

王 月,王鲁鑫,李浩天,等. 不同磷水平下 CO₂ 浓度升高对番茄光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):163-167.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.12.026

不同磷水平下 CO₂ 浓度升高对番茄光合特性和抗氧化酶活性的影响

王 月¹,王鲁鑫¹,李浩天¹,刘兴斌²,韩晓日¹

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院,辽宁沈阳 110866; 2. 沈阳化工研究院生物与医药所,辽宁沈阳 110021)

摘要:通过水培试验研究在低磷(2 μmol/L)、磷充足(2 mmol/L)条件下,大气中不同 CO₂ 浓度[(400 ± 50)、(800 ± 50) μmol/mol]对番茄光合特性和抗氧化酶活性的影响。结果表明,磷充足条件下,CO₂ 浓度升高可以显著促进番茄叶片光合速率的提高;而低磷抑制了这种作用。磷充足时,CO₂ 浓度升高显著增加了叶绿素含量,并且叶绿素 b 含量的增幅明显大于叶绿素 a 含量;而低磷条件下,CO₂ 浓度升高显著降低了叶绿素含量。与磷充足相比,低磷条件下,番茄叶片的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性明显降低,丙二醛含量升高。但 CO₂ 浓度升高明显促进了 3 种抗氧化酶的活性,并且磷充足条件下促进作用更为显著,同时降低了 MDA 的含量。因此 CO₂ 浓度升高条件下,磷素充足供应可以促进 CO₂ 浓度升高产生的正效应。

关键词:番茄;CO₂ 浓度升高;低磷;光合作用;抗氧化酶活性

中图分类号:S145.3;S641.206

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2022)12-0163-05

设施农业中通常施用 CO₂ 来补充密闭条件下 CO₂ 的缺乏问题,从而增加蔬菜产量和提高品质。CO₂ 施肥对作物的影响还由于全球大气变化而受到更广泛的关注。由于森林砍伐、化石燃料的燃烧等人为活动导致大气中 CO₂ 浓度逐年升高,产业革命以前大气中 CO₂ 浓度约是 280 μmol/mol,目前,大气中 CO₂ 浓度已经超过了 400 μmol/mol,预计 2100 年将会达到 730 ~ 1 020 μmol/mol^[1]。

CO₂ 作为植物光合作用的重要原料,其浓度升高势必会对植物光合作用产生影响^[2]。有关 CO₂ 浓度升高对植物的影响国内外学者进行了大量探索^[3-5]。普遍认为在响应短期高浓度 CO₂ 时,多数植物会增加净光合作用和减少蒸腾作用^[6]。在光合作用中叶绿素发挥着重要作用,它的含量会直接影响植物的光合效率。关于 CO₂ 浓度升高对植物叶绿素影响的结论并不一致。研究认为,CO₂ 浓度升高对植物叶绿素含量的影响,表现为促进效应^[7]、抑制效应^[8] 和没有影响^[9]。这可能与植物种类以及 CO₂ 处理时间等因素不同有关。植物叶片

的衰老与光合性能密切相关,因为叶片衰老会影响光合面积以及光合速率。膜质过氧化最重要的产物之一丙二醛(MDA)以及抗氧化酶超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)是标志衰老性状较为常用的敏感指标。通常 CO₂ 浓度升高能提高植物的抗氧化能力^[10-11],也有研究认为,CO₂ 浓度升高会降低植物的抗氧化酶活性^[12]。但以上的研究大多是在单一 CO₂ 浓度升高条件下进行的,而 CO₂ 浓度升高对植物的影响还与其他环境因子有关^[13],其中养分有效性是重要的因素之一,因其在植物响应高浓度 CO₂ 时发挥着调控作用^[14-15]。磷素作为植物必需的大量营养元素,其有效性直接影响植物光合作用对 CO₂ 的响应^[16-17]。本研究在不同供磷条件下,探索 CO₂ 浓度升高对番茄光合作用和抗氧化系统生理指标的影响,对评价和预测 CO₂ 浓度升高条件下番茄植株生长和适应性有一定的实践指导意义,同时为植物的磷素营养管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与方法

试验于 2020 年 11 月在沈阳农业大学植物营养学科人工气候室内进行。供试作物为番茄(302 番茄)。先将种子消毒催芽,然后播在清洗干净的石

收稿日期:2021-08-29

基金项目:国家自然科学基金(编号:41602363)。

作者简介:王 月(1977—),女,辽宁北镇人,博士,讲师,主要从事植物营养施肥与土壤肥力研究。E-mail:wangyue1028@163.com。

英沙中。待幼苗长出 2 张真叶时进行移栽,将 4 株长势一致的幼苗转移到 1 L 的培养器皿中,内装 1/2 浓度 Hoagland 营养液,共移栽 12 盆,供后续进行的 4 个处理,重复 3 次使用。培养 7 d 后,进行不同 CO_2 浓度与供磷量处理。每天光照 12 h,光照度是 10 000 lx;白天、晚上的温度分别为 25、18 $^{\circ}\text{C}$ 。处理后 16 d 进行相关性状测定。

1.2 供磷水平和 CO_2 浓度

供磷水平设低磷、磷充足 2 个水平。磷充足营养液配方:4 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 6 mmol/L KNO_3 , 2 mmol/L $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 2 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;微量元素的组成同 Arnon 营养液。低磷营养液配方: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的浓度为 2 $\mu\text{mol/L}$, 以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 补充铵态氮,其他同磷充足营养液。营养液 pH 值调至 6.0,每 3 d 换 1 次营养液。

CO_2 浓度处理在培养箱 (Convion E7/2, 加拿大) 中进行,对照 CO_2 处理浓度为 (400 ± 50) $\mu\text{mol/mol}$, 升高 CO_2 处理浓度为 (800 ± 50) $\mu\text{mol/mol}$ 。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 番茄叶片光合作用参数测定 每个处理选择具有代表性的番茄植株 3 株,选取倒数第 3 张功能叶,利用便携式 Ciras-2 型光合仪进行光合参数的测定。包括净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r),并通过公式计算水分利用效率 ($\text{WUE} = P_n/T_r$)。

测定时使用内置红蓝光源,叶室温度设定为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.2 番茄叶片叶绿素含量测定 每个处理选择具有代表性的番茄植株 3 株,将主茎上倒数第 3 张功能叶摘下,放入自封袋中并置冰盒内带回实验室,立即测定叶绿素 a、叶绿素 b 含量^[18],并计算总叶绿素含量及叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量。

1.3.3 叶片抗氧化酶活性及丙二醛含量的测定 选择番茄主茎上倒数第 3 张完全展开叶,放入自封袋中并置冰盒内带回实验室,立即进行 3 种抗氧化酶即超氧化物歧化酶 (SOD)^[19]、过氧化物酶 (POD)^[20]、过氧化氢酶 (CAT)^[21] 等的活性以及丙二醛含量^[22] 的测定。

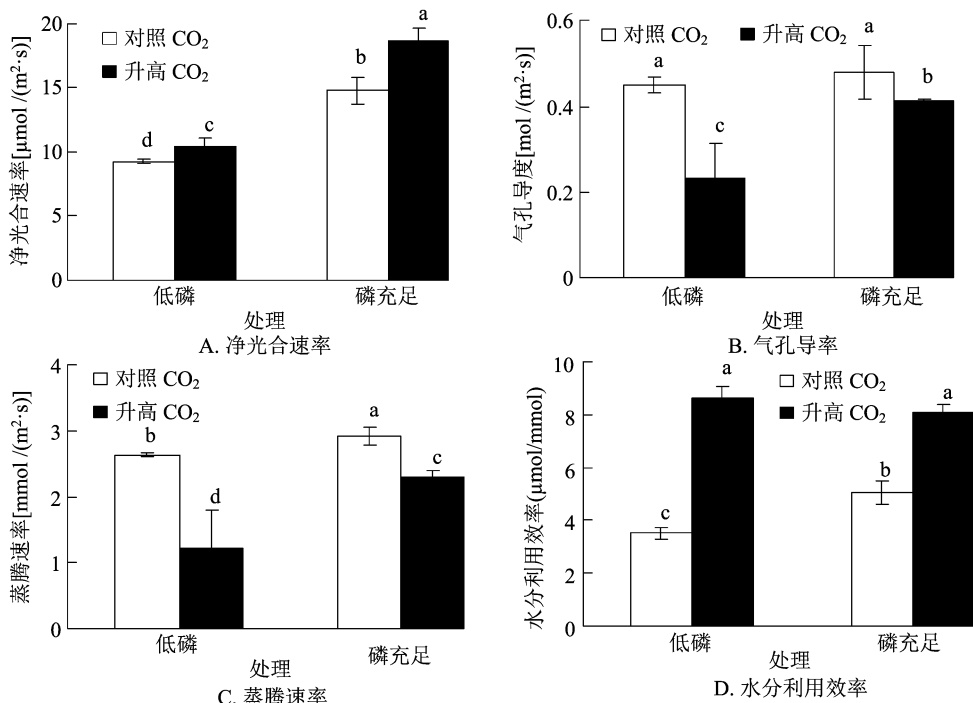
1.4 数据统计分析

利用 SPSS 16.0 和 Excel 分析试验数据并作图。

2 结果与分析

2.1 不同供磷水平下 CO_2 浓度升高对番茄叶片光合作用的影响

由图 1 可知,无论低磷还是磷充足条件下, CO_2 浓度升高均显著增加了番茄的光合速率,低磷条件下增加 13.0%,磷充足条件下增加 26.1%;2 个 CO_2 水平下,均为磷充足处理光合速率显著高于低磷处理。气孔导度以及蒸腾速率在响应 CO_2 浓度升高时均显著降低,低磷和磷充足条件下分别降低



柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图 2 同
图 1 不同供磷水平下 CO_2 浓度升高对番茄叶片光合作用指标的影响

69.1% 和 13.8%、53.9% 和 21.2%; CO_2 浓度升高明显促进了番茄叶片的水分利用效率,在低磷和磷充足条件下分别增加 145.1%、60.1%。

2.2 不同供磷水平下 CO_2 浓度升高对番茄叶片叶绿素含量的影响

从表 1 可以看出,在低磷条件下,叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量在响应 CO_2 浓度升高

时显著减少,分别比对照降低了 17.2%、18.1%、17.5%,叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量的变化不显著;磷充足时,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量在响应 CO_2 浓度升高时均显著提高,分别比对照提高了 11.5%、21.0%、13.5%,其中叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量的比值显著降低。

表 1 不同磷水平下 CO_2 浓度升高对番茄叶片叶绿素含量的影响

处理	CO_2 处理浓度 ($\mu\text{mol/mol}$)	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	叶绿素 a 含量/ 叶绿素 b 含量	总叶绿素含量 (mg/g)
低磷	400 \pm 50	2.04 \pm 0.02a	0.59 \pm 0.01a	3.48 \pm 0.08b	2.63 \pm 0.01a
	800 \pm 50	1.69 \pm 0.03c	0.48 \pm 0.02c	3.51 \pm 0.03b	2.17 \pm 0.03c
磷充足	400 \pm 50	1.83 \pm 0.02b	0.47 \pm 0.01c	3.91 \pm 0.05a	2.30 \pm 0.03b
	800 \pm 50	2.04 \pm 0.00a	0.57 \pm 0.00b	3.60 \pm 0.01b	2.61 \pm 0.00a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 CO_2 浓度升高对番茄叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

对照 CO_2 条件下,与磷充足相比,低磷使番茄叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性分别降低了 31.9%、47.3%、16.2% (图 2 - A、图 2 - B、图 2 - C),而 MDA 的含量比磷充足条件下增加了 27.5% (图 2 - D); CO_2 浓度升高后,SOD、POD 和 CAT 的活性分别增加了 7.7%、21.2%、19.3%,同时 MDA 的含量降低了 13.3%。磷充足条件下,番茄叶片中 SOD、POD 和 CAT 的活性在响应 CO_2 浓度升高时,分别比低碳处理增加 10.6%、25.1%、15.8%,MDA 的含量降低了 15.4%,且处理间差异显著。

3 讨论与结论

众多研究表明, CO_2 浓度升高通常会刺激 C_3 植物的光合作用和生长潜力^[23-24]。本研究结果表明,无论在低磷还是在磷充足条件下, CO_2 浓度升高均促进了番茄叶片的净光合速率,但低磷限制了这种效应,这与相关研究结果^[25]一致,表明磷供应不足会使大中 CO_2 浓度升高,对植物生长的促进作用减弱。无论 CO_2 浓度高或低,低磷均显著降低了番茄的光合速率。低磷条件下植物净光合速率降低并非气孔导度降低减少了 CO_2 的供应,而是由于非气孔因素阻碍了对 CO_2 的利用^[26],主要是因为磷不足影响了植物的代谢过程^[27]。高浓度 CO_2 条件下植物叶片的气孔往往会关闭^[28],减少植物与大气之间的气体交换,从而使气孔导度下降,蒸腾速率降低^[29],这在本研究中进一步得到了证实。由于光合

速率增加和蒸腾速率下降,本研究中番茄水分利用效率显著升高,这与相关研究结果^[30-31]一致。

相关研究表明, CO_2 浓度升高对植物叶片中叶绿素含量,叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量的比值均有影响,但结论不一致。长期生长在 CO_2 浓度升高条件下的植物,其叶片中叶绿素的含量会降低,叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量的比值会下降^[32-33]。本研究中对对照 CO_2 条件下,低磷处理的叶绿素含量显著高于磷充足处理,可能是由于缺磷时植物生长缓慢,干物质积累少,所以叶绿素含量相对较高;低磷条件下,当 CO_2 浓度升高时叶绿素含量显著降低,可能是由于 CO_2 浓度升高促进了其光合作用,积累了更多的干物质,所以叶绿素含量降低。当磷充足时, CO_2 浓度升高使叶绿素含量增加,并且叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值降低,说明磷充足时 CO_2 浓度升高有利于叶绿素的形成并且更有利于形成叶绿素 b,这或许是 CO_2 浓度升高增强植物光合作用的原因之一,因为叶绿素 b 含量增加可使补光色素蛋白复合体的生成增多,从而增强了叶绿体对光能的吸收。也有研究认为, CO_2 浓度升高导致叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量升高^[34-35]或者不变^[36],这可能与植物种类或生育时期等不同有关。

MDA 的积累量间接反映了植物受胁迫的程度^[37-38]。SOD、POD、CAT 这 3 种抗氧化保护酶,可以清除植物体内的活性氧等超氧化物,防止膜脂过氧化,提高植物的生理活性、减缓其衰老^[39]。本研究中低磷导致了番茄叶片中 MDA 的含量显著升高,这与在甘蔗以及在水稻叶片上的研究结果^[40-41]一

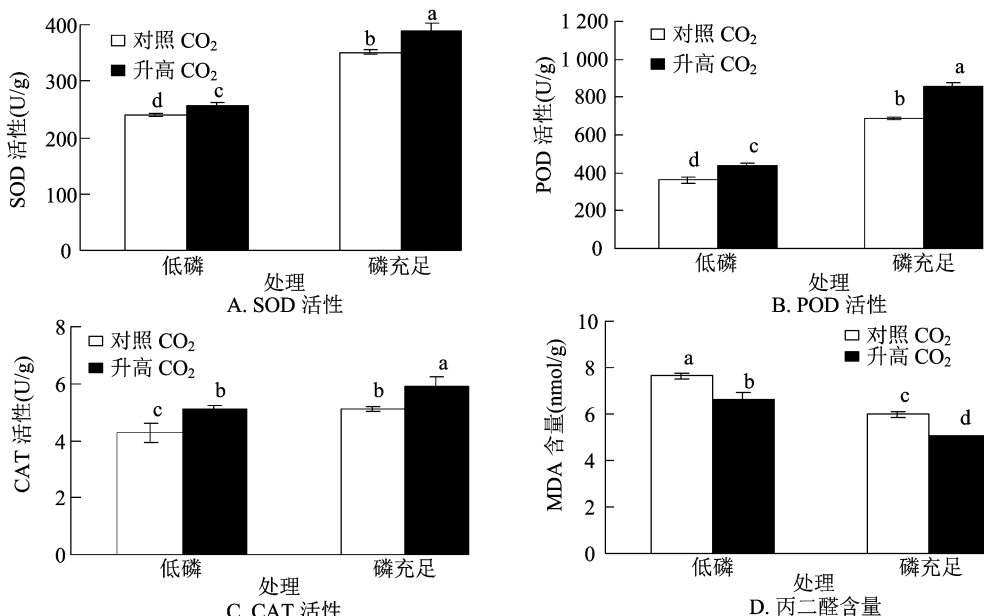


图2 不同供磷水平下 CO₂ 浓度升高对番茄叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

致,因此低磷导致了超氧自由基的增多并造成了膜脂过氧化程度的提高。同时缺磷处理番茄叶片 SOD、POD、CAT 等 3 种抗氧化酶活性显著降低,但是 CO₂ 浓度升高增加了 3 种抗氧化酶的活性,因此增强了抗氧化能力,使其膜脂过氧化程度减弱,进而降低了番茄叶片中的 MDA 含量,表明在一定期间内高浓度 CO₂ 对保护番茄叶片防止氧化损伤起着重要的作用。这与在樱桃番茄以及在番茄幼苗上的研究结果^[42-43]类似。而彭长连等发现,CO₂ 浓度升高条件下水稻的氧化损伤程度降低,同时几种抗氧化酶的活性也降低,认为高浓度 CO₂ 条件下氧化损伤程度的降低主要是由于生成的活性氧减少所致^[12]。林久生等发现,在小麦的整个生长期几种抗氧化酶的活性均表现为 CO₂ 倍增条件下明显高于 CK,并且 H₂O₂ 含量也高于 CK,认为 CO₂ 倍增条件下小麦氧化损伤程度的减轻并不是由于活性氧含量的下降,而主要是由于细胞内抗氧化能力的增强^[44]。可见由于试验使用材料的种类、发育阶段、CO₂ 浓度和处理时间以及其他生长环境等不同,使得高浓度 CO₂ 对植物自由基的产生以及清除的影响试验结果不尽一致。

综上所述,CO₂ 浓度升高增强了番茄的光合效率,而低磷抑制了这种作用;磷充足条件下 CO₂ 浓度升高有利于番茄叶片叶绿素的形成,并且更有利于叶绿素 b 的形成,同时也增强了番茄抗氧化系统的保护能力,进而促进光合作用。因此 CO₂ 浓度升高条件下,磷素的充足供应可以促进 CO₂ 浓度升高

产生的正效应。

参考文献:

- [1] Kumar A, Nayak A K, Sah R P, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on water productivity and antioxidant enzyme activities of rice (*Oryza sativa* L.) under water deficit stress[J]. Field Crops Research, 2017, 212: 61–72.
- [2] Redda A R, Rasinen G K, Raghawendra A S. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity [J]. Current Science, 2010, 99(1): 46–57.
- [3] DeLucia E H, Hamilton J G, Naidu S L, et al. Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment [J]. Science, 1999, 284(5417): 1177–1179.
- [4] 郝兴宇, 韩雪, 李萍, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2776–2780.
- [5] 刘超, 胡正华, 陈健, 等. 不同 CO₂ 浓度升高水平对水稻光合特性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 246–254.
- [6] Long S P, Ainsworth E A, Rogers A, et al. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 591–628.
- [7] Pinter Jr P J, Idso S B, Hendrix D L, et al. Effect of free-air CO₂ enrichment on the chlorophyll content of cotton leaves [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 70(1/2/3/4): 163–169.
- [8] Rao M V, Hale B A, Ormrod D P. Amelioration of ozone-induced oxidative damage in wheat plants grown under high carbon dioxide (role of antioxidant enzymes)[J]. Plant Physiology, 1995, 109(2): 421–432.
- [9] Reeves D W, Rogers H H, Prior S A, et al. Elevated atmospheric carbon dioxide effects on sorghum and soybean nutrient status[J]. Journal of Plant Nutrition, 1994, 17(11): 1939–1954.
- [10] 庄明浩, 李迎春, 郭子武, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对毛竹叶片膜

- 脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 生态学杂志,2012,31(5): 1064–1069.
- [11] 刘 筱. 模拟 CO₂ 浓度升高和降水改变对薄荷生理生态特性的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [12] 彭长连, 林植芳, 林桂珠. 加富 CO₂ 条件下水稻叶片抗氧化能力的变化[J]. 作物学报, 1999, 25(1): 39–43.
- [13] 赵天宏, 王美玉, 张巍巍, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1096–1100.
- [14] Lloyd J, Farquhar G D. The CO₂ dependence of photosynthesis, plant growth responses to elevated atmospheric CO₂ concentrations and their interaction with soil nutrient status. I. General principles and forest ecosystems[J]. Functional Ecology, 1996, 10(1): 4.
- [15] 牛晓光, 杨荣全, 李 明, 等. 大气 CO₂ 浓度升高与氮肥互作对玉米光合特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(2): 255–264.
- [16] Conroy J P, Smillie R M, Küppers M, et al. Chlorophyll a fluorescence and photosynthetic and growth responses of *Pinus radiata* to phosphorus deficiency, drought stress, and high CO₂[J]. Plant Physiology, 1986, 81(2): 423–429.
- [17] Lewis J D, Griffin K L, Thomas R B, et al. Phosphorus supply affects the photosynthetic capacity of loblolly pine grown in elevated carbon dioxide[J]. Tree Physiology, 1994, 14(11): 1229–1244.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: II. purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings[J]. Plant physiology, 1997, 59(2): 315–318.
- [20] 陈贻竹, B. 帕特森. 低温对植物叶片中超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化氢水平的影响[J]. 植物生理学报, 1988, 14(4): 323–328.
- [21] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves[J]. Plant Physiology, 1992, 98(4): 1222–1227.
- [22] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, 125(1): 189–198.
- [23] Kant S, Seneweera S, Rodin J, et al. Improving yield potential in crops under elevated CO₂: integrating the photosynthetic and nitrogen utilization efficiencies[J]. Frontiers in Plant Science, 2012, 3: 162.
- [24] Morales A, Yin X Y, Harbinson J, et al. *In silico* analysis of the regulation of the photosynthetic electron transport chain in C₃ plants[J]. Plant Physiology, 2017, 176(2): 1247–1261.
- [25] Conroy J P. Influence of elevated atmospheric CO₂ concentrations on plant nutrition[J]. Australian Journal of Botany, 1992, 40(5): 445.
- [26] 朱隆静, 喻景权. 不同供磷水平对番茄生长和光合作用的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(3): 120–122.
- [27] Jacob J, Lawlor D W. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1991, 42(8): 1003–1011.
- [28] Mott K A. Sensing of atmospheric CO₂ by plants[J]. Plant, Cell and Environment, 1990, 13(7): 731–737.
- [29] Centritto M, Lucas M E, Jarvis P G. Gas exchange, biomass, whole-plant water-use efficiency and water uptake of peach (*Prunus persica*) seedlings in response to elevated carbon dioxide concentration and water availability[J]. Tree Physiology, 2002, 22(10): 699–706.
- [30] Klaiber J, Najar-Rodriguez A J, Piskorski R, et al. Plant acclimation to elevated CO₂ affects important plant functional traits, and concomitantly reduces plant colonization rates by an herbivorous insect[J]. Planta, 2013, 237(1): 29–42.
- [31] Brestic M, Zivcak M, Hauptvogel P, et al. Wheat plant selection for high yields entailed improvement of leaf anatomical and biochemical traits including tolerance to non-optimal temperature conditions[J]. Photosynthesis Research, 2018, 136(2): 245–255.
- [32] Oberbauer S F, Strain B R, Fetcher N. Effect of CO₂-enrichment on seedling physiology and growth of two tropical tree species[J]. Physiologia Plantarum, 1985, 65(4): 352–356.
- [33] Socias F X, Medrano H, Sharkey T D. Feedback limitation of photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* L grown in elevated CO₂[J]. Plant, Cell and Environment, 1993, 16(1): 81–86.
- [34] Nie G Y, Long S P, Garcia R L, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment on the development of the photosynthetic apparatus in wheat, as indicated by changes in leaf proteins[J]. Plant, Cell and Environment, 1995, 18(8): 855–864.
- [35] 卢从明, 张其德, 冯丽洁, 等. CO₂ 浓度倍增对谷子拔节期和灌浆期光合色素含量和 PS II 功能的影响[J]. 植物学报, 1997, 39(9): 874–878.
- [36] 韦彩妙, 林植芳, 孔国辉. 提高 CO₂ 浓度对两种亚热带树苗光合作用的影响[J]. 植物学报, 1996, 38(2): 123–130.
- [37] 高 婷, 张 杰, 马瑞红, 等. NaCl 胁迫对黑籽南瓜生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 122–124, 137.
- [38] 赵 嫚, 陈仕勇, 李亚萍, 等. 外源 GABA 对盐胁迫下金花菜种子萌发及幼苗抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 310–316.
- [39] 高小丽, 孙健敏, 高金锋, 等. 不同基因型绿豆叶片衰老与活性氧代谢研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2873–2880.
- [40] 万美亮, 邝炎华, 陈建勋. 缺磷胁迫对甘蔗膜脂过氧化及保护酶系统活性的影响[J]. 华南农业大学学报, 1999, 20(2): 1–6.
- [41] 潘晓华, 刘水英, 李 锋, 等. 低磷胁迫对不同水稻品种叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(1): 57–60.
- [42] Karim M F, Hao P F, Nordin N H B, et al. CO₂ enrichment using CRAM fermentation improves growth, physiological traits and yield of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2020, 27(4): 1041–1048.
- [43] Zhang Y, Yao Q, Shi Y, et al. Elevated CO₂ improves antioxidant capacity, ion homeostasis, and polyamine metabolism in tomato seedlings under Ca(NO₃)₂-induced salt stress[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 273: 109644.
- [44] 林久生, 王根轩. CO₂ 倍增对渗透胁迫下小麦叶片抗氧化酶类及细胞程序性死亡的影响[J]. 植物生理学报, 2000, 26(5): 453–457.