农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收利用的影响

周娟， 舒小伟， 许高平， 赖上坤， 杨连新， 董桂春， 王余龙

引用本文:
周娟, 舒小伟, 许高平, 等. 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 736–746.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0980

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

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
周娟, 舒小伟, 许高平, 赖上坤, 杨连新, 王余龙, 董桂春
农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2726–2734 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0679

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响
朱远芃, 史燕捷, 管浩, 叶新新, 郜红建, 华胜, 王宜坤
农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2596–2605 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0289

钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响
贾倩, 胡敏, 张洋洋, 孟远夺, 李小坤, 丛日环, 任涛
农业环境科学学报. 2015(12): 2245–2251 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.001

聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变化及养分利用的影响
徐嘉翼, 牛世伟, 隋世江, 张鑫, 叶鑫, 蔡广兴, 王娜
农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1696–1703 https://doi.org/10.11654/jaes.2019–0229

高CO_2浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响
杨阳, 户少武, 牛玺朝, 童楷程, 陈晨, 杨连新, 王云霞
农业环境科学学报. 2021, 40(2): 436–444 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0899

关注微信公众号，获得更多资讯信息

周娟, 舒小伟, 许高平, 等. 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 736-746.

ZHOU Juan, SHU Xiao-wei, XU Gao-ping, et al. Effect of elevated CO_2 on potassium absorption and utilization in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 736-746.

开放科学OSID

大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收利用的影响

周娟[1], 舒小伟[1], 许高平[1,2], 赖上坤[1,3], 杨连新[1], 董桂春[1], 王余龙[1*]

(1.江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/农业部长江中下游作物生理生态与栽培重点开放实验室/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州大学, 江苏 扬州 225009; 2.天津市农业科学院农作物研究所, 天津 300112; 3.江苏省农业科学院宿迁农科所, 江苏 宿迁 223800)

摘　要:以常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻共6个品种为供试材料,研究FACE(大气CO_2浓度增加200 μmol·mol^{-1})对不同品种类型水稻产量、钾素吸收、钾素利用的影响。结果表明:FACE处理使水稻产量显著提高,平均增加24.17%,常规籼稻增幅最大;FACE处理促进成熟期植株吸钾量和钾素籽粒生产效率的提高,比对照分别增加17.88%和11.80%,前者以杂交籼稻增幅最大,后者以常规籼稻增幅最大,提高吸钾量有利于提高水稻产量;FACE处理使水稻成熟期茎鞘、叶片和植株的含钾率均低于对照,植株含钾率平均降低8.43%,以常规籼稻降幅最大。提高植株含钾率有利于成熟期植株吸钾量的增加;FACE处理使水稻成熟期茎鞘吸钾量和穗吸钾量明显增加,叶片吸钾量略有下降,提高各器官吸钾量均有利于植株吸钾量的增加,茎鞘吸钾量相关程度最大;FACE处理使水稻移栽-分蘖、分蘖-抽穗、抽穗-成熟阶段吸钾量均有所提高,增加移栽-分蘖阶段吸钾量有利于成熟期植株吸钾量的提高;FACE处理有利于钾素向穗和茎鞘中分配,但叶片分配比例明显降低;FACE处理使结实期茎鞘叶钾素运转量降低44.04%,结实期穗部钾素增加量显著增加55.43%,常规籼稻增幅最大。提高结实期茎鞘叶钾素转运量和转运率均利于钾素籽粒生产效率的增加;FACE处理提高了成熟期钾素干物质生产效率、钾素收获指数,但每吨籽粒需钾量有所下降。综上,FACE处理提高了产量、成熟期植株吸钾量、钾素籽粒生产效率、钾素干物质生产效率、茎鞘叶钾素转运量和转运率、收获指数,降低了成熟期植株含钾率、每吨籽粒需钾量,籼稻品种钾素吸收对大气CO_2浓度升高的响应高于粳稻品种。

关键词:CO_2浓度升高;水稻;品种类型;产量;钾素吸收;钾素利用

中图分类号:S511.2　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2021)04-0736-11　　doi:10.11654/jaes.2020-0980

Effect of elevated CO_2 on potassium absorption and utilization in different rice varieties

ZHOU Juan[1], SHU Xiao-wei[1], XU Gao-ping[1,2], LAI Shang-kun[1,3], YANG Lian-xin[1], DONG Gui-chun[1], WANG Yu-long[1*]

(1.Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Low Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Crop Research Institute of Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin

收稿日期:2020-08-20　　**录用日期:**2020-12-01

作者简介:周娟(1978—),女,江苏扬州人,博士研究生,实验师,从事水稻栽培与生理研究。E-mail:juanzhou@yzu.edu.cn

***通信作者:**王余龙　E-mail:ylwang@yzu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31571608);江苏高校优势学科建设工程资助项目,江苏省农业自主创新项目(CX(18)1002);农业部农业重大技术协同推广计划试点项目(2020-SJ-047-03);江苏省重点研究计划科技成果转化专项资金项目(BA2016173,202350040);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目;张家港市科技计划项目(农业)(ZKN1818)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31571608); The Priority Academic Program of Jiangsu Higher Education Institutions; Jiangsu Province Agricultural Independent Innovation Project(CX(18)1002); Project of Collaborative Extension of Major Agricultural Technologies of the Ministry of Agriculture(2020-SJ-047-03); Special Funds for Transformation of Scientific and Technological Achievements in Jiangsu Province Key Research Program(BA2016173,202350040); Scientific Research Innovation Program for Postgraduates in Universities in Jiangsu Province; Zhangjiagang Agricultural Science and Technology Project(ZKN1818)

300112, China; 3. Suqian Institute of Agricultural Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Suqian 223800, China)

Abstract: In order to investigate the effects of FACE (Free Air CO_2 Enrichment: an increase of 200 μmol·mol^{-1} in the atmospheric CO_2 concentration) on the grain yield, and potassium (K) absorption and utilization, FACE treatment experiments were conducted on six rice varieties, including conventional japonica rice, hybrid indica rice, and conventional indica rice. Compared with the control treatment, FACE treatment significantly increased rice yield by 24.17% on average, with the largest increment observed in the conventional indica rice. The K uptake at maturity and use efficiency for grain yield under FACE treatment were promoted by 17.88% and 11.80%, respectively. The maximum increment of K uptake at maturity was observed in the hybrid indica rice, and that of K use efficiency for grain yield was observed in conventional indica rice. The K uptake at maturity was the most important contributor to grain yield. FACE treatment reduced the K content of the rice culm and sheath, leaves and total plant at maturity. The K content of total plants was decreased by an average of 8.43% at maturity, with the largest reduction occurring in the conventional indica rice. The K uptake at maturity was affected by the K content of the rice plant. The K uptake in the culm and sheath and panicle significantly increased, whereas that in the leaf slightly decreased following FACE treatment. The K uptake of each rice organ was important to the K uptake of total plant, with that of the culm and sheath showing greater contribution. FACE treatment promoted K uptake from transplantation to tilling, tilling to heading, and heading to maturity. The total K uptake at maturity was mostly affected by K uptake during transplantation to tilling. FACE treatment promoted the translocation of K to the panicle and culm and sheath, while reducing the translocation to the leaves. FACE treatment reduced the translocation of K to the culm and sheath and leaves by 44.04% at the filling grain stage, and increased the translocation of K to the panicle by 55.43%. The largest translocation to the panicle was found in the conventional indica rice. The K translocation amount and ratio were both beneficial to K use efficiency for grain yield. FACE treatment significantly increased the K use efficiency for dry matter production and K harvest index, while decreasing the K requirement per 1 t grain. In summary, FACE treatment significantly increased the grain yield, K uptake at maturity, K use efficiency for grain yield, K use efficiency for dry matter production, K translocation amount and ratio, and the harvest index, while decreasing the K content at maturity and K requirement per 1 t grain. Taken together, the indica rice varieties were more responsive to the elevated CO_2 concentration in the atmosphere than the japonica varieties.

Keywords: elevated CO_2 concentration; rice; types of varieties; grain yield; potassium absorption; potassium utilization

大气中的CO_2浓度一直在急剧增加,目前全球大气CO_2浓度比工业革命开始时增加了40%,达到400 μmol·mol^{-1},预计到2050年将达到550 μmol·mol^{-1}[1-2]。水稻是世界一半以上人口最重要的主食作物之一,中国约四分之一的耕地用于水稻生产,约占世界水稻总面积的20%[3]。大气CO_2浓度增加对水稻生长发育、产量形成、养分吸收利用均产生显著的影响[4]。钾素是水稻生长发育过程中需求量最大的三大营养元素之一,其能够促进水稻的光合作用和碳同化效率,提高水稻植株抗逆性,与氮、磷等营养元素共同影响作物的产量和品质[5-7]。前人利用FACE(Free Air CO_2 Enrichment)技术开展了水稻对CO_2浓度升高的响应和适应研究,在水稻生长发育、产量、品质等方面已有很多研究成果,且在水稻氮素、磷素吸收利用等方面也积累了较多的数据[8-14],但对水稻钾素吸收利用的研究很少。Wang等[15]研究表明,大气CO_2浓度增加到500 μmol·mol^{-1}时,常优5号成熟期植株吸钾量显著增加,但植株含钾率有所下降,而钾素利用效率变化较小;但Zeng等[16]的研究却显示,当大气CO_2浓度增加200 μmol·mol^{-1}时,常规粳稻9915不但成熟期植株吸钾量显著增加,而且植株含钾率也显著增加19.42%,但钾素利用效率明显下降,降幅达13.9%。在正常大气条件下,无论是中籼水稻(张义凯等[17],以1940—2000年我国各时期生产上大面积推广的9个中熟籼稻品种为试材)还是常规粳稻(梁健等[18],以淮北地区代表性的34个常规粳稻品种为试材),水稻植株钾素积累量、钾素吸收利用效率均随着品种演进和群体生产力的提高而显著增加。我国水稻品种类型较多,有籼稻、粳稻,也有常规稻、杂交稻,前人关于CO_2浓度升高对水稻养分影响的研究,多是用一种类型或一个品种,很少比较分析不同品种类型对CO_2浓度升高的差异。为此,本研究利用我国第一个稻麦轮作FACE研究平台,以常规粳稻、常规籼稻、杂交籼稻共6个品种为供试材料,研究CO_2浓度升高对不同品种类型水稻氮、磷、钾等养分吸收利用的影响,前文已从氮素[19]、磷素[20]吸收利用角度的差异进行了分析,本文拟分析CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收利用的特点及其差异,为应对全球气候变化条件下水稻品种的选择与钾肥施用策略的制定提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与设施

试验依托位于江苏省江都市小纪镇良种场试验田内(119°42′00″E,32°35′05″N)稻田FACE技术平台开展。该地年均降水量约1 100 mm,年均蒸发量约980 mm,年均温度14.9 ℃,日照时间超过2 100 h,年均无霜期约220 d。土壤类型为下位砂浆土的水耕人为土,砂粒(0.02~2 mm)578.4 g·kg^{-1},粉砂粒(0.002~0.02 mm)285.1 g·kg^{-1},黏粒(<0.002 mm)136.5 g·kg^{-1},容重1.16 g·cm^{-1},pH值7.2。土壤性质为有机碳18.4 g·kg^{-1},全氮 1.45 g·kg^{-1},碱解氮71.7 mg·kg^{-1},全磷0.63 g·kg^{-1},全钾14.0 g·kg^{-1},速效磷10.1 mg·kg^{-1},速效钾70.5 mg·kg^{-1}。平台共有3个处理(FACE)圈和3个对照(CK)圈。FACE圈之间以及FACE圈与CK圈之间的间隔大于90 m,以减少相互间的影响。FACE圈设计为正八角形,直径12 m,利用计算机网络对平台的CO_2浓度进行监测和控制,根据大气中的CO_2浓度、风向、风速、作物冠层高度的CO_2浓度及其昼夜变化等因素自动调节CO_2气体的释放速度及方向,使水稻全生育期FACE圈内CO_2浓度保持比大气背景CO_2浓度高200 μmol·mol^{-1}。对照田块没有安装FACE管道,其余环境条件与自然状态一致。

1.2 试验处理

试验以大气背景CO_2浓度(CK:约380 μmol·mol^{-1})为对照,以高CO_2浓度(FACE:比大气背景CO_2浓度高200 μmol·mol^{-1})为处理。处理时间为移栽次日至成熟期,FACE圈每日放气时间为日出至日落。

1.3 供试品种

以常规粳稻(Conventional japonica rice,CJR)武运粳21(中熟中粳)和扬辐粳8号(迟熟中粳)、杂交籼稻(Hybrid indica rice,HIR)汕优63(三系杂交籼稻)和两优培九(两系杂交籼稻)、常规籼稻(Conventional indica rice,CIR)扬稻6号(中籼)和扬辐籼6号(中籼)共6个品种为供试材料。

1.4 水稻培育

采用大田旱育秧,5月23日播种,6月17日移栽,行距25 cm,株距16.7 cm,24穴·m^{-2},常规水稻2苗·穴$^{-1}$,杂交水稻1苗·穴$^{-1}$。总施肥量(折合纯氮)为15 g·m^{-2},钾肥(K_2O)和磷肥(P_2O_5)均为7 g·m^{-2}。氮肥中基肥占60%、穗肥占40%,磷、钾肥作基肥一次性施用。基肥:施复合肥(N:P:K=15:15:15)46.67 g·m^{-2},尿素(含氮量46.67%)4.35 g·m^{-2};穗肥:施尿素13.04 g·m^{-2}。水分管理为6月17日(移栽期)至7月11日(分蘖期)保持浅水层(约5 cm),7月12日至8月5日(拔节期)进行多次轻搁田,8月6日以后间歇灌溉,收获前10日断水。适时进行病虫草害防治,水稻生长正常。

1.5 测定内容与方法

1.5.1 生育期调查

记载移栽期、分蘖期、抽穗期和成熟期等主要生育时期。

1.5.2 植株各器官干物质量的测定

依据普查结果,在主要生育时期取代表性植株5穴,将植株分为叶片、茎鞘、穗等部位,105 ℃杀青30 min、80 ℃烘至恒质量(72 h)后称质量。

1.5.3 植株各器官含钾率测定

将上述测定干质量的各器官样品烘干粉碎,用流动注射分析仪(SALL 3)测定钾浓度,计算各器官含钾量及钾素吸收(累积)量。

1.6 数据计算与统计分析

植株各器官吸钾量(g·m^{-2})=某时期器官含钾率×某时期器官干物质量

植株吸钾量(g·m^{-2})=茎鞘吸钾量+叶吸钾量+穗吸钾量

结实期茎鞘叶钾素转运量(g·m^{-2})=抽穗期茎鞘叶吸钾量−成熟茎鞘叶吸钾量

结实期茎鞘叶钾素转运率=结实期茎鞘叶钾素转运量/抽穗期茎鞘叶吸钾量×100%

结实期穗钾素增加量(g·m^{-2})=成熟期穗吸钾量−抽穗期穗吸钾量

钾素籽粒生产效率(kg·kg^{-1} K)=籽粒产量/成熟期植株吸钾量

钾素干物质生产效率(kg·kg^{-1} K)=某生育期干物质量/某生育期植株吸钾量

每吨籽粒需钾量(kg K·t^{-1})=成熟期植株吸钾量/籽粒产量×1 000

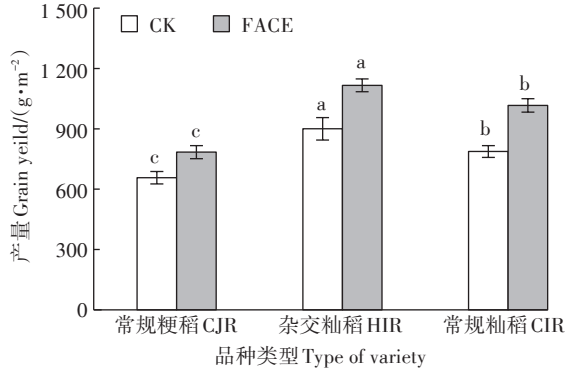
钾素收获指数=成熟期穗吸钾量/成熟植株吸钾量×100%

试验于2009年和2010年进行,两年试验数据基本一致,以合并数据进行分析。本试验所有数据均以Excel进行数据处理和图表绘制,以SPSS(25.0)进行统计分析。相同处理间不同品种类型水稻的比较采用最小显著差法(LSD),超过$LSD_{0.01}$和$LSD_{0.05}$分别视为差异极显著和差异显著。

2 结果与分析

2.1 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻产量的影响

FACE处理使供试水稻产量显著增加(图1),常规粳稻、杂交籼稻和常规籼稻较对照分别增加19.38%、24.02%和29.10%,平均增加24.17%,关于FACE处理对不同品种类型水稻产量及构成因素变化趋势及其差异的详细分析,参见文献[19]。

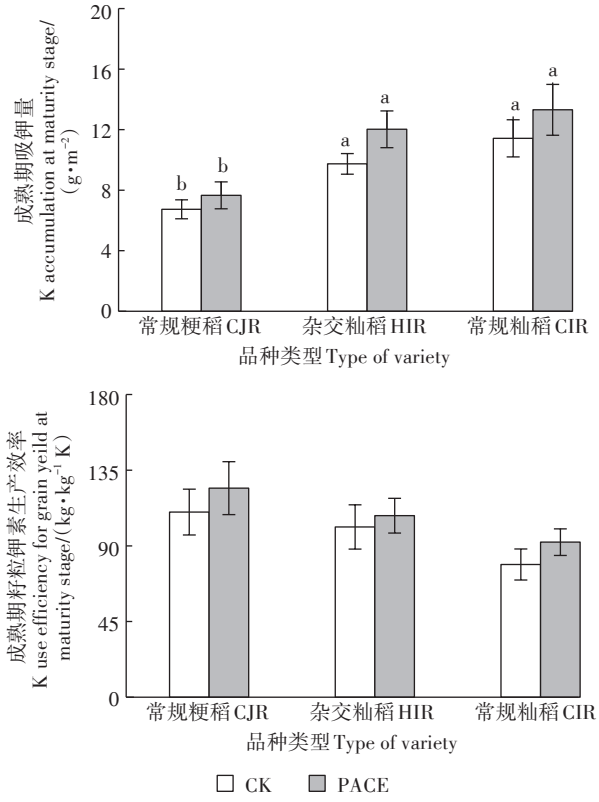


不同小写字母表示0.05水平差异显著(LSD检验),相同处理间不同品种类型水稻比较。下同

Different lowercase letters mean significant difference at $P<0.05$ level (LSD), comparison of different types of rice varieties in the same treatment. The same below

图1 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻产量的影响

Figure 1 Effect of elevated atmospheric CO_2 on grain yield of different rice varieties



图中未标注小写字母表示不同品种类型水稻在处理间无显著差异。下同

Lowercase letters are not marked in the figure, indicating that there is no significant difference among different types of rice varieties. The same below

图2 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期吸钾量及钾素籽粒生产效率的影响

Figure 2 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K accumulation and use efficiency for grain yield of different rice varieties

2.2 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期吸钾量及钾素籽粒生产效率的影响

由图2可知,FACE处理使供试水稻成熟期植株吸钾量增加17.88%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻较对照分别增加13.65%、23.47%、16.51%。从绝对数值来看,CK和FACE处理均以常规籼稻吸钾量最高,较常规粳稻和杂交籼稻分别增加69.55%、17.32%(CK)和73.81%、10.71%(FACE)。处理间(F=3.68)无显著差异,品种类型间(F=12.07**)差异极显著,处理×品种类型间无显著互作效应(F=0.21)。FACE处理使得供试水稻成熟期钾素籽粒生产效率增加11.80%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻较对照分别增加12.91%、6.64%、16.85%。从绝对数值来看,CK和FACE处理均以常规粳稻最高,较杂交籼稻和常规籼稻分别增加11.25%、39.54%(CK)和15.17%、34.83%(FACE处理)。处理间(F=1.04)和品种间(F=2.70)均无显著差异,处理×品种类型间无互作效应(F=0.04)。相关分析表明,成熟期植株吸钾量与产量呈极显著线性正相关(r=0.360**),钾素籽粒生产效率与产量均呈线性负相关(r=−0.125),但不显著。

2.3 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收的影响

2.3.1 对成熟期水稻植株各器官及地上部植株含钾率的影响

不同品种类型水稻成熟期植株含钾率变化如图3所示。FACE处理使供试水稻成熟期植株含钾率降低8.81%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻分别降低6.70%、5.37%、13.22%。从绝对数值来看,CK和FACE处理均以常规籼稻含钾率最高,较常规粳稻和杂交籼稻分别增加40.79%、17.73%(CK)和30.96%、7.97%(FACE)。处理间(F=1.09)无显著差异,品种类型间(F=3.95**)差异极显著,处理×品种类型间无显著互作效应(F=0.16)。相关分析表明,植株含钾率与

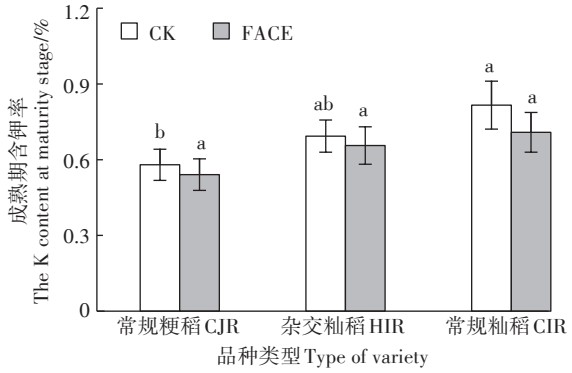


图3 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期含钾率的影响

Figure 3 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K content at maturity stage of different rice varieties

吸钾量呈极显著线性正相关(r=0.870**)。

大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期各器官含钾率的影响如表1所示。FACE处理下,供试水稻成熟期茎鞘、叶片的含钾率较CK分别下降10.79%、14.54%,穗含钾率较CK增加2.62%。茎鞘、叶片的含钾率均以常规籼稻降幅最大,穗含钾率以常规籼稻增幅最大。从绝对数值来看,CK处理下,茎鞘、叶片的含钾率均以常规籼稻最大,穗含钾率以常规粳稻最大;FACE处理下,茎鞘、叶片和穗的含钾率分别以杂交籼稻、常规籼稻和常规粳稻最大。叶片和穗的含钾率在处理间与品种类型间无显著差异,茎鞘的含钾率在品种类型间差异极显著。相关分析表明,成熟期茎鞘(r=0.770**)、叶片(r=0.535**)、穗(r=0.024)的含钾率均与成熟期植株吸钾量呈线性正相关,茎鞘、叶片差异极显著,穗无显著差异。

2.3.2 对成熟期植株各器官吸钾量的影响

由表2可见,FACE处理使得不同品种类型水稻成熟期茎鞘、穗的吸钾量增加18.42%、35.89%,叶片的吸钾量降低3.25%。成熟期茎鞘的吸钾量以杂交籼稻增幅最大,增加26.07%,叶片以常规粳稻降幅最大,降低15.08%,穗以常规粳稻增幅最大,增加44.14%。从绝对数值来看,CK和FACE处理下,茎

表1 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期各器官及地上部植株含钾率的影响(%)

Table 1 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K content in different organs at maturity stage of different rice varieties(%)

处理Treatment	品种类型Type of variety	茎鞘Stem	叶片Leaf	穗Panicle	地上部植株Up-ground plant
CK	常规粳稻CJR	0.96±0.08	0.55±0.08	0.30±0.06	0.58±0.06
	杂交籼稻HIR	1.54±0.14	0.51±0.06	0.21±0.04	0.69±0.06
	常规籼稻CIR	1.58±0.17	0.79±0.14	0.23±0.03	0.82±0.09
FACE	常规粳稻CJR	0.85±0.09	0.46±0.09	0.32±0.07	0.54±0.06
	杂交籼稻HIR	1.47±0.16	0.47±0.08	0.19±0.03	0.66±0.07
	常规籼稻CIR	1.32±0.13	0.65±0.13	0.25±0.04	0.71±0.08
	$F_{处理}$	1.82	1.22	0.03	1.09
	$F_{品种}$	12.38**	3.03	2.98	3.95**
	$F_{处理×品种}$	0.28	0.13	0.12	0.16

注:**、*表示在0.01、0.05水平上达显著相关。下同。

Note: ** and * indicate significant correlation at 0.01 and 0.05 levels. The same below.

表2 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期各器官吸钾量的影响($g·m^{-2}$)

Table 2 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K accumulation in different organs at maturity stage of different rice varieties($g·m^{-2}$)

处理Treatment	品种类型Type of variety	茎鞘Stem	叶片Leaf	穗Panicle
CK	常规粳稻CJR	4.39±0.40	0.97±0.15	1.38±0.22
	杂交籼稻HIR	7.24±0.59	1.06±0.17	1.44±0.29
	常规籼稻CIR	8.09±0.90	1.75±0.36	1.58±0.18
FACE	常规粳稻CJR	4.84±0.54	0.82±0.18	1.99±041
	杂交籼稻HIR	9.13±1.06	1.12±0.17	1.78±0.32
	常规籼稻CIR	9.38±1.18	1.71±0.37	2.22±0.35
	$F_{处理}$	3.26	0.04	4.65*
	$F_{品种}$	14.87**	5.54**	0.51
	$F_{处理×品种}$	0.38	0.08	0.15

鞘、叶片、穗的吸钾量均以常规籼稻最大。相关分析表明,茎鞘(r=0.940**)、叶片(r=0.632**)、穗(r=0.601**)的吸钾量与成熟期植株吸钾量均呈极显著线性正相关。

2.3.3 对主要生育阶段钾素吸收量的影响

FACE处理下不同品种类型水稻各生育阶段吸钾量如表3所示。FACE处理使各生育阶段吸钾量较CK分别增加9.93%、12.38%、23.11%。移栽-分蘖阶段以常规粳稻增幅最大,增加20.11%,分蘖-抽穗和抽穗-成熟阶段均以杂交籼稻增幅最大,分别增加19.61%、32.31%。从绝对数值来看,CK和FACE处理下,移栽-分蘖阶段均以常规籼稻最高,较常规粳稻和杂交籼稻分别增加88.11%、26.49%(CK)和55.74%、8.10%(FACE);分蘖-抽穗、抽穗-成熟阶段均以杂交籼稻最高,较常规粳稻和常规籼稻,分蘖-抽穗阶段分别增加22.28%、4.62%(CK)和41.19%、8.57%(FACE),抽穗-成熟阶段分别增加54.61%、0.07%(CK)和86.41%、8.03%(FACE)。相关分析表明,成熟期植株吸钾量与移栽-分蘖、分蘖-抽穗、抽穗-成熟相关系数分别为0.589**、0.345**、0.299*,呈极显著或显著线性正相关。

2.4 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期钾素分配的影响

由表4可知,FACE使成熟期茎鞘和穗钾素分配比例增加0.42%、14.87%,叶片的钾素分配比例降低20.08%,茎鞘钾素分配比例以杂交籼稻增幅最大,叶片以常规粳稻降幅最大,穗以常规粳稻增幅最大。从绝对数值来看,CK和FACE处理下,茎鞘的钾素分配比例均以杂交籼稻最大,较常规粳稻和常规籼稻分别高11.94%、3.70%(CK)和15.32%、4.87%(FACE);叶片的钾素分配比例均以常规籼稻最大,较常规粳稻和杂交籼稻分别高3.55%、20.30%(CK)和16.16%、13.43%(FACE);穗的钾素分配比例均以常规粳稻最大,较杂交籼稻和常规籼稻分别高42.25%、40.13%

表3 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻各生育阶段吸钾量的影响($g\cdot m^{-2}$)

Table 3 Effect of elevated atmospheric CO_2 concentration on K accumulation amount during different growth period of different rice varieties($g\cdot m^{-2}$)

处理 Treatment	品种类型 Type of Variety	移栽-分蘖 Transplanting-Tillering stage	分蘖-抽穗 Tillering-Heading stage	抽穗-成熟 Heading-Maturity stage
CK	常规粳稻CJR	1.85±0.11	6.85±0.33	1.55±0.41
	杂交籼稻HIR	2.75±0.14	8.37±0.75	2.40±0.35
	常规籼稻CIR	3.48±0.18	8.00±0.73	2.40±0.70
FACE	常规粳稻CJR	2.22±0.11	7.09±0.38	1.70±0.41
	杂交籼稻HIR	3.20±0.18	10.01±0.99	3.18±0.82
	常规籼稻CIR	3.46±0.22	9.22±0.97	2.94±0.92
$F_{处理}$		4.16*	0.54	0.85
$F_{品种}$		41.02**	0.91	1.92
$F_{处理\times品种}$		1.23	0.78	0.12

表4 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻成熟期钾素分配的影响(%)

Table 4 Effect of elevated atmospheric CO_2 concentration on K distribution percentage of organs at maturity stage of different rice varieties(%)

处理Treatment	品种类型Type of Variety	茎鞘Stem	叶片Leaf	穗Panicle
CK	常规粳稻CJR	66.06±3.79	13.91±1.79	20.04±2.41
	杂交籼稻HIR	73.94±3.28	11.97±2.62	14.09±2.07
	常规籼稻CIR	71.30±2.57	14.40±2.23	14.30±1.53
FACE	常规粳稻CJR	65.23±3.96	10.10±1.97	24.66±3.64
	杂交籼稻HIR	75.23±2.65	10.35±1.52	14.43±2.09
	常规籼稻CIR	71.73±2.39	11.74±1.87	16.53±1.58
$F_{处理}$		2.15	2.42	1.58
$F_{品种}$		5.65**	0.41	7.05**
$F_{处理\times品种}$		2.48	0.13	0.42

(CK)和70.95%、49.19%(FACE)。

2.5 大气CO_2浓度升高对不同类型水稻品种结实期钾素转运的影响

由表5可知,FACE处理使不同品种类型水稻结实期茎鞘叶的钾素转运量增加44.04%,常规粳稻降低1.53%,杂交籼稻和常规籼稻分别增加58.94%、196.36%。从绝对数值来看,CK和FACE处理下,茎鞘叶的钾素转运量均以常规粳稻最大,较杂交籼稻和常规籼稻分别增加182.40%、696.58%(CK)和74.97%、509.66%(FACE)。FACE处理使结实期穗钾增加量显著增加55.43%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻分别增加72.44%、23.33%、62.29%。从绝对数值来看,CK处理下,穗钾增加量以常规籼稻最大,较常规粳稻和杂交籼稻分别增加5.38%、39.49%,FACE处理下,穗钾增加量以常规粳稻最大,较杂交籼稻和常规籼稻分别增加85.06%、0.83%。相关分析表明,结实期茎鞘叶的钾素转运量(r=0.598**)、钾素转运率(r=0.658**)与钾素籽粒生产效率均呈极显著线性正相关,穗钾增加量(r=−0.507**)与钾素籽粒生产效率呈极显著线性负相关。

2.6 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素干物质生产效率和钾素收获指数的影响

由图4可知,FACE处理使不同品种类型水稻成熟期钾素干物质生产效率增加11.92%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻较CK分别增加12.37%、8.64%、15.02%。从绝对数值来看,CK和FACE处理均以常规粳稻最高,较杂交籼稻和常规籼稻分别增加24.93%、37.62%(CK)和26.32%、34.45%(FACE)。处理间(F=1.03)和品种类型间(F=2.84)均无显著差异,处理×品种类型间(F=0.03)无互作效应。FACE处理使不同品种类型水稻钾素收获指数增加21.21%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻较CK分别增加30.08%、9.47%、17.99%。从绝对数值来看,CK和FACE处理均以常规粳稻最高,较杂交籼稻和常规籼稻分别增加62.62%、44.24%(CK)和110.01%、59.03%(FACE)。处理间(F=1.89)无显著差异,品种类型间(F=8.14**)

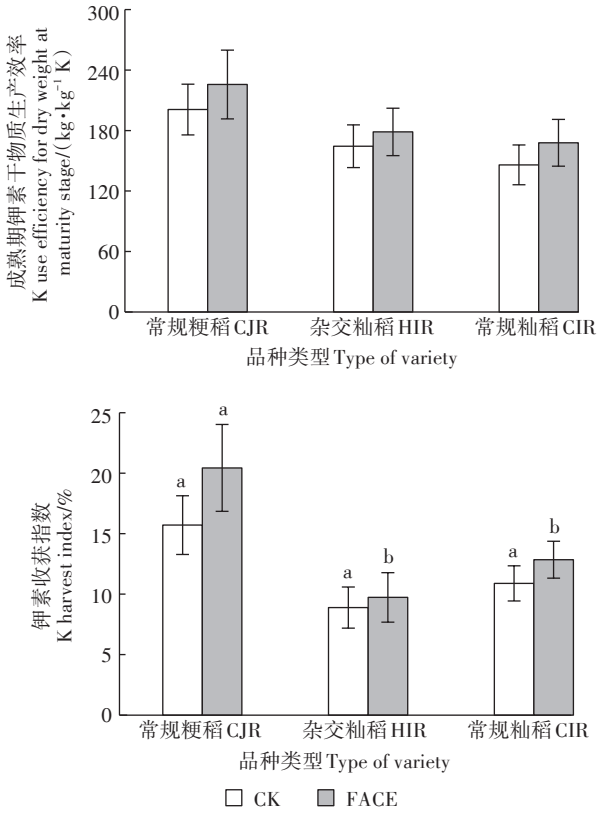


图4 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻干物质生产效率和钾素收获指数的影响

Figure 4 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K use efficiency for dry weight and harvest index of different rice varieties

表5 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻结实期钾素转运的影响

Table 5 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K translocation at ripening period stage of different types of rice varieties

处理 Treatment	品种类型 Type of Variety	茎鞘叶 Stem and leaf		穗钾增加量 Increase in K of panicle/(g·m^{-2})
		钾转运量 K translocation/(g·m^{-2})	钾素转运率 K translocation efficiency/%	
CK	常规粳稻CJR	2.10±0.39	28.49±5.57	0.79±0.23
	杂交籼稻HIR	0.74±0.52	6.93±6.22	0.59±0.23
	常规籼稻CIR	−0.35±0.75	−8.94±9.10	0.83±0.19
FACE	常规粳稻CJR	2.07±0.46	28.43±6.37	1.36±0.43
	杂交籼稻HIR	1.18±1.36	4.60±12.13	0.73±0.28
	常规籼稻CIR	0.34±1.16	−0.31±12.03	1.34±0.36
$F_{处理}$		0.27	0.08	2.88
$F_{品种}$		2.94	7.03**	1.33
$F_{处理×品种}$		0.10	0.21	0.32

差异显著,处理×品种类型间(F=0.40)无互作效应。

2.7 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻每吨籽粒需钾量的影响

由图5可知,FACE处理使不同品种类型水稻每吨籽粒需钾量下降8.84%,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻较对照分别降低5.76%、6.62%、12.85%。从绝对数值来看,CK和FACE处理均以常规籼稻最高,较常规粳稻和杂交籼稻分别增加38.32%、25.68%(CK)和27.92%、17.29%(FACE)。处理间(F=0.81)和品种类型间(F=1.63)均无显著差异,处理×品种类型间无互作效应(F=0.15)。水稻每吨籽粒需钾量(r=0.229)与产量呈线性正相关,但不显著。

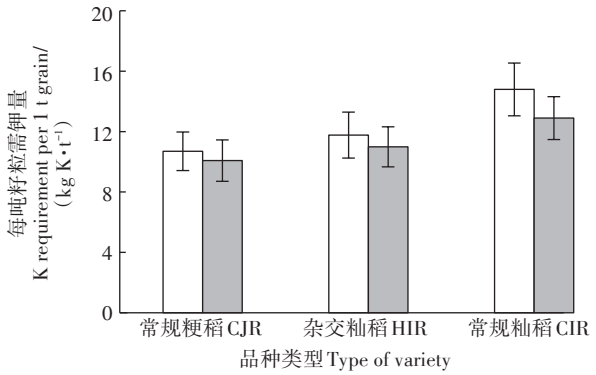


图5 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻每吨籽粒需钾量的影响

Figure 5 Effect of elevated atmospheric CO_2 on K requirement per 1 t grain of different rice varieties

3 讨论

3.1 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收的影响

钾素是水稻生长发育过程中需求量最大的三大营养元素之一,其能够促进水稻的光合作用和碳同化效率,提高水稻植株抗逆性[21],但关于大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素吸收方面的研究较少。Wang等[15]研究表明,尽管年度间存在一定的差异,但CO_2浓度升高均使常优5号成熟期植株含钾率呈下降趋势,2013年降低了4.31%,2014年降低了12.14%。但Zeng等[16]的研究结果却与之相反,即在大气CO_2浓度增加200 μmol·mol^{-1}条件下,常规粳稻9915成熟期植株含钾率不仅不降低,反而提高了19.42%,这个现象在正常大气条件下也有相似的表现,如一些研究指出,超高产栽培[22]或超高产群体[23]的水稻,成熟期含钾率也高于对应的常规栽培或普通群体。本研究表明,FACE处理使成熟期所有供试品种植株含钾率均有所下降,平均降低8.43%,这与Wang等[15]研究结果相似,但与Zeng等[16]研究结果相反,这可能与其研究材料不同有一定的关系。此外,本研究还表明,CO_2浓度升高后,常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻植株含钾率均有所下降,分别降低了6.70%、5.37%、13.22%,常规籼稻下降最大,品种类型间植株含钾率差异达到了极显著水平,说明不同品种植株含钾率对CO_2浓度升高的反应有一定差异。

在大气CO_2浓度增加情况下,常优5号水稻成熟期植株吸钾量增加了16.4%[15],但常规粳稻9915[16]提高的更加明显,增幅达56.41%,在正常大气条件下,超高产栽培[22]或超高产群体[23]的水稻,成熟期植株吸钾量也较对应的普通群体或常规栽培显著提高,分别增加了31.93%、26.17%。本研究表明,FACE处理使供试水稻植株吸钾量平均增加17.88%,但不同品种类型增幅也有一定的差异,籼稻尤其是杂交籼稻显著高于常规粳稻。水稻植株吸钾量可以分解为各器官吸钾量的总和,在大气CO_2浓度增加200 μmol·mol^{-1}条件下,Zeng等[16]研究表明,成熟期茎鞘叶吸钾量较对照降低了18.6%,穗吸钾量增加了45%。本研究表明,FACE处理使供试品种成熟期茎鞘吸钾量、穗吸钾量明显增加,但叶的吸钾量略有下降,说明增加茎鞘、穗的吸钾量有利于植株吸钾量的提高,这与Zeng等[16]的研究结果有相同也有不同;此外,本研究还表明,FACE处理使得供试水稻品种移栽–分蘖、分蘖–抽穗、抽穗–成熟阶段平均吸钾量均有所提高,分别增加了9.93%、12.38%、23.11%,这3个阶段分别以常规粳稻、杂交籼稻、杂交籼稻增幅最大,显示出不同类型水稻品种在不同生育阶段吸钾量的增幅存在一定的差异。

大气CO_2浓度升高促进了水稻生长,提高了水稻叶面积系数[24-25],增加了碳水化合物积累[26],最终表现为水稻植株干物质生产量的增加[19]。本研究表明,FACE处理使常规粳稻、杂交籼稻、常规籼稻成熟期干物质生产量分别增加19.04%、26.41%、28.98%,使成熟期植株含钾率分别降低6.70%、5.37%、13.22%,使成熟期吸钾量分别增加13.65%、23.47%、16.51%。为什么成熟期吸钾量增幅会有比较明显的品种类型的差异?我们发现干物质生产量、植株含钾率这两个指标的增降幅并不能完全直观地说明问题,还要观察它们绝对数量的大小。研究表明成熟期干物质量绝对值在FACE和CK两处理下均以杂交籼稻最大,其

次为常规籼稻、常规粳稻，成熟期植株含钾率绝对值在两处理下均以常规籼稻最大，其次为杂交籼稻，最小为常规粳稻。而吸钾量 = 植株含钾率×干物质量，由此可知，三类水稻品种成熟期吸钾量的绝对值在两处理下均以常规籼稻最大，其次为杂交籼稻，最小为常规粳稻，因此，从这点来看，成熟期吸钾量的差异是由于植株含钾率和干物质量共同作用的结果。进一步分析表明，成熟期植株含钾率（r=0.870**）、成熟期干物质生产量（r=0.488**）与成熟期吸钾量均呈极显著线性正相关，但前者与成熟期吸钾量的相关程度更大。

3.2 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻钾素分配、运转、利用的影响

关于对水稻钾素分配、运转的研究，在大气CO_2浓度升高下几乎无报道，在正常大气条件下研究较多。姜照伟等[27]的研究表明，三系杂交籼稻特优63成熟期茎鞘吸钾量占全株比例高达70%，抽穗后叶片有34%~40%的钾素转运到穗部和茎鞘。王强盛等[28]对常规粳稻武运粳7号、武香粳14号和杂交粳稻86优8号、泗优422的研究发现，施钾提高了水稻成熟期叶片、茎鞘、穗各器官的钾素吸收量（分配量）和茎鞘钾素分配比例，但降低了叶片钾素分配比例。本研究表明，FACE处理下，供试水稻品种成熟期茎鞘、穗钾素比例略有增加，叶片钾素比例显著下降，这与正常大气条件下的结论相似。此外，本研究还表明，FACE处理下，供试水稻品种结实期茎鞘叶钾素转运量降低了44.04%，穗部钾素增加量提高了55.43%，进一步研究发现，尽管结实期茎鞘叶钾素转运量和转运率在不同品种类型间存在一定的差异，但这两个性状的提高与钾素籽粒生产效率的增加有一定的同步关系。

关于大气CO_2浓度升高对水稻钾素籽粒利用效率的影响，前人研究均认为，CO_2浓度升高使钾素籽粒生产效率呈下降趋势，如常优5号下降了8.67%[15]，常规粳稻9915下降了13.9%[16]。本研究表明，FACE处理使供试水稻钾素籽粒生产效率增加11.80%，这与前人研究结论相反，可能与其CO_2浓度低或试验材料不同有关。此外，本研究还发现，不同品种类型水稻钾素籽粒生产效率对CO_2浓度升高响应也有明显的差异，常规籼稻的增幅最大。

3.3 钾素吸收和利用对水稻产量的影响

水稻产量可以分解为成熟期总吸钾量与钾素籽粒生产效率的乘积。显然，水稻产量受到钾素吸收和钾素利用的共同影响。在大气CO_2浓度增加至500 μmol·mol^{-1}条件下，常优5号的水稻成熟期吸钾量增加了16.4%，产量增加了6.4%，表现出吸钾量与产量均增加的趋势，但是钾素籽粒生产效率却下降了8.67%[15]。在正常大气条件下，杜永等[22]对淮稻68和镇稻88的研究发现，与常规高产栽培相比，超高产栽培产量分别增加42.89%、38.77%，成熟期吸钾量分别增加26.11%、26.24%，钾素籽粒生产效率分别增加13.43%、10.18%，表现出产量与吸钾量、钾素籽粒生产效率同时增加的态势。本研究表明，FACE处理使供试水稻产量增加24.17%，吸钾量增加17.88%，钾素籽粒生产效率增加11.80%，这与正常大气条件下的结论相似，但钾素籽粒生产效率变化趋势却与CO_2浓度升高条件下Wang等[15]的研究结论相反，可能因为其研究大气CO_2浓度增加较少（仅增加100 μmol·mol^{-1}），水稻产量增幅小于吸钾量的增幅，导致钾素籽粒生产效率的降低。综上，大气CO_2浓度增加显著促进水稻植株对钾素的吸收，也适度提高了钾素籽粒生产效率，这两个性状对水稻产量的提高均有正向促进作用，但吸钾量的增加无疑是CO_2浓度升高后水稻产量提高的最重要的钾素影响因子。

3.4 大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻氮、磷、钾吸收特点的影响及其异同分析

FACE条件下，大气CO_2浓度升高对不同品种类型水稻氮素、磷素吸收利用的影响前文[19-20]已作了详细分析。综合前文[19-20]及本研究结果表明，FACE处理使水稻氮、磷、钾吸收量均呈增加趋势，但增幅不同，氮、磷、钾吸收量分别增加了21.61%、31.97%、18.25%。成熟期养分总吸收量可以从5个方面进行解析[19]：（1）植株养分含有率×植株干物质量；（2）生育阶段1吸收量 + 生育阶段2吸收量+…+生育阶段n吸收量；（3）茎鞘养分吸收量+叶片养分吸收量+穗养分吸收量；（4）单穗（茎）吸收量×茎蘖（穗）数；（5）生育天数×吸收强度（单位时间内养分的吸收量）。对这5个方面的指标与成熟期养分总吸收量进行相关和通径分析，结果表明：植株干物质量、抽穗－成熟阶段吸氮量、叶片吸氮量、单穗吸氮量、吸氮强度是成熟期总吸氮量提高的主要因素[19]；植株含磷率、抽穗－成熟阶段吸磷量、穗吸磷量、单穗吸磷量、吸磷强度是成熟期吸磷量显著增加的主要因素[20]；植株含钾率、移栽–分蘖阶段吸钾量、茎鞘吸钾量、单穗吸钾量、吸钾强度是成熟期吸钾量显著增加的主要因素。对比5个方面的指标对成熟期养分吸收量的作用大小，可以发现单穗养分吸收量、养分吸收强度均对成熟期氮、磷、钾

养分总吸收量有重要作用,但植株干物质量和植株养分含有率、不同阶段养分吸收量、各器官养分吸收量对总吸收量的影响3种元素多有不同。

此外,氮、磷、钾吸收比例也有差异,在正常大气条件下,水稻对氮、磷、钾的吸收比例约为1:0.45:1.2[29]。本研究发现,FACE处理下水稻植株体内氮:磷吸收比例平均为1:0.58,比对照高15.57%,氮:钾吸收比例平均为1:0.85,比对照低3.12%,表明氮磷吸收比例比对照有所提高,氮钾吸收比例有所下降,同时与正常大气条件下氮磷钾的吸收比例也有一定的差异。这是否意味在未来大气CO_2浓度升高的条件下,当目标产量和氮素施用水平确定时,磷肥的用量要适度增加,钾肥的用量要适度减少,值得关注。

4 结论

FACE处理显著提高了不同品种类型水稻的产量、成熟期植株吸钾量、钾素籽粒生产效率,降低了成熟期植株含钾率、每吨籽粒需钾量。提高成熟期植株吸钾量有利于水稻产量的提高。促进成熟期植株含钾率、茎鞘吸钾量、移栽-分蘖期吸钾量的增加有利于成熟期吸钾量的提高,促进茎鞘叶中钾素向籽粒中转运有利于提高钾素籽粒生产效率。大气CO_2浓度升高后籼稻品种比粳稻品种有更高的钾素吸收利用潜力。

参考文献:

[1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K. IPCC: Climate change: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. IPCC: Climate change 2001: The scientific basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 225-237.

[3] Nagai T, Makino A. Differences between rice and wheat in temperature responses of photosynthesis and plant growth[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2009, 50(4): 744-755.

[4] Frolking S, Qiu J J, Boles S, et al. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4).

[5] Wang J, Liu X, Zhang X, et al. Size and variability of crop productivity both impacted by CO_2 enrichment and warming: A case study of 4 year field experiment in a Chinese paddy[J]. *Agriculture Ecosystems& Environmental*, 2016, 221: 40-49.

[6] Cheng W, Sakai H, Yagi K, et al. Combined effects of elevated CO_2 and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption, and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(9): 1174-1181.

[7] 廖育林, 郑圣先, 黄建余, 等. 施钾对缺钾稻田土壤钾肥效应及土壤钾素状况的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 255-260. LIAO Yu-lin, ZHENG Sheng-xian, HUANG Jian-yu, et al. Effect of application of K fertilizer on potassium efficiency and soil K status in deficit K of paddy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(2): 255-260.

[8] 杨连新, 王余龙, 黄建晔, 等. 开放式空气CO_2浓度增高对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1331-1337. YANG Lian-xin, WANG Yu-long, HUANG Jian-ye, et al. Responses of rice growth and development to free-air CO_2 enrichment (FACE): A research review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1331-1337.

[9] 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 CO_2 enrichment (FACE) experiments on rice CO_2 and grain yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1486-1497.

[10] 杨连新, 王云霞, 朱建国, 等. 开放式空气中CO_2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 CO_2 enrichment (FACE) experiments on rice growth and development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 1573-1585.

[11] Noguchi K, Tsunoda T, Miyagi A, et al. Effects of elevated atmospheric CO_2 on respiratory rates in mature leaves of two rice cultivars grown at a free-air CO_2 enrichment site and analyses of the underlying mechanisms[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2018, 59(3): 637-649.

[12] Cai C, Yin X, He S, 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.

[13] Cai C, Li G, Yang H, et al. Do all leaf photosynthesis parameters of rice acclimate to elevated CO_2, elevated temperature, and their combination, in FACE environments[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1685-1707.

[14] Wang W, Cai C, He J, et al. Yield, dry matter distribution and photosynthetic characteristics of rice under elevated CO_2 and increased temperature conditions[J]. *Field Crops Research*, 2020, 248: 107605.

[15] Wang J, Li L, 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, 250/251: 202-208.

[16] Zeng Q, Liu B, Gilna B, et al. Elevated CO_2 effects on nutrient competition between a C3 crop (*Oryza sativa* L.) and a C4 weed (*Echinochloacrusgalli* L.)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(1): 93-104.

[17] 张义凯, 陈惠哲, 张玉屏, 等. 不同年代育成的中籼水稻品种干物质累积和钾素吸收及分配[J]. 华北农学报, 2016, 31(6): 227-232. ZHANG Yi-kai, CHEN Hui-zhe, ZHANG Yu-ping, et al. Accumulation and distribution of dry matter and potassium in mid-season indica rice cultivars applied at different decades[J]. *Acta Agricultural Bo-*

reali-Sinica, 2016, 31(6):227-232.

[18] 梁健, 任红茹, 夏敏, 等. 淮北地区氮肥群体最高生产力水稻钾素吸收利用特征[J]. 作物学报, 2017, 43(4):558-570. LIANG Jian, REN Hong-ru, XIA Min, et al. Potassium absorption and utilization characteristics of rice varieties with the highest population productivity under corresponding nitrogen fertilization in Huaibei area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(4):558-570.

[19] 周娟, 舒小伟, 赖上坤, 等. 不同类型水稻品种产量和氮素吸收利用对大气CO_2浓度升高响应的差异[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(6):561-573. ZHOU Juan, SHU Xiao-wei, LAI Shang-kun, et al. Differences in response of grain yield, nitrogen absorption and utilization to elevated CO_2 concentration in different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(6):561-573

[20] 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. ZHOU Juan, SHU Xiao-wei, XU Gao-ping, et al. Effect of elevated CO_2 on phosphorus absorption and utilization in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12):2726-2734.

[21] 陈际型. 钾素营养对水稻根系生长和养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(2):182-188. CHEN Ji-xing. Effects of K nutrition on rice root growth and nutrient uptake[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(2):182-188.

[22] 杜永, 刘辉, 杨成, 等. 超高产栽培迟熟中粳稻养分吸收特点的研究[J]. 作物学报, 2007, 33(2):208-215. DU Yong, LIU Hui, YANG Cheng, et al. Characteristics of nutrient absorption in super-high-yielding mid-season and late-maturity japonica rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2):208-215.

[23] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 等. 超级稻甬优12不同产量水平群体的钾素营养特性[J]. 作物学报, 2016, 42(7):1047-1057. WEI Huan-he, MENG Tian-yao, LI Chao, et al. Potassium nutrition characteristics in different yield populations of super rice Yong you 12[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7):1047-1057.

[24] 周宁, 景立权, 朱建国, 等. 杂交水稻光合和荧光特性对高CO_2浓度的动态响应[J]. 核农学报, 2019, 33(4):772-780. ZHOU Ning, JING Li-quan, ZHU Jian-guo, et al. Dynamic responses of leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence to elevated atmospheric CO_2 concentration for two hybrid rice cultivars[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(4):772-780.

[25] 廖轶, 陈根云, 张海波, 等. 水稻叶片光合作用对开放式空气CO_2浓度增高(FACE)的响应与适应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1205-1209. LIAO Yi, CHEN Gen-yun, ZHANG Hai-bo, et al. Response and acclimation of photosynthesis in rice leaves to free-air CO_2 enrichment (FACE) [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10):1205-1209.

[26] 王亮, 朱建国, 曾青, 等. 大气CO_2浓度升高对水稻氮代谢影响的研究进展[J]. 土壤, 2010, 42(3):344-351. WANG Liang, ZHU Jian-guo, ZENG Qing, et al. Responses of nitrogen metabolism in rice plant to elevated atmospheric CO_2: A research review[J]. *Soils*, 2010, 42(3):344-351.

[27] 姜照伟, 李小萍, 赵雅静, 等. 杂交水稻氮钾素吸收积累特性及氮素营养诊断[J]. 福建农业学报. 2011, 26(5):852-859. JIANG Zhao-wei, LI Xiao-ping, ZHAO Ya-jing, et al. N/P absorption and accumulation and N nutrition of hybrid rice[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(5):852-859.

[28] 王强盛, 丁艳锋, 朱艳, 等. 不同基因型水稻钾素吸收利用对施钾量的生理响应[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):190-194. WANG Qiang-sheng, DING Yan-feng, ZHU Yan, et al. Physiological response of potassium absorption and utilization of different genotypes rice to potassium application rates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4):190-194.

[29] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论:南方本[M]. 二版:北京:中国农业出版社, 2011:48-51. YANG Wen-yu, TU Nai-mei. The southern edition of the theory of crop cultivation[M]. Second edition. Beijing:China Agriculture Press, 2011:48-51.