李敏, 贾羽旋, 夏新月, 等. 大气 CO2浓度上升与增温对双季稻籽粒铁、锌和植酸含量及累积量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1195-1207.

LI M, JIA Y X, XIA X Y, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and warming on the content of iron, zinc, and phytic acid in double cropping rice grains[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(6): 1195–1207.

大气CO₂浓度上升与增温对双季稻籽粒铁、锌和 植酸含量及累积量的影响

李敏1, 贾羽旋2, 夏新月3, 王斌4*, 宋春燕4, 朱波5, 石生伟1*

(1.北京农学院生物与资源环境学院,北京 102206; 2.中化现代农业有限公司,北京 100031; 3.北京姿美堂生物技术股份有限 公司,北京 100144; 4.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081; 5.长江大学农学院,湖北 荆州 434022)

摘 要:为揭示未来气候变化趋势对稻谷 Fe、Zn 含量和积累量的影响,本研究利用开顶式气室(Open Top Chamber, OTC)系统模拟 大气 CO₂浓度上升(EC处理,+100 µL·L⁻¹)和增温(ET处理,+1.5 ℃)以及二者相互作用(ETEC处理,+1.5 ℃,+100 µL·L⁻¹)的气候变 化情景,对江汉平原2017—2019年双季稻籽粒 Fe、Zn 以及植酸含量进行持续3 a 的大田试验观测。结果表明:双季稻籽粒 Fe 和 Zn 含量对大气 CO₂浓度上升与增温的响应存在较大的年际间差异,其中对大气 CO₂浓度上升的响应较增温更为敏感。与对照(CK) 相比,EC处理显著降低2018年晚稻籽粒 Fe含量(-13.41%, P<0.05),显著增加2019年早稻和晚稻籽粒 Fe含量(+29.70%和+ 27.95%,P<0.05);ET处理显著降低2018年早稻籽粒 Zn含量(-13.49%,P<0.05)。就3 a 观测平均值而言,EC处理显著降低早稻 籽粒 Zn含量(-8.28%,P<0.05),而ETEC处理显著降低晚稻籽粒 Zn含量(-10.91%,P<0.05)。本研究发现 CO₂浓度上升与增温叠 加作用效果有别于各单因子影响,尤其对高温干旱年份晚稻籽粒 Zn含量的降低具有显著的正协同效应。本研究预测未来气候变 化可能增加稻米食用人口出现"隐性饥饿"的风险。

关键词:增温;增加CO2浓度;水稻;矿质元素;累积量

中图分类号:S511.42 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)06-1195-13 doi:10.11654/jaes.2022-0758

Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and warming on the content of iron, zinc, and phytic acid in double cropping rice grains

LI Min¹, JIA Yuxuan², XIA Xinyue³, WANG Bin^{4*}, SONG Chunyan⁴, ZHU Bo⁵, SHI Shengwei^{1*}

(1. College of Biological and Resource Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. Sinochem Agriculture Holdings, Beijing 100031, China; 3. Beijing Zimeitang Biotechnology Co., Ltd, Beijing 100144, China; 4. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 5. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434022, China)

Abstract: Global climate change, which is characterized by increasing atmospheric CO₂ concentrations and warming, significantly affects agro-ecosystem productivity and food security. To reveal the impact of future climate trends on the content and accumulation of iron (Fe) and zinc(Zn) in rice, this study used Open Top Chamber(OTC) systems to simulate climate change scenarios with increasing atmospheric CO₂ concentration (EC treatment, +100 μ L·L⁻¹) and warming (ET treatment, +1.5 °C), as well as their interactions (ETEC treatment, +1.5 °C, +100 μ L·L⁻¹). The study involved field experiments and observations on Fe, Zn, and phytic acid content in double cropping rice

收稿日期:2022-07-25 录用日期:2023-02-12

作者简介:李敏(1997一),女,河北邯郸人,硕士生,主要研究方向为生态系统溶解性有机碳溶解机制。E-mail:3401225827@qq.com

^{*}通信作者:石生伟 E-mail:342866767@qq.com; 王斌 E-mail:wangbin01@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41401277,41905102);北京市教委项目(SQKM201810020004)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41401277, 41905102); Beijing Municipal Education Commission (SQKM20181-0020004)

grains on the Jianghan Plain from 2017 to 2019. The results showed significant interannual variations in the response of Fe and Zn contents in rice grains to greater atmospheric CO₂ concentration and warming, and the contents were more sensitive to the atmospheric CO₂ concentrations than to warming. Compared with the control (CK), Fe content in late rice grains decreased with the EC treatment in 2018 (-13.41%, P<0.05), but increased significantly in early and late rice grains in 2019 (27.95%-29.70%, P<0.05). With the ET treatment, Zn content in early rice grains significantly decreased in 2018 (-13.49%, P<0.05). In terms of the three-year observed average, the Zn content in the EC treatment was significantly reduced in early rice grains (-8.28%, P<0.05), while the Zn content in the ETEC treatment was significantly reduced in late rice grains (-10.91%, P<0.05). This study found that the positive synergistic effects of greater CO₂ concentrations and warming are different for each factor. A significant reduction of Zn content in late rice grains in high temperature and drought years was observed. Accordingly, we predict an increasing risk of a "hidden hunger" for the rice-eating population under future climate change scenarios.

Keywords: warming; increasing atmospheric CO2 concentration; rice; mineral elements; cumulant

化石燃料燃烧和土地利用等人为活动持续加剧 温室气体排放,导致大气 CO₂浓度不断上升,引发了 以全球变暖为主要特征的气候变化问题。2019年全 球大气 CO₂浓度已达到410 μL·L⁻¹,预计到21世纪末 大气 CO₂浓度将达到750 μL·L⁻¹,全球平均温度升高 2~4 ℃¹¹。气候变化对农业生态系统产生了一系列直 接或间接的影响,如改变农业生态系统作物的生产 力,导致粮食产量以及品质发生改变,给粮食安全和 居民营养健康问题带来潜在风险等^[2-6]。因此,研究 气候变化对粮食产量与营养品质的影响具有十分重 要的现实意义。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,全球一半 以上的人口以稻米为食□。已有研究表明大气CO₂浓 度上升促进水稻叶片进行光合作用,增加产量[8-9]。 水稻产量的增加将有助于缓解全球性"粮食危机"。 然而,有研究表明大气CO2浓度增加导致水稻籽粒养 分发生"稀释现象"[9-11],即谷物中与人体健康相关的 营养素含量(如氨基酸、蛋白质^[10-12]、Fe和Zn等^[13-15]) 会随着大气 CO2浓度增加而降低。Seneweera 等[15-16] 发现大气 CO₂浓度增加导致水稻籽粒中 N、P、Fe 和 Zn 的含量分别降低14%、5%、17%和28%。Jin等^[17]发现 长期高CO₂浓度条件下小麦籽粒中N、P和Zn元素的 浓度分别下降 6%、5% 和 10%。Zhu 等[18]利用 FACE (Free Air CO₂ Enrichment)模拟高 CO₂浓度条件对 18 种常见水稻品种稻谷营养品质的影响,结果表明高 CO₂浓度下大部分品种稻谷Fe和Zn含量表现出下降 趋势,其中5个品种的下降幅度达到显著水平。Fe、 Zn等矿质营养元素参与谷物体内一系列酶的合成和 代谢过程^[8]。Fe、Zn等矿质营养元素摄入不足将引起 贫血、免疫功能降低、儿童反应迟钝等健康问题[12-13]。 据估计,全球约有20亿人口的营养元素摄取依赖于 C3谷物和豆类中的Zn和Fe^[14-15]。因此,大气CO2浓度

上升引起稻谷中Fe、Zn元素含量变化,对于以稻米为 主食的发展中国家居民健康具有不可低估的影响。

稻谷Fe和Zn含量对高CO2浓度具有复杂的响应 机制[19-20]。尽管大多数观测偏向于高CO2浓度导致Fe 和Zn含量下降的观点[14,18],但受制于水稻品种、土壤 环境和气候条件的差异,已有观测试验中稻谷Fe和 Zn含量对CO2浓度升高的响应并不一致[14-15]。目前 研究主要关注稻谷Fe和Zn含量的变化,而缺少对累 积量的观测研究。如果考虑到CO2浓度上升对水稻 的增产效应,大气CO2浓度升高对稻米Fe和Zn累积 量的影响可能会被高估[21]。此外,根据气候模式可知 未来CO2浓度和温度存在同步升高现象[22]。已有研 究主要关注大气CO2浓度升高的单因子影响,而缺乏 对大气CO2浓度升高和增温叠加作用效果的探索。 水稻产量对气温变化较为敏感,温度升高会导致稻谷 减产[23]。因此,仅考虑CO2浓度上升的单因子试验对 于认识气候变化对稻谷Fe和Zn含量的影响存在较 大的局限性,而综合考虑CO2浓度和温度同步上升的 田间观测数据更有说服力。

开顶式气室(Open Top Chamber, OTC)观测系统 作为模拟生态系统在不同气候变化情景下响应的主 流研究方法,具有模拟田间作物生长真实环境的优 势。本研究采用OTC系统模拟大气温度上升1.5℃ (即《巴黎协定》制定的升温阈值)、CO2浓度上升100 μL·L⁻¹[即根据气候模式预测的当全球温度升高 1.5℃时对应的大气CO2浓度中值(507 μL·L⁻¹)较 2016年的增加量^[22]]和二者叠加作用的气候变化情 景,对江汉平原双季稻籽粒Fe、Zn和植酸含量进行观 测,探索以下科学问题:(1)大气CO2浓度升高和增温 是否显著改变水稻籽粒中Fe、Zn含量及积累量;(2) 大气CO2浓度升高和增温的叠加作用效果是否有别 于各单因子影响。以上科学问题的解决将有助于更 好地理解未来气候变化对水稻营养品质的影响,为探 索未来气候背景下稻田水肥管理、物质循环及粮食营 养安全的改善提供理论依据和决策参考。

材料与方法 1

1.1 试验平台概况

田间试验观测地点位于湖北省荆州市荆州区农 业气象局试验观测场内,具体地理位置为30°21′N, 112°09′E。荆州区位于江汉平原腹地,属亚热带季风 性气候,雨热同季,年太阳辐射总量435~460 kJ·cm⁻², 年日照时数1800~2000 h,年平均气温15.9~16.6℃, 年平均降水量1100~1300 mm,是我国重要的商品粮 生产基地。当地每年4—10月是双季稻(早稻和晚 稻)生长季。双季稻生长季太阳辐射量占全年75% 左右,降水量与积温高于10℃的天数占全年80%左 右。2017—2019年双季稻生长期内气温与降水的动 态变化见图1。

试验种植区土壤类型为内陆河湖交替沉积形成 的粉质中壤水稻土,其中黏粒占19.70%、粉粒占 54.20%、砂粒占26.10%,具有较好的保持土壤水分与 肥力的能力。0~20 cm稻田土壤基础理化性质为:土 壤pH为7.90,容重为1.44g·cm⁻³,有机碳含量为14.12 g·kg⁻¹, 全氮含量为1.13 g·kg⁻¹, 速效磷含量为11.04 mg·kg⁻¹,速效钾含量为58.15 mg·kg⁻¹,土壤有效态Fe 含量为84.61 mg·kg⁻¹,有效态Zn含量为1.13 mg·kg⁻¹。 1.2 试验设计

本试验采用的OTC系统具体参数与原理见文献 [24]。试验平台共有12个OTC气室,分为3个区组, 每个区组4个OTC气室,均匀分布在稻田中。每个 OTC 气室均呈正六边形棱柱状,底部有效面积为5 m²。通过加热换气装置和CO₂释放装置来调节试验 所需背景值。田间试验为双因素交互设计试验,包含 有CO2浓度和温度2个因素,共4个处理,分别是:(1) 对照处理(CK),OTC气室内CO2浓度和温度与大田环 境基本一致,作为OTC装置对局部微环境因素(风速 以及少量遮光)影响的对照;(2)增温处理(ET),OTC 气室内的温度比CK高1.5℃;(3)大气CO₂浓度上升 处理(EC),OTC 气室内 CO₂浓度比 CK 高 100 µL·L⁻¹: (4) 增温与大气 CO₂浓度上升叠加效应处理(ETEC), 即 OTC 气室内 CO₂浓度比 CK 高 100 µL·L⁻¹, 温度比 CK高1.5℃。每个处理设有3个重复,呈随机区组排 列。每个OTC气室内1.5 m处安装有温度探头和CO2 浓度探头,用于监控气室内温度和CO2浓度,其精度 分别为±0.1 ℃和±20 µL·L⁻¹。监测系统每2 min 记录 一次数据,并通过自动感应控制系统来调节OTC内 部的温度和CO2浓度,实现准确动态模拟。

以当地常规稻种作为供试品种,其中早稻品种为 两优287,晚稻品种为金优212,移栽密度为21万穴· hm⁻²,2~3株·穴⁻¹。水稻于每年4月下旬移栽,10月中 旬收割。所有处理施肥方案均一致,其中氮肥采用尿 素(N≥46%)、磷肥采用过磷酸钙(P₂O₅≥12%)、钾肥采 用氯化钾(K₂O≥60%)。3种肥料混合施用,施肥方案 依据当地推荐的最适合双季稻生长的施肥配比与施 用时间而制定,各种肥料具体施用量见表1。各处理 水分管理模式相同,前期淹水,中期晒田,后期干湿交 替,最后自然落干至收割。

1.3 样品采集与测定

谷物样品采集:水稻成熟后,在每个OTC气室内





Figure 1 Dynamic change of air temperature and precipitation in early and late rice growing period from 2017 to 2019

www.aer.org.cn

表1 双季稻施肥方案(kg·hm⁻²) Тε

able 1 Fertilization p	orogram(kg•hm ⁻²)
------------------------	-------------------------------

养分 Nutrient	基肥 Basal fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer	总量 Total amount
Ν	90	45	45	180
P_2O_5	60	0	0	60
K ₂ O	30	15	45	90

选取1m²未被之前采样影响的地块作为样方进行测 产,样品晾晒脱粒后获得籽粒备用。

水稻籽粒中Fe、Zn含量测定:于2017-2019年 早稻和晚稻成熟期收获籽粒,籽粒在80℃下烘至恒 质量后粉碎。称取2g粉碎后的样品先完全碳化,再 放入马福炉中灰化。所得到的灰化样品用0.5 mol· L⁻¹硝酸溶解并过滤定容,采用原子吸收法测定Fe和 Zn的含量[25]。

谷物中植酸含量测定:称取过40目筛的谷物样品 0.25g于具塞三角瓶中,用2%盐酸提取液提取2h, 5000 r·min⁻¹离心5 min,经过滤后加入三氯化铁-磺基 水杨酸反应剂,混匀后静置20min,于500nm波长处 测定吸光度值,并根据标准曲线计算样品中植酸含量。

农业环境科学学报 第42卷第6期

土壤样品:于2017—2019年早稻和晚稻成熟期 分别从各OTC小区内取0~20 cm 耕层土样(5点取样 法)。用EDTA 浸提土壤中有效态 Fe、Zn 离子并用原 子吸收法测定其含量^[25]。土壤pH用pH计测量。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 对数据计算整理后采用重复测 量数据的方差分析方法(Repeated-measures ANOVA) 进行统计分析,即试验年份为重复取样的时间,测量 指标(籽粒Fe、Zn以及植酸含量)为因变量,分别开展 早稻和晚稻统计检验,以实现试验年份和处理交互作 用影响下不同年份和处理间差异的显著性检验(P< 0.05)。采用相关性分析建立双季稻籽粒Fe、Zn和植 酸含量以及土壤有效态 Fe、Zn含量的内在关联。

2 结果与分析

2.1 大气CO₂浓度上升与增温对双季稻籽粒 Fe、Zn 及 植酸含量的影响

重复测量数据的方差分析结果显示(表2),年份 对双季稻籽粒Fe、Zn及植酸含量均具有显著影响,年 份与处理的交互作用对早稻籽粒Fe含量和晚稻籽粒 中Zn含量具有显著影响(P<0.05)。根据方差分析中

表2 2017—2019年双季稻籽粒中Fe、Zn及植酸含量的重复测量数据方差分析结果

Table 2 Repeated measures ANOVA results for Fe, Zn and phytic acid contents in double-cropping rice grains from 2017 to 2019

水稻类型 Rice type	观测指标 Observation indicators	来源 Source	Ⅲ类平方和 Class Ⅲ sum of squares	自由度 Free degree	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
早稻	籽粒Fe含量	年份	3 439.26	2	1 719.63	49.50	< 0.01
		年份×处理	1 309.99	6	218.33	6.29	< 0.01
		误差	555.81	16	34.74	—	—
	籽粒Zn含量	年份	64.58	2	32.29	14.58	< 0.01
		年份×处理	8.84	6	1.47	0.67	0.68
		误差	35.44	16	2.22	—	—
	籽粒植酸含量	年份	427 659.45	2	213 829.72	14.76	< 0.01
		年份×处理	68 530.75	6	11 421.79	0.79	0.59
		误差	231 835.32	16	14 489.71	—	—
晚稻	籽粒 Fe 含量	年份	4 867.78	2	2 433.89	13.13	< 0.01
		年份×处理	1 792.77	6	298.79	1.61	0.21
		误差	2 965.56	16	185.35	—	—
	籽粒Zn含量	年份	59.92	2	29.96	26.06	< 0.01
		年份×处理	19.96	6	3.33	2.89	0.04
		误差	18.39	16	1.15	—	—
	籽粒植酸含量	年份	64 687.91	2	32 343.95	4.61	0.03
		年份×处理	24 035.49	6	4 005.91	0.57	0.75
		误差	112 164.95	16	7 010.31	_	_

注:"一"表示无此项内容。

Note: "-" means no such content.

Ffa(1)可判断,观测年份是造成双季稻籽粒 Fe_{x} Zn 及植酸含量变异的主要因素,即Fe,Zn及植酸含量对 大气 CO₂浓度上升与增温的响应存在显著的年际间 差异(表2)。

2017-2019年早稻和晚稻籽粒 Fe含量在 39.28~ 93.87 mg·kg⁻¹之间(表3)。相比CK,EC和ETEC处理 显著降低 2018 年早稻籽粒中 Fe 含量(-13.41% 和 -25.95%, P<0.05)。相反, EC处理显著增加2019年 早稻和晚稻籽粒中Fe含量(+29.70%和+27.95%,P< 0.05)。就3a平均值而言,EC和ET处理对早稻籽粒 中Fe含量无显著影响,但ETEC处理显著降低早稻籽 粒中Fe含量(-8.30%, P<0.05)。

2017-2019年早稻和晚稻籽粒 Zn含量在15.26~ 22.89 mg·kg⁻¹之间(表3)。相比CK,EC处理显著降 低 2017 年晚稻和 2018 年早稻籽粒 Zn 含量(-13.84% 和-12.97%, P<0.05), ET处理显著降低 2018 年早稻籽 粒Zn含量(-13.49%, P<0.05), ETEC处理显著降低 2019年晚稻籽粒Zn含量(-16.24%, P<0.05)。就3a平 均值而言,EC处理显著降低早稻籽粒Zn含量(-8.28%,

P<0.05),而ETEC处理显著降低晚稻籽粒Zn含量 (-10.91%, P < 0.05)

2017-2019年早稻和晚稻籽粒中植酸含量在 351.26~739.87 mg·kg⁻¹之间(表3)。本试验未发现早 稻和晚稻籽粒植酸含量存在显著的处理间差异 (*P*>0.05)_°

2.2 不同处理下双季稻籽粒 Fe、Zn 及植酸含量的年 际间差异特征

双季稻籽粒 Fe 和 Zn 含量均表现出显著的年际 间差异(P<0.05,图2)。在EC和ETEC处理下,2019 年早稻籽粒Fe含量显著大于2018年对应的观测值 (P<0.05):在ET和ETEC处理下,2017年晚稻籽粒Fe 含量显著大于2018年对应的观测值(P<0.05)。在CK 处理下,2017年晚稻籽粒Fe含量显著大于2018年和 2019年对应的观测值(P<0.05)。双季稻籽粒Zn含量 表现出不同的年际间变化特征,具体表现为CK和EC 处理下,2019年早稻籽粒Zn含量显著低于2017年对 应的观测值(P<0.05), 而CK、ET和ETEC处理下, 2018 年和2019年晚稻籽粒Zn含量显著低于2017年对应的

表3	2017-2019	年不同试验处理	下双季稻籽粒	这中 Fe 、Zi	n及植酸含量
----	-----------	---------	--------	-----------	--------

m 11 0	E 7 1	1					
Table 3	Fe. Zn and	phytic acid	contents i	ın doubl	e-cropping	rice grains	s
	,	p					

under different treatments from 2017 to 2019

单位:mg·kg⁻¹

年份 か理 植酸含量 年份 か理 Fe含量 Zn含量 Fe含量 Zn含量 植酸含量 Year Treatment Fe content Zn content Phytic acid content Year Treatment Fe content Zn content Phytic acid content 2017年 早稻 Early rice 2019年 早稻 Early rice $652.23{\pm}9.26a$ CK 58.30±2.03a 21.93±0.69a CK $72.37{\pm}2.78\mathrm{b}$ $18.89 \pm 0.98a$ 397.21±89.30a EC 51.54±5.12a 21.19±1.02a 651.79±51.15a EC 93.87±2.88a 17.33±0.43a 489.86±78.14a EΤ 57.46±5.22a 21.30±0.73a 733.49±11.19a \mathbf{ET} $76.85 \pm 1.69 \mathrm{b}$ 18.63±0.55a 526.89±106.89a ETEC ETEC 76.45±2.89b 56.59+3.63a 21.18+0.80a 598.42+76.84a 18.25+0.99a 351.26+40.25a 晚稻 Late rice 晚稻 Late rice CK89.92±11.06a 21.88±0.91a 585.76±13.13a CK $48.65 \pm 2.07 \mathrm{b}$ 18.22±0.72a 494.76±79.72a EC 60.86±14.74a 18.85±1.03b 636.32±34.48a EC 62.25±2.63a 18.71±0.17a 507.91±46.82a EΤ 63.13±7.09a 20.34±0.30ab 623.28±14.22a EΤ 49.93±1.71b 17.15±0.69ab 587.41±60.14a ETEC 58.71±18.19a 20.11±0.32ab 576.96±48.41a ETEC 50.48 ± 1.30 b $15.26 \pm 0.91 \mathrm{b}$ 517.31±2.40a 2018年 早稻 Early rice 早稻 Early rice 2017 -2019年 CK 74.99±0.72a 22.89±0.77a 739.87±45.09a CK68.55±2.78a 21.24±0.73a 596.43±59.00a EC 64.93±3.26b $19.92{\pm}0.05\mathrm{b}$ 683.70±45.08a EC 70.11±6.53a $19.48 \pm 0.65 \mathrm{b}$ 608.45±42.38a EΤ 72 58+2 81a 1980+107h 630 77+38 32a ET 68 96+3 43a 1991+056ab 630 38+44 43a ETEC 55.53±1.51c 20.26±1.11ab 681.71±109.41a ETEC $62.86 \pm 3.68 \mathrm{b}$ 19.89±0.65ab 543.80±63.92a 晚稻 Late rice 晚稻 Late rice CK 39.28±1.98a 18.46±0.94a 603.81+38.86a CK 59.28±8.44a 19.52+0.73a 561.44+30.89a EC 39.62±1.40a 17.63±0.93a 666.14±93.73a EC 54.25±5.68a 18.40±0.44ab 603.46±40.03a ΕT EΤ 40.10±2.30a 18.50±0.25a 587.63±44.98a 51.05±4.00a 18.66±0.51ab 599.44±22.85a ETEC 39.80±1.98a 16.81±0.54a 641.77±49.28a ETEC 49.66±5.96a $17.39 \pm 0.78 \mathrm{b}$ $578.68 \pm 26.85a$

注:表中数值为"平均值±标准误",每列数值后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Data in the table are presented as "mean value±standard error". Different letters indicate different significance in the same period (P<0.05). The same below

观测值(P<0.05)。早稻籽粒植酸含量存在显著的年 际间差异(图2),其中CK、ET和ETEC处理下,2019 年早稻籽粒植酸含量显著低于2017年对应的观测值 (P<0.05)。晚稻籽粒植酸含量年际间无显著差异。

2.3 大气CO₂浓度上升与增温对双季稻籽粒Fe、Zn及 植酸累积量的影响

2017-2019年早稻和晚稻籽粒 Fe 累积量在 0.33~0.71 kg·hm⁻²之间(表4)。相比CK,在ETEC处 理下2018年早稻籽粒Fe累积量下降23.43%,但晚稻 增加24.24%(P<0.05);在EC处理下2019年早稻和晚 农业环境科学学报 第42卷第6期

稻籽粒 Fe 累积量分别增加 52.94% 和 69.38% (P< 0.05)。就3a平均值而言,早稻籽粒Fe累积量在EC 处理下较CK显著增加17.30%(P<0.05)。

2017-2019年早稻和晚稻籽粒中Zn累积量在 0.13~0.25 kg·hm⁻²之间(表4)。相比CK,在EC处理 下 2018 年和 2019 年晚稻籽粒 Zn 累积量分别增加 20.00%和38.88%(P<0.05)。就3a平均值而言,晚稻 籽粒Zn累积量在EC、ET和ETEC处理下分别较CK 增加25.00%、18.75%和18.75%(P<0.05)。

2017—2019年早稻和晚稻籽粒中植酸累积量在



口 2017年 2019年

柱状图数值为"平均值±标准误",同一处理间不同小写字母表示年份间差异显著(P<0.05)。下同。

Data in the histogram chart are presented as "mean value ± standard error". Different letters for each treatment indicate significant interdecadal variations (P < 0.05). The same below.

图2 不同试验处理下双季稻籽粒 Fe、Zn 及植酸含量的年际变化

Figure 2 Annual variation of Fe, Zn and phytic acid contents in double cropping rice grains under different treatments

2.65~7.49 kg·hm⁻²之间(表4)。相比 CK,在 EC 处理 下 2017年晚稻籽粒植酸累积量增加 34.49%;在 ETEC 处理下 2017年和 2019年晚稻籽粒植酸累积量分别增 加 28.93%和 46.21%(*P*<0.05)。总体而言,EC、ET 和 ETEC 处理对早稻植酸累积量无显著影响,但均显著 提高晚稻植酸累积量(*P*<0.05)。

2.4 不同处理下双季稻籽粒 Fe、Zn 及植酸累积量的 年际间差异

不同处理下双季稻籽粒Fe、Zn及植酸累积量存 在较大的年际间差异(图3)。EC处理下早稻籽粒Fe 累积量的年际间变化特征为2019年>2018年>2017年(P<0.05)。2018年CK、ET处理和2019年ET、ETEC处理下早稻籽粒Fe累积量均显著大于2017的对应观测值。2019年不同处理下晚稻籽粒Fe累积量均显著大于2018年的对应观测值(P<0.05)。对于籽粒Zn累积量而言,不同处理下2018年早稻观测值均显著大于2019年的对应观测值(P<0.05),而晚稻则表现出相反的变化特征。2017年和2018年所有处理的早、晚稻籽粒植酸累积量间不存在显著差异,但2019年CK、ET和ETEC处理下早稻籽粒植酸累积量

表4 不同试验处理作用下双季稻产量和籽粒 Fe、Zn、植酸累积量

Table 4 Grain yield, cumulants of Fe, Zn and phytic acid in double-cropping rice under different treatments

年份 Year	的 处理 ear Treatment		稻谷产量 Rice yield/(kg•hm ⁻²)	籽粒Fe累积量 Fe cumulant in seeds/ (kg•hm ⁻²)	籽粒Zn累积量 Zn cumulant in seeds/ (kg•hm ⁻²)	籽粒植酸累积量 Phytic acid cumulant in seeds/(kg•hm ⁻²)
2017年	2017年 早稻		7 318.56±264.96a	0.43±0.03a	0.16±0.00a	4.76±0.10a
	Early rice	EC	8 219.4±373.92a	0.42±0.03a	0.17±0.01a	5.38±0.65a
		ET	7 505.26±369.16a	0.43±0.05a	0.16±0.01a	5.51±0.34a
		ETEC	8 147.7±373.18a	0.46±0.01a	0.17±0.01a	4.82±0.49a
	晚稻	СК	7 365.93±402.01c	0.65±0.07a	0.16±0.01a	4.32±0.31b
	Late rice	EC	9 124±637.19a	0.53±0.10a	0.17±0.02a	5.81±0.56a
		ET	$8514.33 \pm 20.942 ab$	0.53±0.06a	0.17±0.00a	5.30±0.11ab
		ETEC	9 718.8±472.47a	0.57±0.19a	0.19±0.01a	5.57±0.36a
2018年	早稻	СК	8 470.93±251.89a	0.64±0.01a	0.19±0.00a	6.26±0.44a
	Early rice	EC	9 577.73±268.00a	0.62±0.02a	0.19±0.01a	6.53±0.39a
		ET	8 616.39±737.26a	0.62±0.03a	0.17±0.01a	5.41±0.47a
		ETEC	8 807.69±286.62a	$0.49 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.18±0.01a	5.94±0.76a
	晚稻	СК	$8436.03 \pm 304.57 \mathrm{b}$	$0.33 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$0.15\pm0.01\mathrm{b}$	5.11±0.49a
	Late rice	EC	10 248±394.04a	$0.40\pm0.02ab$	0.18±0.01a	6.80±0.93a
		ET	9 730.16±226.89a	0.39 ± 0.03 ab	0.18±0.00a	5.69±0.30a
		ETEC	10 445.5±72.844a	0.41±0.01a	$0.17 \pm 0.00 \mathrm{ab}$	6.71±0.56a
2019年	早稻	СК	$7\ 041.85 \pm 177.62 \mathrm{b}$	$0.51 \pm 0.02 \mathrm{b}$	0.13±0.01a	2.79±0.62a
	Early rice	EC	8 321.43±355.05a	ba 0.78±0.03a 0.14±0.01a		4.02±0.48a
		ET	7 532.76 \pm 339.47ab	$0.58 \pm 0.03 \mathrm{b}$	0.14±0.01a	3.90±0.67a
		ETEC	7 554.96 \pm 317.06ab	$0.58 \pm 0.02 \mathrm{b}$	0.14±0.01a	2.65±0.32a
	晚稻	СК	$10\ 112.2 \pm 244.45 d$	$0.49 \pm 0.02 c$	$0.18\pm0.01\mathrm{b}$	5.02 ± 0.86 b
	Late rice	EC	13 463.3±144.59b	0.83±0.03a	0.25±0.01a	$6.84 \pm 0.66 \mathrm{ab}$
		ET	$12\ 747.3 \pm 198.49 c$	$0.63 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.21 ± 0.01 ab	$7.49 \pm 0.84 a$
		ETEC	14 194.3±80.078a	$0.71 \pm 0.02 \mathrm{b}$	0.21 ± 0.01 ab	7.34±0.06a
2017—2019年	早稻	СК	7 610.45 \pm 248.27b	$0.52 \pm 0.03 \mathrm{b}$	0.16±0.01a	4.60±0.55a
	Early rice	EC	8 706.18±275.37a	$0.61 \pm 0.05 a$	0.16±0.01a	5.31±0.44a
		ET	7 884.80 \pm 315.79b	$0.55 \pm 0.03 \mathrm{b}$	0.15±0.01a	4.94±0.36a
		ETEC	8 170.11±244.03ab	$0.51 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.16±0.01a	4.47±0.55a
	晚稻	СК	8 638.05±431.10d	$0.49 \pm 0.05 a$	$0.16\pm0.01\mathrm{b}$	4.82±0.32b
	Late rice	EC	$10945.1\pm686.42\mathrm{b}$	$0.59 \pm 0.07 a$	0.20±0.01a	6.48±0.40a
		ET	10 330.6±635.16c	0.52±0.04a	0.19±0.01a	6.16±0.42a
		ETEC	11 452.8±707.31a	0.57±0.07a	0.19±0.01a	6.54±0.32a

www.aer.org.cn





图3 不同试验处理下双季稻籽粒中Fe、Zn及植酸累积量

Figure 3 Accumulation of Fe, Zn and phytic acid in double cropping rice grain under different treatments

显著小于2017年的对应值。

2.5 大气CO₂浓度上升与增温对土壤有效态Fe和Zn 的影响

2017—2019年不同处理下早稻和晚稻收获后土 壤有效态 Fe与Zn含量存在较大的年际间差异(表 5)。与CK相比,2018年晚稻土壤有效态 Fe含量在 EC、ET和ETEC处理下分别下降17.34%、10.17%和 15.68%(P<0.05)。2018年早稻土壤有效态Zn含量在 EC处理下显著增加431.00%,晚稻却显著下降 42.67%(P<0.05)。整体而言,2017—2019年在EC处 理下早稻土壤有效态Zn含量显著增加,而晚稻土壤 有效态Zn含量显著降低。

2.6 双季稻籽粒 Fe和 Zn含量与其他变量的内在关联

相关性分析表明(表6),2017年和2018年晚稻籽 粒 Fe 含量与植酸含量存在显著负相性(P<0.01)。 2018年早稻籽粒Zn含量与植酸含量存在正相关性 (r=0.5,P<0.05),而晚稻则表现为负相关性(r=-0.67, P<0.01)。2017年早稻、2018年早稻和晚稻籽粒Fe 和Zn含量之间存在正相关性。2019年早稻籽粒Zn 含量与土壤中有效态Zn含量存在正相关性(r=0.53, P<0.01)。2018年和2019年晚稻土壤有效态Fe含量 与Zn含量存在显著正相关性(P<0.01)。 2023年6月

李敏,等:大气CO2浓度上升与增温对双季稻籽粒铁、锌和植酸含量及累积量的影响

表5 不同处理下双季稻成熟期土壤有效态Fe和Zn含量

Table 5 Soil available Fe, Zn content at mature stage of double cropping rice under different treatments

水稻类型	处理	有效态 Fe 含量 Available Fe content/(mg·kg ⁻¹)				有效态Zn含量Available Zn content/(mg·kg ⁻¹)			
Rice type	Treatment	2017年	2018年	2019年	2017—2019年	2017年	2018年	2019年	2017—2019年
早稻	СК	122.14±1.79a	86.02±15.26a	113.19±9.83a	107.12±7.95a	3.12±0.72a	$1.00\pm0.11\mathrm{b}$	2.61±0.46a	2.24±0.41b
Early rice	EC	114.24±3.48a	90.42±1.85a	96.52±15.37a	107.06±6.46a	4.81±0.30a	5.31±1.00a	2.16±0.36a	4.10±0.59a
	ET	116.29±4.54a	91.04±7.91a	104.19±7.26a	103.84±5.18a	3.71±0.67a	$2.79 \pm 0.39 \mathrm{ab}$	2.60±0.14a	$3.03{\pm}0.30{\rm ab}$
	ETEC	122.79±0.94a	113.62±4.88a	90.21±20.23a	108.28±8.74a	3.80±0.23a	$2.69 \pm 0.77 \mathrm{ab}$	1.66±0.36a	2.72±0.41ab
晚稻	СК	109.37±8.00a	89.94±0.38a	92.52±10.63a	97.28±5.40a	4.54±0.56a	1.57±0.02a	3.52±0.24a	3.21±0.45a
Late rice	EC	84.13±6.95a	$74.34{\pm}0.96{\rm c}$	102.80±12.06a	87.09±6.08a	3.51±0.21a	0.90±0.01c	2.97±0.21a	$2.46 \pm 0.38 \mathrm{b}$
	ET	99.49±7.98a	$80.79{\pm}2.92\mathrm{b}$	88.18±2.31a	89.49±3.90a	3.70±0.48a	$1.30{\pm}0.02{\rm b}$	2.90±0.15a	2.63±0.37ab
	ETEC	85.38±14.99a	$75.84{\pm}0.57{\rm bc}$	115.19±2.34a	92.14±7.54a	3.06±0.31a	0.86±0.01c	3.43±0.26a	$2.45 \pm 0.40 \mathrm{b}$

表 6 水稻籽粒中 Fe、Zn、植酸含量和土壤中有效态 Fe、Zn含量的皮尔逊相关系数(r)

Table 6 Pearson's correlation coefficients results between Fe,Zn and phytic acid(PA) contents in rice grains and soils

年八	*	牙粒 Grains	5	土壤Soils			
Year	Fe_g/ PA	Zn_g/ PA	Fe_g/ Zn_g	Fe_s/ Fe_g	Zn_s/ Zn_g	Fe_s/ Zn_s	
2017早稻	0.31	0.17	0.63**	0.16	-0.23	0.01	
2017晚稻	-0.61**	-0.40	0.13	0.08	0.52	0.33	
2018早稻	0.22	0.50*	0.49**	-0.51	-0.23	-0.06	
2018晚稻	-0.79***	-0.67**	0.51*	0.24	0.52	0.90***	
2019早稻	0.11	-0.33	-0.48	0.17	0.53**	0.05	
2019晚稻	0.10	-0.01	0.26	-0.18	-0.01	0.60**	

注:Fe_g、Zn_g和PA分别代表水稻籽粒中Fe、Zn和植酸含量; Fe_s和Zn_s分别代表土壤中有效态Fe和Zn含量;*,**和***表示相 对变化的统计学显著性水平(P<0.05,P<0.01和P<0.001)。

Note: Fe_g, Zn_g and PA represented Fe, Zn and phatic acid contents in rice grains, respectively; Fe_s and Zn_s represented soil available Fe and Zn contents, respectively. *, ** and *** indicated the statistical significance level of relative changes (P<0.05, P<0.01 and P<0.001), respectively.

3 讨论

3.1 大气CO₂浓度上升和增温对稻谷籽粒Fe和Zn含 量的影响

稻谷籽粒 Fe 和Zn 含量对于 CO₂浓度升高和增温 的响应机制较为复杂^[19-20]。目前存在的解释机制为: (1)温度升高通过改变水稻植物体内细胞膜的流动性 和细胞壁上能够结合矿质元素的位点数量,改变矿质 元素从细胞膜进入植株体内的运输方式,从而影响水 稻籽粒中矿质元素含量^[26-27];(2)温度升高促进植株 新陈代谢,增强营养器官向籽粒中转运矿质元素的能 力,改变作物籽粒矿质元素含量^[27];(3)大气 CO₂浓度 上升有利于水稻光合作用合成碳水化合物,从而导致 矿物质比例相对减少^[28];(4)大气CO₂浓度上升可能 会通过提高植物根系向地上部各个器官转运矿质元 素的能力而增加植株体内矿质元素含量^[28]。水稻在 不同生长阶段对每种矿质元素需求量不同,大气CO₂ 浓度上升会导致矿质元素在秸秆和籽粒的分配发生 不同程度的改变^[29]。

本研究通过3a的田间试验,未发现水稻籽粒Fe 和Zn含量对大气CO2浓度上升和增温的响应存在一 致性的规律。就单一因素而言,水稻籽粒Fe和Zn含 量的变化对CO2浓度上升较增温更为敏感,例如:EC 处理下2018年早稻籽粒Fe含量显著降低,2019年早 稻和晚稻籽粒Fe含量显著增加,2017年晚稻和2018 年早稻籽粒Zn含量显著降低;而ET处理下仅2018年 早稻籽粒Zn含量显著降低(表3)。ECET处理下 2018年早稻籽粒Fe含量和2019年早稻籽粒Zn含量 均显著降低。显然,难以用以上一种机理解释水稻籽 粒Fe和Zn含量对大气CO2浓度上升和增温的响应。 整体而言,大气CO2浓度上升是该地区水稻籽粒Fe和 Zn含量变化的主因,而增温与大气CO2浓度上升叠加 的作用更为显著。未来气候变化极可能出现 CO2浓 度和温度同步升高的情况,本研究倾向于未来气候变 化可能会降低稻米籽粒中Fe和Zn含量的观点。

有研究认为稻谷籽粒矿质元素含量对于 CO₂浓 度升高的响应和植酸含量存在一定程度的关联^[30]。 周三妮等^[31]利用 FACE 平台研究发现,高 CO₂浓度处 理下超级水稻精米和糙米 Zn 含量分别降低 4.70% 和 6.60% (*P*<0.01),植酸含量增加 2.00% 和 0.30% (*P*>0.05),尤其植酸与 Zn 的摩尔比显著增加。Myers 等^[14]的研究结果表明高 CO₂浓度使水稻植酸含量增 加了 1.20%,有效态 Zn 含量显著降低 7.80%。本研究

www.ger.org.cn

中EC处理下不同年份籽粒植酸含量普遍会增加(早稻增幅为17.17%,标准差为15.97%;晚稻增幅为9.96%,标准差为9.27%),但尚未达到统计学显著程度(P>0.05)。由于部分稻季稻谷籽粒Fe、Zn含量与植酸含量存在显著的负相关性(表6),且EC处理和ECET处理下籽粒Zn含量多年平均值的降幅达到统计学显著水平(P<0.05),因此本研究结果支持大气CO₂浓度上升有利于提高水稻籽粒植酸含量的观点。水稻植酸可以与Fe、Zn等矿质元素络合形成难以移动的植酸盐而不利于有效态Zn的转运^[32-33]。根据以上分析,我们推断大气CO₂浓度升高对水稻籽粒Zn含量的负效应可能与高CO₂浓度下植酸含量的增加存在因果关系。

3.2 大气CO₂浓度上升后稻谷籽粒Fe和Zn含量变化 的年际间差异

本试验中早稻和晚稻籽粒 Fe 和 Zn 含量对大气 CO,浓度上升与增温的响应存在极大的年际间差异, 尤其年份对变量总变异的贡献大于试验处理(表2)。 我们认为这种极大的年际间差异与年际间气象条件 波动有一定关联。已有研究发现移栽至抽穗期的温 度是限制长江中下游地区早稻生长发育和产量的主 要因素^[34]。本研究中EC处理的CO₂浓度增幅仅比对 照高100 µL·L⁻¹,远低于水稻功能叶片光合作用的 CO2饱和点。在适宜的温度条件下水稻叶片净光合 速率随着大气CO2浓度增加呈直线上升趋势,意味着 高CO2浓度有利于早稻叶片通过光合作用合成更多 的碳水化合物[35]。2019年早稻生育期平均温度比 2017年和2018年同期低0.6~1.6℃,降雨量高100 mm (图4),尤其在移栽至拔节期出现低温和长期阴雨天 气,比其他年份同期低2.1℃(图1)。对于早稻生长 期光温资源相对充裕的年份(2018年)而言,高CO2浓 度更有利于早稻合成更多碳水化合物而易于发生对 矿质元素的"稀释现象",导致EC处理下籽粒Fe和Zn 含量显著降低;相反,2019年早稻生长期内的低温和 阴雨天气会降低高CO₂浓度对光合作用的正向刺激, 从而减弱 EC 处理对水稻籽粒 Fe 和 Zn 含量的影响。

不同年份晚稻籽粒 Fe 和 Zn 含量的变化差异比 早稻更为明显。晚稻移栽于7月下旬,日均温高于 30℃,为该地区全年高温时段。移栽至拔节期的高 温天气是制约晚稻移栽后秧苗缓苗和分蘖的主要逆 境因子^[34]。此外,晚稻生育期内气温过高会限制水稻 功能叶片净光合速率^[35]。本研究中2019年晚稻生长 期内存在高温和干旱天气,其中平均气温比2017年



图4 2017—2019年不同水稻生长季内平均温度与累计降水量 Figure 4 Average temperature and cumulative precipitation in different rice growing seasons in 2017—2019

和2018年同期高0.8~1.8℃,降雨量减少120~350 mm (图4)。该气候条件下高CO₂浓度未表现出对Fe和 Zn含量的"稀释现象",相反EC处理对晚稻籽粒Fe含 量具有正效应,但对Zn含量无显著影响(表3)。这可 能是由于高温干旱条件下不同矿质元素转移运输对 高CO₂浓度的响应存在差异^[36-37]。有研究认为大气 CO₂浓度上升通过提高光合效率促进植物生长而提 高根际微生物活性,同时增加根系与根际微生物对矿 质元素的需求,从而导致被植物吸收的矿质元素在不 同部位的分配比例发生变化^[37]。这可能是晚稻籽粒 中Fe和Zn含量对CO₂浓度升高具有不同响应特征的 原因之一。

本试验2019年同时出现早稻生长期内低温阴雨 和晚稻生长期内高温干旱的不利天气,籽粒Fe含量 比其他年份普遍增加或保持不变,而籽粒Zn含量则 普遍出现降低现象。由此可认为该地区双季稻籽粒 Zn含量比Fe含量对于异常气候因子(高温或低温)更 为敏感。此外,本试验发现ETEC处理下2018年早 稻、2019年早稻和晚稻籽粒Fe含量显著低于EC处理 的对应观测值,并且ETEC处理下2019晚稻籽粒中 Zn含量显著降低(表3)。这说明增温与CO₂浓度升高 叠加作用效果有别于单因子影响,具体表现为二者叠 加对双季稻籽粒Fe和Zn含量的降低具有正协同效 应,尤其在高温干旱年份的晚稻籽粒Zn含量的降低 风险较大。

3.3 大气CO₂浓度上升和增温对土壤有效态Fe和Zn 的影响

关于气候变化对稻田土壤有效态矿质元素含量 影响的研究较少,Rounsevell等^[38]提出在未来全球气 候变化下土壤化学过程可能会对气候变化发生快速 响应。王小治等^[39]的研究表明大气CO₂浓度升高在一 定程度上增加了小麦田土壤有效态微量元素含量,以 及麦季土壤溶液中阴离子含量。本试验结果表明大 气中CO₂浓度上升增加2018年早稻土壤有效态Zn含 量,但降低2018年晚稻土壤有效态Fe、Zn含量(表5)。

研究普遍认为大气 CO2浓度升高会增强土壤酸 性[40],对土壤有效态矿质元素含量产生一定影响。"土 壤环境酸化"假说认为大气CO2浓度升高会促使根系 分泌酸性物质而降低 pH, 有利于促进土壤矿质元素 的溶解性和络合作用,间接提高耕层土壤中有效态矿 质元素的含量和分布[41-46]。本研究所有处理间土壤 pH不存在显著性差异,故"土壤环境酸化"假说并不 能解释气候变化引起土壤中有效态 Fe 和 Zn 含量的 变化。程磊等[47]的研究表明,高浓度CO2会使土壤溶 液中的阴离子(如NO3、SO4-、Cl-)含量降低,从而使其 主要的阳离子(有效态Fe和Zn)含量也发生明显改 变。此外,不同季节土壤微生物的数量和活性对高 CO₂浓度的响应机制可能不同,由此引起早稻和晚稻 成熟期土壤有效态 Fe 和 Zn 含量变化呈现不同的响 应特征。因此,气候变化与土壤有效态Fe和Zn含量 的关联和影响机制,需要开展更多试验进一步验证。

4 结论

(1)双季稻籽粒中 Fe、Zn 和植酸含量对大气 CO₂ 浓度上升与增温的响应存在较大的年际间差异,年际 间变化的影响大于试验处理的影响。

(2)双季稻籽粒Fe和Zn含量对大气CO₂浓度上 升的响应较增温更为敏感。大气CO₂浓度上升会显 著改变双季稻籽粒Fe和Zn含量,其作用与水稻生长 期内气象条件存在密切关系。

(3)大气CO₂浓度上升与增温叠加作用的效果有 别于各单因子影响,具体表现为二者叠加对双季稻籽 粒Fe和Zn含量的降低具有正协同效应,尤其在高温

干旱年份晚稻籽粒Zn含量的降低风险更大。

参考文献:

- IPCC. The physical science basis[R]//Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] ZAK R D, PREGITZER S K, CURTIS S P ,et al. Elevated atmospheric CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles[J]. *Plant and Soil*, 1993, 151(1):105–117.
- [3] GRIMM N B, CHAPIN F S, BIERWAGEN B, et al. The impacts of climate change on ecosystem structure and function[J]. Frontiers in Ecology & the Environment, 2013, 11(9):474-482.
- [4] 景立权,赖上坤,王云霞,等.大气CO₂浓度和温度互作对水稻生长 发育的影响[J].生态学报,2016,36(14):4254-4265. JING L Q, LAI S K, WANG Y X, et al. Combined effect of increasing atmospheric CO₂ concentration and temperature on growth and development of rice: a research review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14):4254-4265.
- [5] 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 L X, WANG Y X, ZHU J G, et al. What have we learned from 10 vears of free -air CO₂ enrichment (FACE) experiments on rice? Growth and development[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6):1573-1585.
- [6] 周伟平.大气温度和二氧化碳浓度升高对稻田 CH₄和 N₂O 排放及微 生物的影响[D].北京:中国农业科学院,2017:1-4. ZHOU W P. Elevated carbon dioxide and air temperature effects on theemissions of methane and nitrous oxide, and soil microbes in a double rice cropping system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017: 1-4.
- [7] WANG B, LI J L, WAN Y F, et al. Variable effects of 2 °C air warming on yield formation under elevated[CO₂] in a Chinese double rice cropping system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107662.
- [8] KHOSHGOFTARMANESH A H, SCHULIMN R, CHANEY R L, et al. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(1):83-107.
- [9] 蒋倩,朱春梧,刘钢,等. 籼稻和粳稻品种糙米矿质营养对开放式空 气 CO₂浓度升高的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5):1363-1369. JIANG Q, ZHU C W, LIU G, et al. Response of mineral nutrients in brown rice of indica and japonica cultivars(*Oryza sativa* L.) to elevated atmospheric[CO₂][J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5):1363-1369.
- [10] CONROY J P, SENEWEERA S, BASRA A S, et al. Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth, yield and grain quality of cereal crops[J]. *Functional Plant Biology*, 1994, 131(21):741-758.
- [11] FERNANDO N, PANOZZO J, TAUSZ M, et al. Rising atmospheric CO₂ concentration affects mineral nutrient and protein concentration

1206 IL

农业环境科学学报 第42卷第6期

of wheat grain[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4):1307-1311.

- [12] KAZUHIRO U, KEN I, NAOKI H, et al. How elevated CO₂ affects our nutrition in rice, and how we can deal with it[J]. *PLoS One*, 2019, 14 (3):e0212840.
- [13] HARRISON G G. Public health interventions to combat micronutrient deficiencies[J]. Public Health Reviews, 2010, 32(1):256–266.
- [14] MYERS S S, ZANOBETTI A, KLOOG I, et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition[J]. *Nature*, 2014, 510(7503):139–142.
- [15] SENEWEERA S, BLAKENEY A, MILHAM P, et al. Influence of rising atmospheric CO₂ and phosphorus nutrition on the grain yield and quality of rice(*Oryza sativa* cv. Jarrah)[J]. *Cereal Chemistry*, 1996, 73 (2):239–243.
- [16] SENEWEERA S, CONROY J P. Growth, grain yield and quality of rice(*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO₂ and phosphorus nutrition[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43:1131–1136.
- [17] JIN J, ARMSTRONG R, TANG C. Impact of elevated CO₂ on grain nutrient concentration varies with crops and soils: a long-term FACE study[J]. Science of the Total Environment, 2018, 651:2641–2647.
- [18] ZHU C, KOBAYASHI K, LOLADZE I. Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest ricedependent countries[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5):eaaq1012.
- [19] 王云霞,杨连新.水稻品质对主要气候变化因子的响应[J].农业环境科学学报,2020,39(4):822-833. WANG Y X, YANG L X. Response of rice quality to major climate change factors[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2020, 39(4):822-833.
- [20] 牛玺朝,户少武,杨阳,等.大气CO₂浓度增高对不同水稻品种稻米品质的影响[J].中国生态农业学报,2021,29(3):509-519. NIUXC, HUSW, YANGY, et al. Effects of CO₂ concentration enrichment on the grain quality of different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(3):509-519.
- [21] 李春华,曾青,沙霖楠,等.大气CO₂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. LI C H, ZENG Q, SHA L N, et al. Influence of elevated atmospheric CO₂ and temperature on microelement accumulation in rice [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2017, 36(6):1021-1026.
- [22] RICHARDSON M, COWTAN K, HAWKINS E, et al. Reconciled climate response estimates from climate models and the energy budget of earth[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10):931–935.
- [23] LIU L , WANG E , ZHU Y , et al. Effects of warming and autonomous breeding on the phenological development and grain yield of doublerice systems in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 165(Complete): 28–38.
- [24] 万运帆, 游松财, 李玉娥, 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 Y F, YOU S C, LI Y E, et al. Applied effect of improved open-top chamber on simulation in situ of elevating air temperature and CO₂ concentration in early rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5):123-130.
- [25] 中国土壤学会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版 社, 1984: 79-81. Agricultural Chemical Committee of Chinese Soil

Science. Chemical analysis in agriculture[M]. Beijing: Science Press, 1984:79-81.

- [26] SASAKI A, YAMAJI N, MA J F. Transporters involved in mineral nutrient uptake in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67 (12):3645–3653.
- [27] LYNCH D V, SREPONKUS P L. Plasma membrane lipid alterations associated with cold acclimation of winter rye seedlings (*Secale cereale* L. cv Puma)[J]. *Plant Physiology*, 1987, 83(4):761–767.
- [28] PENG S, JEAN-CHARLES I, AUDE C L, et al. Countering elevated CO₂ induced Fe and Zn reduction in *Arabidopsis* seeds[J]. *New Phytol*ogist, 2022, 235(5):1796–1806.
- [29] FANGMEIER A U, GRUTERS P H. Effects of elevated CO₂, nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat-II. Nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn)[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 96(1): 43-59.
- [30] 杨阳,户少武,牛玺朝,等.高CO₂浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(2):436-444. YANG Y, HU S W, NIU X C, et al. Effects of free air CO₂ enrichment and foliar zinc application on the grain zinc nutrition of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):436-444.
- [31] 周三妮, 王云霞, 赖上坤, 等. FACE下二氧化碳、施氮量、密度和锌肥对 II 优 084 稻米锌浓度及有效性的影响[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(3):289-296. ZHOU S N, WANG Y X, LAI S K, et al. Effects of free air CO₂ enrichment and foliar zinc application on the grain zinc nutrition of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(3):289-296.
- [32] STANTIALL S E, SERVENTI L. Nutritional and sensory challenges of gluten-free bakery products: a review[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2018, 69:427-436.
- [33] 李兴林,张月新. 种子植酸及其低植酸作物品种选育的研究进展 [J]. 种子, 2006, 25(12):51-53. LI X L, ZHANG Y X. Research progress on seed phytic acid and its low phytic acid crop varieties[J]. *Seed*, 2006, 25(12):51-53.
- [34] 潘志军, 吴晨阳, 吕和平, 等. 沿江双季稻北缘区气象要素分布及 其对双季稻生长发育的影响[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(4):29-35. PAN Z J, WU C Y, LÜ H P, et al. Distribution of meteorological elements and their effects on the growth and development of doublecropping rice along the northern margin of the Yangtze River[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(4):29-35.
- [35] 贾羽旋, 孙志华, 宋春燕, 等. 温度和 CO₂浓度变化对主要饲料作物功能叶光合参数的影响研究:以玉米和水稻的差异为例[J]. 中国饲料, 2021(19):87-93. JIA Y X, SUN Z H, SONG C Y, et al. Impacts of changes in temperature and CO₂ concentration on photo-synthetic parameters in functional leaves of feed crops: a case study on the differences between maize and rice[J]. *China Feed*, 2021(19): 87-93.
- [36] HUNGATE B A, JOHNSON D W, DIJKSTRA P, et al. Nitrogen cycling during seven years of atmospheric CO₂ enrichment in a scrub oak woodland[J]. *Ecology*, 2006, 87(1):26-40.
- [37] HU S J, CHAPIN F S I, FIRESTONE M K, et al. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂[J]. Na-

ture, 2001, 409(6817):188-191.

- [38] ROUNSEVELL M D A, EYANS S P, BULLOCK P. Climate change and agricultural soils: impacts and adaptation[J]. *Climatic Change*, 1999, 43(4):683-709.
- [39] 王小治, 孙伟, 封克, 等. 大气 CO₂浓度升高和施氮对麦季土壤有效态微量元素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 530-534. WANG X Z, SUN W, FENG K, et al. Effect of CO₂ enrichment and n supply on concentrations of DTPA-extractable microelements of soils in wheat season[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2):530-534.
- [40] 王小治, 尹微琴, 孙伟, 等. 大气 CO₂浓度升高对稻季耕层土壤溶液中 Ca、Mg浓度的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20):4221-4228. WANG X Z, YIN W Q, SUN W, et al. Effect of CO₂ enrichment on Ca and Mg concentration in soil solution at arable layer in the rice season[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(20):4221-4228.
- [41] 徐国强, 李杨, 史奕, 等. 开放式空气 CO₂浓度增高(FACE)对稻田 土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1358-1359.
 XU G Q, LI Y, SHI Y, et al. Effect of free-air CO₂ enrichment on soil microbe in paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10):1358-1359.
- [42] ZAK D R, PREGITZER K S, CURTIS P S, et al. Elevated atmospher-

ic CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles[J]. *Plant and Soil*, 1993, 151(1):105-117.

- [43] 张永娥, 王瑞良, 靳绍菊. 土壤微量元素含量及其影响因素的研究
 [J]. 土壤肥料, 2005(5):35-37. ZHANG Y E, WANG R L, JIN S J. Research on the content of soil micronutrients and affecting factors[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2005(5):35-37.
- [44] DIAZ S, GRIME J P, HARRIS J, et al. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide[J]. *Nature*, 1993, 364(6438):616-617.
- [45] BERNTSON G M, BAZZAZ F A. Belowground positive and negative feedbacks on CO₂ growth enhancement[J]. *Plant & Soil*, 1996, 187 (2):119-131.
- [46] 刘芷宇, 施卫明. 根际研究方法[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1996:308-327. LIUZY, SHIW M. A method for the study of rhizosphere[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996: 308-327.
- [47] 程磊,朱建国,陈改苹,等.大气 CO₂浓度升高和氮肥施用对小麦 生长期间土壤溶液阴离子含量的影响[J].土壤,2005,37(1):8084. CHENG L, ZHU J G, CHEN G P, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the concentration of anion of soil solution in wheat field[J]. *Soils*, 2005, 37(1):80-84.