

doi:10.11937/bfyy.20183940

不同氮处理下增施 CO₂ 对番茄叶片养分含量的影响

荀志丽, 张 玲, 温祥珍, 李亚灵

(山西农业大学 园艺学院, 山西 太谷 030801)

摘 要:为探究不同氮处理对番茄植株叶片养分的影响及增施 CO₂ 的效果。以番茄“鸿途”为试验材料,在 2 个自然光照人工气候室内,采用苗钵基质栽培,设置 5 个氮素处理的营养液(50、150、250、350、450 mg · L⁻¹, 分别设为 N1~N5)、2 个 CO₂ 浓度(300、600 μL · L⁻¹, 分别设为 C1、C2),分别测定植株开花期、坐果期、果实膨大期生物量及叶片硝态氮和矿质元素含量。结果表明:中氮处理(N 250~350 mg · L⁻¹)下,植株干质量、叶片硝态氮含量以及矿质元素 N、P、K、Ca、Mg 含量均较高。增施 CO₂ 处理后,番茄植株干质量较 C1 处理增加了 10.2%,叶片 N、K、Mg 含量都增加了 20%左右,P 含量没有变化,Ca 含量降低了 25.67%;低氮处理(N 50 mg · L⁻¹)下,番茄植株干质量、叶片硝态氮含量以及矿质元素 N、P、K、Mg、Ca 含量均较对照 N3 处理低。增施 CO₂ 处理后,植株的总干质量没有显著增加,其叶片硝态氮含量以及 N、P、K 含量也没有显著变化,而 Ca 含量在开花期和坐果期较 C1 处理分别增加了 37.72%、15.45%,Mg 含量在开花期较 C1 处理增加了 43.86%;高氮处理(N 450 mg · L⁻¹)下,植株干质量较 N3 处理降低了 18.03%,叶片硝态氮含量较 N3 处理增加了 111.44%,叶片 N、Ca、Mg 含量与 N3 处理接近均较高,P、K 含量较 N3 处理均降低了 10%。增施 CO₂ 处理后,植株干质量较 C1 处理增加了 35.92%,叶片硝态氮含量增加不显著,叶片 N、K、Mg 含量较 C1 处理分别增加了 19.06%、27.82%、24.87%,而叶片 P 含量变化不显著,叶片钙含量在番茄开花期、坐果期和果实膨大期都较低,较 C1 处理分别降低了 21.37%、17.16%、7.75%。综合番茄生长各项指标及经济效益,在营养液 N 浓度为 250~350 mg · L⁻¹ 时,增施 CO₂ 浓度到 600 μL · L⁻¹ (C2) 最能促进开花期番茄植株叶片养分含量的增加。

关键词:氮;增施 CO₂;总干质量;矿质元素

中图分类号:S 641.206⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2019)13-0001-10

番茄作为世界范围种植的茄果类蔬菜,具有非常高的经济价值。蔬菜栽培生产过程中,对氮

肥的需求量最大,氮素是植物必需的大量营养元素之一,是植物生长的重要物质基础,对植物的器官建造、物质代谢、生化过程等都有不可替代的作用,通常被称为“生命元素”,直接或间接影响着植物的生长发育^[1]。CO₂ 是植物光合作用的必要原料,刘保才等^[2]用通径分析法证明,影响日光温室蔬菜栽培的光照、有效积温、CO₂ 浓度三大环境要素中,CO₂ 浓度对产量的贡献最大。CO₂ 浓度升高对作物生长发育、生理指标以及养分吸收等产生正向促进作用^[3-5]。增施 CO₂ 不但可大幅

第一作者简介:荀志丽(1986-),女,博士研究生,研究方向为蔬菜栽培与生理生态。E-mail:zhili20052@126.com.

责任作者:李亚灵(1962-),女,博士,教授,博士生导师,现主要从事蔬菜栽培与生理生态等研究工作。E-mail:yalingli1988@163.com.

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(201801D121239);国家自然科学基金重点资助项目(61233006)。

收稿日期:2019-02-14

增加作物产量,还可显著改善农产品品质^[6]。而温室是一个相对封闭的空间,空气流动性差,使得白天温室内 CO_2 浓度低,很大程度上限制了蔬菜产量,因此,设施栽培中过低的 CO_2 已成为光合作用的主要限制因素,它制约了植株的生长发育,降低了蔬菜的产量和品质^[7]。但植物对 CO_2 施肥的响应依赖于养分的供应强弱,高养分条件促进植物生长,低养分条件抑制植物生长,且 CO_2 施肥有利于植物组织中碳水化合物的积累,降低了氮含量^[8]。氮供应水平对小麦的富 CO_2 响应影响较大^[9],缺氮时,富 CO_2 下鸭茅光合作用下调,正常氮供应下富 CO_2 时,小麦光合作用无下调现象^[10]。因此,研究不同 N 处理和 CO_2 浓度,对温室番茄生长有重要意义。 CO_2 和氮肥对蔬菜生产尤其重要,因此在自然光照人工气候室内,设置 5 个不同氮处理的营养液,2 个 CO_2 浓度,比较不同氮处理下番茄植株叶片养分的变化情况,以及不同氮处理下增施 CO_2 对植株叶片养分的影响。探究不同氮处理

下增施 CO_2 ,对番茄叶片养分含量的影响,确定提高番茄叶片养分合理的氮素处理和 CO_2 浓度。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西太谷(东经 $112^{\circ}25'$,北纬 $37^{\circ}25'$)山西农业大学设施农业工程中心的非对称 3 连栋温室内进行。搭建 2 个自然光照人工气候室,其结构坐北朝南,长 3 m、宽 2.4 m、前屋面高 1.5 m、后屋面高 2.3 m。2 个自然光照人工气候室中的环境条件如图 1 所示。温度和空气相对湿度基本一致,分别约为 20.5°C 和 78.8%,在 09:00 开始通入 CO_2 气体之后,2 个自然光照人工气候室内 CO_2 浓度迅速上升,在 CO_2 施用时间段内,各人工气候室内 CO_2 浓度基本达到控制目标,实际测定的 CO_2 浓度均值分别约为 $360\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $630\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

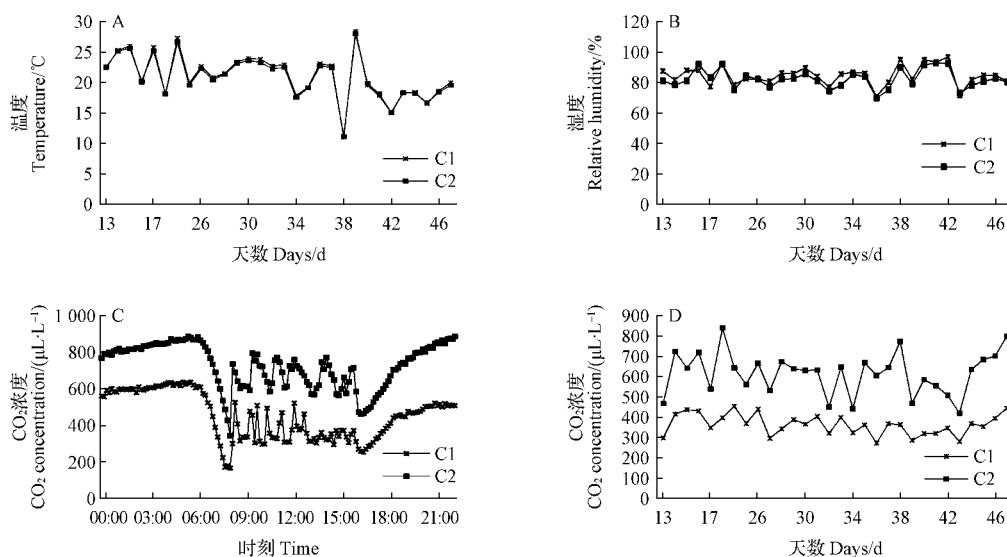


图 1 2 个自然光照人工气候室中的环境状况

Fig. 1 The environmental conditions in two natural lighting artificial climate rooms

1.2 试验材料

供试番茄品种为“鸿途”,无限生长型。

1.3 试验方法

试验在 2 个自然光照人工气候室中进行, CO_2 由 CO_2 钢瓶供应,温湿度由立式空调自动调节,各人工气候室中温度、相对湿度和 CO_2 浓度

均由北京烁光盛业科技发展有限公司提供的 SG605 二氧化碳+温湿度一体式控制器智能控制。

试验设计 2 个 CO_2 浓度处理: $300\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, $300\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 最为接近大气 CO_2 浓度,作为对照,以 C1 表示, $600\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 以 C2 表示。 CO_2 浓度处理(阴雨天气除外)时间为

09:00—16:00,该时段正是太阳光照强,温室番茄光合作用旺盛的时期,期间打开小吊扇以促进空气流通,使其内部 CO_2 浓度均匀。

试验设计 5 种氮素处理,氮素含量分别是 50、150、250、350、450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以 N1、N2、N3、N4、N5 表示,N 处理设计参照山崎番茄配方,试验中称 N1、N2 为低氮浓度,N3、N4 为中氮浓度,N5 为高氮浓度,并且高氮处理没有超过 Hoagland 配方中的氮浓度。微量元素采用通用配方。采用苗钵基质(椰壳)栽培,将番茄植株定植在套有黑色塑料袋的苗钵中。每隔 3 d 浇一次营养液,每次浇 400 mL。通过 NH_4NO_3 来调节营养液的不同 N 处理,其中 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 营养液只有硝态氮,其余浓度营养液既有铵态氮又有硝态氮,分析不同 N 浓度对植株叶片养分的影响。

表 1 番茄营养液配方

Table 1 Nutrient solution composition of tomato

营养来源 Nutrient source	N 浓度 N concentration/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				
	50	150	250	350	450
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	292.90	292.90	292.90	292.90	292.90
$\text{KCl}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	248.10	248.10	248.10	248.10	248.10
$\text{NH}_4\text{NO}_3/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.00	285.70	571.40	857.10	1142.90
$\text{KH}_2\text{PO}_4/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	91.10	91.10	91.10	91.10	91.10
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	245.90	245.90	245.90	245.90	245.90
$\text{EC}/(\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1})$	2.28	2.37	2.94	3.30	3.75

注:EC 表示电导率值,由便携式电导率仪(HI 8733)在给植株浇营养液时进行测定。

Note:EC indicates the conductivity value, it measured by a portable conductivity meter (HI 8733) before watering the nutrient solution to the plant.

试验于 2015 年 8 月 20 日定植,定植时的苗龄为 60 d,定植后缓苗 8 d。每个 N 处理有 8 株,重复 3 次,随机选取 3 株长势均匀的植株进行定株观察。番茄植株在 9 月 21 日开始坐果,10 月 5 日试验结束,共计 47 d。

1.4 项目测定

于定植后 19 d(番茄开花期)、33 d(坐果期)、47 d(果实膨大期),收集每个处理植株的全部叶片,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 20 min,85 $^{\circ}\text{C}$ 干燥至恒质量,用硝基水杨酸比色法测定叶片硝态氮含量,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 蒸馏法测定叶片全氮含量^[11]和硝态氮含量,用火焰原子吸收法测定磷、钾、钙、镁含量。

生物量:于定植后 47 d,收集每个处理整株植

株,于 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 20 min,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,然后用天平测定植株的干质量。

1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 21 软件进行数据计算处理,采用 Duncan 新复极差法进行方差分析及显著性检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 增施 CO_2 对番茄植株生物量的影响

由图 2 可知,植株总干质量在中氮的 N3、N4 处理下显著高于低氮的 N1 处理,并在营养液 N4 处理时达到了最高值,当营养液氮素处理继续增加到高氮的 N5 处理时,番茄植株的总干质量不再增加反而降低。在适宜的 N4 处理下,增施 CO_2 ,植株的总干质量显著高于 C1 处理 5.31 g,增加了 25.78%;在低氮 N1 处理下,增施 CO_2 ,植株的总干质量变化不显著;高氮的 N5 处理下,增施 CO_2 ,植株的总干质量较 C1 处理高 5.60 g,增加显著。

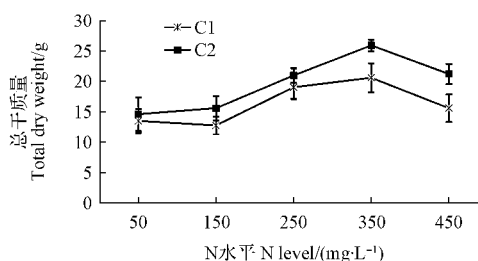


图 2 CO_2 浓度对番茄植株干质量的影响

Fig. 2 The influence of enriched CO_2 on dry weight of tomato plant

2.2 增施 CO_2 对叶片硝态氮含量的影响

植物体内硝态氮含量可以反映土壤氮素供应情况,常作为施肥的指标。由图 3 可知,在 C1 条件下,低氮的 N1 处理时,番茄生长的 3 个时期,叶片硝态氮含量显著低于 N3、N4 处理,分别降低了 58.13%、73.09%、63.4%;在高氮 N5 处理下,叶片硝态氮含量显著高于 N3 处理,与 N4 处理差异不显著,分别较 N3 处理增加了 111.44%、57.61%、61.99%。说明叶片硝态氮含量与营养液中氮处理呈正相关。

植株不同生长时期,在不同氮处理下,增施 CO_2 叶片硝态氮含量变化趋势相同,且在 N4 处理时,含

量达到峰值。在中氮的 N4 处理下,增施 CO_2 ,番茄叶片硝态氮含量在番茄生长 3 个时期都显著增加,分别增加了 68.59%、37.21%、25.04%;在低氮的 N1 处理下,增施 CO_2 ,叶片硝态氮含量无显著变化;在高氮的 N5 处理下,增施 CO_2 ,叶片硝态氮含量在果实膨大期显著增加,增加了 60.93%。

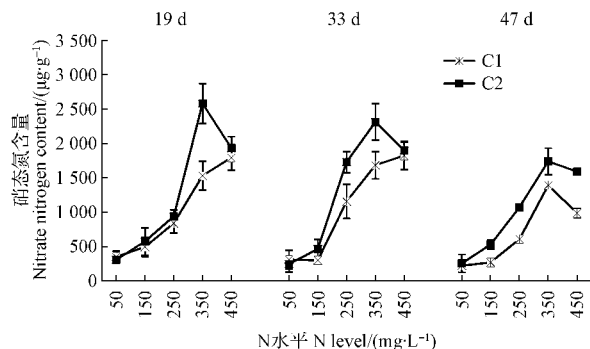


图 3 CO_2 -N 耦合对番茄叶片硝态氮含量的影响

Fig. 3 Influence of CO_2 -N coupling on nitrate nitrogen content of tomato leaves

2.3 增施 CO_2 对矿质元素含量的影响

2.3.1 叶片氮含量

由图 4 可知,番茄开花期、坐果期、果实膨大期这 3 个时期中,C1 处理下,其叶片氮含量在中氮的 N3、N4 处理,显著高于低氮的 N1 处理,其中 N3 处理分别较 N1 处理增加了 17.66%、39.86%、34.8%;在高氮 N5 处理下,叶片氮含量与 N3、N4 处理差异不显著。

在中氮 N3 或 N4 处理下,增施 CO_2 ,在番茄生长 3 个时期中其叶片氮含量较 C1 处理显著增

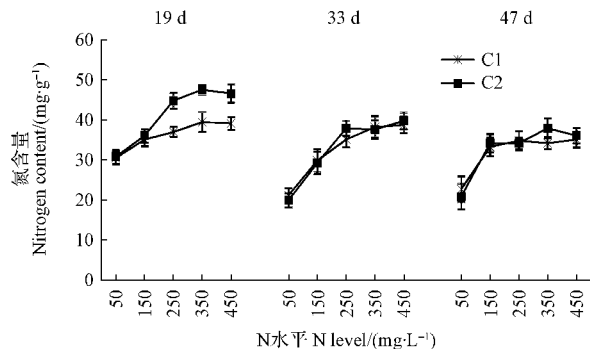


图 4 CO_2 -N 耦合对番茄叶片氮含量的影响

Fig. 4 Influence of CO_2 -N coupling on total nitrogen content of tomato leaves

加,均增加了 20%左右;在低氮 N1 处理下,增施 CO_2 ,3 个时期中叶片氮含量没有显著增加;在高氮的 N5 处理下,增施 CO_2 ,叶片氮含量在开花期较 C1 处理差异显著,增加了 19.06%。

2.3.2 叶片磷含量

由图 5 可知,C1 处理,在中氮的 N3 处理下,番茄在开花期及果实膨大期其叶片磷含量分别为 100.84、79.19 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于低氮的 N1 处理,分别增加 14.3%、13.66%;在高氮的 N5 处理下,叶片磷含量在坐果期和果实膨大期显著低于 N3 处理,分别降低了 6.96%、16.71%,与 N4 处理差异不显著。

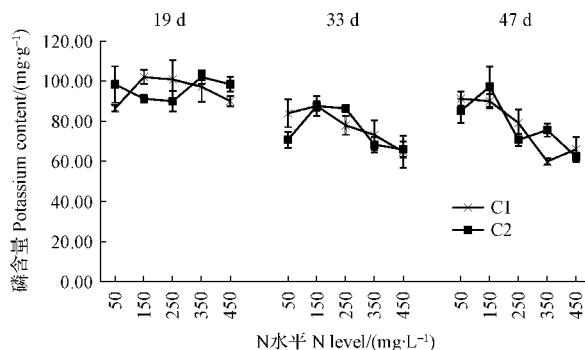


图 5 CO_2 -N 耦合对番茄叶片磷含量的影响

Fig. 5 Influence of CO_2 -N coupling on total phosphorus content of tomato leaves

番茄生长的 3 个时期,在低氮的 N1 处理和高氮的 N5 处理下,增施 CO_2 ,叶片磷含量差异不显著;坐果期,在中氮的 N3 处理下,增施 CO_2 ,磷含量显著增加,增加了 10.80%;果实膨大期,在中氮的 N4 处理下,增施 CO_2 ,磷含量显著增加,增加了 14.58%。

2.3.3 叶片全钾含量

由图 6 可知,低氮 N1 处理,番茄生长 3 个时期,其叶片钾含量,在 C1 处理下,与中氮 N3 处理差异不显著,但在 C2 处理下,其差异显著。在高氮的 N5 处理下,2 个 CO_2 浓度下,其叶片钾含量,在开花期、坐果期差异不显著,在果实膨大期差异显著。

在中氮 N3 处理下,增施 CO_2 ,番茄开花期和果实膨大期叶片钾含量增加显著,分别较 C1 处理高 2.77、3.33 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,分别增加了 20.69%、29.76%;在低氮的 N1 处理下,增施 CO_2 处理,番

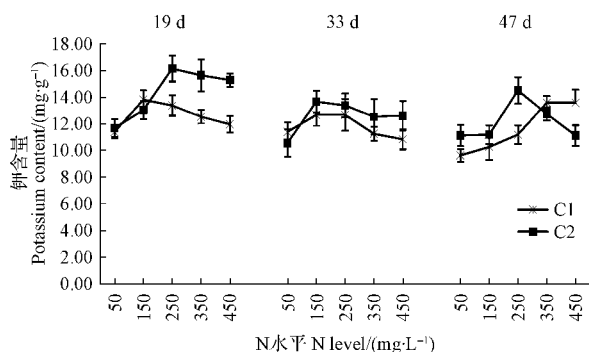
图 6 CO₂-N 耦合对番茄叶片钾含量的影响

Fig. 6 Influence of CO₂-N coupling on total potassium content of tomato leaves

茄 3 个生长时期的叶片钾含量差异不显著;在高氮的 N5 处理下,增施 CO₂,叶片钾含量在番茄开花期增加显著,增加了 27.82%;果实坐果期,不论何种 N 浓度下,增施 CO₂,差异均不显著。

2.3.4 叶片钙含量

图 7 表明,在 C1 处理,中氮的 N3 处理下,番茄在开花期、坐果期、果实膨大期其叶片的钙含量分别为 18.39、17.0、31.02 mg·g⁻¹;在低氮的 N1 处理下,叶片钙含量在番茄生长 3 个时期都显著低于 N3 处理,分别降低了 40.18%、16.12%、41.8%;在高氮的 N5 处理下,其叶片钙含量与 N3 处理差异显著。

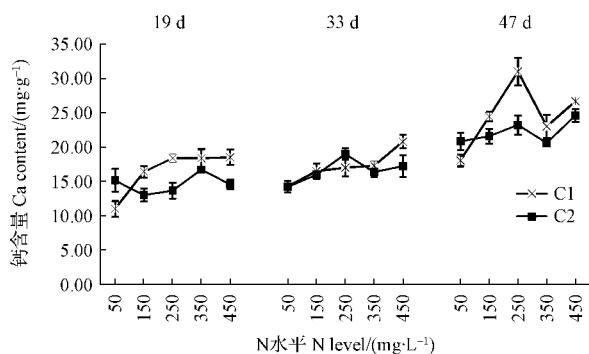
图 7 CO₂-N 耦合对番茄叶片钙含量的影响

Fig. 7 Influence of CO₂-N coupling on Ca content of tomato leaves

在对照 N3 处理下,增施 CO₂,叶片钙含量在番茄开花期和果实膨大期降低显著,降低了 25.67%、24.5%;在低氮的 N1 处理下,增施 CO₂,叶片钙含量在番茄开花期和果实膨大期较

C1 处理下增加显著,分别增加了 37.72%、15.45%;在高氮的 N5 处理下,增施 CO₂,叶片钙含量在番茄生长 3 个时期都显著降低,分别降低了 21.37%、17.16%、7.75%。

2.3.5 叶片镁含量

由图 8 可知,在 C1 处理,中氮的 N3 处理下,番茄在开花期、坐果期、果实膨大期其叶片镁含量分别为 2.46、2.29、4.37 mg·g⁻¹;在低氮 N1 处理下,番茄生长 3 个时期中叶片镁含量显著低于 N3 处理,分别降低了 43.77%、16.74%、23.30%;在高氮 N5 处理下,叶片镁含量在果实膨大期较 N3 处理降低显著,降低了 17.85%。

番茄开花期,在中氮 N3、N4 处理下,增施 CO₂,叶片镁含量较 C1 处理差异显著,分别增加了 22.36%、26.64%;在低氮的 N1 处理下,增施 CO₂,其差异显著,增加了 43.86%;高氮 N5 处理下,增施 CO₂,差异不显著;在坐果期及果实膨大期,不论何种 N 处理下,增施 CO₂,其叶片镁含量差异都不显著。

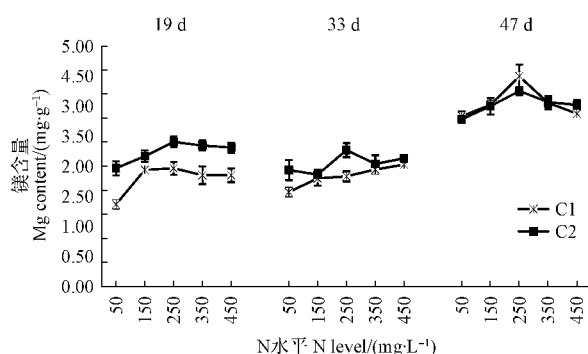
图 8 CO₂-N 耦合对番茄叶片镁含量的影响

Fig. 8 Influence of CO₂-N coupling on Mg content of tomato leaves

3 讨论

3.1 营养液不同氮处理对叶片养分含量的影响

该研究中,叶片硝态氮和 N 含量在营养液中氮浓度达到 N4 处理时为最大值,在过高的 N5 处理时,其含量降低。植物对氮的吸收情况,国内外已做了不少研究,早在 1967 年 LEGG 等^[12]就观测到施氮有助于植物对氮的吸收,并指出与激发效应有关,提出氮肥的激发效应有随土壤供氮力值增长而加大的趋势。此外,植物对矿质元素的

吸收主要通过根系吸收,有效的根系形态有利于其吸收,有研究报道在低氮条件下,玉米的节根数目减少、总根长增加,而氮充足的土壤侧根易发生和伸长^[13-14]。综合该研究结果和有关研究报道,说明植物生长过程中 N 浓度不宜过低,适当的高 N 浓度有利于植物对氮和其它养分的吸收。

营养液不同氮处理下,叶片其它养分含量的变化趋势与氮含量的变化趋势有所不同。在番茄开花期,其叶片 N、K 含量在低氮的 N1 处理时含量都较低,其 N 含量在 N4 处理时达到最大值,但其 K 含量在 N2 处理时已达到最大值并随着 N 浓度的增加呈下降趋势,可见,增施氮,植物对 N 元素的吸收作用远远大于 K 元素,说明植物对 N 的过量吸收会抑制植物对 K 的吸收,这种现象有可能与植物离子之间的拮抗作用有关,也可能与各种矿质元素调节植物生长作用不同有关。有关研究表明土壤增施氮肥能改变叶片的矿质元素组成,N 与 K 表现有拮抗现象,这可能是由于氮素促进了植物对钠离子的吸收,而钠离子与钾离子的吸收具有拮抗作用^[15],即随着钠离子含量的上升,钠胁迫条件下,迫使植物增加细胞质膜透性,离子的选择性降低,这时过量的 Na^+ 进入细胞,细胞膜对水合半径相似的 Na^+ 和 K^+ 有着同样的选择,盐胁迫加速了 Na^+ 的积累和 K^+ 的外渗。

此外,在番茄开花期,其叶片 Ca、Mg 含量在低氮的 N1 处理时含量都较低,随着 N 浓度的增加其 Ca 含量表现出不断增加的趋势,但其 Mg 含量在 N2 处理达到最大值后不再增加反而开始下降,说明不同 N 处理对叶片 Ca 和 Mg 含量影响不同。有研究表明,由于蔬菜栽培设施内相对封闭的生长环境,土壤缺少雨水的淋溶,随着营养液氮素含量的增加^[16], H^+ 离子在 NH_4^+ 和 NO_2^- 氧化形成 NO_3^- 积累的过程中得到释放,基质 pH 下降,由此根系吸收如 Ca、Mg 等矿质元素过程受到土壤酸化的制约,有研究提出 NH_4^+ 存在会抑制植物对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收^[17],该研究中 Mg 含量变化与上述结论一致,Ca 含量不一致,可能原因是钙离子在植物体内属于不易移动的营养元素,钙被根部吸收后,基本呈向上运输而不向下运输的趋势,钙的运输与分布受蒸腾速率的影响,一旦钙在老叶中沉淀下来,就不能再被活化向生长点移动。

3.2 中氮处理下增施 CO_2 对叶片养分含量的影响

PREGIZER 等^[18]试验表明在高 N 条件下高浓度 CO_2 可以明显的促进白橡木根系的伸长和根周转速率,从而有利于根系吸收营养。李娟等^[19]试验表明,幼苗期番茄植株对 CO_2 响应的程度依赖于营养液浓度的高低,营养液浓度较高时,植株对 CO_2 的响应程度也会较高。也有些研究表明增施 CO_2 可以明显促进番茄植株生长,增加植株干质量、鲜质量^[20]。同样,也有研究表明植物在 N 供应充足条件下对 CO_2 浓度升高的响应比 N 供应不足时强烈^[21-22]。 CO_2 浓度升高会加速植物对矿质养分的吸收,提高植株矿质养分含量,从而满足自身生长的需要^[23]。该研究中,营养液中氮浓度在适宜的 N3、N4 处理时,增施 CO_2 处于番茄开花期的叶片 N、K、Mg 含量显著增加,生物量也显著增加,与上述研究相符。

前人研究表明^[24-25], CO_2 浓度增加,植物体内硝态氮含量降低,硝酸还原酶活性也有降低趋势。该研究中,适宜氮处理时,增施 CO_2 ,叶片硝态氮含量显著增加,与上述研究不符。门中华等^[24]等研究表明,施 CO_2 处理后,小麦单株吸氮量有增加趋势。植物体内 NO_3^- 同化首先在硝酸还原酶催化下还原,产生 NH_4^+ ,而硝酸还原酶是硝态氮代谢的关键酶。因此,该研究中,增施 CO_2 ,番茄植株体内硝态氮含量增多,究竟是吸收增加了,还是代谢减少了,有待进一步的研究。这也是该研究的不足之处:未能指出增施 CO_2 后,硝态氮含量增加的具体原因。在后续研究中,应增加植株硝酸还原酶活性测定、 NH_4^+ 以及相关 N 代谢产物的测定。

前人研究表明, CO_2 浓度升高通过提高 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 向光合器官叶片的运输能力,促进四季竹生长^[26],该研究中,增施 CO_2 ,叶片 Mg 含量增加,与上述结论一致,但 Ca 含量下降,可能有以下 3 个原因:一是 Ca 元素在植株体内与植株的抗逆性有关,增施 CO_2 后使生长环境更适宜植株的生长,因此 Ca 含量也减少,来减弱这种抑制作用。二是与植株生长环境有关,营养液中 Ca 浓度有关,一些研究认为,增施 CO_2 后植株对养分的总吸收量通常是增加的,但是各器官中养分含

量(浓度)却有所降低^[27-28]。三是可能与 Mg 离子、Ca 离子竞争细胞膜上离子吸收通道有关^[29-30]。

3.3 低氮处理下增施 CO₂ 对叶片养分含量的影响

在该研究中,低氮处理下,增施 CO₂,植株干质量、硝态氮含量以及 N、P、K 含量几乎都没有变化。可能原因是营养液中氮供应严重不足,植株蛋白质合成有限,即使人为增施 CO₂,增加光合作用原材料,植株也没有能力利用这些 CO₂,只有当营养液中 N 供应充足,植株能合成大量蛋白质时,增施 CO₂ 才能更有效促进植株生长发育,促进对养分的吸收。此外,植株叶片养分含量很大程度上取决于其根系对养分的吸收能力,有研究表明在低氮条件下,植株的节根数目少、侧根不易发生和伸长,且在低氮条件下,高浓度 CO₂ 对根的伸长和周转速率没有影响^[17],同样,有研究表明,植株对增施 CO₂ 的反应依赖于养分供应^[31-32],而氮素直接参与植株体内各项生命活动,不同氮肥处理会影响 CO₂ 肥效的发挥。于佳等^[33]利用顶式气室,通过盆栽试验表明,当 CO₂ 浓度为 760 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,作物光合作用会因 N 肥含量低而受到限制,而在 N 肥含量高的条件下则能使作物的光合能力提高。因此,在低氮条件下,增施 CO₂ 几乎不影响植株对养分的吸收,但低氮处理下,增施 CO₂,促进叶片 Ca 含量增加,一定程度上提高了植株对低肥逆境的抗性,从而使番茄植株能够正常生长。

3.4 高氮处理下增施 CO₂ 对叶片养分含量的影响

前面已讨论到,植株生长需要充足的氮源,植株对 CO₂ 的响应依赖于营养液的养分含量,N 供应充足条件下对 CO₂ 浓度升高的响应强,但营养液氮浓度不易过高,当 N 供应过高时,会影响叶片矿质元素含量。有研究表明,CO₂ 施肥能增加番茄对养分的利用率,也能减少由养分过高而带来的负面影响^[34]。该研究中,在高氮的 N5 浓度下,增施 CO₂,番茄植株叶片矿质元素含量变化趋势与适宜的 N3 浓度下一致,同样是 N、K、Mg 含量增加,Ca 含量降低,另外,增施 CO₂ 还缓解了氮过高导致叶片矿质元素含量下降的现象,与上述结论相符。有研究表明 CO₂ 浓度升高可以促进植物对 N 的吸收^[35],同样许多研究者发现 CO₂

浓度升高降低了地上部分 N 含量^[36-37],抵消了过量的 N,该研究中,增施 CO₂,地上部叶片 N 含量增加,但 N 的积累量始终没有超过营养液中 N5 处理即 450 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,有可能地上部的总 N 量是减少的,从而减少了由于 N 过高带来的负面影响。

此外,该试验中,番茄坐果期和果实膨大期,增施 CO₂,叶片养分变化较小。可能原因是:HICK-LENTON 等^[38]发现长期处于高浓度 CO₂ 环境下,番茄的光合效率会下降,从而减小了 CO₂ 施肥的效果。YELLE 等^[39]指出,当番茄的发育成熟后,CO₂ 浓度增加对光合速率和相对生长率的促进作用将难以保持,出现光合适应现象。增施 CO₂ 后,养分的吸收增加速率低于作物干物质积累速率,即碳水化合物积累和植株生长速度较快而产生的稀释作用^[40-41]。理论上参与循环的元素在植物的个体发育中,优先分布于代谢较旺盛的部位,番茄开始坐果后,植株生长最旺盛的部位从叶片转化为果实,根系吸收的矿质元素优先运输至果实,此时增施 CO₂ 叶片矿质元素增长缓慢,变化不显著。

CO₂ 施肥能改变碳固定的最初过程,从而改变其它营养元素的吸收和利用,CO₂ 施肥与不同浓度的营养液交互作用以一种复杂的方式影响番茄幼苗吸收利用不同营养元素^[42],N 肥的不同形态和浓度直接影响着植株的 N 吸收和代谢,该研究着重讨论了不同 N 浓度对植株叶片养分的影响,在后续研究中会继续加深对不同 N 形态的研究。CO₂ 浓度以及 N 供应状态对植株生长发育影响以及其作用机理仍需进一步深入研究。

4 结论

综上所述,叶片各种养分含量不仅仅与增施 CO₂ 这一个因素相关,同时还受 N 供应处理和植株生长时期的影响。在高 CO₂ 条件下,番茄植株对 N 浓度升高的响应更强烈。中氮(N3~N4)处理下,增施 CO₂,最能促进植株叶片矿质元素含量;在低氮(N1)处理下,增施 CO₂,对植株生长影响不显著;在高氮的(N5)处理下,增施 CO₂,能缓解氮肥过高对植株的不利影响。因此,番茄温室栽培中,增施 CO₂ 同时需要综合考虑各种因素。综合该试验番茄生长各项指标及经济效益,在营养液 N 浓度为 250~350 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,增施 CO₂

浓度到 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 最能促进开花期番茄植株叶片养分含量的增加。

参考文献

- [1] 李文庆, 张民, 束怀瑞. 氮素在果树上的生理作用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2002, 33(1): 96-100.
- [2] 刘保才, 赛富昌, 李英敏. 影响日光温室蔬菜产量的三大要素分析[J]. 河南农业科学, 1995(11): 34-35.
- [3] LEAKEYA D B, AINSWORTHE A, BERNACCHIH C J, et al. Elevated CO_2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lesions from FACE[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(10): 2859-2876.
- [4] BEHBOUDIAN M H, LAI R. Carbon dioxide enrichment in virosa tomato plant: Responses to enrichment duration and to temperature[J]. Horticulture Science, 1994, 29(12): 1456-1459.
- [5] OOSTEN J, WILKINS D, BESFORD R T. Some relationships between the gas exchange biochemistry and molecular biology of photosynthesis during leaf development of tomato plants after transfer to different carbon dioxide[J]. Plant Cell and Environment, 1995, 18(11): 1253-1266.
- [6] 于承艳, 都韶婷, 邢承华, 等. CO_2 浓度对番茄幼苗生长及养分吸收的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(3): 307-312.
- [7] TONGBAI P, KOZAI T, OHYAMA K. CO_2 and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings[J]. Scientia Horticulture, 2010, 126(3): 338-344.
- [8] BAUER G A, BERTSON G M, BAZZAZ F A. Regenerating temperate forests under elevated CO_2 and nitrogen deposition: Comparing biochemical and stomatal limitation of photosynthesis[J]. New Phytol, 2001, 152: 249-256.
- [9] LI F S, KANG S Z, ZHANG J H. Interactive effects of elevated CO_2 , nitrogen and drought on leaf area, stomatal conductance, and evapotranspiration of wheat[J]. Agricultural Water Managemet, 2004, 67: 221-233.
- [10] HYMUS G J, BAKER N R, LONG S P. Growth in elevated CO_2 can both increase and decrease photochemistry and photoinhibition of photosynthesis in a predictable manner[J]. Plant Physiology, 2001, 127: 1204-1211.
- [11] 王芳芳. 柑橘四种砧木在营养钵栽培下对总和矿质元素的吸收性评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [12] LEGG J O, STANFORD G. Utilization of soil and fertilizer N by oats in relation to the available N status of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1967, 31(2): 215.
- [13] SAENGWILAI P, TIAN X, LYNCH J P. Low crown root number enhances nitrogen acquisition from low-nitrogen soils in maize[J]. Plant Physiology, 2014, 166(2): 581-589.
- [14] LYNCH J P. Steep, cheap and deep: An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems[J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 347-357.
- [15] 石德成, 殷立娟. 盐(NaCl)与碱(Na_2CO_3)对星星草胁迫作用的差异[J]. 植物学报, 1993, 35(2): 144-149.
- [16] 李廷轩, 张锡洲, 王昌全, 等. 保护地土壤次生盐渍化的研究进展[J]. 西南农业学报, 2001(S1): 103-107.
- [17] 侯文娟. 增温和施氮对松嫩草原羊草叶片矿质营养元素的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [18] PREGIZER K S, BURTON A J, KING J S, et al. Soil respiration, root biomass, and root turnover following long-term exposure of northern forests to elevated atmospheric CO_2 and tropospheric O_3 [J]. New Phytologist, 2008, 180: 153-161.
- [19] 李娟, 周建明. CO_2 与 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比互作对番茄幼苗培养基质 pH、根系生长及根系活力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 865-878.
- [20] 王红玉, 曲英华, 周士力, 等. CO_2 增施与养分交互作用对日光温室番茄生长的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 182-188.
- [21] ROGERS G, MIHAM P, THIBAUD M, et al. Interactions between rising CO_2 concentration and nitrogen supply in corn growth and leaf nitrogen concentration[J]. Functional Plant Biology, 1996, 23: 119-125.
- [22] KIM H, LIEFFERING M, MIURA S, et al. Growth and nitrogen uptake of CO_2 -enriched rice under field conditions[J]. New Phytologist, 2001, 150: 223-229.
- [23] 郭嘉. 稻田系统主要矿质元素生物有效性对大气 CO_2 浓度升高的响应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [24] 门中华, 李生秀. CO_2 浓度对冬小麦氮代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005(2): 320-326.
- [25] LARIOS B, AGUERA E, CABELLO P, et al. The rate of CO_2 assimilation controls the expression and activity of glutamine synthetase through sugar formation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(394): 69-75.
- [26] 庄明浩, 李迎春, 郭子武, 等. CO_2 浓度升高对毛竹和四季竹叶片主要养分化学计量特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 239-245.
- [27] ROGERS H H, RUNION G B, KRUPA S V. Plant responses to atmospheric CO_2 enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere[J]. Environmental Pollution, 1994, 83(1-2): 155-189.
- [28] 王月. CO_2 浓度升高对不同供磷番茄根系生长和根系分泌物的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [29] HERMANS C, VUYLSTEKE M, COPPENS F, et al. Systems analysis of the responses to long-term magnesium deficiency and restoration in *Arabidopsis thaliana* [J]. New Phytologist, 2010, 187: 132-144.
- [30] YAMANAKA T, NAKAGAWA Y, MORI K, et al. *MCA1* and *MCA2* that mediate Ca^{2+} uptake have distinct and overlapping roles in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2010, 152: 1284-1296.
- [31] GEBAUER R L E, REYNOLDS J F, STRAIN B R. All

ometric relations and growth in *Pinus taeda*; The effect of elevated CO₂ and changing N availability[J]. *New Phytologist*, 1996, 134(1): 85-93.

[32] THOMPSON G B, WOODWARD F J. Some influences of CO₂ enrichment, nitrogen nutrition and competition on grain yield and quality in spring wheat and barley[J]. *Exp Bot*, 1994, 45(7): 937-942.

[33] 于佳, 于显枫, 郭天文, 等. 施氮和大气 CO₂ 浓度升高对春小麦拔节期光合作用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(4): 651-655.

[34] 李娟, 周健民, 段增强, 等. 养分与 CO₂ 交互作用对番茄幼苗生长及一些生理指标的影响[J]. *西北农业学报*, 2005(4): 10-13.

[35] KOGAWARA S, NORISADA M, TANGE T, et al. Elevated atmospheric CO₂ concentration alters the effect of phosphate supply on growth of Japanese red pine (*Pinus densiflora*) seedlings[J]. *Tree Physiology*, 2006, 26: 25-33.

[36] LUTZE J L, GIFFORD R M. Nitrogen accumulation and distribution in *Danthonia richardsonii* swards in response to CO₂ and nitrogen supply over four years of growth[J]. *Global Change*

Biol, 2000(6): 1-12.

[37] PRITCHARD S, ROGERS H H, PRIOR S A, et al. Elevated CO₂ and plant structure; A review[J]. *Global Change Biology*, 1999(5): 807-837.

[38] HICKLENTON P R, JOLIFFE P A. Alteractions in the physiology of CO₂ exchange in tomato plants grown in CO₂ enriched atmospheres[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1980, 58: 2181-2189.

[39] YELLE S, BEESON R C, TRUDEL M J, et al. Acclimation of two tomato species to high atmospheric CO₂, sugar and starch concentrations[J]. *Plant Physiol*, 1989, 90: 1465-1472.

[40] PORTER M A, GRODZINSKI B. Acclimation to high CO₂ in bean carbonic anhydrase and ribulose biphosphate carboxylase[J]. *Plant Physiology*, 1984, 74(2): 413-416.

[41] PORTER M A, GRODZINSKI B. Growth of bean in high CO₂; Effects on shoot mineral composition[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1989, 12(2): 129-144.

[42] 李娟, 周健民, 段增强, 等. 养分与 CO₂ 交互作用对番茄幼苗生长及一些生理指标的影响[J]. *西北农业学报*, 2005(4): 10-13.

Effect of CO₂ Supplementation on Nutrient Content in Tomato Leaves at Different Nitrogen Treatments

XUN Zhili, ZHANG Ling, WEN Xiangzhen, LI Yaling

(College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: To explore the effect of different nitrogen treatment on the nutrient of tomato leaves and the effect of CO₂ supplementation. Tomato variety of 'Hongtu' was cultured in two artificial climate room under natural light in the pot with substrate. Five nutrient solutions of different nitrogen treatment were adopted (50, 150, 250, 350, 450 mg · L⁻¹, respectively was N1—N5), and two CO₂ concentrations were setted up (300, 600 μL · L⁻¹, respectively were C1, C2). The whole plant biomass, the contents of nitrate nitrogen and mineral elements in leaves were determined at the stage of plant flowering, fruit setting, fruit enlargement, respectively. The results showed that under the medium N level (N 250—350 mg · L⁻¹), the total dry weight and the contents of nitrate nitrogen and mineral elements N, P, K, Ca and Mg of the leaves were higher. After supplemented CO₂, the dry weight of tomato plants was increased by 10.2% compared with the control (C1). The contents of N, K and Mg in the leaves were increased by about 20%, while the content of P was unchanged, and the Ca content was decreased by 25.67%; under low N level (N 50 mg · L⁻¹), the plant dry weight and the contents of nitrate nitrogen and mineral elements N, P, K, Ca and Mg were lower than those of N3 treatment. After supplemented CO₂ treatment, the total dry weight of plant was no significant change, and the contents of the nitrate nitrogen and N, P, K were no significant change, but the contents of Ca at flowering period and fruit setting period were increased by 37.72% and 15.45% compared with the control (C1), respectively, the content of Mg at flowering period was increased by 43.86% than C1 treatment; under the high N level (N 450 mg · L⁻¹), the plant dry weight was lower by 18.03% than N3 treatment, nitrate nitrogen content in the leaf was increased by 111.44% than N3 treatment, and the contents of N, Ca,

doi:10.11937/bfyy.20183754

腐胺对吸胀冷害下菜豆种子萌发及抗性的影响

刘 畅, 李佳荫, 刘大军, 杨晓旭, 冯国军

(黑龙江大学 农作物研究院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘 要:为提高吸胀冷害下菜豆种子发芽率,缓解吸胀冷害对菜豆种子的伤害。以低温敏感型菜豆“热那亚”种子为试材,设置 CK(常温对照)、LT(4 ℃低温处理)和 LT+Put(4 ℃低温处理时加入 1 mmol·L⁻¹的腐胺(Put))3 个处理,研究外源 Put 对吸胀冷害下菜豆种子萌发及抗性的影响。结果表明:吸胀冷害下,外源 Put 处理后 LT+Put 组菜豆种子发芽率、发芽指数和种子活力与 LT 组相比分别提高了 87.12%、124.21%和 191.99%;LT+Put 与 LT 处理相比细胞膜透性下降,可溶性物质含量增加,抗氧化酶活性升高,O₂⁻、H₂O₂ 和 MDA 含量增加。说明外源 Put 的施用可能通过降低细胞膜透性,增加可溶性物质含量,诱导抗氧化酶活性,直接或间接调节 ROS 清除系统来提高菜豆种子对吸胀冷害的抗性,提高菜豆种子的发芽率、发芽指数和种子活力。

关键词:菜豆;种子;吸胀冷害;腐胺

中图分类号:S 643.104⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2019)13-0010-07

菜豆是一种喜温作物,种子发芽的最适温度为 20~25 ℃,最低温度为 8~10 ℃,在我国北方

第一作者简介:刘畅(1989-),女,博士,助理研究员,研究方向为蔬菜遗传育种与生物技术。E-mail:liuchang3126@hotmail.com.

责任作者:冯国军(1966-),男,博士,研究员,研究方向为蔬菜遗传育种与生物技术。E-mail:feng998@126.com.

基金项目:黑龙江省省属高等学校基本科研业务费基础研究资助项目(KJCXYB201705)。

收稿日期:2018-12-06

早春栽培遇到低温天气时易出现出苗不齐的现象。种子发芽作为植物生命周期的重要一步,根据吸水的速率,发芽的时间过程和随后的生长可以分成 3 个阶段。在第 1 阶段,也称为吸胀阶段,吸水迅速;在第 2 阶段,水分吸收变慢并达到了顶峰;在第 3 阶段(发芽后期),水分吸收有一个升高^[1-2]。吸胀受高吸水率和低温条件的负向影响,导致种子活力下降,影响出苗率和幼苗正常生长。吸胀冷害在农业上是一种普遍存在的问题并在许

Mg in leaf closed to that of N3 treatment, were both higher, the contents both of P and K reduced by 10% than N3 treatment. After supplemented CO₂, the plant dry weight increased by 35.92% than the control, and the content of nitrate nitrogen in the leaves was no significant increase, the contents of N, K, Mg were increased by 19.06%, 27.82% and 24.87% than C1 treatment, respectively. However, the P contents in the leaves was no significant change, the Ca contents in the leaves at the stage of tomato flowering period, fruit setting and fruit enlargement period were lower compared with C1 treatment, were reduced by 21.37%, 17.16% and 7.75%, respectively. Comprehensive the growth indicators and economic benefit, the nutrient contents of tomato leaves during flowering period were increased, in the condition of nutrient solution N concentration of 250 mg·L⁻¹(N3)—350 mg·L⁻¹(N4), and elevated CO₂ concentration to 600 μL·L⁻¹(C2).

Keywords: nitrogen; elevated CO₂; the total dry weight; mineral element