



大气 CO₂ 浓度升高对东北主栽作物种子活力的影响

姚 婷¹, 龙杰琦¹, 韩晓增², 苗淑杰¹, 乔云发¹

(1. 南京信息工程大学 应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘 要:大气 CO₂ 浓度升高是全球气候变化的重要特征之一,为揭示未来气候变化对作物种子活力的影响,进行种子发芽对 CO₂ 增加的适应性响应研究。2019 年在中国科学院海伦农业生态实验站进行开顶式气室 (OTC) 模拟 CO₂ 增加试验,选取东北三大主栽作物大豆、玉米和水稻为供试作物,设置两个 CO₂ 处理,分别为 aCO₂ (400 μmol·mol⁻¹) 和 eCO₂ (700 μmol·mol⁻¹)。结果表明:相比于对照 (aCO₂) 处理,CO₂ 浓度升高后,大豆种子的体积、百粒重、24 h 吸胀速度、浸出液电导率、发芽率、发芽势和发芽指数分别降低了 11.24%、10.53%、2.51%、27.72%、15.85%、19.75% 和 10.17%;虽然 CO₂ 升高未显著影响玉米种子百粒重,但其 24 h 吸胀速度和浸出液电导率分别降低了 3.69% 和 8.62%,而发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别提高了 81.03%、75.00%、56.14% 和 81.68%;水稻种子的体积降低了 21.35%,而其千粒重、发芽势、发芽指数和活力指数分别提高了 5.62%、5.19%、26.11% 和 32.21%。综合以上结果表明,大气 CO₂ 浓度升高对不同作物种子活力的影响存在差异,从发芽指标来看,大气 CO₂ 浓度为 700 μmol·mol⁻¹ 时,种子活力表现为玉米 > 水稻 > 大豆。

关键词:CO₂;大豆;玉米;水稻;种子活力

Effects of Elevated Atmospheric CO₂ Concentration on Seeds Vitality of Main Crop in Northeast China

YAO Ting¹, LONG Jie-qi¹, HAN Xiao-zeng², MIAO Shu-jie¹, QIAO Yun-fa^{1*}

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Elevated atmospheric CO₂ concentration is one of the important characteristics of global climate change. In order to reveal the impact of future climate change on the vitality of crop seeds, a germination experiment was carried out to study the adaptive response of seeds to elevated CO₂. In 2019, an open top chamber (OTC) was set up to simulate CO₂ enrichment at Hailun Agroecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. Three major crop including soybean, maize and rice of Northeast China were selected as test material. Two CO₂ treatments were aCO₂ (ambient CO₂, 400 μmol·mol⁻¹) and eCO₂ (elevated CO₂, 700 μmol·mol⁻¹). The results showed that eCO₂ decreased seed volume, 100-seed weight, 24 h-imbibition speed, electrical conductivity rate of seeds soaking solution, germination rate, germination potential and germination index in soybean seeds decreased by 11.24%, 10.53%, 2.51%, 27.72%, 15.85%, 19.75% and 10.17% compared to aCO₂, respectively. Although CO₂ enrichment did not significantly influence the 100-seed weight of maize, the 24 h-imbibition speed and electrical conductivity rate of seeds soaking solution in maize seeds at eCO₂ decreased by 3.69% and 8.62%, respectively. The germination rate, germination potential, germination index and vigor index of rice seeds at eCO₂ increased by 81.03%, 75.00%, 56.14% and 81.68% compared to aCO₂, respectively. The volume of rice seeds decreased by 21.35%, while the 1000-seed weight, germination potential, germination index and vigor index increased by 5.62%, 5.19%, 26.11% and 32.21%, respectively. All these indicated that the responses of various crop seeds to elevated atmospheric CO₂ were different. Totally, at 700 μmol·mol⁻¹ CO₂ concentration, the seed vitality was maize > rice > soybean.

Keywords: Carbon dioxide; Soybean; Maize; Rice; Seed vigor

随着全球经济和社会的快速发展,大气 CO₂ 浓度已从工业革命前的 280 μmol·mol⁻¹ 增加到了目前的 400 μmol·mol⁻¹,联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 预测,全球大气 CO₂ 浓度在 2100 年将达到 700 μmol·mol⁻¹[1]。IPCC 于 2019 年发布的

《气候变化与土地特别报告》(SRCCL) 提出,全球 CO₂ 浓度增加已经影响了粮食安全,且随着 CO₂ 浓度的升高,未来这种威胁还会加剧[2]。CO₂ 是影响作物生长发育的关键因子之一[3],植物通过光合作用固定大气中的 CO₂,维持植物正常的生命活动[4]。

收稿日期:2021-01-11

基金项目:国家自然科学基金(41471240)。

第一作者:姚婷(1996—),女,在读硕士,主要从事气象生态研究。E-mail:yaot00726@163.com。

通讯作者:乔云发(1975—),男,博士,研究员,主要从事全球变化与土壤生态过程研究。E-mail:qiaoyunfa@nuist.edu.cn。

然而,大气中的 CO₂ 浓度持续增加不仅影响作物生长发育,还可能会影响作物种子质量和活力^[5-7],进而影响未来粮食安全^[8]。

前人研究发现,大气中 CO₂ 浓度升高使大豆光合固定 CO₂ 的效率提高了近 30%,大豆叶片量及叶面积均增加^[9]。对水稻的研究发现,环境 CO₂ 浓度增加导致水稻生育期出现延推,从而累积更多的碳水化合物和其他营养物质,增加种子体积和粒重^[10]。体积和粒重的增加是有机物和无机物累积的结果,而种子萌发时需要消耗贮存在胚乳中的营养物质^[11]。有研究表明,大粒种子因具有较多的营养物质从而种子活力较高,但也有研究认为小粒种子具有更高的萌发率和抗逆性^[12]。可见,种子体积和粒重影响种子活力,但仍存有争议。然而,大气 CO₂ 浓度升高使 C3 作物水稻种子谷壳变厚、种子蛋白质和微量元素含量降低,从而使水稻种子的活力明显下降^[13-14]。高 CO₂ 浓度会导致作物籽粒品质降低^[7],而籽粒品质会影响种子的发芽率和发芽势,进而影响种子活力^[15]。大气 CO₂ 浓度升高对于其他 C3 作物以及 C4 作物种子活力的影响目前尚不十分清楚,因此探究高 CO₂ 浓度对 C3 和 C4 作物种子活力的影响显得尤为必要。

种子活力可以反映种子品质的优劣^[13],是农业生产的重要保障^[16]。近年来,随着 CO₂ 浓度对农业生产的影响日益加剧,国内外越来越重视 CO₂ 浓度升高对粮食作物影响的研究^[2]。到目前为止,寒温带气候区大气 CO₂ 浓度升高对作物种子发芽特性和种子活力的影响研究很少^[17-19]。东北地区是我国重要的商品粮生产基地,大豆、玉米和水稻是该地区的三大主要作物^[5],大气 CO₂ 浓度升高对 3 种作物种子活力的影响,直接关系到我国粮食安全。因此,本研究在位于东北粮食主产核心区的中国科学院海伦农业生态实验站开展,采用开顶式气室(OTC)模拟 21 世纪末预计的大气 CO₂ 浓度,研究其对东北三大主栽作物大豆、玉米和水稻种子活力的影响,为评估未来大气 CO₂ 浓度升高对我国粮食安全的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为东生 2 号,玉米品种为德美亚 1 号,水稻品种为绥粳 27。

1.2 试验区概况

试验区位于中国科学院海伦农业生态实验站(47.26°N,126.38°E),海拔 151 m,属于温带季风气候,年平均降水量约 550 mm,年平均气温为 1.5℃。

该试验开始前土壤基础肥力为:土壤有机质含量 51.4 g·kg⁻¹、全氮(N)含量 2.2 g·kg⁻¹、全磷(P₂O₅)含量 0.74 g·kg⁻¹、全钾(K₂O)含量 20.8 g·kg⁻¹、pH6.05(水土比为 2.5:1)。试验中施肥量为:大豆 N 63 kg·hm⁻²、P₂O₅ 110.4 kg·hm⁻²、K₂O 71.8 kg·hm⁻²;玉米 N 174 kg·hm⁻²(1/2 氮肥作追肥)、P₂O₅ 184.1 kg·hm⁻²、K₂O 108 kg·hm⁻²;水稻 N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻²、K₂O 50 kg·hm⁻²。

1.3 试验设计

试验于 2019 年在中国科学院海伦农业生态试验站建立 OTC 模拟大气 CO₂ 浓度增加研究长期定位平台^[20]。OTC 为八角形,高 3 m,内长 1.2 m,构成 20 m³ 体积。每个 OTC 内为田间原位土壤,用埋深 50 cm,且高于地表 10 cm PVC 板隔开,阻止小区间土壤和水分的交叉影响。通过 OTC 内圈网状的管道向内喷射纯 CO₂ 气体,CO₂ 排气管的高度距作物冠层 50 cm 左右(根据作物高度可以进行调整)。根据 OTC 预设定的 CO₂ 浓度自动调节 CO₂ 气体的释放速度,保持作物生育期 OTC 内 CO₂ 浓度水平。试验设置两个 CO₂ 水平,分别为对照(aCO₂,400 μmol·mol⁻¹)和增加 CO₂ 浓度(eCO₂,700 μmol·mol⁻¹)。选取大豆、玉米和水稻为 3 种指示作物。每个处理 3 次重复,完全随机排列。作物成熟后收集作物种子,阴干,贮存在种子袋中备用。

1.4 测定项目与方法

随机取 100 粒种子,称重,记为 W₁,用游标卡尺测量种子粒径,估算种子体积。将选取的种子放入 100 mL 烧杯内,用 1% 次氯酸钠消毒 5 min,蒸馏水清洗 3 次,烧杯内加入 50 mL 蒸馏水,20℃ 培养箱中浸种 24 h。同时设置 3 个不加种子烧杯作为对照,测定 24 h 浸出液电导率。取出浸好的种子,用蒸馏水清洗 3 次,用滤纸吸干表面水分,称重,记为 W₂,以 1 g 干种子的吸水速率计算吸胀速度。将浸种后的种子平铺放入垫有 3 层滤纸的直径为 15 cm 的培养皿中,用浸湿的滤纸覆盖,保持湿度,放入 20℃ 的恒温培养箱内进行培养。从种子萌发第 2 天开始,每天早上 8:00 统计发芽个数以及芽长(发芽标准为根长达到种子长度,芽长达到种子长度一半)。体积(mm³·粒⁻¹):根据测得的种子粒径估算其体积;百(千)粒重(g):大豆和玉米种子百粒重为 W₁,水稻种子千粒重为 W₁×10;吸胀速度(g·g⁻¹):浸种 24 h 前后种子的质量差与浸种前种子质量的比值^[11];浸出液电导率(mS·cm⁻¹):24 h 浸出液电导率值与空白对照值之差^[11];发芽率(%)=(7 d 发芽种子总数/供试种子总数)×100;发芽势(%)=

(萌发前3 d 发芽数之和/供试种子总数) × 100^[11]; 发芽指数(GI) = $\sum (G_i/D_i)$, 其中 G_i 为在发芽试验终期7 d 内每日的发芽数, D_i 为与 G_i 对应的发芽日数; 活力指数(AGR) = $GI \times L$, 其中 GI 代表萌发第7天发芽指数, L 代表萌发第7天的平均芽长。

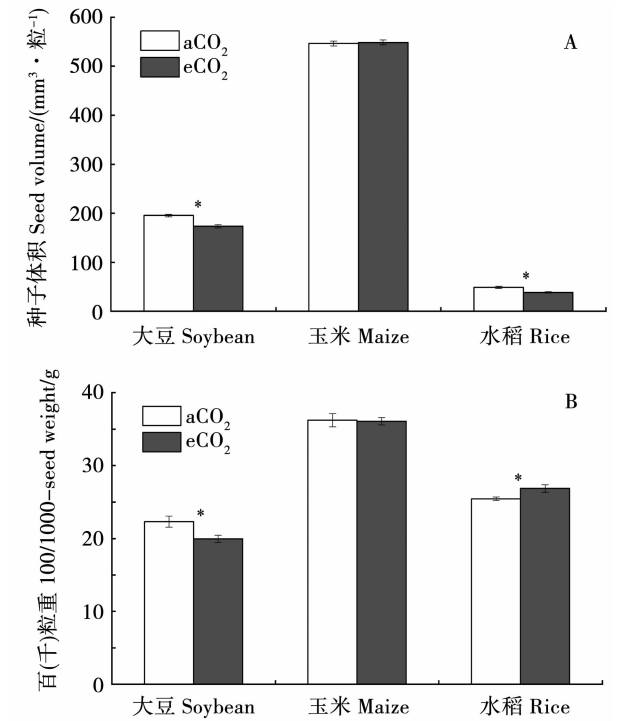
1.5 数据分析

用 Origin 2018 和 Excel 2016 进行数据和图表绘制, 用双因素 ANOVA 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 大气 CO₂ 浓度升高对种子体积和粒重的影响

种子体积和百(千)粒重受高 CO₂ 浓度的影响各不相同(图1)。与环境大气 CO₂ 浓度相比, 高 CO₂ 浓度显著降低了大豆和水稻种子体积, 分别降低了 11.24% 和 21.35%, 而玉米种子体积没有受到显著影响(图1A)。大气 CO₂ 浓度升高对3种作物种子百(千)粒重的影响与种子体积不同(图1B)。与环境大气 CO₂ 浓度相比, CO₂ 浓度升高使大豆种子百粒重显著降低了 10.53%, 水稻种子千粒重显著增加了 5.62%, 而玉米种子的百粒重变化不明显。



* 表示在 0.05 水平, 与 aCO₂ 相比差异达到了显著水平, 下同。
* indicate significant difference at 0.05 level compared to aCO₂, the same below.

图1 大气 CO₂ 浓度升高对作物种子体积(A)和百(千)粒重(B)的影响
Fig. 1 The effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the seed volume (A) and 100/1000-seed weight (B)

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对作物种子 24 h 吸胀速度和浸出液电导率的影响

大气 CO₂ 浓度升高条件下, 3 种作物种子的 24 h 吸胀速度(图2A)和浸出液电导率(图2B)均呈下降趋势。相比于 aCO₂ 处理, eCO₂ 处理显著降低了大豆种子的 24 h 吸胀速度和浸出液电导率, 分别下降了 2.51% 和 27.72%, 玉米种子的 24 h 吸胀速度和浸出液电导率也分别显著降低了 3.69% 和 8.62%。CO₂ 浓度升高对水稻种子的 24 h 吸胀速度和浸出液电导率的影响均不显著。

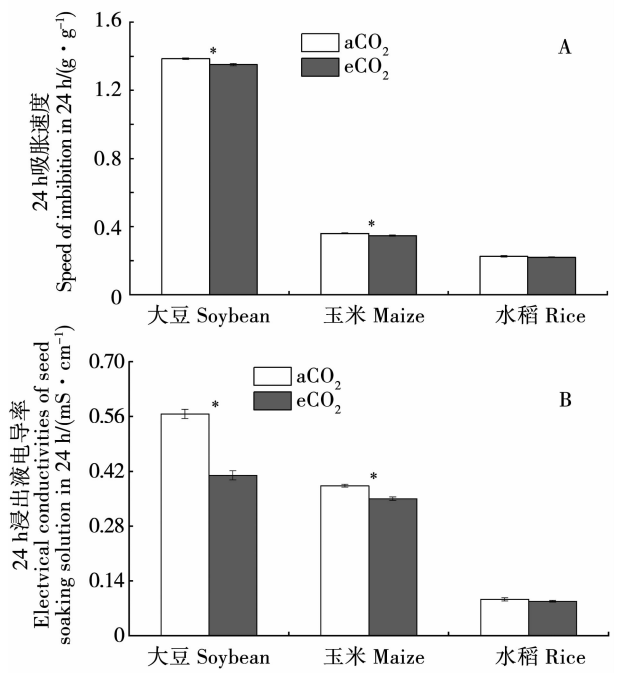


图2 大气 CO₂ 浓度升高对作物种子 24 h 吸胀速度(A)和浸出液电导率(B)的影响

Fig. 2 The effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the seed imbibition speed (A) and electrical conductivities of seed soaking solution (B) for crop seeds after 24 h soaking

2.3 大气 CO₂ 浓度升高对作物种子发芽率和发芽势的影响

不同作物种子的发芽率(图3A)和发芽势(图3B)对大气 CO₂ 浓度升高的响应呈现出不同的趋势。与 aCO₂ 处理相比, CO₂ 浓度升高时, 玉米种子的发芽率和发芽势显著提高, 分别增高了 81.03% 和 75.00%, 且在 3 种作物中受到的影响最大; 水稻种子的发芽率和发芽势变化幅度最小, 发芽率变化不明显, 发芽势增加 5.19%。与 aCO₂ 处理相比, CO₂ 浓度升高使大豆种子的发芽率和发芽势分别显著降低了 15.85% 和 19.75%。

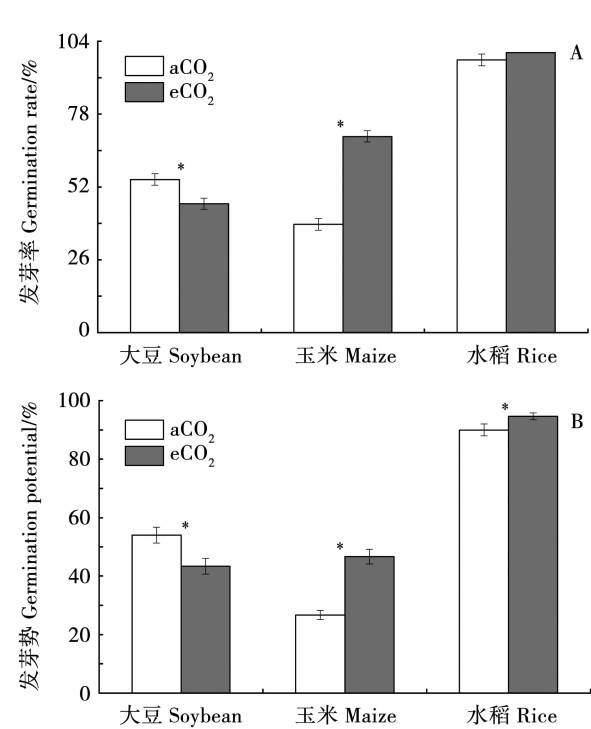


图3 大气CO₂浓度升高对作物种子发芽率(A)和发芽势(B)的影响

Fig. 3 The effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the germination rate (A) and germination potential (B) of crop seeds

2.4 大气CO₂浓度升高对作物种子发芽指数和活力指数的影响

大气CO₂浓度升高条件下,3种作物种子发芽指数的变化如图4A所示,大气CO₂浓度升高显著提高了玉米和水稻种子的发芽指数,其中玉米种子的提高幅度最大,为56.14%,而对大豆种子的影响不显著。3种作物种子的发芽指数相比,水稻种子最高,玉米种子次之,大豆种子最低。CO₂浓度升高使玉米和水稻种子的活力指数均呈上升趋势,分别增高了81.68%和32.21%,而对大豆种子的活力指数影响不明显(图4B)。

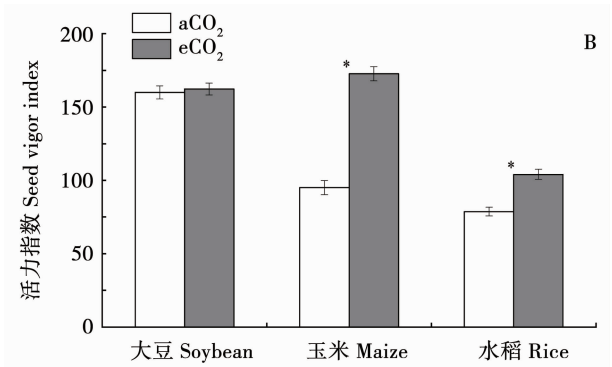
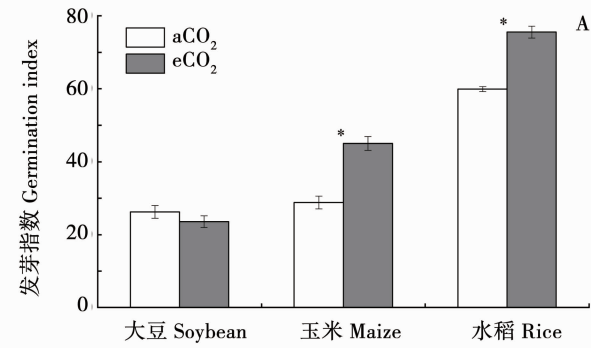


图4 大气CO₂浓度升高对作物种子发芽指数(A)和活力指数(B)的影响

Fig. 4 The effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the germination index (A) and vigor index (B) of crop seeds

3 讨论

本研究中高CO₂浓度抑制了大豆和水稻籽粒体积,但对玉米籽粒体积没有明显作用,这可能与C3和C4作物对环境CO₂响应的不同有关。因为高CO₂浓度环境下C3作物的生育进程会加快,生育期会缩短^[18],导致作物籽粒体积变小,而对C4作物来说,当前大气CO₂浓度已经达到CO₂饱和点,因此CO₂浓度继续升高对其籽粒的体积可能不会有很大影响。籽粒体积通常是影响种子萌发的一个重要因素,但是,前人在特定条件下的研究获得了不同的结果。刘万^[21]在对不同大小的玉米种子进行发芽对比研究时发现,种子活力与体积大小呈显著正相关关系。而程春明等^[22]对不同大豆品种进行分析时,提出小粒种子的发芽率高于大粒种子。在本研究中,CO₂浓度700 μmol·mol⁻¹条件下,大豆种子体积下降了11.24%,而活力指数却无明显变化;玉米种子体积变化不明显,活力指数却显著增高;水稻种子体积下降了21.35%,活力指数却增高了32.21%。可见,对于不同的作物品种来讲,单纯从籽粒体积大小来评价其发芽能力还不够。

种子活力是表征种子能否迅速整齐出苗以及幼苗能够正常生长的潜力参数^[23],是种子萌发的前提,对作物的生长发育起关键作用^[24]。种子活力的几个重要指标包括发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数^[25],能够用来反映种子未来的生长发育潜力状况^[26]。本研究中,高CO₂浓度引起3种作物种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数出现了不同的变化趋势。这表明大气CO₂浓度升高会对作物种子萌发产生影响,但是影响程度因品种而异。

即使对于同一作物品种,目前的研究结果也存在争议。如在CO₂增高对水稻种子活力的影响研究中,高厚玉等^[13]报道,在FACE条件下,CO₂浓度较大气环境升高200 μmol·mol⁻¹后,粳稻武运粳23的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均显著降低。而本研究发现,大气CO₂浓度升高至700 μmol·mol⁻¹使水稻种子的发芽势、发芽指数和活力指数均有不同程度的提高。由此可见,不同基因型作物对环境CO₂浓度的响应程度直接影响着籽粒活力。CO₂浓度升高影响种子活力可归因于两个方面,一是CO₂浓度升高影响了种壳厚度,影响氧气的扩散,减弱呼吸作用,从而影响种子萌发时胚乳养分和蛋白的释放和利用^[27];二是CO₂浓度增加导致籽粒中的微量元素和蛋白质含量降低,会影响细胞分裂和幼苗生长^[28]。从粮食安全角度来看,未来应重点研究种子营养物质含量等品质性状对CO₂浓度变化的响应以及适应机制,更好地评估气候变化为种子活力带来的影响,为保障中国未来粮食安全提供更全面的理论依据。

4 结 论

本研究表明未来大气CO₂浓度升高对我国东北地区3种主栽作物种子活力的影响存在差异。尽管体积和重量是影响种子发芽的重要因素,但是不能作为判断种子发芽能力的直接判断依据,需要将作物对CO₂的适应性反应同种子24 h浸出液电导率、发芽率、发芽势和发芽指数结合起来,综合判断大气CO₂浓度变化对种子活力的影响。仅2019年东北三大作物各自单一品种的研究结果表明,大气CO₂浓度由400 μmol·mol⁻¹升高至700 μmol·mol⁻¹时,种子活力表现为玉米>水稻>大豆,玉米和水稻的种子活力有所提高,而大豆的种子活力有所降低。

参考文献

[1] Church J, Clark P. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]// IPCC. IPCC WGI Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013:95-123.

[2] 许吟隆,赵运成,翟盘茂. IPCC 特别报告 SRCL 关于气候变化与粮食安全的新认知与启示[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 37-49. (Xu Y L, Zhao Y C, Zhai P M. IPCC special report SRCL's new cognition and enlightenment on climate change and food security[J]. Research Progress of Climate

Change, 2020, 16(1): 37-49.)

[3] 李彦生,金剑,刘晓冰. 作物对大气CO₂浓度升高生理响应研究进展[J]. 作物学报, 2020, 46(12): 1819-1830. (Li Y S, Jin J, Liu X B. Advances in physiological responses of crops to elevated atmospheric CO₂ concentration [J]. Journal of Crop Science, 2020, 46(12): 1819-1830.)

[4] 赖金美,潘若琪,刘燕飞,等. 大气二氧化碳浓度增加对木本植物 BVOCs 释放的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 865-871. (Lai J M, Pan R Q, Liu Y F, et al. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide concentration on BVOCs release from woody plants[J]. Journal of Ecology, 2020, 39(3): 865-871.)

[5] 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(14): 4254-4265. (Jing L Q, Lai S K, Wang Y X, et al. Effects of atmospheric CO₂ concentration and temperature on rice growth and development [J]. Journal of Ecology, 2016(14): 4254-4265.)

[6] Myers S, Zanobetti A, Kloog I, et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition [J]. Nature, 2014, 510: 139-142.

[7] 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 Agricultural Environmental Science, 2020, 39(4): 822-833.)

[8] 赵毅,于翠梅,杨柳,等. 野生大豆和不同栽培大豆品种在镉胁迫下种子萌发及幼苗生长的差异[J]. 大豆科学, 2019, 38(2): 267-273. (Zhao Y, Yu C M, Yang L, et al. Differences of seed germination and seedling growth between wild soybean and different cultivated soybean varieties under cadmium stress [J]. Soybean Science, 2019, 38(2): 267-273.)

[9] 金奖铁,李扬,李荣俊,等. 大气二氧化碳浓度升高影响植物生长发育的研究进展[J]. 植物生理学报, 2019, 5(3): 558-568. (Jin J T, Li Y, Li R J, et al. Research progress on the effects of elevated atmospheric carbon dioxide on plant growth and development [J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 5(3): 558-568.)

[10] 杨海龙,蔡金洋. 大气CO₂浓度和温度升高对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(4): 24-27, 30. (Yang H L, Cai J Y. Research progress on effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on rice growth and development [J]. Anhui Agricultural Science, 2020, 48(4): 24-27,30.)

[11] 杨京京,陈江鲁,谢瑞芝,等. 玉米种子粒重差异对相关发芽指标整齐度的影响[J]. 作物杂志, 2018, 28(3): 180-184. (Yang J J, Chen J L, Xie R Z, et al. Effects of different seed weight on uniformity of germination indexes in maize [J]. Journal of Crop Science, 2018, 28(3): 180-184.)

[12] 江绪文,李贺勤,王建华. 不同大小玉米种子萌发及活力初步研究[J]. 种子, 2014, 33(6): 75-78. (Jiang X W, Li H Q, Wang J H. Preliminary study on germination and vigor of different corn seeds [J]. Seed, 2014, 33(6): 75-78.)

[13] 高厚玉,景立权,陈龙,等. 自由空气中CO₂浓度和温度增高对水稻种子活力的影响[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(4):

371-379. (Gao H Y, Jing L Q, Chen L, et al. Effects of elevated CO₂ concentration and temperature in free air on seed vigor of rice [J]. Rice Science in China, 2016, 30(4): 371-379.)

[14] 王付娟, 刘书含, 李淑梅, 等. 野生大豆种皮障碍休眠解除及萌发的研究[J]. 大豆科学, 2019, 38(5): 733-739. (Wang F J, Liu S H, Li S M, et al. Study on dormancy breaking and germination of wild soybean seed coat obstacle [J]. Soybean Science, 2019, 38(5): 733-739.)

[15] 鲁春霞, 高平, 杨纯光. 水稻种子劣变对发芽率影响及应对措施[J]. 南方农业, 2019, 13(11): 5-7. (Lu C X, Gao P, Yang C G. Effect of rice seed deterioration on germination rate and countermeasures[J]. Southern Agriculture, 2019, 13(11): 5-7.)

[16] 连彩云, 马忠明. 玉米种子活力研究综述[J]. 甘肃农业科技, 2019(16): 64-68. (Lian C Y, Ma Z M. Review on seed vigor of maize[J]. Agricultural Science and Technology in Gansu Province, 2019(16): 64-68.)

[17] 陈楠楠, 周超, 王浩成, 等. 大气二氧化碳含量升高对稻麦产量影响的整合分析[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(2): 83-90. (Chen N N, Zhou C, Wang H C, et al. The integrated analysis of the effect of the increase of atmospheric carbon dioxide content on rice and wheat yield [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(2): 83-90.)

[18] 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. Effects of elevated CO₂ concentration in open air (FACE) on rice growth and development[J]. Journal of Ecology, 2010, 30(6): 1573-1585.)

[19] 张安鹏, 钱前, 高振宇. 水稻种子活力的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(3): 92-99. (Zhang A P, Qian Q, Gao Z Y. Research progress of rice seed vigor [J]. Rice Science in China, 2018, 32(3): 92-99.)

[20] Qiao Y F, Miao S J, Li Q, et al. Elevated CO₂ and temperature increase grain oil concentration but their impacts on grain yield differ between soybean and maize grown in a temperate region [J]. Science of The Total Environment, 2019, 666: 405-413.

[21] 刘万. 同一品种玉米种子活力差异试验[J]. 农村科技, 2017(4): 11-13. (Liu W. Experiment on seed vigor difference of the same variety of maize [J]. Rural Science and Technology, 2017(4): 11-13.)

[22] 程春明, 王瑞珍, 吴问胜. 大豆种子活力基因型差异的研究[J]. 江西农业学报, 2003, 15(1): 8-12. (Cheng C M, Wang R Z, Wu W S. The study of genotypic differences in soybean seed vigor[J]. Jiangxi Agricultural University, 2003, 15(1): 8-12.)

[23] 孙群, 王建华, 孙宝启. 种子活力的生理和遗传机理研究进展[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 48-53. (Sun Q, Wang J H, Sun B Q. Advances in physiological and genetic mechanism of seed vigor[J]. Agricultural Science in China, 2007, 40(1): 48-53.)

[24] 于奇, 曹亮, 金喜军, 等. 低温胁迫下褪黑素对大豆种子萌发的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(1): 56-62. (Yu Q, Cao L, Jin X J, et al. Effect of melatonin on soybean seed germination under low temperature stress [J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 56-62.)

[25] 田艺心, 高会, 汪自强. 大豆种子萌发影响因素研究进展[J]. 大豆科学, 2011, 30(1): 153-157. (Tian Y X, Gao H, Wang Z Q. Research progress on influencing factors of soybean seed germination [J]. Soybean Science, 2011, 30(1): 153-157.)

[26] Hampton J G, Boelt B, Rolston M P, et al. Producing quality seed: The problem of seed vigor [J]. Special Publication - Agronomy Society of New Zealand, 2000(12): 53-61.

[27] Sun Q, Wang J, Sun B. Advances on seed vigor physiological and genetic mechanisms[J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(9): 1060-1066.

[28] Wang Y X, Frei M, Song Q L, et al. The impact of atmospheric CO₂ concentration enrichment on rice quality-A research review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31: 277-282.