

赵旭, 刘涛, 姚慧敏, 等. 长期根际 CO_2 浓度升高对雾培番茄植株营养吸收及果实产量和品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 158-163.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.022

长期根际 CO_2 浓度升高对雾培番茄植株营养吸收及果实产量和品质的影响

赵旭^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 姚慧敏^{1,2}, 杨洁^{1,2}

(1. 山东省农业可持续发展研究所, 山东 济南 250100; 2. 农业农村部华东都市农业重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要: 采用气雾法栽培, 研究不同根际 CO_2 体积比处理[(370±10) $\mu\text{L/L}$ (CK)、(2 500±50) $\mu\text{L/L}$ 、(5 000±100) $\mu\text{L/L}$ 和(10 000±200) $\mu\text{L/L}$], 对番茄植株根系营养元素吸收以及产量和品质的影响。结果表明: 当处理 60 d 时各 CO_2 加富处理的根系干质量显著低于对照, 随着根际 CO_2 体积比的升高, 分别比对照减少 17.9%、13.2% 和 6.1%; 茎叶干质量分别比对照减少 6.1%、4.4% 和 2.6%。 CO_2 加富处理根系 Mg^{2+} -ATPase 活性开始变化缓慢, 从处理 40 d 开始急剧下降, 到处理结束时, 对照根系的 Mg^{2+} -ATPase 活性显著高于根际 CO_2 加富处理, 分别是 2 500 $\mu\text{L/L}$ 、5 000 $\mu\text{L/L}$ 和 10 000 $\mu\text{L/L}$ CO_2 处理的 1.1、1.3 和 1.8 倍。在 20 d 时, 根际 CO_2 加富处理的植株根系 Ca^{2+} -ATPase 活性均显著低于对照, 在处理结束时, 根际 10 000 $\mu\text{L/L}$ 和 5 000 $\mu\text{L/L}$ CO_2 处理显著低于 2 500 $\mu\text{L/L}$ 处理和对照, 但二者间无显著差异。根际 CO_2 处理 60 d, 叶片中 N、P 和 Mg 含量显著低于对照, 其中 2 500 $\mu\text{L/L}$ 、5 000 $\mu\text{L/L}$ 和 10 000 $\mu\text{L/L}$ 处理叶片中 P 含量分别比对照减少 12.6%、17.0% 和 19.3%, Mg 含量分别比对照减少 11.1%、18.5% 和 20.7%。根际 CO_2 加富处理植株的单株结果数与对照无显著性差异, 但对照植株单株产量和果实可溶性糖含量显著高于各根际 CO_2 加富处理。

关键词: 根际 CO_2 升高; 雾培番茄; 营养吸收; 产量; 品质

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0158-06

Effects of long-term elevated root-zone CO_2 concentration on nutrition uptake, fruit yield and quality of aeroponic tomato

ZHAO Xu^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, YAO Hui-min^{1,2}, YANG Jie^{1,2}

(1. Shandong Institute of Agricultural Sustainable Development, Jinan 250100, China; 2. Key Laboratory of East China Urban Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China)

Abstract: Effects of different root-zone CO_2 concentration, such as (370±10) $\mu\text{L/L}$ (CK), 2 500±50) $\mu\text{L/L}$, (5 000±100) $\mu\text{L/L}$ and (10 000±200) $\mu\text{L/L}$, on plant root nutrient uptake, fruit yield and quality of aeroponic tomato were investigated. The results showed that the root dry weight of each treatment was significantly lower than that of the control when treated for 60 days. With the increase of rhizosphere CO_2 concentration, the root dry weight decreased by 17.9%, 13.2% and 6.1%, and the dry weight of stems and leaves decreased by 6.1%, 4.4% and 2.6%, respectively. The activity of Mg^{2+} -ATPase in the roots of tomato plants under the treatment of CO_2 enrichment changed slowly at the beginning, and decreased sharply from 40 days after treatment. At the end of the treatment, the Mg^{2+} -ATPase activity in the control was significantly higher than that in the treatment of

CO_2 enrichment. The Mg^{2+} -ATPase activity in roots of tomato plants in the control 1.1 times, 1.3 times and 1.8 times as high as that in the treatments of 2 500 $\mu\text{L/L}$ CO_2 , 5 000 $\mu\text{L/L}$ CO_2 and 10 000 $\mu\text{L/L}$ CO_2 , respectively. At 20 days, the Ca^{2+} -ATPase activity in the roots of tomato plants in the treatment of CO_2 enrichment was significantly lower than that in the control. At the end of the treatment, the Ca^{2+} -ATPase

收稿日期: 2019-06-13

基金项目: 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2017B03)

作者简介: 赵旭(1980-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 高级农艺师, 主要从事设施蔬菜生理生态以及都市农业栽培模式研究。
(E-mail) cfszhaoxu@shandong.cn

通讯作者: 刘涛, (E-mail) liutaocfs@163.com; 姚慧敏, (E-mail) LDZDGC@163.com

activity in roots of tomato plants in the treatments of 10 000 $\mu\text{L/L}$ CO₂ and 5 000 $\mu\text{L/L}$ CO₂ was significantly lower than that in the treatment of 2 500 $\mu\text{L/L}$ CO₂ and control, but there was no significant difference between them. After 60 days of CO₂ treatment, the contents of N, P and Mg in the leaves were significantly lower than those in the control. Compared with the control, the P content of leaves in the treatments of 2 500 $\mu\text{L/L}$ CO₂, 5 000 $\mu\text{L/L}$ CO₂ and 10 000 $\mu\text{L/L}$ CO₂ was decreased by 12.6%, 17.0% and 19.3%, the content of Mg was reduced by 11.1%, 18.5% and 20.7%, respectively. There was no significant difference in the number of fruit per plant between the rhizosphere CO₂ treatments and control, but the yield per plant and soluble sugar content of fruits in the control were significantly higher than those in the rhizosphere CO₂ enrichment treatment.

Key words: elevated root zone CO₂; aeroponic tomato; nutrient uptake; yield; quality

根际通气在植物生长过程中起着非常重要的作用,调节根际通气可以改善植物的生长和发育^[1]。有研究表明,大气 CO₂ 体积分数增加对土壤中 CO₂ 体积分数有显著影响^[2]。同时,在土壤中由于植物根系呼吸作用和土壤微生物的影响,CO₂ 体积分数较高,而 O₂ 体积分数较低,这往往是植物生长发育的不利因素^[3]。

作为吸收和代谢的重要器官,根不仅可以直接控制水分和养分的吸收,还可以限制植物的生长^[4]。李军等研究结果表明,增加土壤通气可以增加马铃薯植株功能叶中的 ATP 含量,促进块茎干物质的积累,增加块茎产量^[5]。Boru 等在大豆的研究中发现,在 O₂ 缺乏的情况下,根际 15% CO₂ 和 30% CO₂ (体积分数)处理的植株高度分别减少了 39.3% 和 57.9%^[6]。根际 CO₂ 体积分数升高可以减少根系中营养物质的吸收,根吸收 Zn、Fe、K、Mg 和 Mn 的生理过程受到高体积分数根际 CO₂ 的抑制^[7-8]。长期根际高浓度的 CO₂ 处理会削弱甜瓜根系活力,降低产量^[9]。从根部到茎和其他器官的营养物质运输是维持植物生长的重要因素^[10]。作为重要的根际气体之一,二氧化碳对作物生长和产量具有非常重要的影响。目前,相对于大气 CO₂ 体积分数增加对植物生长影响的研究,根际 CO₂ 体积分数变化对植物生长影响的研究比较少。本试验系统研究根际 CO₂ 体积分数升高对番茄养分吸收和产量及品质的影响,为进一步改善根际环境调控,促进番茄高产优质栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于 2016 年在沈阳农业大学辽沈 I 型日光温室内进行。栽培番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 品种为辽园多丽。7 月 28 日穴盘基质育苗,9 月 21 日定植于栽培槽中。本试验采用气雾法栽培

(以下简称雾培)。

雾培槽的制作:焊制长 1.20 m、宽 0.75 m、高 0.40 m 的铁架,底部和四周放置 4 cm 厚的聚苯乙烯泡沫板,并将 0.1 mm 厚的塑料膜置于内部以防止漏水。将雾培槽顶部的聚苯乙烯泡沫板用胶带密封,盖板上放置银色塑料薄膜。将进液管安装在距离雾培槽顶部 10 cm 处,并在管上每隔 35 cm 安装一个雾化喷嘴。盖板上制作直径 1.5 cm 的小孔,用于种植番茄幼苗。

种植和管理:使用基质穴盘育苗。取 5 叶 1 心幼苗,洗净根系,种植在雾培槽上,用岩棉填充孔的间隙。每个雾培槽种植 8 株,每个处理种植 3 个槽,重复 3 次。全生长期的长效营养液采用日本园式配方制成,由水泵供应,通过计时器和电磁阀控制,营养液每 3 min 供给 30 s,管道的营养液压力为 0.28 MPa。营养液循环使用,其 pH 和电导率值分别保持在 6.5 和 1.8 uS/cm。

气体处理:根据参考文献[2]、[11],本试验中根际 CO₂ 处理体积比为 (370±10) $\mu\text{L/L}$ (温室空气中 CO₂ 体积比,CK)、(2 500±50) $\mu\text{L/L}$ 、(5 000±100) $\mu\text{L/L}$ 和 (10 000±200) $\mu\text{L/L}$, O₂ 体积分数均为 21%,每处理重复 3 次。(2 500±50) $\mu\text{L/L}$ 、(5 000±100) $\mu\text{L/L}$ 和 (10 000±200) $\mu\text{L/L}$ CO₂ 处理气体:在气体混合器中将室外正常大气和钢瓶中的 CO₂ 气体通过气体流量计调节。当第 1 个花序的第 1 朵花开放时进行根际 CO₂ 处理,不中断。通过 PCO₂/10 手持式红外二氧化碳分析仪 (UK) 测定雾培槽内 CO₂ 浓度,每天早晨、中午和晚上测定气体浓度并调节 1 次,根际高 CO₂ 处理持续 60 d。

1.2 植株根系和茎叶干质量的测定

在根际处理 0 d、20 d、40 d 和 60 d 时取样,从雾培槽中取出番茄苗,用水洗涤根系,分解成根和茎叶,在烘箱中干燥至恒质量,测量干物质质量。每处

理取 3 株植株作为 3 个重复。

1.3 植株产量和品质的测定

在番茄成熟期每处理取 5 株测定单株产量及第 1 穗第 1 果的可溶性糖含量(蒽酮法),有机酸含量(滴定法),计算糖酸比,测定维生素 C 含量、可溶性固形物含量等品质指标^[12]。

1.4 根系 Ca^{2+} -ATPase 和 Mg^{2+} -ATPase 活性的测定

在根际气体处理 0 d、20 d、40 d 和 60 d 时取根尖 1 g,液氮速冻,超低温冰箱-80 ℃保存备用,用于根系 Ca^{2+} -ATPase 和 Mg^{2+} -ATPase 活性的测定^[13]。每个处理取 3 株植株作为 3 个重复。

1.5 植株叶片 N、P、K、Ca 和 Mg 含量的测定

定植后 60 d 取植株叶片,每槽取样 1 株,共 3 次重复,在 105 ℃杀青 15 min 后,于 70 ℃烘干。采用原子吸收分光光度法测定钾、钙、镁含量^[14],全氮、全磷含量用流动分析仪测定。

1.6 数据处理

应用 Excel 软件处理数据和作图,采用 DPS 统计

软件的邓肯氏新复极差法对各指标进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 根际不同体积比 CO_2 处理对番茄茎叶和根系干质量的影响

在 CO_2 处理 40 d 时,各 CO_2 加富处理茎叶干质量显著低于对照,且 $(10\ 000\pm 200)\ \mu\text{L/L}$ CO_2 处理显著低于 $(2\ 500\pm 50)\ \mu\text{L/L}$ 、 $(5\ 000\pm 100)\ \mu\text{L/L}$ 处理(图 1)。当处理 60 d 时, $(10\ 000\pm 200)\ \mu\text{L/L}$ 、 $(5\ 000\pm 100)\ \mu\text{L/L}$ 和 $(2\ 500\pm 50)\ \mu\text{L/L}$ CO_2 处理显著低于对照,且各处理之间差异显著,此时其茎叶干质量分别比对照减少了 6.1%、4.4%和 2.6%;在气体处理结束时,各 CO_2 加富处理的根系干质量显著低于对照,分别比对照减少 17.9%、13.2%和 6.1%。说明根际不同 CO_2 体积比处理对番茄植株茎叶和根系干质量有显著的影响,且这种影响随着处理时间的增加而加强,同时,根际不同 CO_2 体积比对植株根系的影响大于茎叶。

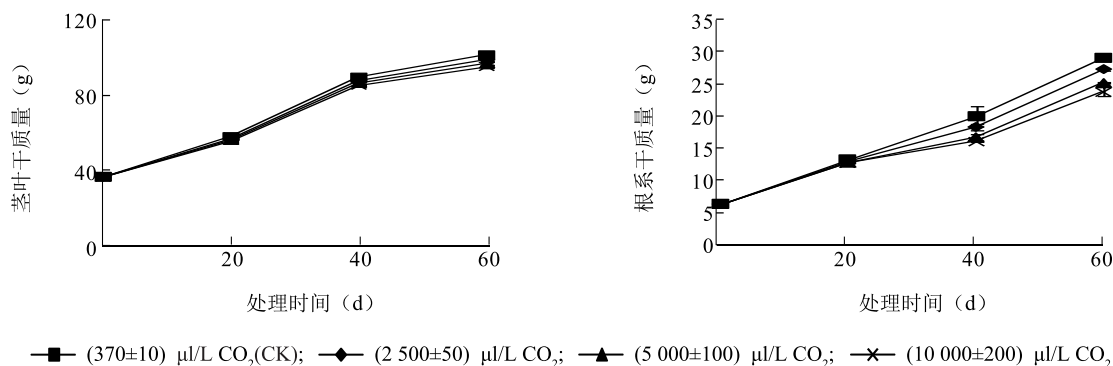


图 1 根际不同体积比 CO_2 处理对番茄植株茎叶和根系干质量的影响

Fig.1 Effect of different root zone CO_2 treatments on the dry weight of stem, leaf and root

2.2 根际不同体积比 CO_2 处理对番茄植株根系 Ca^{2+} -ATPase 活性和 Mg^{2+} -ATPase 活性的影响

由图 2 可知,对照根系 Ca^{2+} -ATPase 活性呈现先上升后缓慢下降的趋势,在处理 40 d 时达到最大值。在处理 20 d 时,根际 CO_2 加富处理的植株根系 Ca^{2+} -ATPase 活性显著低于对照。在处理结束时,根际 $(10\ 000\pm 200)\ \mu\text{L/L}$ 、 $(5\ 000\pm 100)\ \mu\text{L/L}$ CO_2 处理显著低于 $(2\ 500\pm 50)\ \mu\text{L/L}$ CO_2 处理和对照,但二者间无显著差异。根际 CO_2 加富处理的根系 Mg^{2+} -ATPase 活性在初期先升高后降低,变化较平缓,处理 40 d 后开始急剧下降。在处理 20 d 时, $(10\ 000\pm 200)\ \mu\text{L/L}$ 、 $(5\ 000\pm 100)\ \mu\text{L/L}$ 、 $(2\ 500\pm 50)\ \mu\text{L/L}$ CO_2 处理根系

Mg^{2+} -ATPase 活性分别比对照减少 46%、35%和 25%。在处理结束时,对照根系的 Mg^{2+} -ATPase 活性显著高于各根际 CO_2 加富处理,分别是 $(2\ 500\pm 50)\ \mu\text{L/L}$ 、 $(5\ 000\pm 100)\ \mu\text{L/L}$ 和 $(10\ 000\pm 200)\ \mu\text{L/L}$ CO_2 处理的 1.1 倍、1.3 倍和 1.8 倍。说明根际 CO_2 加富处理显著降低了根系 Ca^{2+} -ATPase 活性和 Mg^{2+} -ATPase 活性,显著地削弱了植株根系吸收能力,降低了雾培番茄植株根系对营养的吸收。

2.3 不同根际 CO_2 体积比处理对雾培番茄植株叶片中营养元素含量的影响

由图 3 可以看出,根际 CO_2 处理后番茄叶片中 N、P、K、Mg 和 Ca 营养元素含量呈现先上升后下降

的趋势,N、P、Mg 和 Ca 在处理 20 d 后达到最大值,K 在处理 40 d 后达到最大值。在处理结束时,各 CO₂ 加富处理叶片中 N 含量显著低于对照,(2 500±50) μL/L、(5 000±100) μL/L 和 (10 000±200) μL/L CO₂ 处理分别比对照减少 4.9%、9.3%和 15.7%。叶片中 P 含量在处理 20 d 和 40 d 时,(5 000±100) μL/L 和 (10 000±200) μL/L CO₂ 处理就显著高于对照,(2 500±50) μL/L CO₂ 处理与对照无显著差异。在处理结束时,(2 500±50) μL/L、(5 000±100) μL/L 和 (10 000±200) μL/L CO₂ 处理 P 含量分别比对照减少 12.6%、17.0%和 19.3%。各 CO₂ 加富处理植株叶片中 K 含量在处理 40 d 时

显著低于对照,在处理结束时(5 000±100) μL/L 和 (10 000±200) μL/L CO₂ 处理显著低于对照,分别是对照的 0.85 和 0.77 倍。不同体积比根际 CO₂ 处理对叶片中 Ca 含量的影响不显著,在处理 40 d 及处理结束时,(2 500±50) μL/L CO₂ 处理与对照无显著差异。在处理结束时,(2 500±50) μL/L、(5 000±100) μL/L 和 (10 000±200) μL/L CO₂ 处理叶片中 Mg 含量分别比对照减少 11.1%、18.5%和 20.7%。说明根际 CO₂ 体积比提高可以显著降低番茄植株叶片中 N、P、K、Mg 含量,且这种作用随着处理时间的延长和 CO₂ 体积比的增加而更加显著。

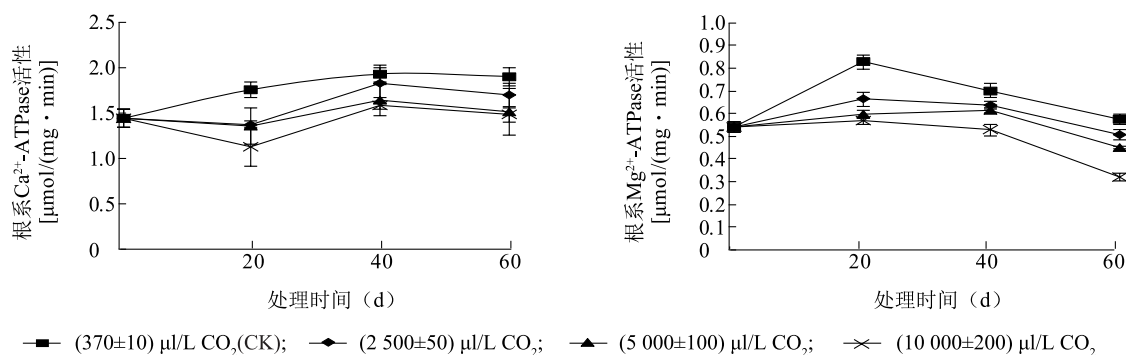


图2 根际不同 CO₂ 体积比处理番茄根系中 Ca²⁺-ATPase 和 Mg²⁺-ATPase 活性变化

Fig.2 Changes of Ca²⁺-ATPase and Mg²⁺-ATPase activities in the tomato root under the treatments of CO₂ enrichment

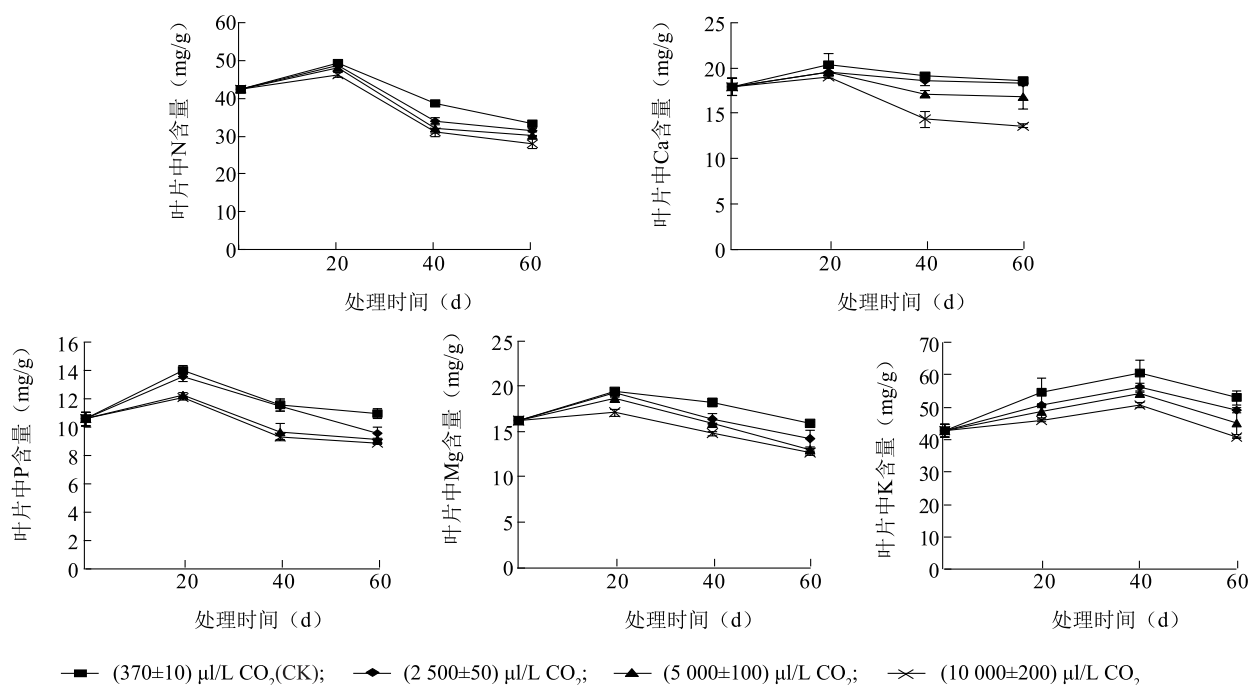


图3 根际不同 CO₂ 体积比处理番茄叶片中 N、P、K、Ca 和 Mg 含量的变化

Fig.3 Changes of N, P, K, Ca and Mg contents in tomato leaves under the treatment of CO₂ enrichment

2.4 根际不同体积比 CO₂ 处理对番茄产量和品质的影响

对照与各根际 CO₂ 加富处理植株的单株结果数无显著差异,但对照单株果实产量显著高于各 CO₂ 加富处理,同时各 CO₂ 加富处理果实可溶性糖含量也显著低于对照,有机酸含量显著高于对照,根际

(5 000±100) μL/L 和 (10 000±200) μL/L CO₂ 处理的糖酸比显著低于 (2 500±50) μL/L CO₂ 处理和对照(表 1)。说明根际长期根际 CO₂ 加富处理降低了果实单果重,因而显著降低了果实产量,同时也显著影响了果实品质。

表 1 根际不同体积比 CO₂ 处理对番茄产量和品质的影响

Table 1 Effects of different root zone CO₂ treatments on fruit yield and quality of tomato

处理	单株结果数	单株产量 (kg)	可溶性糖含量 (%)	有机酸含量 (%)	糖酸比
对照	15.0±0.71 a	2.97±0.08 a	2.73±0.02 a	0.41±0.02 c	6.62±0.28 a
(2 500±50) μL/L CO ₂	14.6±0.55 a	2.84±0.02 b	2.68±0.02 b	0.47±0.03 b	5.74±0.43 b
(5 000±100) μL/L CO ₂	14.4±0.55 a	2.74±0.02 c	2.63±0.01 c	0.51±0.02 a	5.12±0.19 c
(10 000±200) μL/L CO ₂	14.8±1.10 a	2.65±0.03 d	2.57±0.04 d	0.55±0.02 a	4.71±0.23 c

同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

李胜利等在研究根际通气环境对盆栽黄瓜生长的影响时发现,在盆底安装一透气盆托,可以明显改善容器的通气状况,降低根际的 CO₂ 含量,很好地改善盆栽黄瓜根系的生长状况,从而更好地发挥根系的生产潜力,有通气装置处理的根鲜质量、根干质量、根长和根系活力与对照相比有明显的提高^[15]。根际通气处理玉米地上和地下部分鲜质量和干质量均大于不通气处理,穗长、穗质量、根数也大于不通气处理,说明通气处理可促进玉米地上部分和地下部分干物质的积累^[16-17]。在高体积比 CO₂ 下甘薯根部块根的形成受到抑制,并且与在正常 CO₂ 生长条件下甘薯相比整株植株和须根的干质量明显降低^[18]。土壤中 CO₂ 体积比为 2.5% 以上时,草坪根系生物量下降^[19]。本研究结果表明,在整个生长发育过程中,对照植株茎叶及根系干物质积累量明显大于根际 CO₂ 加富处理,且随着根际 CO₂ 体积比的增大和高体积比 CO₂ 处理时间的延长,这种作用越显著,说明长期根际高体积比 CO₂ 对番茄的生长发育产生了一定的抑制作用,与前人研究结果基本一致。

质膜 Ca²⁺-ATPase 和 Mg²⁺-ATPase 是 Ca²⁺ 的一个重要调节剂,它能将 Ca²⁺ 由胞内泵到胞外,维持一个细胞内外的 Ca²⁺ 梯度, Ca²⁺-ATPase 直接参与信号转导过程的调控^[20-22],此外,在介导 Ca²⁺ 外排的同时会伴随着 H⁺ 的向内运输,在调节胞质酸化过程中

可能也发挥着一定作用^[23]。根际高体积比 CO₂ 会抑制大豆根系对营养物质吸收和离子运输能力,导致根系吸收的水分和矿质营养元素向地上部运输受阻,生长受到抑制^[6]。本试验结果表明,随着根际 CO₂ 处理体积比的增加和处理时间的延长,根系 Ca²⁺-ATPase 和 Mg²⁺-ATPase 活性显著降低,根系吸收和转运营养元素的能力降低,叶片中营养元素含量下降。

门福义等的盆栽马铃薯试验结果表明,黏土加沙处理的马铃薯根数、根长、根质量与地上茎比值分别比不加沙的分别增多 100%、60% 和 40% 左右,产量也提高 88%^[24]。李军等研究结果表明,土壤通气性提高可增加马铃薯植株功能叶片 ATP 含量,促进干物质在块茎中的分配率,从而增加块茎产量^[5]。Arteca 等进行的根际短期 CO₂ 富积试验结果不尽相同,他们以正常大气为对照,用 45% CO₂、21% O₂ 和 34% N₂ 对马铃薯根际处理 12 h,处理后第 3 周调查发现,CO₂ 富积显著促进了马铃薯匍匐茎长度、块茎质量和数量以及生物量的增加,但是第 6 周的调查结果却显示根系质量比对照降低 11%^[25]。其原因可能在于长期高体积比 CO₂ 可能影响根系的有氧呼吸,抑制根系的生长发育,从而阻碍根系营养物质的吸收、利用以及代谢,最终限制了马铃薯植株的生长发育。本研究中,根际 CO₂ 加富处理显著地降低了果实产量与品质,但各处理和对照植株的单株结果数均无显著差异,说明根际 CO₂ 体积比加富处理主要通过影响单果质量来显著降低果实产量。同时,

根际 CO₂加富处理植株果实可溶性糖含量显著下降,有机酸含量显著提高,糖酸比显著降低。

参考文献:

- [1] HANS P K, MANUELA Z. Sensing of tomato plant response to hypoxia in the root environment [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 122 (1): 17-25.
- [2] 刁一伟,郑循华,王跃思,等. 开放式空气 CO₂浓度增高条件下旱地土壤气体 CO₂浓度廓线测定[J]. *应用生态学报*, 2002, 13 (10): 1249-1252.
- [3] 陆时万,徐祥生,沈敏健. *植物学* [M]. 北京:高等教育出版社, 1991.
- [4] WEI X, KITAYA Y, SHIBUYA T. Effects of soil gas composition on transpiration and leaves conductance of bamboos [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2016, 60(5): 845-848.
- [5] 李 军,李长辉,刘喜才,等. 土壤通气性对马铃薯产量的影响及其生理机制[J]. *作物学报*, 2004, 30(3): 279-283.
- [6] BORU G, VANTOAI T, ALVES J, et al. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91: 447-453.
- [7] YANG X, ROMHELD V, MARSCHNER H. Effect of bicarbonate and root zone temperature on uptake of Zn, Fe, Mn and Cu by different rice cultivars grown in calcareous soil [J]. *Plant and Soil*, 1993, 155/156: 441-444.
- [8] MARSCHER H. *The mineral nutrition of higher plants* [M]. 2nd Edition. London: Academic Press, 1995: 889.
- [9] 李天来,陈亚东,刘义玲,等. 根际 CO₂浓度对网纹甜瓜根系生长和活力的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 210-215.
- [10] 石元豹,曹 兵,宋丽华. CO₂浓度倍增对宁夏枸杞种植地土壤养分及微生物的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 201-206.
- [11] KAMMANN C A. New sampling technique to monitor concentrations of CO₂, CH₄, and N₂O in air at well-defined depths in soils with varied water potential [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 297-303.
- [12] 郝建军,刘延吉. *植物生理学实验技术* [M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 2001.
- [13] 上海市植物生理学会. *现代植物生理学实验指南* [M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [14] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 263-275.
- [15] 李胜利,齐子杰,王建辉. 根际通气环境对盆栽黄瓜生长的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2008, 42(3): 280-288.
- [16] 蒋 倩,朱建国,朱春梧,等. 大气 CO₂浓度升高对糙米和精米中矿质营养元素含量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(6): 1217-1224.
- [17] 牛文全,郭 超. 根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2785-2791.
- [18] KITAYA Y, HIRAI H, ENDO R, et al. Effects of water contents and CO₂ concentrations in soil on growth of sweet potato [J]. *Field Crops Research*, 2013, 152: 36-43.
- [19] BUNNELL B T, MCCARTY L B, DODD R B, et al. Creeping bent grass growth response to elevated soil carbon dioxide [J]. *Hortscience*, 2002, 37(2): 367-370.
- [20] 潘有强,李杨瑞,陈如凯,等. 甘蔗节间 Mg²⁺-ATP 酶活性与节间生长的关系[J]. *福建农林大学学报*, 2003, 32(2): 150-155.
- [21] 郝鲁宁,余叔文. 大麦根细胞质膜 Ca²⁺-ATP 酶和 Ca²⁺转运系统的特性[J]. *植物生理学报*, 1993, 19(2): 172-180.
- [22] 肖 平,张旭家,沈 昕. 质膜 Ca²⁺-ATPase 的活性和功能[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2008, 24(6): 496-504.
- [23] BELITSER N V, ZAALISHVILI G V, SYTNIANSKAJA N P. Ca²⁺-binding sites and Ca²⁺-ATPase activity in barley root tip cells [J]. *Protoplasma*, 1982, 111(1): 63-78.
- [24] 门福义,蒙美莲,刘梦云,等. 马铃薯不同品种淀粉积累生理基础研究——品种淀粉含量与叶部氮磷钾浓度的关系[J]. *马铃薯杂志*, 1995, 9(4): 193-197.
- [25] ARTECA R N, POOVAIAHB W, SMITH O E. Changes in carbon fixation, tuberization, and growth induced by CO₂ application to the root zone of potato plant [J]. *Science*, 1979, 205 (4412): 1279-1280.

(责任编辑:张震林)