

CO₂ 浓度和温度升高对早稻生长及产量的影响

万运帆, 游松财*, 李玉娥, 王斌, 高清竹, 秦晓波, 刘硕

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要: 研究温度升高和 CO₂ 浓度增加的气候变化条件对我国主要粮食作物早稻生长及产量的影响对评估国家粮食安全有重要参考意义。采用改进后的开顶式气室原位模拟大气 CO₂ 浓度 450 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 及温度升高 2 °C 的环境条件对早稻生长及产量的影响, 试验设置三个处理(对照、增温、增温+CO₂), 结果表明:①温度及 CO₂ 同增对早稻最终株高有显著增加作用, 而仅增温只能加快前期株高增长速度而对最终株高没有影响;②增温处理使最终分蘖数增加 2~3 茎·穴⁻¹, 但在增温条件下增加 CO₂ 浓度, 分蘖数不再增加;③增加 CO₂ 浓度使早稻叶片叶绿素含量略增, 但增温处理没有效应;④增温处理对不同时期地上部生物量无显著影响, 但增温+CO₂ 处理使各期生物量较对照显著增加;⑤增温 2 °C 使早稻增产 13.3%, 而增温基础上再增 CO₂, 产量不再进一步增加。从产量构成因子看, 增温或增温+CO₂ 处理条件下早稻增产主要与穗数和每穗粒数增加有关。

关键词: 开顶式气室; 大气 CO₂ 浓度; 温度; 早稻; 生长; 产量

中图分类号: S511.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)09-1693-06 doi:10.11654/jaes.2014.09.004

Influence of Elevated Atmospheric CO₂ Concentration and Temperature on Growth and Yield of Early Rice

WAN Yun-fan, YOU Song-cai*, LI Yu-e, WANG Bin, GAO Qing-zhu, QIN Xiao-bo, LIU Shuo

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences /Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: It is very important for national cereal security evaluation to study the influence of elevated CO₂ concentration and temperature on early rice growth and yield under changed climate scenario. We studied the effects of 450 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ CO₂ concentration and 2 °C temperature increments on early rice growth and yield in an early rice field using a modified open-top chamber method. There were 3 treatments with 3 replication per treatment: ①Check OTC (ambient atmospheric CO₂ and temperature), ②air temperature increase by 2 °C, and ③air temperature increase by 2 °C plus 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ CO₂ elevation. Treatment with both CO₂ concentration and temperature rise significantly increased the final height of early rice, while temperature alone expedited plant elongation speed only without showing effects on the final height of early rice. Elevated temperature increased the number of tiller of early rice by 2~3 tillers per hole, but CO₂ had no obvious effects on the number of tiller of early rice. Increasing CO₂ concentration had a positive effect on leaf chlorophyll content, but increasing temperature did not. The aboveground biomass of early rice was not influenced by temperature rise, but increased significantly by temperature plus CO₂ concentration. Grain yield of early rice was increased by 13.3% by temperature rise, but was no additional increase by elevated CO₂. Temperature influenced yields via increasing spike rates and grains per spike.

Keywords: open-top chamber; elevated CO₂ concentration; temperature rise; early rice; growth; yield

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告指出, 气候变化要比原来认识到的更加严重, 而且有 95% 以

上的可能是人类活动行为造成的。1880—2012 年, 全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势, 升高了 0.85 °C, 截止 2011 年, 大气中二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)浓度分别达到 391、1.80 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.324 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别比工业化前的 1750 年升高了 40%、150% 和 20%, 达到 80 万年以来的最高值, 未来大气中 CO₂ 浓度及全球气温将呈同步上升趋势, 预计到 2100 年最坏情况下 CO₂ 浓度可达 936 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 大气增温达 4.8 °C^[1]。

收稿日期: 2014-02-20

基金项目: 国家“973”计划项目(2010CB951302); 公益性行业(农业)科研专项(201103039)

作者简介: 万运帆(1973—), 男, 湖北洪湖人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为气候变化与农业温室气体排放。

E-mail: wanyunfan@caas.cn

* 通信作者: 游松财 E-mail: yousc@ieda.org.cn

水稻生长对大气温度及 CO_2 浓度非常敏感^[2-3], 大气 CO_2 浓度及温度的同时上升已经加剧了对水稻生产的影响^[4-6]。中国是水稻种植大国, 水稻常年播种面积约 29 Mhm², 约占中国粮食作物总面积的 18.7%^[7], 研究未来温度及 CO_2 浓度升高对早稻生长及产量的影响, 对评估中国未来气候变化条件下水稻生产的影响及其应对措施具有重要的现实意义^[8]。气候模式预测结果表明气候变化将对中国的粮食安全产生重要的影响, 由于这种预测还存在着很大的不确定性, 通过实验模拟气候变化对水稻生产的影响将更具有参考意义^[2,4,9-11]。气候变化试验模拟主要有三种: ①封闭式的增长箱或 CO_2 浓度梯度大棚^[12-14]。由于其与大田差异太大, 研究结果采信度不高。②开顶式气室 (Open-Top Chamber, OTC)。相对简便、成本较低, 在 20 世纪 90 年代就被广泛用于气候变化的模拟^[15-17]。③自由大气 CO_2 浓度增加 (Free-Air CO_2 Enrichment, FACE) 外加红外加热技术^[18-21]。早期的 FACE 系统都没有加热系统, 大多数的研究表明大气中 CO_2 浓度的增加会促进水稻的生长及产量的增加^[22-23], 但这些研究大多没有同时模拟温度的变化。FACE 平台的研究成本及技术要求较高, 如果再增加升温系统, 则耗费的成本更高, 使其应用受到很大的限制^[21,24]。本研究在参考国内外 OTC 技术的基础上, 对 OTC 系统予以改进, 自行研制出可控温和控 CO_2 的 OTC 系统, 并应用此系统在早稻生育期进行增温及增 CO_2 的原位模拟, 其控制平均增温误差可达 ± 0.2 °C, CO_2 平均增幅可达 ± 40 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 可用于气候变化模拟^[25]。

未来气候变化条件下 CO_2 和温度增加的幅度还存在很大的不确定性, 预测的时间尺度也不尽相同^[1], 早期的 CO_2 模拟目标浓度以 550、700 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 居多^[22]。本研究基于 2009 年在丹麦哥本哈根举行的全球第十五次气候变化大会上形成的 2050 年控制温度升高 2 °C 和大气 CO_2 浓度在 450 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内的共识^[26], 拟在改进的 OTC 环境下, 控制 CO_2 的相对目标浓度在 450 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内 (相对于目前大气平均 CO_2 浓度动态增加, 参考 2010 年 390 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 基准动态增加 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) 和气温相对增幅 2 °C, 模拟研究大气 CO_2 浓度及温度增加对早稻生长的影响, 为评估未来气候变化对水稻生长及产量影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与设施

试验地点位于湖北省荆州市农业气象试验站内

(30°21'01"N, 112°09'13"E), 地处江汉平原, 是中国主要的双季稻种植区之一, 年平均气温 15.9~16.6 °C, 年均降水量 1100~1300 mm, 年日照时数 1800~2000 h, 试验地的土壤类型为湖积潜育型水稻土, 土壤质地为中壤土。

试验用 OTC 为正六边形, 直径 2.4 m、高 2 m, 顶部收有锥形口, 收缩角度为 45°, 收口部分高度 50 cm, 气室内部六个角分别立有一根释放管, 释放管上均匀分布有释放孔, 气体的交换通过释放孔均匀释放到 OTC 内部^[25]。OTC 内增温采用自动控制技术, 使 OTC 内的气温相对于外界温度增加 2 °C (控制增温范围为 1.5~2.5 °C), 当 OTC 内相对增温低于 1.5 °C 时, 通过换气风扇抽取 OTC 外部的空气, 经过电加热模块加热后均匀送入 OTC 内部实现增温, 当增温达到 2.5 °C 时停止抽取空气; 如果 OTC 内部的增温高于 2.5 °C, 则只通过换气风扇抽取 OTC 外部的空气而不经加热直接均匀送入 OTC 内部来降温, 使 OTC 内部温度相对于外部增加 1.5 °C 时停止抽取空气。 CO_2 浓度也采用自动控制技术使 OTC 内部的 CO_2 浓度比外界动态增加 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ (控制 CO_2 浓度增加范围 40~80 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$), 以 CO_2 钢瓶气作为气源, 当 OTC 内部 CO_2 浓度低于设定的差值 40 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 打开释放电磁阀, 将 CO_2 通过换气风扇和释放管均匀释放到 OTC 内部, 直至达到相应的浓度差值 80 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 时停止; 当 OTC 内外部 CO_2 浓度差值高于设定的差值 80 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 采用换气系统抽取 OTC 外部空气到 OTC 内部降低其 CO_2 浓度至浓度差值 40 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 时停止。

1.2 试验设计与方法

本试验基于当地农民种植水稻的传统管理方式, 供试品种为两优 287, 大田早育秧。4 月 6 日播种; 5 月 5 日施基肥, 氮肥使用碳酸氢铵 (用量 750 kg N·hm⁻²), 磷肥使用普钙 (用量 750 kg P₂O₅·hm⁻²), 施肥当日移栽, 平均行距 22.6 cm, 平均株距 22.2 cm; 5 月 18 日施追肥, 尿素 75 kg N·hm⁻²; 6 月 8 日晒田; 6 月 15 日复水后追第二次肥, 氮肥使用尿素 (用量 120 kg N·hm⁻²), 钾肥使用氯化钾 (用量 90 kg K₂O·hm⁻²); 5 月 15 日进入分蘖期, 6 月 6 日进入拔节期, 6 月 12 日开始孕穗, 6 月 18 日抽穗, 6 月 23 日扬花, 6 月 30 日乳熟, 7 月 14 日完熟, 7 月 17 日收获。

试验共设 3 种 OTC 处理: 对照 (OTC 内温度及 CO_2 浓度与大田一致); 增温 (OTC 内温度相对于大田动态增加 2 °C); 增温+ CO_2 (OTC 内温度及 CO_2 浓度相对于大田动态分别增加 2 °C 和 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)。自早稻移

栽起在 OTC 内生长,田间施肥和管理与大田完全一致,每个处理 3 次重复,随机区组排列。

1.3 调查取样

移栽后,每个 OTC 内选取 5 穴早稻进行跟踪,调查水稻的株高、分蘖、叶绿素含量、抽穗生长状况及水稻的产量构成,其中叶绿素含量使用日本 Minolta 生产的 SPAD502 叶绿素速测仪进行测定。分别在早稻的分蘖期、拔节期、抽穗期及完熟期各抽样 3 株,调查各处理的生物量;在早稻成熟期,选取 1 m² 水稻进行测产。

1.4 统计分析

使用微软公司 Excel 进行数据处理及作图,使用 DPS 数据处理系统进行数据的方差分析^[27]。

2 结果与分析

2.1 温度和 CO₂ 浓度升高对早稻株高的影响

温度或 CO₂ 的升高都对早稻株高有显著的促进作用,但不同生长阶段两者的作用效果不同(图 1)。在早稻移栽 10 d 后,增温对株高的促进作用开始显现,在移栽 15 d 后增温和增温+CO₂ 处理的株高与对照的差异(4~5 cm)达到显著水平,约在早稻移栽 20 d 后株高差距达到最大,但增温和增温+CO₂ 处理的株高基本没有差异,在早稻移栽 20~40 d,对照的株高增长加快,与增温和增温+CO₂ 处理的株高差距逐步缩小,至移栽 40 d 时三者的差异变得不显著;但在移栽 40 d 后,早稻从孕穗期至完熟期,增温处理与对照的株高差异逐步缩小,移栽 60 d 后的完熟期趋于一致,而增温+CO₂ 处理的株高与对照的差距再次增加至显著水平,在移栽 50 d 后株高差异稳定在 5 cm 左右,说明增温基础上再增加 CO₂ 是引起水稻株高增加的主

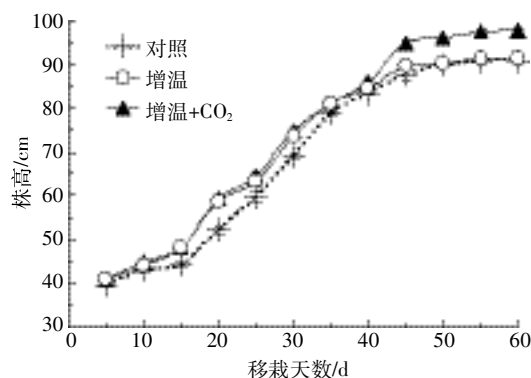


图 1 温度和 CO₂ 浓度升高对早稻株高的影响

Figure 1 Effects of elevated temperature and CO₂ concentration on plant height of early rice

要原因。

2.2 温度和 CO₂ 浓度升高对早稻分蘖的影响

增温和增加 CO₂ 浓度对移栽早稻的分蘖有明显的促进作用,但在不同分蘖阶段其促进作用并不一样(图 2)。在早稻移栽后的前 20 d 内,两者均有促进作用,但增加 CO₂ 浓度的促进作用大于增温的促进作用,同时增加温度及 CO₂ 浓度早稻分蘖数明显多于只增加温度处理,并且增温处理早稻的分蘖数与对照之间差异较小;在早稻移栽 20 d 后,早稻进入分蘖盛期,增温对早稻分蘖的促进作用加速,并且缩小与增温+CO₂ 处理之间的分蘖数差异,但仍比增温+CO₂ 处理少约 1 茎·穴⁻¹,而对照与两处理的分蘖差异显著,并且呈逐渐增大趋势,说明早稻分蘖盛期后对分蘖起主要促进作用的是温度的增加。至分蘖期结束,两处理最终比对照分蘖数增加 3 茎·穴⁻¹。

2.3 温度和 CO₂ 浓度升高对早稻叶绿素含量的影响

叶片的叶绿素含量是影响植物生长的重要因素之一,早稻叶绿素相对量动态监测结果如图 3 所示。从早稻叶绿素含量的总体变化趋势看,从分蘖期到孕

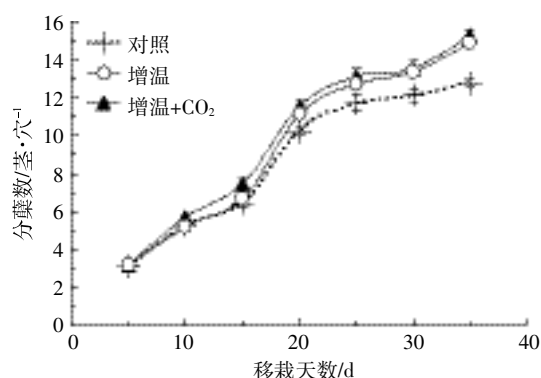


图 2 温度和 CO₂ 浓度升高对早稻分蘖的影响

Figure 2 Effects of elevated temperature and CO₂ concentration on number of tiller of early rice

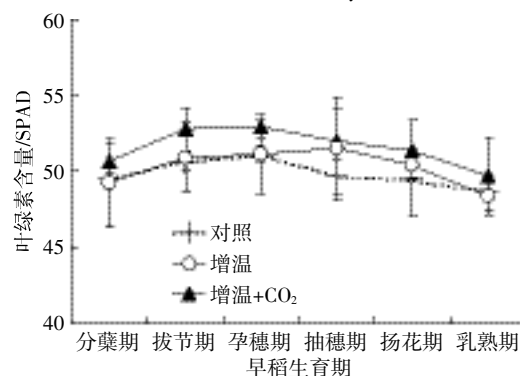


图 3 温度和 CO₂ 浓度升高对早稻叶片叶绿素含量的影响

Figure 3 Effects of elevated temperature and CO₂ concentration on chlorophyll contents of early rice leaves

穗期叶绿素含量呈上升趋势,从孕穗期到乳熟期呈缓慢下降趋势。不同处理早稻叶绿素含量高低趋势为增温+CO₂>增温>对照,特别是增温+CO₂比对照和增温处理约高1个SPAD单位,但三者间差异均未达显著水平。从增温和增CO₂效果看,单独的增温在孕穗期前对早稻叶片中的叶绿素相对含量没有影响,而在增温的同时增加CO₂,叶片中的叶绿素含量比对照明显提高1个SPAD单位以上。特别是在孕穗期前,增加CO₂对早稻叶片的叶绿素含量增加作用明显,而在孕穗期后,温度对早稻叶片叶绿素含量的增加作用开始显现。全生育期内,增温、增温+CO₂处理比对照叶片叶绿素相对含量平均分别增加0.3、1.64 SPAD单位,说明在增温基础上再增加CO₂浓度能显著提高早稻叶片的叶绿素含量,CO₂浓度的增加是促进早稻叶片叶绿素含量的主要因素。

2.4 温度和CO₂浓度升高对早稻地上部生物量的影响

早稻4个主要生育期地上部生物量的测定结果见表1。4个生育期增温+CO₂与对照的生物量差异均达显著水平,增幅为7.35%~9.80%,增温处理较对照略增,但均未达显著水平,说明增温与增CO₂处理对早稻生物量均有一定促进作用,CO₂与温度同增情况下与对照生物量的差异达显著水平。在早稻的拔节期和孕穗期增温+CO₂与增温处理间的生物量差异达显著水平,说明CO₂的增加是造成早稻生物量显著增长的主要因素。

2.5 温度和CO₂浓度升高对早稻产量构成的影响

表2表明,不同处理对早稻产量构成一定影响。增温与增温+CO₂处理的籽粒产量基本持平,但与对

照相比,这两个处理使籽粒产量分别增加13.3%和11.7%,均达显著水平。从产量构成指标来看,增温对产量增加的主要贡献是穗长、穗粒数和有效分蘖数的增加。与对照相比,三者平均分别增加了0.5 cm、11.2粒·穗⁻¹、1.2茎·穴⁻¹。另外,增温对早稻的一个不利影响是空秕率增加了7%;在增温的基础上再增加CO₂对水稻产量构成的影响与单一增温处理的各项指标间的差异均不显著(除空秕率外)。

3 讨论

增温对早稻的株高增加仅在早稻生长前期,后期对株高的增长基本无影响,并且对早稻最终的株高也没有增加的效果,说明增温只是促进了早稻的快速生长。这主要是因为早稻生长前期的气温较低,经统计5月份的平均气温只有23.6℃,而增温2℃后,早稻的生长更加适宜,有利于早稻的加速生长^[28]。在增温基础上再增大CO₂浓度后,更加有利于早稻的株高增长,但这种促进效果在植株较小时的分蘖期因主要受温度的影响而表现不明显;在孕穗期后,早稻植株生长旺盛,生物量变大,同化产物也急剧增多,CO₂对早稻的生长及促进作用明显^[29],最终导致株高比对照及单独增温处理都显著增加。

增加温度对早稻的分蘖也有显著的促进作用。温度的增加使早稻生长更快,特别是在温度较低的分蘖期,而CO₂的增加则可为早稻提供更多的同化产物,更利于分蘖的增多,因而在早稻移栽15 d后,两者的交互作用导致增温+CO₂对早稻的分蘖有一个明显的跃升(图2)。增温对分蘖数的增加较为显著,而增加CO₂对分蘖有一定的促进作用^[30],但因为本研究CO₂浓度的增幅较小(约60 μL·L⁻¹),其对分蘖的促进作用有限。

温度与CO₂浓度的同时增加使早稻主要生育期的生物量比对照显著增加,但只增温与对照的差异没有达到显著水平,说明两者对早稻的生物量增加有一个互相促进的作用,前述的增温及增CO₂浓度对早稻叶片叶绿素含量、分蘖及株高的影响也同时会表现在生物量的增加上。而且早稻生长最为旺盛的时期这种

表1 温度和CO₂浓度升高对早稻地上部生物量的影响

Table 1 Effects of elevated temperature and CO₂ concentration on aboveground biomass of early rice

处理	分蘖期/g·m ⁻²	拔节期/g·m ⁻²	孕穗期/g·m ⁻²	完熟期/g·m ⁻²
对照	93.7b	394.6b	445.6b	1 143.8b
增温	97.8ab	407.2b	453.2b	1 214.3ab
增温+CO ₂	102.9a	432.3a	478.3a	1 236.8a

注:字母标记为5%LSD显著检验。下同。

表2 温度及CO₂浓度升高对早稻产量构成的影响

Table 2 Effects of elevated temperature and CO₂ concentration on grain yield and its components of early rice

处理	有效分蘖/茎·穴 ⁻¹	成穗率/%	穗粒数/粒	空秕率/%	穗长/cm	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
对照	12.7b	95.8b	131.2b	4.73c	21.4b	22.18b	6 697.2b
增温	13.9a	95.7b	142.4a	11.78a	21.9a	22.98a	7 585.0a
增温+CO ₂	13.7a	97.0a	138.7a	9.29b	22.3a	22.63a	7 477.9a

差异更大,表1中的结果也显示在早稻的拔节期和孕穗期的差异最明显。从总的生物量的增加量来看,动态增加 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\text{CO}_2$ 比增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 对生物量的贡献更大。

增温对水稻的产量有明显的增加作用^[31],本研究增温对早稻产量的影响已达到显著水平,而在增温基础上再增加 CO₂ 对产量的增加并无贡献,并且总的产量还略有下降,表明增加 CO₂ 对产量增加没有效果。对比前述对株高、叶片叶绿素含量、生物量的增加,CO₂ 浓度增加 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 的贡献均大于增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 的贡献,说明增加 CO₂ 浓度可能导致早稻营养生长过于旺盛,将对生殖生长和最终产量造成不利影响,最终不能表现出增产效果。增温+CO₂ 处理对早稻成穗率的提高和空秕率的降低略高于增温处理,可能与增加 CO₂ 后早稻营养生长基础较好有关^[32]。如果要保证增加 CO₂ 对最终产量的贡献,可能要强化水稻生殖生长期的水肥调节或其他田间管理^[33],才可以促进早稻营养生长与生殖生长的均衡。

4 结论

(1)增温会促进早稻株高在生长早期加速增高,但对最终株高无影响;温度和 CO₂ 同增则显著增加早稻的株高。

(2)增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 会显著提高早稻分蘖约 2~3 茎·穴⁻¹,而在增温基础上再增 CO₂ 浓度对分蘖有一定的促进作用但不显著。

(3)增加 CO₂ 浓度会促进早稻叶片叶绿素含量的增加,从而促进早稻的生长。

(4)CO₂ 浓度增加 60 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 比增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 更有利于显著提高早稻的生物量。

(5)本研究增温对早稻产量影响表现为正效应,增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 可促进早稻增产 13.3%,而在增温基础上再增 CO₂ 则可能需要通过水肥调节防止早稻营养生长过旺而影响产量。

参考文献:

- [1] IPCC. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf[EB]. 2013/09/26.
- [2] 熊伟,杨婕,吴文斌,等.中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性[J].生态学报,2013,33(2):509-518.
XIONG Wei, YANG Jie, WU Wen-bin, et al. Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2):509-518.
- [3] 孙芳.中国主要作物对气候变化的敏感性和脆弱性研究[D].北京:中国农业科学院,2005.
- [4] SUN Fang. Study on the sensitivity and vulnerability of main crops to climate change in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [5] 吕露,崔远来,丁俊芝.气候变化对水稻生长影响的模拟分析[J].灌溉排水学报,2012,31(3):48-53.
LÜ Lu, CUI Yuan-lai, DING Jun-zhi. Simulation of climate change impacts on rice yields[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(3):48-53.
- [6] 杨沈斌,申双和,赵小艳,等.气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响[J].作物学报,2010,36(9):1519-1528.
YANG Shen-bin, SHEN Shuang-he, ZHAO Xiao-yan, et al. Impacts of climate changes on rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(9):1519-1528.
- [7] 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.
YANG Lian-xin, WANG Yun-xia, ZHU Jian-guo, et al. What have we learned from 10 years of Free Air CO₂ Enrichment (FACE) experiments on rice grain yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3):1486-1497.
- [8] 中国农业年鉴编辑委员会.中国农业年鉴[M].北京:中国农业出版社,2012.
Editorial board of China Agriculture Yearbook. China agriculture yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [9] 周锐,豆沿斌.全球气候变化对水稻生产的影响[J].广西农学报,2009,24(3):51-53.
ZHOU Ding, DOU Yan-bin. The impact of global climate change on rice production[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2009, 24(3):51-53.
- [10] 王主玉.未来气候变化对长江中下游稻区水稻生产的影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
WANG Zhu-yu. Study of effects of future climate change on rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Sciences and Technology, 2011.
- [11] 朱红根,周曙东.南方水稻对气候变化的脆弱性分析:以江西为例[J].农业现代化研究,2010,31(2):208-211.
ZHU Hong-gen, ZHOU Shu-dong. Vulnerability analysis of southern rice to climate change: Taking Jiangxi Province as an example[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(2):208-211.
- [12] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.气候变化对我国南方双季稻发育和产量的影响[J].气候变化研究进展,2005,1(4):151-156.
ZHANG Jian-ping, ZHAO Yan-xia, WANG Chun-yi, et al. Effect of climate change on the growth and yields of double-harvest rice in the Southern China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(4):151-156.
- [13] Cheng W G, Yagi K, Sakai H, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: An experiment in controlled-environment chambers[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(3):351-373.
- [14] Horie T, Nakagawa H, Nakano J, et al. Temperature gradient chambers for research on global environment change: A system designed for rice in Kyoto, Japan[J]. *Plant Cell & Environment*, 1995, 18(9):1064-1069.

- [14] 白莉萍, 仝乘风, 林而达, 等. 基于 CTGC 实验系统下面包小麦主要品质形状的研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5): 814–818.
BAI Li-ping, TONG Cheng-feng, LIN Er-da, et al. Quality characteristics of bread wheat grown under elevated CO₂ and temperature[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(5): 814–818.
- [15] Jones P, Collins L M, Ingram K T. Open top chambers for field studies of crop response to elevated CO₂ and temperature[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(4): 1195–1201.
- [16] Moya T B, Ziska L H, Weldon C, et al. Microclimate in open-top chambers: Implications for predicting climate change effects on rice production[J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(3): 739–747.
- [17] 王春乙, 高素华, 刘江歌. OTC-1 型开顶式气室的结构和性能[J]. 环境科学进展, 1994, 2(3): 19–31.
WANG Chun-yi, GAO Su-hua, LIU Jiang-ge, et al. The structure and character of open top chamber OTC-1[J]. *Advance in Environment Sciences*, 1994, 2(3): 19–31.
- [18] Hendrey G R, Lewin K F, Nagy J. Free air carbon dioxide enrichment: Development, progress, results[J]. *Vegetation*, 1993, 104/105(1): 17–31.
- [19] Okada M, Liewerding M, Nakamura H, et al. Free-air CO₂ enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: System description[J]. *New Phytol*, 2001, 150(2): 251–260.
- [20] 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.
LIU Gang, HAN Yong, ZHU Jian-guo, et al. Rice-wheat rotational FACE platform I: System structure and control[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1253–1258.
- [21] Kimball B A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming[J]. *Glob Change Biol*, 2005, 11(11): 2041–2056.
- [22] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂[J]. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 351–371.
- [23] 黄建晔, 杨洪建, 董桂春, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1210–1214.
HUANG Jian-ye, YANG Hong-jian, DONG Gui-chun, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1210–1214.
- [24] Kimball B. A Cost comparisons among free-air CO₂ environment, open-top chamber and sunlit controlled environment chamber methods of CO₂ exposure[J]. *Critical Review in Plant Science*, 1992(11): 265–270.
- [25] 万运帆, 游松财, 王 斌, 等. 开顶式气室原位模拟温度和 CO₂ 浓度升高在早稻上的应用效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 123–130.
WAN Yun-fan, YOU Song-cai, WANG Bin, et al. Applied effect of improved OTC on elevated air temperature and CO₂ concentration simulation in early rice in situ[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 123–130.
- [26] 葛全胜, 方修琦. 科学应对气候变化的若干因素及减排对策分析[J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(1): 32–40.
GE Quan-sheng, FANG Xiu-qi. Analysis of the factors and countermeasures for scientifically coping with of climate change[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(1): 32–40.
- [27] Tang Q Y, Zhang C X. Data Processing System (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. *Insect Science*, 2013, 20(2): 254–260.
- [28] 黄 俊, 翟志宏, 陈慧华. 气候变化背景下广东早稻温度适宜度的变化特征[J]. 广东气象, 2012, 34(3): 60–63.
HUANG Jun, ZHAI Zhi-hong, CHEN Hui-hua. Change character of early rice to temperature suitable on climate change[J]. *Guangdong Meteorology*, 2012, 34(3): 60–63.
- [29] 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.
YANG Lian-xin, WANG Yun-xia, ZHU Jian-guo, et al. What have we learned from 10 years of free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments on rice growth and development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 1573–1585.
- [30] 孙成明, 庄恒扬, 杨连新, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻茎蘖动态影响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1122–1126.
SUN Cheng-ming, ZHUANG Heng-yang, YANG Lian-xin, et al. Simulation study on effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on tiller dynamic of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1122–1126.
- [31] 龚金龙, 张洪程, 胡雅杰, 等. 灌浆结实期温度对水稻产量和品质形成的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 482–491.
GONG Jin-long, ZHANG Hong-cheng, HU Ya-jie, et al. Effects of air temperature during rice grain-filling period on the formation of rice grain yield and its quality[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 482–491.
- [32] 杨连新, 王余龙, 李世峰, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦物质生产与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 339–346.
YANG Lian-xin, WANG Yu-long, LI Shi-feng, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and allocation in wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 339–346.
- [33] Yang L X, Peng S B. Agronomic avenues to maximize the benefits of rising atmospheric CO₂ concentration in the Asian irrigated rice system (review) [M]// Araus J L, Slafer G A (Eds.). *Crop Stress Management and Global Climate Change*. CAB international Publishing, Oxon, UK, 2011: 37–46.