西北农业学报 2019,28(8):1309-1316
Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica

网络出版日期:2019-07-09 doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2019.08.013
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20190708.0913.006.html

CO_2 加富对盐胁迫下番茄幼苗生长和渗透调节特性的影响

李旭芬,石 玉,李 斌,侯雷平,邢国明,张 毅
(山西农业大学 园艺学院/山西省设施蔬菜提质增效协同创新中心,山西太谷 030801)

摘 要 以'中杂9号'番茄为试材,用80 mmol/L $Ca(NO_3)_2$ 胁迫模拟设施土壤次生盐渍化,(800±40) μmol/mol 模拟 CO_2 加富环境,研究 CO_2 加富对盐胁迫下番茄幼苗生长及渗透调节特性的影响。结果表明:与对照相比,盐胁迫显著抑制番茄生长,且叶片相对含水量、叶片水势、根系水力学导度、根系形态参数和根系渗透势均不同程度降低;同时,叶片可溶性糖、植株游离氨基酸和脯氨酸的质量分数均显著升高,但叶片可溶性蛋白和植株有机酸的质量分数均显著降低。与单独盐胁迫相比,CO_2 加富处理显著提高盐胁迫植株的干鲜质量、叶片水势、根系长度、根系表面积、根系体积和根系渗透势,叶片可溶性蛋白、脯氨酸、有机酸的质量分数分别显著增加111.99%、10.93%和14.62%,根系可溶性蛋白和游离氨基酸的质量分数分别显著增加76.01%和76.97%,根系脯氨酸质量分数显著降低6.33%。综上所述,CO_2 加富能够通过改善植株水分状况和提高渗透调节能力,尤其是促进可溶性蛋白等渗透调节物质的积累来增强番茄幼苗的盐胁迫耐受性。

关键词 CO_2 加富;$Ca(NO_3)_2$ 胁迫;渗透调节;番茄

中图分类号 S626.5 **文献标志码** A **文章编号** 1004-1389(2019)08-1309-08

近年来,中国设施农业发展迅速,设施栽培面积稳居世界第一[1],在提升作物抗灾能力、增加土地生产力、促进农民增收等方面起到重要作用。由于不合理的施肥、灌溉,土壤次生盐渍化已成为制约设施农业生产的主要问题之一。在设施次生盐渍化土壤中,阴离子以 NO_3^- 为主,阳离子则以 Ca^{2+} 为主[2]。设施土壤中盐分积累会导致土壤的溶液渗透势下降,使作物根系吸水困难,导致植株生理代谢紊乱,严重时会造成水分外渗[3],影响作物生长发育。研究发现,作物面临盐胁迫时,一些渗透调节物质会主动积累在细胞内,降低自身水势,以维持细胞吸水能力[4],减少或避免渗透胁迫对植株造成的伤害。

设施栽培中常出现 CO_2 亏缺现象,尤其在冬季反季节栽培中,由于设施的密闭保温需求以及作物进行光合作用,导致设施内 CO_2 严重亏缺[5],影响作物生长。通过 CO_2 施肥(即 CO_2 加富)调控栽培设施内的 CO_2 浓度,增强作物光合作用,是实现设施蔬菜提质增效的有效途径[6]。研究发现,CO_2 加富会提高作物的光合速率,促进植株生长[7]。李清明等[8]研究表明,CO_2 浓度升高可显著促进干旱条件下黄瓜叶片渗透调节物质的积累,调节细胞渗透压,从而增强植株对环境的适应能力。可见,CO_2 加富有利于作物更好地进行光合作用,抑制光呼吸,提高植株水分利用率,促进植株生长[9]。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)是国内外种植面积最大、广受消费者青睐的蔬菜作物之一[10]。随着设施农业的发展,番茄栽培技术体系不断完善,然而设施土壤次生盐渍化和 CO_2 亏缺等逆境对番茄的产量和品质造成严重影响。目前,关于 CO_2 与盐胁迫的互作效应研究多集中在NaCl胁迫以及两者对作物生长和光合特性的影响等方面[11-12],而基于 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫模拟设施盐渍化土壤条件下,CO_2 加富对作物生长及渗透调节特性的具体影响仍不明确。为此,本试验以番茄为研究对象,采用水培技术,探讨 CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗生长及渗透调节特

收稿日期:2019-03-06 **修回日期**:2019-03-28
基金项目:第63批中国博士后科学基金面上项目(2018M631769);国家自然科学基金青年科学基金(31501807,31501750,31501806)。
第一作者:李旭芬,女,硕士研究生,从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: fengyatou610@163.com
通信作者:张 毅,男,博士,副教授,主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: harmony1228@163.com

性的影响，以期进一步阐明 CO_2 加富对番茄 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫伤害的缓解机制，为基于 CO_2 施肥应对设施土壤次生盐渍化问题及进行设施蔬菜抗盐栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

供试番茄品种为‘中杂 9 号’。选择饱满的种子，经消毒、浸种、催芽后播于穴盘内育苗，在人工气候室中培养。设置温度(28±1)℃/(18±1)℃(昼/夜)，光暗周期 16 h/8 h，光照度为 800 μmol/(m^2·s)。待 3 叶 1 心时，挑选长势一致的幼苗，定植于装有 1/2 山崎番茄专用营养液的水培槽中进行缓苗，约每隔 3 d 更换 1 次营养液，pH 保持在 6.2±0.2。缓苗 3 d 后，分别在 2 个植物生长室内进行 CO_2 预处理，并通过 CO_2 控制系统对生长室内 CO_2 释放的时间和浓度进行控制，分别保持在(400±20)μmol/mol 和(800±40)μmol/mol。CO_2 预处理 3 d 后，在营养液中一次性加入 80 mmol/L $Ca(NO_3)_2$，盐处理 7 d 后取样，待用。4 个处理分别为：CK、Ca、CO_2、CO_2+Ca，其中，CK 即正常 CO_2 浓度+无盐胁迫，Ca 即正常 CO_2 浓度+$Ca(NO_3)_2$ 胁迫，CO_2 即 CO_2 加富+无盐胁迫，CO_2+Ca 即 CO_2 加富+$Ca(NO_3)_2$ 胁迫。

1.2 试验方法

加盐处理后第 7 天，随机选取长势均匀一致的幼苗 3 株，称量其地上部和根系的干鲜质量。叶片含水量采用直接称量法[13]测定；叶片水势参照单立山等[14]的方法测定，根系水力学导度参照 Miyamoto 等[15]的方法测定，均使用植物水分压力室(PMS Model 3500，美国)测定；根系形态参数用根系扫描仪(MRS-9600TFU2L，上海)测定；渗透势直接用渗透仪(Vapor Pressure Osmometer 5520，USA)测定；可溶性糖质量分数测定用硫酸苯酚法[16]；可溶性蛋白质量分数用考马斯亮蓝法[17]测定；游离氨基酸质量分数用茚三酮比色法[18]测定；脯氨酸质量分数用磺基水杨酸法[18]测定；有机酸质量分数采用酸碱滴定法[19]测定。

1.3 数据处理及分析

试验数据均采用 SAS 8.1 分析，用 Microsoft Excel 2013 作图。

2 结果与分析

2.1 CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗生长的影响

由表 1 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理使番茄植株地上部和根系鲜质量、干质量均有所增加，且对干质量的影响达到显著水平。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下地上部和根系干鲜质量均显著降低，说明 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对番茄幼苗生长有显著的抑制作用。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富处理后地上部鲜质量、干质量及根系鲜质量、干质量分别显著增加 1.61 倍、1.60 倍、0.93 倍和 1.04 倍，说明 CO_2 加富能有效缓解 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫导致的生物量下降，促进盐胁迫植株的生长，有效提高其耐盐性。

表 1 不同处理下番茄幼苗生物量积累

Table 1 Biomass accumulation of tomato seedlings under different treatments

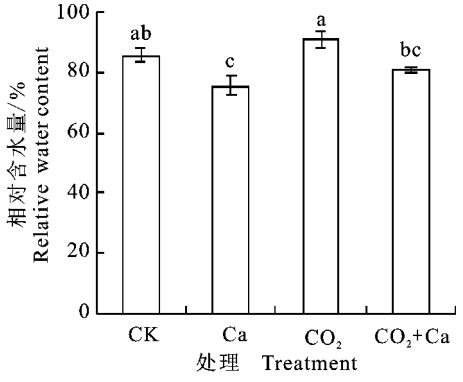
处 理 Treatment	地上部鲜质量/g Shoot fresh mass	根系鲜质量/g Root fresh mass	地上部干质量/g Shoot dry mass	根系干质量/g Root dry mass
CK	10.142±0.223 a	1.915±0.035 a	0.603±0.033 b	0.093±0.001 b
Ca	2.435±0.295 c	1.140±0.071 b	0.269±0.018 c	0.077±0.003 c
CO_2	10.727±0.765 a	2.235±0.106 a	0.843±0.042 a	0.158±0.018 a
CO_2+Ca	6.364±1.023 b	2.195±0.445 a	0.701±0.074 b	0.153±0.015 a

注：数据以“平均值±标准差”表示。同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Valuesare “mean ± standard deviation”. The same alphabet with the different lowercase letters indicate a significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2 CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄叶片相对含水量的影响

由图 1 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理对番茄叶片相对含水量的影响不显著。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫使番茄叶片相对含水量显著降低 11.7%。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富处理后叶片相对含水量有所提高，但差异不显著。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下同。Differentlowercase letters are significantly difference（$P<0.05$）. The same below

图 1　不同处理下番茄叶片相对含水量

Fig. 1　Leaf relative water contents of tomato seedlings under different treatments

2.3　CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄叶片水势的影响

由图 2 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理后番茄叶片水势显著降低 94.73%。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片水势降低 3.5 倍。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富处理使叶片水势显著增加 26.89%，说明 CO_2 加富可以提高叶片水势，减轻 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫造成的水分亏缺，提高植株的耐盐性。

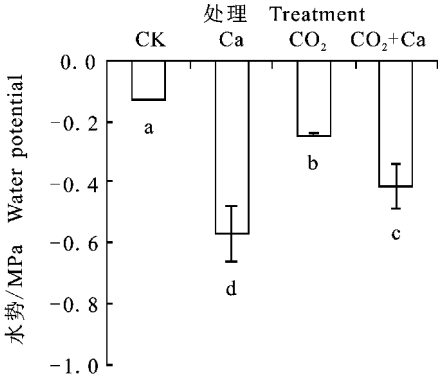


图 2　不同处理下番茄叶片水势

Fig. 2　Leaf water potential of tomato seedlings underdifferent treatments

2.4　CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄根系水力学导度的影响

由图 3 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理后番茄根系水力学导度显著降低 47.4%。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下根系水力学导度降低 75.7%。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富处理后根系水力学导度降低 5.4%。说明 CO_2 加富对盐胁迫下根系水力学导度无显著影响。

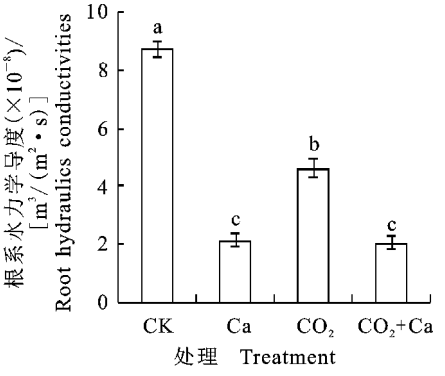


图 3　不同处理下番茄根系水力学导度

Fig. 3　Root hydraulics conductivities of tomato seedlings under different treatments

2.5　CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄根系结构的影响

由表 2 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理后番茄根系总长、总表面积、平均直径、总体积均显著增加。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下根系总长、总表面积、平均直径、总体积均降低，说明 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对根系生长有抑制作用。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富处理后根系总长、总表面积和总体积分别显著增加 173.99%、269.97% 和 392.41%，说明 CO_2 加富能促进 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下的根系生长，有效提高番茄植株的耐盐性。

表 2　不同处理下番茄幼苗根系特征

Table 2　Root characteristics of tomato seedlings under different treatments

处 理 Treatment	总根长/cm Total root length	总根系表面积/cm^2 Total root surface area	平均直径/mm Average diameter	总根系体积/cm^3 Total root volume
CK	214.087±89.386 bc	37.748±5.562 c	0.480±0.002 c	0.551±0.074 c
Ca	127.335±2.332 c	18.749±0.420 d	0.569±0.038 bc	0.237±0.018 d
CO_2	434.249±82.726 a	103.487±12.346 a	0.764±0.055 a	1.968±0.093 a
CO_2+Ca	348.881±51.844 ab	69.366±0.093 b	0.656±0.071 ab	1.167±0.081 b

2.6 CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗渗透势的影响

由图 4 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理使番茄叶片渗透势降低 0.3%，而根系渗透势显著增加 5.7%。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片和根系的渗透势分别显著降低 35.59% 和 12.24%。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富使叶片的渗透势显著降低 15.32%，根系渗透势显著增加 7.2%。

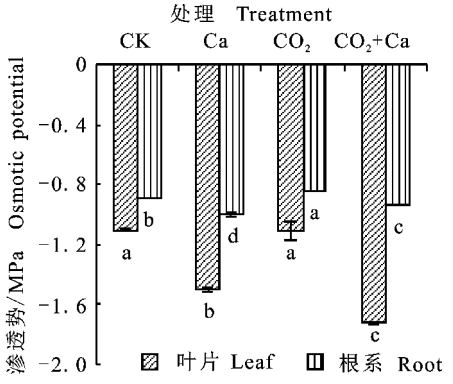


图 4 不同处理下番茄幼苗渗透势

Fig. 4 Osmotic potential of tomato seedlings under different treatments

2.7 CO_2 加富对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗渗透调节物质质量分数的影响

2.7.1 可溶性糖 由图 5 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理使番茄叶片的可溶性糖质量分数显著增加 50.42%，而根系可溶性糖质量分数降低 59.21%。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片和根系的可溶性糖质量分数分别增加 71.03% 和 40.59%、且叶片有显著性差异。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富使叶片和根系可溶性糖质量分数分别降低 11.79% 和 11.78%，但无显著性差异。

2.7.2 可溶性蛋白 由图 6 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理使番茄叶片的可溶性蛋白质量分数降低，根系可溶性蛋白质量分数增加，但差异不显著。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫使叶片和根系的可溶性蛋白质量分数分别降低 53.47% 和 25.97%，且叶片有显著性差异。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富使叶片和根系的可溶性蛋白质量分数分别显著增加 111.99% 和 76.01%，说明 CO_2 加富能够促进 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗体内可溶性蛋白合成，以维持其渗透调节，提高盐胁迫下番茄的耐盐性。

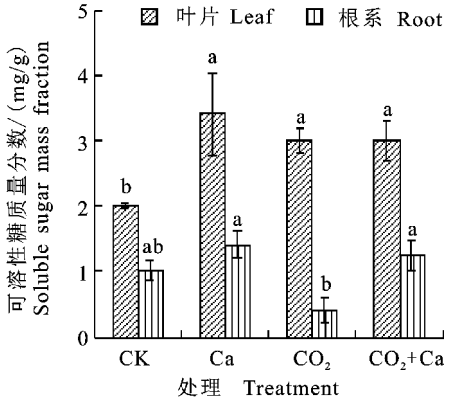


图 5 不同处理下番茄幼苗可溶性糖质量分数

Fig. 5 Soluble sugar mass fraction of tomato seedlings under different treatments

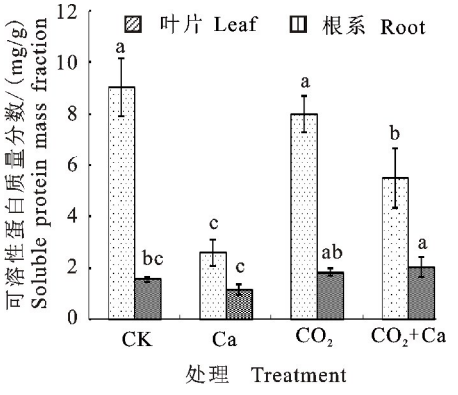


图 6 不同处理下番茄幼苗可溶性蛋白质量分数

Fig. 6 Soluble protein mass fraction of tomato seedlings under different treatments

2.7.3 游离氨基酸 由图 7 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理后番茄叶片和根系的游离氨基酸质量分数均增加。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片和根系的游离氨基酸质量分数分别显著增加 1.69 倍和 2.01 倍。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富使叶片和根系的游离氨基酸质量分数分别增加 3.66% 和 76.97%，且根系差异显著。

2.7.4 脯氨酸 由图 8 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理后番茄叶片和根系的脯氨酸质量分数均增加。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片和根系的脯氨酸质量分数分别显著增加 6.44 倍和 4.47 倍。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富使番茄叶片的脯氨酸质量分数显著增加 10.93%，根系的脯氨酸质量分数显著降低 6.33%。

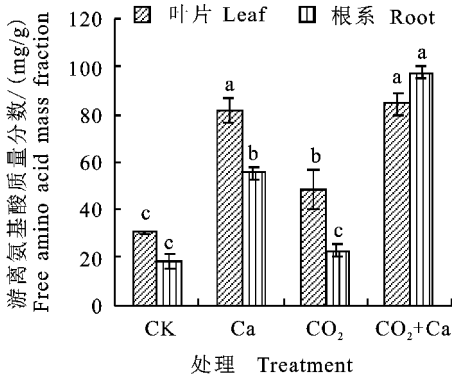


图 7　不同处理下番茄幼苗游离氨基酸质量分数

Fig. 7　Free amino acid mass fraction of tomato seedlings under different treatments

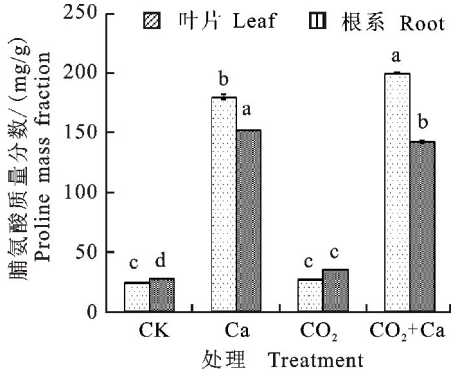


图 8　不同处理下番茄幼苗脯氨酸质量分数

Fig. 8　Proline mass fraction of tomato seedlings under different treatments

2.7.5　有机酸　由图 9 可知，正常栽培条件下，CO_2 加富处理后番茄叶片和根系的有机酸质量分数均增加。与 CK 相比，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片和根系的有机酸质量分数分别显著降低 12.95%和 33.62%。与单独 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫相比，CO_2 加富使叶片和根系的有机酸质量分数分别增加 14.62%和 0.81%，且叶片差异显著。

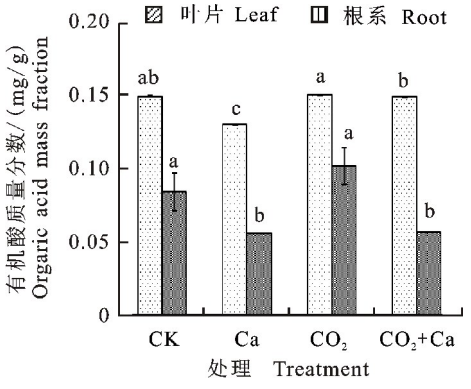


图 9　不同处理下番茄幼苗有机酸质量分数

Fig. 9　Total organic acid of tomato seedlings under different treatments

3　讨论与结论

生物量是衡量作物受胁迫程度与抗盐能力的重要指标[20]。本研究结果表明，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫显著抑制番茄生物量的积累，CO_2 加富则显著促进生物量积累、减轻 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对番茄生长的抑制效应，结果与前人在黄瓜[21]和大麦[22]上的相关研究一致。

盐胁迫造成的根际环境水势降低，会导致作物吸水困难，影响植株生长[23]。植株可通过调节叶片水势、渗透势和相对含水量等来响应盐胁迫伤害[24]。本研究结果显示，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶片相对含水量、水势及植株渗透势均显著下降，这与石玉等[25]的研究结果相似；CO_2 加富处理有效缓解了叶片相对含水量及其水势的下降。可见，CO_2 加富在一定程度上可有效增强 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄植株的保水能力，改善其水分状况，增强其抗盐能力；同时，CO_2 加富下盐胁迫植株的叶片渗透势进一步降低，可能与 CO_2 加富促进脯氨酸等渗透调节物质的积累有关。

根系水力学导度是反映根系吸收水分能力的一个重要指标[26]。根系形态（如根系总长、总表面积、总体积和平均直径等）直接影响根系对水分和养分的吸收[27]。本研究结果表明，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫显著降低番茄根系总长、总表面积及根系水力学导度，CO_2 加富处理显著提高 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫植株的根系总长和总表面积，但对根系水力学导度的影响不显著；CO_2 加富促进盐胁迫下根系总表面积的增加，有利于根系对水分的吸收，从而提高番茄的耐盐性。同时，本研究结果显示，CO_2 加富下番茄幼苗的相对含水量、保水能力明显提高，但 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下 CO_2 加富如何增强番茄植株的水分运输能力及保水能力则还需进一步研究。

作物可通过主动合成或诱导积累脯氨酸等渗透调节物质来调节细胞的渗透势，维持细胞膨压，保证其正常的生理功能，以适应胁迫逆境[4]。可溶性糖不仅可以作为渗透调节物质维持细胞水分平衡，还可以作为其他有机溶质合成的碳架和能量来源[28]。本研究结果显示，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄叶片和根系的可溶性糖、游离氨基酸和脯氨酸的质量分数均显著增加，其中脯氨酸质量分数的增加最为明显，这与王国霞等[29]的研究结果相似。本试验中，$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下番茄幼苗可溶

性蛋白质量分数显著降低，可能与 NO_3^- 抑制作物叶肉细胞内蛋白质的合成有关[30]。CO_2 加富显著提高盐胁迫植株的可溶性蛋白质量分数，可见，CO_2 加富能够促进植株体内蛋白的积累，有利于根系功能的恢复。CO_2 加富使叶片的脯氨酸质量分数增加，可能是由于 CO_2 加富提高与脯氨酸合成有关的酶活性，促进脯氨酸积累，进而增强番茄植株的盐胁迫耐受性。因此，CO_2 加富通过调控盐胁迫植株的渗透调节能力来维持根系渗透压是促进盐胁迫下番茄生长和增强其耐盐性的重要原因之一。本研究结果发现，CO_2 加富降低植株可溶性糖质量分数，与魏珉等[31]、许申平等[32]的研究结果有出入，这可能是由于 CO_2 加富促进植株的生长，代谢旺盛，使可溶性糖转化为碳架[33]，也可能是因为 CO_2 加富在一定程度上抑制植物的呼吸，减少光合产物的分解，导致可溶性糖质量分数下降。

综上所述，CO_2 加富能够通过改善植株水分状况、提高渗透调节能力，尤其是促进可溶性蛋白等渗透调节物质积累来增强番茄幼苗对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫的耐受性。

参考文献 Reference:

[1] 蒋卫杰，邓 杰，余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学，2015，48(17)：3515-3523.
JIANG W J，DENG J，YU H J. General situation，existing problems and industrial development suggestion of facility horticulture [J]. *Agricultural Science in China*，2015，48(17)：3515-3523.

[2] 薛继澄，毕德义，李家金，等. 保护地栽培蔬菜生理障碍的土壤因子与对策[J]. 土壤肥料，1994(1)：4-9.
XUE J D，BI D Y，LI J J，*et al*. Soil factors and countermeasures of physiological disorder of vegetable cultivated in protected land [J]. *Soil Fertilizer*，1994(1)：4-9.

[3] 李晓燕，宋占午，董志贤. 植物的盐胁迫生理[J]. 西北师范大学学报(自然科学版)，2004，40(3)：106-111.
LI X Y，SONG ZH W，DONG ZH X. Salt stress physiology of plants [J]. *Journal of Northwest normal University (Natural Science Edition)*，2004，40(3)：106-111.

[4] 吴亮其，范战民，郭 蕾，等. 通过转 *δ-OAT* 基因获得抗盐抗旱水稻[J]. 科学通报，2003，48(19)：2050-2056.
WU L Q，FAN ZH M，GUO L，*et al*. Salt-resistant and drought-resistant rice was obtained by transformation of *δ-OAT* gene [J]. *Scientific Bulletin*，2003，48(19)：2050-2056.

[5] 黄忠阳，常义军，徐明喜，等. 棚室废弃物发酵增施 CO_2 对绿绒菜生长的影响[J]. 农业开发与装备，2014(11)：66-67.
HUANG ZH Y，CHANG Y J，XU M X，*et al*. Effect of fermentation of shed waste on the growth of green velvet vegetables [J]. *Agricultural Development and Equipment*，2014(11)：66-67.

[6] 杨志刚，崔世茂，胡栓红，等. 长期 CO_2 加富对温室辣椒结果期光合生理及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2018，46(12)：65-73.
YANG ZH G，CUI SH M，HU SH H，*et al*. Effects of long-term CO_2 gafula on photosynthetic physiology and yield in greenhouse pepper results period [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*，2018，46(12)：65-73.

[7] 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(1)：591-628.

[8] 李清明，刘彬彬，艾希珍. CO_2 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响[J]. 生态学报，2010，30(22)：6063-6071.
LI Q M，LIU B B，AI X ZH. Effects of CO_2 concentration multiplication on lipid peroxidation and antioxidant system of cucumber seedlings under drought stress[J]. *Journal of Ecology*，2010，30(22)：6063-6071.

[9] CONFALONIERIU，CANZIANI O F，PALUTIKOF J P. Climate change 2007：impacts，adaptation and vulnerability [J]. *Journal of Environmental Quality*，2007，37(6)：2407.

[10] 孙德智，韩晓日，彭 靖，等. 外源水杨酸和一氧化氮对盐胁迫番茄幼苗光系统Ⅱ功能及激发能分配利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24(1)：170-178.
SUN D ZH，HAN X R，PENG J，*et al*. Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on photosystem Ⅱ function and excitation energy allocation and utilization of tomato seedlings under salt stress [J]. *Acta Plant Nutrition and Fertilizer*，2018，24(1)：170-178.

[11] 张 琴，朱祝军. 盐胁迫下 CO_2 加富对黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. 耕作与栽培，2015(3)：31-32.
ZHANG Q，ZHU ZH J. Effects of CO_2 enrichment on physiological characteristics of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Cultivation and Cultivation*，2015(3)：31-32.

[12] 易昌禹. 质外体 H_2O_2 介导 CO_2 加富缓解番茄盐害的机制研究[D]. 杭州：浙江大学，2015.
YI CH Y. Study on the mechanism of H_2O_2 mediated CO_2 and rich in the mitigation of tomato salt damage [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2015.

[13] 张中峰，尤业明，黄玉清，等. 模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响[J]. 生态学报，2012，32(20)：6318-6325.
ZHANG ZH F，YOU Y M，HUANG Y Q，*et al*. Effects of drought stress on seedling of *Quercusquinquefolium* under simulated Karst Habitat [J]. *Journal of Ecology*，2012，32(20)：6318-6325.

[14] 单立山，李 毅，张希明，等. 灌溉对 3 种荒漠植物蒸腾耗

水特性的影响[J]. 生态学报，2012，32(18)：5692-5702.
SHAN L SH，LI Y，ZHANG X M，*et al*. Effects of irrigation on transpiration and water consumption of three desert plants [J]. *Journal of Ecology*，2012，32(18)：5692-5702.

[15] MIYAMOTO N，STEUDLE E，HIRASAWA T，*et al*. Hydraulic conductivity of rice roots [J]. *Journal of Experimental Botany*，2001，52(362)：1835-1846.

[16] 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，2000：195-197.
LI H SH. Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiment [M]. Beijing：Higher Education Press，2000：195-197.

[17] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*，1976，72(s1/2)：248-254.

[18] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 第 2 版. 高等教育出版社，2006：199-201，278-279.
WANG X K. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments[M]. Edition 2. Beijing：Higher Education Press，2006：199-201，278-279.

[19] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京：高等教育出版社，2006：199-200.
GAO J F. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. Beijing：Higher Education Press，2006：1999-2000.

[20] DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants：a review [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*，2005，60(3)：324-349.

[21] 厉书豪，李　曼，张文东，等. CO_2 加富对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 生态学报，2019(6)：1-8.
LI SH H，LI M，ZHANG W D，*et al*. Effects of CO_2 gafula on photosynthetic characteristics and reactive oxygen metabolism of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Journal of Ecology*，2019(6)：1-8.

[22] USUE PÉREZ-LÓPEZ，JON MIRANDA-APODACA. Barley growth and its underlying components are affected by elevated $CO_2$and salt concentration [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*，2013，32(4)：732-744.

[23] 程玉静，郭世荣，孙　锦，等. 外源硝酸钙对盐胁迫下黄瓜幼苗氮化合物含量和硝酸还原酶活性的影响[J]. 西北农业学报，2010，19(4)：188-191.
CHENG Y J，GUO SH R，SUN J，*et al*. Effects of exogenous calcium nitrate on nitrogen compounds content and nitrate reductase activity in cucumber seedlings under salt stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*，2010，19(4)：188-191.

[24] 朱雨晴，杨再强. 不同品种葡萄叶片光合特性对干旱胁迫的响应及旱后恢复过程[J]. 中国农业气象，2018，39(11)：739-750.
ZHU Y Q，YANG Z Q. The response of photosynthetic characteristics of different varieties of grape leaves to drought stress and the recovery process after drought [J]. *Agricultural Meteorology in China*，2018，39(11)：739-750.

[25] 石　玉，潘媛媛，张　毅，等. 光碳核肥对盐胁迫下黄瓜幼苗生长抑制的缓解效应[J]. 西北农业学报，2017，26(5)：752-758.
SHI Y，PAN Y Y，ZHANG Y，*et al*. Mitigation effect of photo-carbon fertilizer on growth inhibition of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*，2017，26(5)：752-758.

[26] 朱永兴. 硅对黄瓜幼苗盐胁迫损伤的缓解效应及机理研究[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2016.
ZHU Y X. Mitigation effect and mechanism of silicon on salt stress of cucumber seedling [D]. Yangling Shaanxi：Northwest A&F University，2016.

[27] JIA W，ZHANG J. Stomatal movements and long-distance signaling in plants [J]. *Plant Signaling & Behavior*，2008，3(10)：772-777.

[28] 卢克欢，郭　双，韦　悦，等. 外源性 5-氨基乙酰丙酸对盐胁迫下颠茄生理特性及次生代谢产物含量的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2018，40(9)：13-20.
LU K H，GUO SH，WEI Y，*et al*. Effects of exogenous 5-aminobutyric acid on physiological characteristics and secondary metabolites of the potassium under salt stress [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*，2018，40(9)：13-20.

[29] 王国霞，张　宁，杨玉珍，等. 盐胁迫对红心萝卜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报，2016，25(5)：744-749.
WANG G X，ZHANG N，YANG Y ZH，*et al*. Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of radish [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*，2016，25(5)：744-749.

[30] 李海云，王秀峰. 含硝酸根化肥对黄瓜叶片脱落酸含量及叶绿体超微结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(3)：324-326.
LI H Y，WANG X F. Effects of nitrate fertilizer on abscisic acid content and chloroplast ultrastructure in cucumber leaves [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*，2004，10(3)：324-326.

[31] 魏　珉，邢禹贤，王秀峰，等. 设施蔬菜 CO_2 施肥技术研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版)，2003，34(4)：609-612.
WEI M，XING Y X，WANG X F，*et al*. Study on fertilization techniques of vegetable CO_2 in facilities [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*，2003，34(4)：609-612.

[32] 许申平，王　芳，叶庆生. CO_2 加富与两种供 N 水平对非洲菊光合生理及生长发育的影响[J]. 植物生理学报，2016，52(4)：533-542.
XU SH P，WANG F，YE Q SH. CO_2 gafula and the effects

of two kinds of N levels on photosynthetic physiology and growth and development of African chrysanthemum [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 52(4): 533-542.

[33] 莫亿伟,王 忠,梁国斌,等.施氮处理对水稻子代乳苗素质的影响[J].作物学报,2004(3):227-231.
MO Y W, WANG ZH, LIANG G B, *et al*. Effect of nitrogen application treatment on the quality of milk seedlings in rice offspring [J]. *Journal of Crops*, 2004(3): 227-231.

Effects of CO_2 Enrichment on Seedling Growth and Osmotic Regulation Characteristics of Tomato under Salt Stress

LI Xufen, SHI Yu, LI Bin, HOU Leiping, XING Guoming and ZHANG Yi

(Collaborative Innovation Center of Quality and Profit Improvement for the Protected Vegetables of Shanxi Province, College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu Shanxi 030801, China)

Abstract In this study, tomato(*Solanum lycopersicum* L.) cultivar 'Zhongza No. 9' was used as experimental material, 80 mmol/L $Ca(NO_3)_2$ was conducted to simulate the soil secondary salinization in protected agriculture, and(800±40) μmol/mol was used to simulate the CO_2 enrichment environment. The effects of CO_2 enrichment on the growth and osmotic regulation characteristics in tomato seedling exposed to salt stress were investigated. The results showed that compared with control treatment, salt stress significantly inhibited tomato growth. The leaf relative water content and water potential, the root hydraulic conductance, morphological parameters and osmotic potential were also decreased to different extent. Meanwhile, the soluble sugar mass fraction in leaves, the free amino acid and proline mass fraction in plants were increased significantly, but the soluble protein mass fraction in leaves, the organic acid mass fraction in plants were significantly decreased. In comparison with single salt treatment, CO_2 enrichment significantly improved the dry and fresh quality, leaf water potential, root length, root surface area, root volume and root osmotic potential in salt—stressed plant. Besides, the mass fraction of soluble protein, proline and organic acid in leaves were significantly increased by 111.99%, 10.93% and 14.62%, respectively, while the mass fraction of soluble protein and free amino acid in roots were significantly increased by 76.01% and 76.97%, respectively, and the proline mass fraction in roots were significantly lowered by 6.33%. In conclusion, CO_2 enrichment could enhance the salt tolerance of tomato seedlings by improving the water status and osmotic adjustment capacity of the plants, especially promoting the accumulation of soluble protein.

Key words CO_2 enrichment; $Ca(NO_3)_2$ stress; Osmotic adjustment; Tomato

Received 2019-03-06 **Returned** 2019-03-28

Foundation item The 63rd Batch of China Post-doctoral Science Foundation Projects (No. 2018M631769); the National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation Projects (No. 31501807, No. 31501750, No. 31501806).

First author LI Xufen, female, master student. Research area: physiology of vegetable cultivation-doctoral. E-mail: fengyatou610@163.com

Corresponding author ZHANG Yi, male, Ph. D, associate professor. Research area: physiology of vegetable cultivation. E-mail: harmony1228@163.com

(责任编辑:顾玉兰 **Responsible editor: GU Yulan**)