土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202502280084 CSTR: 32215.14.trxb202502280084

顾歆悦，蔡创，尹斌，朱春梧. 多年 CO_2 浓度升高对水稻子代植株磷素吸收与分配的影响[J]. 土壤学报，2025，

GU Xinyue, CAI Chuang, YIN Bin, ZHU Chunwu. Effects of Elevated CO_2 on Phosphorus Uptake and Distribution in Rice for Multiple Generations[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

多年 CO_2 浓度升高对水稻子代植株磷素吸收与分配的影响 *

顾歆悦[1,2,3]，蔡 创[1]，尹 斌[1]，朱春梧[1,2,3]†

(1.中国科学院南京土壤研究所，南京 211135；2. 中国科学院大学，北京 100049；3.中国科学院大学南京学院，南京 211135)

摘 要：水稻是重要的口粮作物，客观真实地探究其子代磷素吸收与分配对持续多年 CO_2 浓度升高对土壤磷素的管理具有重要意义，有利于农业的可持续发展。在江苏常熟的自由大气 CO_2 富集系统（FACE）中进行子代 FACE 实验，在正常大气 CO_2 浓度和高 CO_2 浓度（较对照高 200 μmol·mol^{-1}）条件下将扬稻 6 号（籼稻）和武运粳 23（粳稻）连续子代培育七代，分析当代和子代在植株磷素浓度、积累量以及分配比例对 CO_2 浓度升高方面的响应差异。结果表明，连续多年 CO_2 浓度升高对扬稻 6 号和武运粳 23 当代与子代植株各器官磷含量均无显著性的影响。连续多年 CO_2 浓度升高能显著增加两个品种当代与子代地上部的磷素积累量，扬稻 6 号子代植株地上部和穗的磷素积累量的增幅要低于当代植株，高 CO_2 浓度对武运粳 23 号子代植株各器官的磷素积累量的增幅要高于当代植株。高 CO_2 浓度对武运粳 23 号秸秆磷素分配比例的增幅效应随着母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数的增加而显著线性增加。结果表明，基于过去 FACE 试验均为当季结果，不能准确反映未来持续高 CO_2 浓度对水稻植株磷素吸收与分配的真实效应。研究对未来 CO_2 浓度升高背景下田间磷素管理具有重要的指导意义。

关键词：CO_2 浓度升高；水稻；磷素吸收；磷素分配；子代

中图分类号：S511 **文献标志码**：A

Effects of Elevated CO_2 on Phosphorus Uptake and Distribution in Rice for Multiple Generations

GU Xinyue[1,2,3], CAI Chuang[1], YIN Bin[1], ZHU Chunwu[1,2,3†]

(1. *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences,*

* 鄂尔多斯市科技重大专项（2022EEDSKJZDZX010）、国家重点研发计划项目（2023YFD1500801）和江苏省重点研发计划（现代农业）（BE2022308）资助 Supported by the Erdos City Science and Technology Major Project (No. 2022EEDSKJZDZX010), the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500801), and the Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No. BE2022308)

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：cwzhu@issas.ac.cn

作者简介：顾歆悦（1998—），女，浙江台州人，硕士研究生，主要从事 CO_2 浓度升高对水稻植株营养元素变化研究。E-mail：guxinyue@issas.ac.cn

收稿日期：2025-02-28；收到修改稿日期：2025-08-22

Beijing 100049, *China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing* 211135, *China*)

Abstract: 【**Objective**】With the intensification of human activities since the Industrial Revolution, there is a continuous rise in carbon dioxide concentration in the atmosphere, which has become the main feature of global climate change. Rice being an important staple crop, it is important to explore its absorption and distribution of phosphorus under a long-term elevated CO_2 environment. 【Method】In this study, a multigenerational experiment was carried out cultivating Yangdao 6 (indica) and Wuyunjing 23 (japonica) in the Free Atmospheric CO_2 Enrichment System (FACE) in Changshu, Jiangsu Province. The experiment was carried out under ambient CO_2 and elevated CO_2 (increased by 200 μmol·mol^{-1}) conditions for seven generations, and the differences in phosphorus concentration, phosphorus uptake, and phosphorus distribution between the single-generation and multigenerational rice plants were evaluated. 【Results】(1) Long-term elevated CO_2 had no significant effect on the phosphorus concentration of multigenerational rice plants in Yangdao 6 and Wuyunjing 23. (2) The long-term elevated CO_2 significantly increased the phosphorus uptake of shoots in single-generation and multigenerational rice plants. However, the average increase in phosphorus uptake of the shoot and panicle of the offspring plant of Yangdao 6 was lower than that of the single-generation plant. On the contrary, the average increase in phosphorus uptake of shoot, straw, and panicle of the offspring plant of Wuyunjing 23 was higher than that of the single-generation plant under elevated CO_2. (3) The average increasing effect of elevated CO_2 on the phosphorus distribution in the straw of Wuyunjing 23 increased significantly with the increase in generations of maternal seeds under elevated CO_2. 【Conclusion】The results indicate that in the past, based on the single-generation short-term FACE studies, the real effect of long-term elevated CO_2 on phosphorus uptake and distribution in rice plants could not be accurately predicted in the future. Therefore, this study provides guidelines for field-level phosphorus fertilizer management in a future high-CO_2 world.

Key words: Elevated CO_2; Rice; Phosphorus uptake; Phosphorus distribution; Multiple generations

自工业革命以来，大气 CO_2 浓度已由 280 μmol·mol^{-1} 上升至现在的 420 μmol·mol^{-1} 左右，未来将大概率持续增加，预计到 21 世纪末，大气 CO_2 浓度将达到 600~650 μmol·mol^{-1}[1]。作为植物光合作用的底物，大气 CO_2 浓度升高会提高 C_3 作物（包括水稻）光合作用速率，增加其生物量和产量的[2-3]。作为全球 50 %以上的人口口粮作物[4]，水稻产量很大程度决定了全球粮食安全，因此，研究未来 CO_2 浓度升高对水稻生产效应是未来粮食安全的重要部分。CO_2 浓度升高对水稻产量的“肥料效应”与土壤磷的有效性和吸收量密切相关[5]。前人研究发现经过长期田间开放式 CO_2 浓度升高处理会降低土壤磷的有效性达 20 %以上，导致全球水稻因缺磷而减产风险的面积由 35 %增至 55 %[5]。CO_2 浓度升高会增加水稻植株生长，引起植株磷素吸收量增加，收获后带走多的植株磷素吸收量，从而引起土壤磷的有效性降低[5]。因此，研究植株磷吸收量对高 CO_2 浓度的响应对指导未来气候变化背景下田间磷素管理具有重要的意义。

前人主要是利用自由大气 CO_2 富集系统（FACE），探究骤增 CO_2 浓度对水稻生产与必需营养元素吸收量的影响[6-9]。而未来，水稻将持续的暴露在高 CO_2 浓度的环境中，也就是水稻在高 CO_2 浓度环境中种植、生长和收获，收获的种子子代又继续在高 CO_2 浓度下种植收获[10]。因此，多年水稻子代 FACE 试验才能更真实探究水稻对未来 CO_2 浓度升高的响应。然而，目前还没有研究在 FACE 环境中探究多年子代 CO_2 浓度升高对水稻子代生长与磷素吸收分配的影响。此外，前期的骤增 FACE 试验研究表明，CO_2 浓度升高对水稻生产的影响存在明显的籼粳差异[11]。多年 CO_2 浓度升高对水稻子代生长与磷素吸收分配的影响是否存在籼粳差异也值得进一步研究。

为此，本研究利用 FACE 试验平台，进行了连续 6 年的高 CO_2 浓度环境下水稻子代培养，以籼稻品种（扬稻 6 号）和粳稻品种（武运粳 23 号）为测试品种，探究水稻子代植株磷素的吸

收与分配对多年 CO_2 浓度升高的响应及其籼粳差异。本研究结果为未来 CO_2 浓度升高下土壤营养元素磷素的管理提供重要的依据，有利于农业的可持续发展及其全球粮食安全。

1 材料与方法

1.1 自由大气 CO_2 富集系统（FACE）

本试验依托位于江苏省苏州市常熟市古里镇康博村（31° 30′ N，120° 33′ E）稻麦轮作 FACE 平台，开展连续多年高 CO_2 浓度对籼粳亚种子代植株磷素吸收与利用影响的研究。该地年均降水量 1 100 mm，年均温度 16 ℃，日照时间超过 2 100 h，年均无霜期约 220 d。供试土壤类型为太湖地区典型乌栅土，2011 年耕层（0~20 cm）土壤有机碳 16.0 $g·kg^{-1}$、全氮 1.9 $g·kg^{-1}$、有效磷 12.3 $mg·kg^{-1}$、速效钾 94.3 $mg·kg^{-1}$。

该 FACE 平台共有 3 个 CO_2 浓度升高圈和 3 个对照圈。各圈设计为正八边形，直径 8 m，面积约 50 m^2。CO_2 浓度升高系统，是通过 FACE 圈周围的管道向中心喷射纯 CO_2 气体，利用反馈控制系统自动调节 CO_2 气体的释放速度及方向，保持水稻全生育期 FACE 圈内 CO_2 浓度较正常大气 CO_2 浓度高 200 $\mu mol·mol^{-1}$。对照田块未安装 FACE 管道，与自然状态一致。

1.2 试验材料和栽培管理

供试籼稻品种为扬稻 6 号(YD6)，粳稻品种为武运粳 23 号(WYJ23)。每个品种最初母代种子均在对照条件下获得，然后种植在高 CO_2 浓度环境或对照环境中，收获后种子再分别种入对应环境中。以此往复，经过 2015—2021 年连续种植，形成不同生长 CO_2 浓度历史的子代种子。2020 年本研究开始时，A5E0 种子经过连续 5 个对照生长季；A1E3 种子经过 1 个对照生长季、3 个高 CO_2 浓度生长季；A1E4 种子经过 1 个对照生长季， 4 个高 CO_2 浓度生长季；A0E5 种子经过连续 5 个高 CO_2 浓度生长季。2021 年以此类推，具体见图 1。将 A5E0 和 A6E0 种子分别种植于高 CO_2 浓度环境和对照环境中，模拟当代骤增 CO_2 浓度试验；而 A1E3、A1E4、A0E5、A1E5 和 A0E6 的种子分别种植在高 CO_2 浓度环境和对照环境中，模拟多子代 CO_2 浓度升高试验。

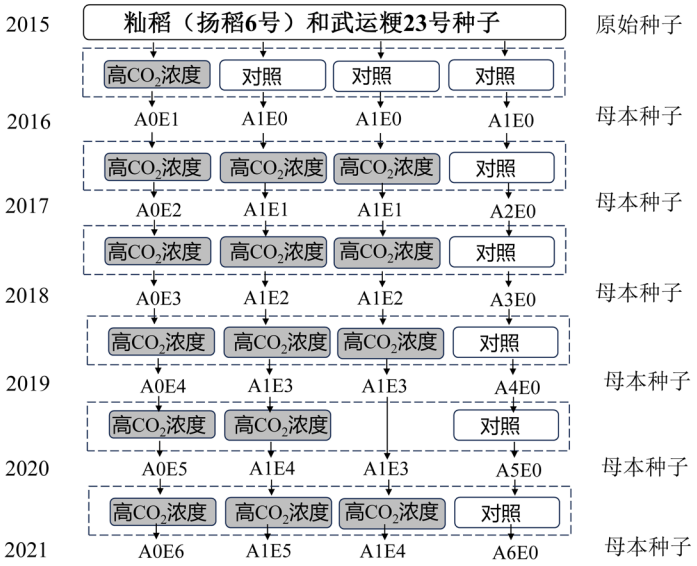

图 1 各实验季高 CO_2 浓度和对照处理的母本种子

Fig. 1 Parent seeds treated with elevated CO_2 and ambient CO_2 in each experimental season

扬稻 6 号水稻品种移栽密度为每穴 1 株，武运粳 23 号水稻品种为每穴 2 株，种植行距 16.7

cm，列距 25 cm，每平方米 24 穴。根据当地施肥方式，氮磷钾肥的施用量分别为 181、69、69 kg·hm^{-2}，其中磷钾肥作为基肥一次性施入，氮肥基肥、分蘖肥、穗肥施用量分别为 69、60、52 kg·hm^{-2}，基肥采用氮磷钾 15∶15∶15 的复合肥于移栽前一天施入。病虫害防治均参照当地常规管理。

1.3 样品采集与分析

在水稻植株成熟期，根据每穴平均分蘖数，每品种每处理取代表性植株 3 穴（2020 年）和 6 穴（2021 年）。将取样植株分为秸秆和穗两个部位，在 80 ℃烘箱中烘至质量恒定（一般 72 h）后称重。

植株各器官磷含量用钼锑抗比色法确定：将成熟期样品（包括穗和秸秆）烘干粉碎，各取 0.5 克与 5 mL 浓硫酸和 30%双氧水混合，340 ℃消煮；然后吸取 0.5 mL 过滤定容后的消煮液于 50 mL 容量瓶中，用水稀释至约 20 mL 后，加 2 滴二硝基酚指示剂，滴加 2 mol·L^{-1} 氢氧化钠溶液中和至刚呈黄色，再加入 1 滴 0.5 mol·L^{-1} 稀硫酸溶液，使溶液的黄色刚刚褪去呈淡黄色，再加入钼锑抗显色剂 5 mL 摇匀，用水定容，在室温（高于 15 ℃）条件下放置 30 min 后，用 1 cm 光径比色槽在波长 700 nm 处测定吸光度，以空白溶液为参比调节仪器零点；随后准确吸取磷浓度为 5 mg·L^{-1} 标准工作溶液 0、1、2、4、6、8 mL 分别放入 50 mL 容量瓶中，加水至 20 mL，同上步骤显色并定容，即得 0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 mg·L^{-1} 的磷标准系列溶液，与待测液同时测定，读取吸光度，然后绘制校准曲线；据此计算植株各器官磷素浓度，最后根据磷素浓度以及各器官干重，计算出植株各器官磷素积累量和分配比例。

1.4 数据处理

扬稻 6 号和武运粳 23 号分属籼稻和粳稻品种，在磷素吸收分配对高 CO_2 浓度响应方面存在较大差异，为更好地评估连续多年 CO_2 浓度升高对水稻植株磷素吸收分配的真实效应，将各品种当代及子代的高 CO_2 浓度处理结果除以对照进行归一化处理，计算高 CO_2 浓度效应：

$$\text{高 } CO_2 \text{ 浓度效应} = \frac{\text{高}CO_2\text{浓度下植株磷素吸收与分配}}{\text{大气}CO_2\text{浓度下植株磷素吸收与分配}}$$

以 Excel 进行数据处理和图表绘制。以 SPSS 25.0 进行统计分析，采用方差分析（ANOVA）及最小显著差异法（LSD）分析比较不同处理间的差异。为说明高 CO_2 浓度处理对植株磷素积累与分配的影响是否与母本种子在高 CO_2 浓度下的代际数有关，构建两者的线性关系。当 $P < 0.05$ 时，认为差异显著或线性相关。

2 结 果

2.1 连续多年高 CO_2 浓度对水稻子代植株磷含量的影响

CO_2 浓度升高对扬稻 6 号和武运粳 23 号子代植株地上部、秸秆和穗的磷含量均无显著性影响（图 2、图 3）。总体而言，CO_2 浓度升高增加这两个品种各子代植株各器官的磷含量。线性回归分析表明，地上部、秸秆和穗磷含量在高 CO_2 浓度下的增加比值与高 CO_2 浓度对母本种子处理的代际数无显著的相关性。

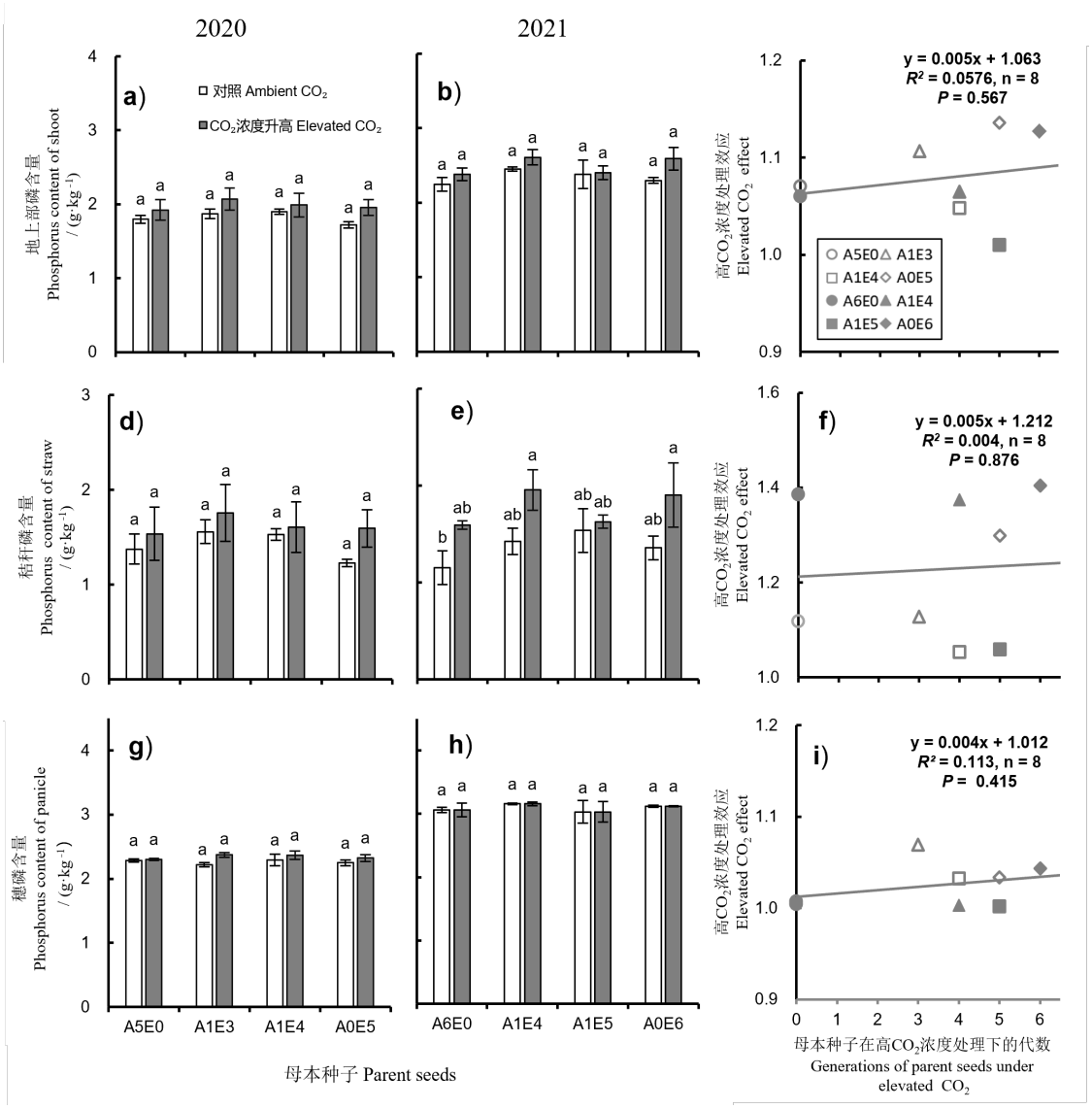

图 2 2020 年和 2021 年扬稻 6 号成熟期各子代植株不同部位磷含量对 CO_2 浓度升高的响应

Fig. 2 Phosphorus content of shoot, straw, and panicle under ambient CO_2 and elevated CO_2, and the ratio in phosphorous content of different organs at ambient CO_2 to elevated CO_2, for all generations of cv. YD6 in 2020 and 2021 in FACE experiments

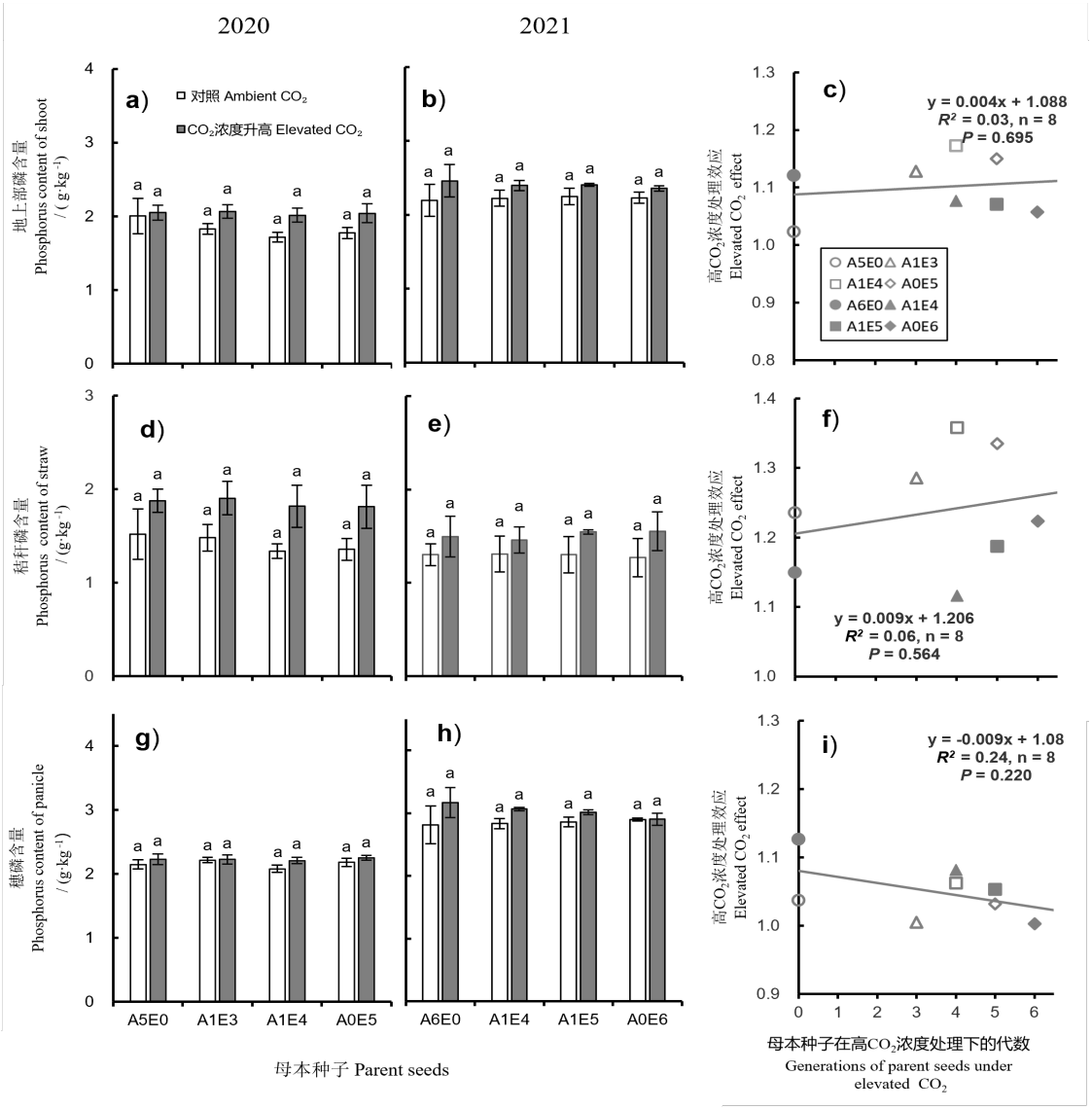

图 3 2020 年和 2021 年武运粳 23 号成熟期各子代植株不同部位磷含量对 CO_2 浓度升高的响应

Fig. 3 Phosphorus content of shoot, straw, and panicle under ambient CO_2 and elevated CO_2, and the ratio in phosphorous content of different organs at ambient CO_2 to elevated CO_2, for all generations of cv. WYJ23 in 2020 and 2021 in FACE experiments

2.2 连续多年高 CO_2 浓度对水稻子代植株磷素累积量的影响

对扬稻 6 号当代植株（A5E0 和 A6E0）而言，CO_2 浓度升高能够显著增加地上部、秸秆和穗的磷素积累量。地上部磷素积累量的增幅为 36.0%（图 4a、图 4b），秸秆磷素积累量的增幅为 65.5%（图 4d、图 4e），穗磷素积累量的增幅为 28.5%（图 4g、图 4h）。对杨稻 6 号子代植株（A2E3、A1E4、A0E5、A2E4、A1E5 和 A0E6）而言， CO_2 浓度升高显著增加各子代地上部磷素积累量以及 A1E4 和 A0E6 秸秆磷素积累量。具体表现为：各子代地上部磷素积累量的增幅为 23.9%（图 4a、图 4b），秸秆磷素积累量的增幅为 43.3%（图 4d、图 4e）以及穗磷素积累量的增幅为 17.1%（图 4g、图 4h）。对比子代与当代研究结果表明，CO_2 浓度升高对子代植株地上部、秸秆和穗的磷素积累量的增幅要低于当代植株的增幅效应。对武运粳 23 号当代植株（A5E0 和 A6E0）而言，CO_2 浓度升高仅显著增加 A5E0 穗的磷素积累量，增幅为 22.1%（图 5g）。对武运粳 23 号子代植株（A2E3、A1E4、A0E5、A2E4、A1E5 和 A0E6）而言，CO_2 浓度升高显著

增加 A2E3、A1E4、A0E5、A2E4、A1E5 和 A0E6 地上部和穗的磷素积累量（图 5a、图 5b、图 5g、图 5h），以及 A1E4 和 A0E5 秸秆的磷素积累量（图 5d、图 5e）。对比子代与当代研究结果表明，CO_2 浓度升高对武运粳 23 号子代植株地上部、秸秆和穗的磷素积累量的增幅要高于当代植株的增幅效应（图 5c、图 5f、图 5i）。线性回归分析表明，高 CO_2 浓度对武运粳 23 号植株秸秆磷素积累量的增幅效应均随着母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数的增加而显著线性增加（图 5f，$P < 0.05$）。

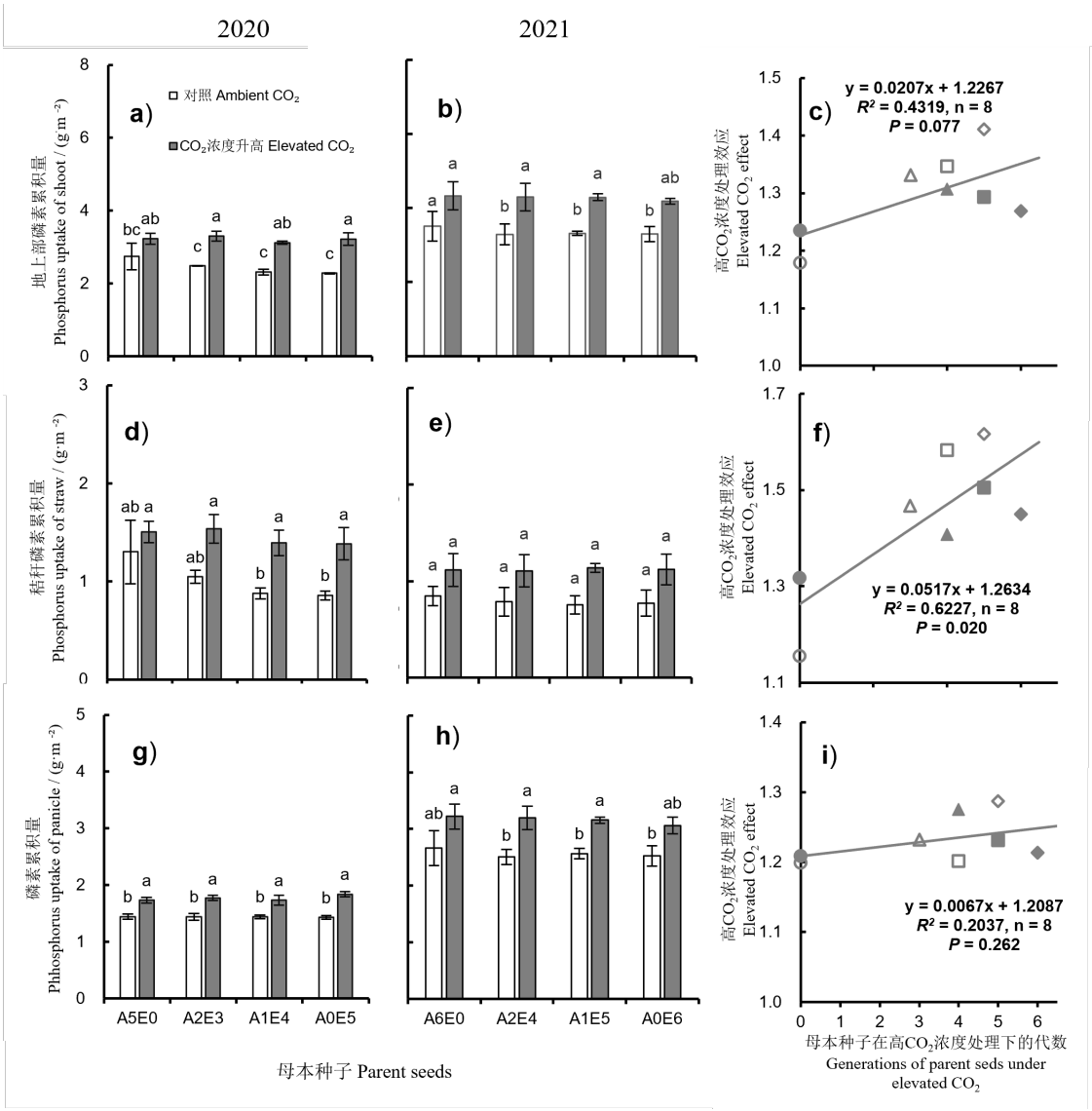

图 4 2020 年和 2021 年扬稻 6 号成熟期各子代植株不同部位磷素积累量对 CO_2 浓度升高的响应

Fig. 4 Phosphorus uptake of shoot, straw, and panicle under ambient CO_2 and elevated CO_2, and the ratio in phosphorous uptake of different organs at ambient CO_2 to elevated CO_2, for all generations of cv. YD6 in 2020 and 2021 in FACE experiments

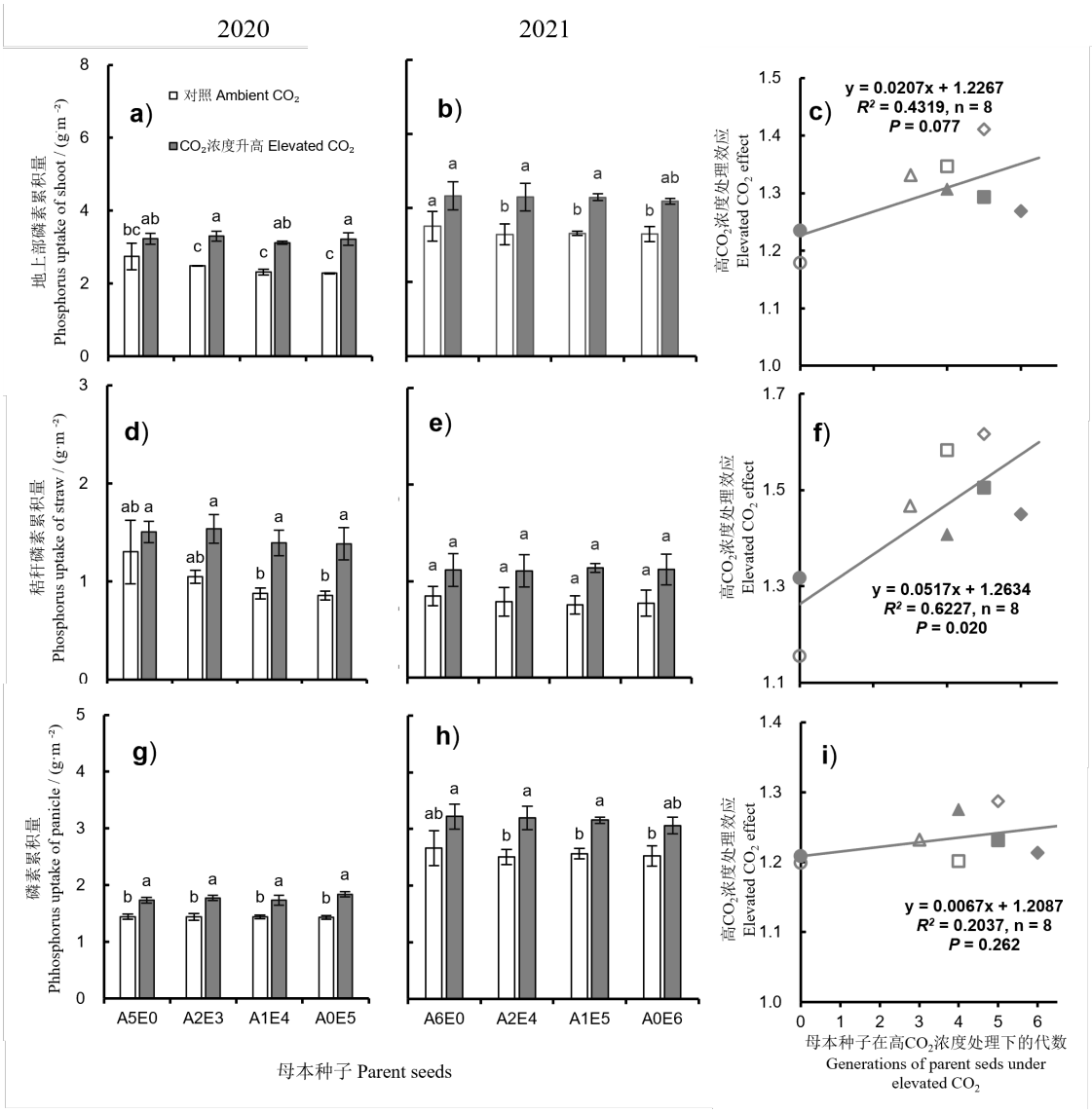

图 5 2020 年和 2021 年武运粳 23 号成熟期各子代植株不同部位磷素积累量对 CO_2 浓度升高的响应

Fig. 5 Phosphorus uptake of shoot, straw, and panicle under ambient CO_2 and elevated CO_2, and the ratio in phosphorous uptake of different organs at ambient CO_2 to elevated CO_2, for all generations of cv. WYJ23 in 2020 and 2021 in FACE experiments

2.3 连续多年高 CO_2 浓度对水稻子代植株磷素分配比例的影响

对扬稻 6 号当代植株而言， CO_2 浓度升高显著增加 A6E0 秸秆的磷素分配比例，显著降低 A6E0 穗的磷酸分配比例（图 6d、图 6e）。对各子代植株而言，CO_2 浓度升高仅显著 A2E4 秸秆的磷素分配比例，显著降低 A2E4 穗的分配比例（图 6a、图 6b）；对其他子代秸秆和穗的磷素分配比例无显著性的影响。线性回归分析表明，CO_2 浓度升高对秸秆和穗的磷素分配比例与母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数无显著性的相关性（图 6c、图 6f）。

对武运粳 23 号当代与子代植株而言，CO_2 浓度升高对秸秆和穗的磷素分配比例均无显著性的影响（图 7a、图 7b、图 7d、图 7e）。线性回归分析表明，高 CO_2 浓度对秸秆磷素积累量的分配比例增幅效应随着母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数的增加而呈线性显著上升（图 7c、图 7f，$P < 0.05$）。

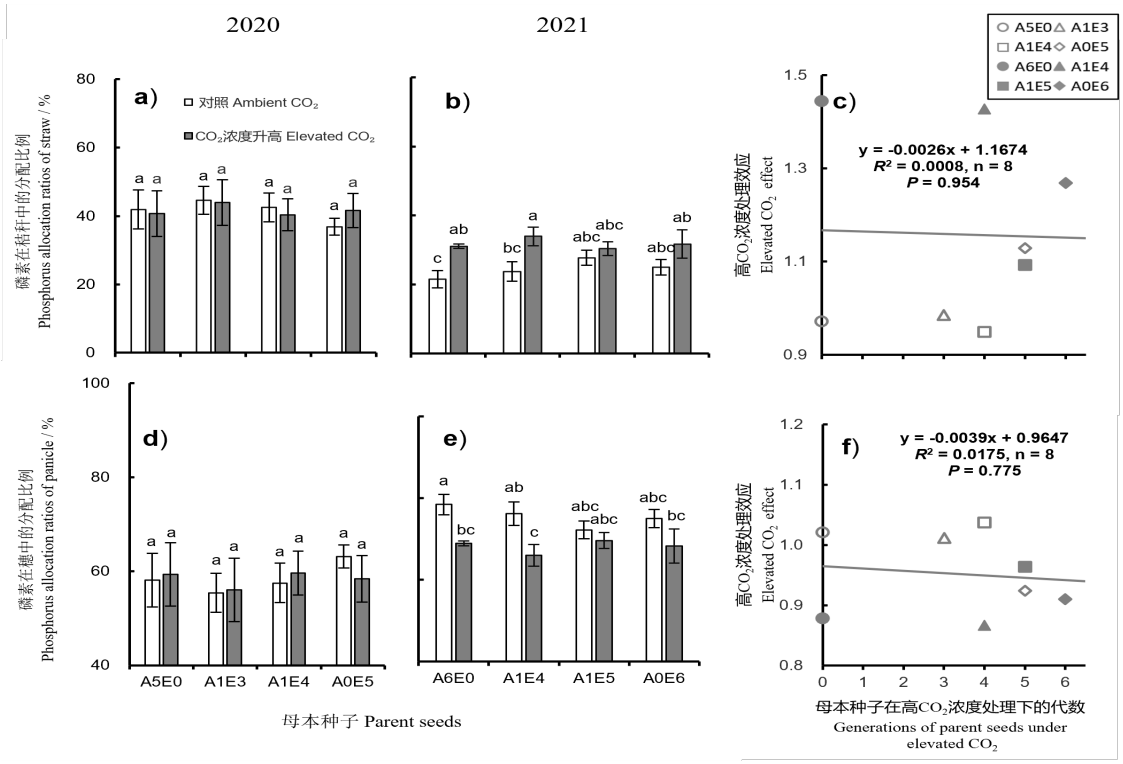

图 6 2020 年和 2021 年扬稻 6 号各子代植株不同部位磷素分配比例对 CO_2 浓度升高的响应

Fig. 6 Phosphorus distribution in straw and panicle under ambient CO_2 and elevated CO_2, and the ratio in phosphorous distribution at ambient CO_2 to elevated CO_2 in different organs, for all generations of cv. YD6 in 2020 and 2021 in FACE experiments

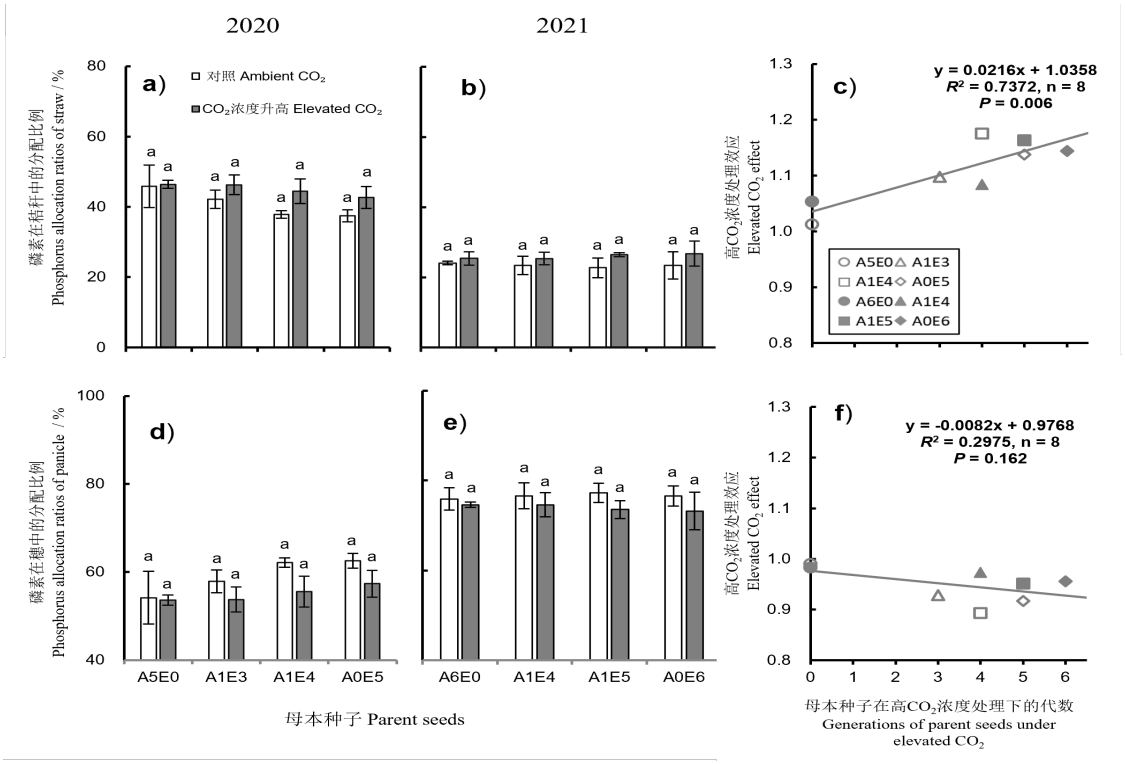

图 7 2020 年和 2021 年武运粳 23 号各子代植株不同部位磷素分配比例对 CO_2 浓度升高的响应

Fig. 7 Phosphorus distribution in straw and panicle under ambient CO_2 and elevated CO_2, and the ratio in phosphorous distribution at ambient CO_2 to elevated CO_2 in different organs, for all generations of cv. WYJ23 in 2020 and 2021 in FACE experiments

3 讨 论

3.1 连续多年高 CO_2 浓度对水稻子代植株磷含量的影响

前期的 FACE 研究表明，骤增 CO_2 浓度会降低水稻植株和籽粒中氮浓度，引起“隐性饥饿”，威胁全球以稻米为主食的贫困人群的营养健康[4]。而当代骤增 CO_2 浓度和多年子代 CO_2 浓度升高均不会降低植株和籽粒的磷含量[5, 12-13]。但是由于水稻在高 CO_2 浓度下收获带走的籽粒磷更多，长期高 CO_2 浓度处理会导致土壤有效磷的含量降低，使得全球水稻种植区（尤其是低收入国家）因缺磷而减产的面积增加[5]。本研究表明，CO_2 浓度升高会增加水稻当代和子代植株地上部、秸秆和穗的磷含量（图 2、图 3）。针对高 CO_2 浓度对磷素影响的机制，可能与其改变了土壤磷的有效性有关[5]。例如，高 CO_2 浓度可能通过增加根系分泌物和土壤磷酸酶活性来提高土壤磷的有效性[14-15]。此外，高 CO_2 浓度也可能通过增强根表皮和根毛的活性，提高植物对磷的吸收[16]。这表明，在未来子代高 CO_2 浓度处理下，水稻因缺磷而减产的风险并不会降低。因此，加强磷的养分管理，对确保农业的可持续发展是很必要的。

3.2 连续多年高 CO_2 浓度对水稻磷素积累的影响

CO_2 浓度升高会增加 C_3 作物叶片的光合速率，导致 C_3 作物生长与产量的增加[6]，进而引起植株营养元素（包括氮、磷和钾）的吸收量增加[17]。但是前人的研究关于 C_3 作物磷素的吸收量在短期高 CO_2 浓度增加处理下的增幅存在很大的差异。这种巨大的差异可能与测试品种和 CO_2 浓度升高幅度不同有关。周娟等[13]研究发现，当代 CO_2 浓度升高 200 μmol·mol^{-1} 使得常规粳稻、杂交籼稻和常规籼稻成熟期植株磷素积累量的增幅分别为 44.32%、12.47% 和 40.74 %。Wang 等[18]发现，当代 CO_2 浓度升高 100 μmol·mol^{-1} 对杂交粳稻成熟期植株磷素积累量无显著影响。本研究发现，当代 CO_2 浓度升高 200 μmol·mol^{-1} 对当代扬稻 6 号植株地上部磷素积累量的增幅为 36.0%（图 4a、图 4b），对当代武运粳植株 23 号地上部磷素积累量的增幅为 20.7%（图 5a、图 5b）。与当代武运粳 23 号相比，当代扬稻 6 号植株地上部磷素积累量的增幅更高；这与扬稻 6 号植株表现出更高的生物量增幅有关[19-20]。

然而，水稻当代与子代在 CO_2 浓度升高对植株地上部、秸秆和穗磷素吸收量方面存在很大的差异。CO_2 浓度升高对扬稻 6 号子代植株地上部和穗的磷素积累量的增幅要低于当代植株的增幅效应（图 4c、图 4i）。而 CO_2 浓度升高对武运粳 23 号子代植株地上部和穗的磷素积累量的增幅要高于当代植株的增幅效应（图 5c、图 5i）。线性回归分析表明，高 CO_2 浓度对武运粳 23 号植株秸秆磷素积累量的增幅效应均随着母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数的增加而显著线性增加（图 5f）。这些均表明，基于当季骤增 FACE 试验的结果，不能准确评估未来持续高 CO_2 浓度对水稻植株地上部和各器官磷素积累量的真实效应。

3.3 连续多年高 CO_2 浓度对水稻磷素分配的影响

水稻成熟时，60%～80%的植株吸收的磷会转运到籽粒[21]。在籽粒灌浆过程中，磷转运和磷利用效率等对籽粒充实度和品质改良有重要育种指导意义[22]。当代骤增 CO_2 浓度会影响水稻磷素的分配。杨连新等[23]研究发现，高 CO_2 浓度处理使得武香粳 14 号成熟期秸秆的磷酸分配比例增加 2.2%~23.9%，穗的磷素分配比例下降 9.8%~26.3 %；刘红江等[24]研究发现，高 CO_2 浓度处理下汕优 63 成熟期秸秆磷素比例显著增加 21.2%，穗磷素比例

下降 7.1%。与上述研究结果类似，本研究发现，对武运粳 23 号当代而言，CO_2浓度升高会增加植株磷素在秸秆的分配比例为 3.3%~5.1%。而对扬稻 6 号当代而言，CO_2浓度升高会增加植株磷素在穗的分配比例为 4.8%~ 5.1%。因此，骤增 FACE 试验对水稻植株磷酸分配的影响也存在品种差异。

本试验的子代 FACE 研究结果表明，CO_2浓度升高对扬稻 6 号子代秸秆和穗的磷素分配比例的影响与当代一致（图 6）。而对武运粳 23 号而言，高 CO_2 浓度对植株秸秆磷素积累量的增幅效应均随着母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数的增加而显著线性增加（图 7c）。这进一步表明，基于当季骤增 FACE 试验的结果，不能准确评估未来持续高 CO_2 浓度对水稻植株磷素分配的真实效应及其品种或籼粳差异。

4 结 论

CO_2 浓度升高对水稻当代与子代植株各器官磷含量无显著性的影响。但是 CO_2 浓度升高对扬稻 6 号子代植株地上部和穗的磷素积累量的增幅要低于当代植株的增幅效应。相反，CO_2 浓度升高对武运粳 23 号子代植株地上部、秸秆和穗的磷素积累量的增幅要高于当代植株的增幅效应。高 CO_2 浓度对武运粳 23 号植株秸秆磷素积累量和秸秆磷素分配比例的增幅效应均随着母本种子在高 CO_2 浓度处理下的代数的增加而显著线性增加。基于当季骤增 FACE 试验，不能准确评估未来持续高 CO_2 浓度对水稻植株磷素吸收与分配的真实效应。

参考文献（References）

[1] IPCC. Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crops to free-air CO_2 enrichment[J]. Advances in Agronomy, 2002, 77: 293-368.

[3] Zeng Q, Zhu J G, Liu G, et al. Effect of on competition between a C_3 crop (rice, *Oryza sativa*) and a C_4 weed (barnyard grass, *Echinochloa crus-galli*)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(10): 1231-1234. [曾青, 朱建国, 刘刚, 等. 开放式空气 CO_2 浓度增高条件下 C_3 作物（水稻）与 C_4 杂草（稗草）的竞争关系[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1231-1234.]

[4] Zhu C W, Kobayashi K, Loladze I, et al. Carbon dioxide (CO_2) 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.

[5] Wang Y, Huang Y Y, Song L, et al. Reduced phosphorus availability in paddy soils under atmospheric CO_2 enrichment[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(2): 162-168.

[6] Cai C, Yin X Y, He S Q, et al. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO_2 and temperature in FACE experiments[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 856-874.

[7] Zhang J Y, Li Y S, Yu Z H, et al. Elevated atmospheric CO_2 and warming enhance the acquisition of soil-derived nitrogen rather than urea fertilizer by rice cultivars[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 324: 109117.

[8] Ujiie K, Ishimaru K, Hirotsu N, et al. How elevated CO_2 affects our nutrition in rice, and how we can deal with it[J]. PLoS One, 2019, 14(3): e0212840.

[9] Hu S W, Tong K C, Chen W, et al. Response of rice grain quality to elevated atmospheric CO_2 concentration: A meta-analysis of 20-year FACE studies[J]. Field Crops Research, 2022, 284: 108562.

[10] Meinshausen M, Nicholls Z R J, Lewis J, et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500[J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(8): 3571-3605.

[11] Hu S W, Wang Y X, Yang L X. Response of rice yield traits to elevated atmospheric CO_2 concentration and its interaction with cultivar, nitrogen application rate and temperature: A meta-analysis of 20 years FACE studies[J]. Science of the Total Environment, 2021, 764: 142797.

[12] Huang J Y, Yang L X, Yang H J, et al. Effects of free-air CO_2 enrichment (FACE) on phosphorus accumulation and utilization at different growth stages in rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Wuxiangjing 14[J]. Journal of Yangzhou

University: Agricultural and Life Science Edition, 2004, 25(4): 1-6. [黄建晔, 杨连新, 杨洪建, 等. 水稻磷素对开放式空气 CO_2 浓度增高响应的研究[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 25(4): 1-6.]

[13] Zhou J, Shu X W, Xu G P, et al. Effects of elevated CO_2 on phosphorus absorption and utilization in different rice varieties[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(12): 2726-2734. [周娟, 舒小伟, 许高平, 等. 大气 CO_2 浓度升高对不同类型水稻品种磷素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2726-2734.]

[14] De Costa W A J M, Weerakoon W M W, Herath H M L K, et al. Physiology of yield determination of rice under elevated carbon dioxide at high temperatures in a subhumid tropical climate[J]. Field Crops Research, 2006, 96(2/3): 336-347.

[15] Kang H, Kim S Y, Fenner N, et al. Shifts of soil enzyme activities in wetlands exposed to elevated CO_2[J]. Science of the Total Environment, 2005, 337(1/2/3): 207-212.

[16] Bhattacharyya P, Roy K S, Dash P K, et al. Effect of elevated carbon dioxide and temperature on phosphorus uptake in tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53: 28-37.

[17] Zhou J. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration on yield formation and NPK absorption and utilization in different types of rice varieties[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. [周娟. 大气 CO_2 浓度升高对不同类型水稻品种产量形成及氮磷钾养分吸收利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.]

[18] Wang J Q, Li L Q, Lam S K, et al. Changes in nutrient uptake and utilization by rice under simulated climate change conditions: A 2-year experiment in a paddy field[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250: 202-208.

[19] 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_2 concentration[J]. Physiologia Plantarum, 2020, 168(1): 218-226.

[20] Zhu C W, Xu X, Wang D, et al. An indica rice genotype showed a similar yield enhancement to that of hybrid rice under free air carbon dioxide enrichment[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 12719.

[21] Tian Z J. Phosphorus accumulation, utilization and translocation characteristics in rice under saline-alkaline stress [D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2017. [田志杰. 盐碱胁迫下水稻磷素吸收利用转运特征的研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2017.]

[22] Ma B, Zhang L, Gao Q F, et al. A plasma membrane transporter coordinates phosphate reallocation and grain filling in cereals[J]. Nature Genetics, 2021, 53(6): 906-915.

[23] Yang L X, Yang H J, Huang J Y, et al. Effects of free-air CO_2 enrichment (FACE) on phosphorus nutrition of *Oryza sativa* at its different growth stages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(5): 924-928. [杨连新, 杨洪建, 黄建晔, 等. 水稻不同生育期磷素营养对开放式空气二氧化碳浓度增高的响应[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 924-928.]

[24] Liu H J, Yang L X, Huang J Y, et al. Effect of free-air CO_2 enrichment (FACE) on phosphorus uptake and utilization of three-line indica hybrid rice cultivar Shanyou 63[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 1882-1889. [刘红江, 杨连新, 黄建晔, 等. FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 磷素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1882-1889.]

（**责任编辑：** 卢 萍）