度均减少了水稻产量,但环境温度较低年份水稻产量要比环境温度较高年份高(图1),这也进一步表明环境温度年际差异是导致水稻产量变化的重要影响因素。

本文试验均在长江中下游地区进行,在全球气候变化的背景下,该区域环境温度也在不断攀升。有研究认为,该地区水稻生育期内的日最高气温将持续升高,高温日数及强度增加<sup>[18, 30]</sup>。如果在水稻关键生育期内发生高温胁迫,会加速水稻物候发育<sup>[31]</sup>,缩短干物质

积累时间,造成水稻产量以及收获指数下降<sup>[13, 32-33]</sup>,这些对水稻生产来说是一个巨大的挑战。本研究中,增温显著减少了水稻产量,同时升高[CO<sub>2</sub>]和温度并没有完全缓解增温的减产效应,这与其他稻作区存在一定差异<sup>[16]</sup>,尚需考虑其他稻作生产区域的相关试验研究予以补充和完善。此外,本研究选用了两种粳稻品种作为试验材料,通过分析发现,两者对[CO<sub>2</sub>]和温度的平均响应差异较小,但年际差异较为明显(图 1,表 3),说明充分考虑年际间气候变异对水稻产量的影响是必要的,但由于本研究只考虑了粳稻品种响应,缺乏对杂交稻和籼稻的研究,从而导致风险评估不确定性提高。因此,今后应加强田间模拟试验研究,加快建设其他稻作区相关设施并投入应用,补充水稻对气候变化的响应和适应性理论,进一步降低模型评估的不确定性;加强提高应对气候变化的技术措施研究,包括适时调整播种时间和新品种的培育等;加强利用新品种及播期调整来完善田间模拟试验,减少预期结果与未来情况的差异,为我国粮食安全评估提供合理性建议。

## 4 结论

高[CO<sub>2</sub>]处理通过增加有效穗数和结实率提升了水稻产量;增温处理减少了有效穗数和穗粒数,导致水稻减产;高[CO<sub>2</sub>]和温度升高互作条件下水稻产量下降,说明高[CO<sub>2</sub>]并不能完全抵消温度升高带来的负效应。不同年份下,[CO<sub>2</sub>]升高、温度升高或两者交互作用对水稻产量和产量构成的影响存在明显年际差异,且随环境温度的升高,水稻产量表现为下降趋势。试验期间增温均减少了水稻产量,但环境温度较低年份水稻产量降幅比环境温度较高年份低,因此,环境温度的年际波动可能是影响水稻产量变化的重要因素。

## 参考文献:

- [1] 李彦生,金剑,刘晓冰.作物对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高生理响应研究进展[J].作物学报,2020,46(12):1819-1830.
- [2] Houghton J. Climate change 2013 - the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2014.
- [3] Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working Paper No. 12-03. FAO, Rome.
- [4] Field C. Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, UK., 2014.
- [5] Zhu C W, Kobayashi K, Loladze I, et al. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries[J]. Science Advances, 2018, 4(5): eaaq1012.
- [6] Cai C, Yin X Y, He S Q, et al. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO<sub>2</sub> and temperature in FACE experiments[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 856-874.
- [7] Wang B, Guo C, Wan Y F, et al. Air warming and CO<sub>2</sub> enrichment increase N use efficiency and decrease N surplus in a Chinese double rice cropping system[J]. Science of the Total Environment, 2020, 706: 136063.
- [8] 黄建晔,董桂春,杨洪建,等.开放式空气 CO<sub>2</sub> 增高对水稻物质生产与分配的影响[J].应用生态学报,2003,14(2): 253-257.
- [9] Zhang J S, Li D F, Xu X, et al. The potential role of sucrose transport gene expression in the photosynthetic and yield response of rice cultivars to future CO<sub>2</sub> concentration[J]. Physiologia Plantarum, 2020, 168(1): 218-226.
- [10] 谢立勇,姜乐,冯永祥,等. FACE 条件下 CO<sub>2</sub> 浓度和温度增高对北方水稻光合作用与产量的影响研究[J].中国农业大学学报,2014,19(3): 101-107.
- [11] Lv C H, Huang Y, Sun W J, et al. Response of rice yield and yield components to elevated[CO<sub>2</sub>]: A synthesis of updated data from FACE experiments[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 112: 125961.
- [12] Wang B, Li J L, Wan Y F, et al. Variable effects of 2°C air warming on yield formation under elevated[CO<sub>2</sub>] in a Chinese double rice cropping system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107662.
- [13] Cai C, Li G, Yang H L, et al. Do all leaf photosynthesis parameters of rice acclimate to elevated CO<sub>2</sub>, elevated temperature, and their combination, in FACE environments? [J]. Global Change Biology, 2018, 24(4): 1685-1707.
- [14] Wang W L, Cai C, Lam S K, et al. Elevated CO<sub>2</sub> cannot compensate for Japonica grain yield losses under increasing air temperature because of the decrease in spikelet density[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 99: 21-29.
- [15] Zhao C, Liu B, Piao S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [16] 王斌,万运帆,郭晨,等.模拟大气温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对双季稻氮素利用的影响[J].作物学报,2015,41(8): 1295-1303.
- [17] 蔡威威,万运帆,艾天成,等.空气温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对晚稻生长及产量的影响[J].中国农业气象,2015,36(6): 717-723.
- [18] 张卫建,陈长青,江瑜,等.气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略[J].农业环境科学学报,2020,39(4): 805-811.

- [19] Usui Y, Sakai H, Tokida T, et al. Rice grain yield and quality responses to free-air CO<sub>2</sub> enrichment combined with soil and water warming[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1256–1270.
- [20] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461/462: 601–611.
- [21] Ziska L H, Tomecek M B, Gealy D R. Assessment of cultivated and wild, weedy rice lines to concurrent changes in CO<sub>2</sub> concentration and air temperature: Determining traits for enhanced seed yield with increasing atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Functional Plant Biology*, 2014, 41(3): 236.
- [22] Choi W J, Lee M S, Choi J E, et al. How do weather extremes affect rice productivity in a changing climate? An answer to episodic lack of sunshine[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1300–1310.
- [23] Moya T B, Ziska L H, Namuco O S, et al. Growth dynamics and genotypic variation in tropical, field-grown paddy rice (*Oryza sativa* L.) in response to increasing carbon dioxide and temperature[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(6): 645–656.
- [24] 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[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1253–1258, 1235.
- [25] 李春华, 曾青, 沙霖楠, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻体内微量元素累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6): 1021–1026.
- [26] 袁嫚嫚, 朱建国, 孙义祥, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻籽粒充实度的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2251–2262.
- [27] Zhu C W, Zhu J G, Cao J, et al. Biochemical and molecular characteristics of leaf photosynthesis and relative seed yield of two contrasting rice cultivars in response to elevated[CO<sub>2</sub>][J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(20): 6049–6056.
- [28] 宋晓雯, 王国骄, 孙备, 等. 开放式增温对不同耐热性粳稻光合作用和产量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(6): 648–655.
- [29] Wang J Y, Wang C, Chen N N, et al. Response of rice production to elevated[CO<sub>2</sub>]and its interaction with rising temperature or nitrogen supply: A meta-analysis[J]. *Climatic Change*, 2015, 130(4): 529–543.
- [30] 冯灵芝, 熊伟, 居辉, 等. RCP 情景下长江中下游地区水稻生育期内高温事件的变化特征[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 383–392.
- [31] Ziska L H, Manalo P A, Ordonez R A. Intraspecific variation in the response of rice (*Oryza sativa*L.) to increased CO<sub>2</sub> and temperature: Growth and yield response of 17 cultivars[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(9): 1353–1359.
- [32] Bowes G, Vu J C V, Hussain M W, et al. An overview of how rubisco and carbohydrate metabolism may be regulated at elevated atmospheric[CO<sub>2</sub>]and temperature[J]. *Agricultural and Food Science*, 1996, 5(3): 261–270.
- [33] 李春华, 曾青, 沙霖楠, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对水稻地上部干物质积累和分配的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1336–1342.