

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.004

陈雨娇, 李汛, 田兴军, 等. CO<sub>2</sub> 浓度与氮磷供应水平对黄瓜根系生长及各组织矿质养分含量的影响. 土壤, 2020, 52(6): 1121–1130.

## CO<sub>2</sub> 浓度与氮磷供应水平对黄瓜根系生长及各组织矿质养分含量的影响<sup>①</sup>

陈雨娇<sup>1</sup>, 李汛<sup>2</sup>, 田兴军<sup>1\*</sup>, 段增强<sup>2\*</sup>

(1 南京大学生命科学学院, 南京 210023; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 在开顶式生长箱内, 以黄瓜为试验材料, 采用营养液培养方法, 研究了不同氮、磷水平条件下大气 CO<sub>2</sub> 浓度对黄瓜植株矿质养分含量以及根系生长的影响。结果表明: 黄瓜植株各部位 N 素含量随供氮水平提高而增加, 磷水平提高也能促进各部位 N 含量的提高。植株各部位 P 含量随供磷水平的提高而升高, 在相同磷水平下, 缺氮会使各部位 P 含量升高。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会使黄瓜植株各部位氮及特定部位的 P 含量降低。黄瓜根部的 Ca 含量随 CO<sub>2</sub> 浓度的升高而显著降低, 氮和磷水平的升高极显著地增加其含量, 且 CO<sub>2</sub> 浓度与供磷水平、供氮与供磷水平以及这三者之间存在明显的交互作用。供氮、供磷水平的升高极显著地提高了黄瓜叶片 Ca 的含量以及茎部 Mg 的含量, 且两者存在明显的交互作用。黄瓜总根长和总根表面积随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加有增大的趋势; 在缺磷条件下, 总根长和总根表面积随氮水平的提高而增大; 而同一氮水平和 CO<sub>2</sub> 浓度下, 磷水平的降低会增加总根长和总根表面积。总体看来, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度的升高能促进黄瓜根系的生长, 但会使得黄瓜植株某些部位 N、P、Ca、Mg 等矿质元素含量降低, 而供氮、供磷水平的提高可以通过增强黄瓜的生长与活力促进黄瓜根系对矿质养分的吸收, 从而缓解由于 CO<sub>2</sub> 浓度升高带来的矿质元素含量降低的风险。由此, 在对设施蔬菜 CO<sub>2</sub> 施肥的同时, 也要注重适量提高合理配比下矿质元素的供应。

**关键词:** 大气 CO<sub>2</sub> 浓度; 氮水平; 磷水平; 矿质养分含量; 根系生长

**中图分类号:** Q945.1; Q945.3; S627 **文献标志码:** A

### Effects of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration, Nitrogen and Phosphorus Levels on Root Growth and Mineral Nutrient Concentrations in Different Organs of Cucumber

CHEN YuJiao<sup>1</sup>, LI Xun<sup>2</sup>, TIAN XingJun<sup>1\*</sup>, DUAN ZengQiang<sup>2\*</sup>

(1 School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The effects of different combinations of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations ([CO<sub>2</sub>]), nitrogen (N) and phosphorus (P) levels on mineral nutrient concentrations and root growth of cucumber were studied by the nutrient solution culture method in the open-top chambers. Three [CO<sub>2</sub>] levels (400 μmol/mol (CK, C1), 625 μmol/mol (C2), 1 200 μmol/mol (C3)), three N levels (low N (N1), medium N (N2), high N (N3)) and two P levels (low P (P1), medium P (P2)) were designed. The results showed that N concentrations in all cucumber organs increased with the increase of N level, and N concentration in N3 treatment was significantly higher than those in N1 and N2 treatments. The increase of P level also promoted N concentrations in cucumber. P concentrations in all cucumber organs increased with P supply increasing. Under the condition of N deficiency (N1), P concentrations in all cucumber organs increased. Elevated [CO<sub>2</sub>] reduced N and P concentrations in specific organs of cucumber. Ca concentration in cucumber roots decreased significantly with the increase of [CO<sub>2</sub>], whereas higher N and P levels significantly increased Ca concentration. There were apparent interactions between the [CO<sub>2</sub>] and P level, N level and P level, and within these three factors on Ca concentration in cucumber roots. The rise of N and P levels also significantly increased Ca concentration in cucumber leaves and Mg concentration in cucumber stems, and there was a significant interaction between N and

<sup>①</sup>基金项目: 国家自然科学基金项目(41877103)和中科院战略性先导科技专项 B 类(XDB15030300)资助。

\* 通讯作者(tianxj@nju.edu.cn; zqduan@issas.ac.cn)

作者简介: 陈雨娇(1994—), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事植物营养和土壤生态研究。E-mail: chen-yujiao2012@hotmail.com

P levels. Total length and surface area of cucumber roots increased with the  $[CO_2]$  increasing. Under the condition of P deficiency (P1), total length and surface area of cucumber roots increased with the increase of N level, whereas a decrease in P level caused the increase in total length and surface area of cucumber roots at the same N level and  $[CO_2]$ . In general, the increase of  $[CO_2]$  can promote the growth of cucumber roots, but reduce the concentrations of mineral nutrient such as N, P, Ca and Mg in some organs of cucumber. However, the increase of N and P levels can promote the absorption of mineral nutrients in roots by enhancing the growth and vitality of cucumber, thereby can alleviate the risk of the decrease in mineral nutrient concentrations due to the elevated  $[CO_2]$ . The above results suggest that the applying suitable amount of mineral nutrients with matched proportion is quite necessary while  $CO_2$  fertilization is conducted to the greenhouse vegetables.

**Key words:** Atmospheric  $CO_2$  concentration; Nitrogen supply level; Phosphorus supply level; Mineral element concentrations; Root growth

20 世纪 90 年代以来,我国设施蔬菜产业迅速发展<sup>[1]</sup>。截至 2016 年,我国设施蔬菜播种面积 548 万  $hm^2$ ,设施蔬菜产量 2.8 亿 t,净产值为 12 540 亿元;以 20% 的蔬菜播种面积,提供了 30% 的蔬菜产量和 60% 以上的产值,既满足了人们对蔬菜周年均衡供应的需求,也获得了可观的经济效益<sup>[2]</sup>。我国目前已经成为世界第一大设施蔬菜生产国<sup>[3]</sup>,但相较于欧美、日本等国家,我国设施蔬菜生产管理技术仍处于落后状态。冬季设施蔬菜生产中为了保温,往往到接近中午外界气温较高时才揭棚通风,而通风前相对封闭的环境容易导致  $CO_2$  匮乏,设施内大气  $CO_2$  浓度往往会降低到不足蔬菜进行光合作用效率最高时所需的 10%,而此时的光照和温度都是最有利于光合作用的,因此过低的大气  $CO_2$  浓度极大地限制了作物的光合作用效率,严重影响其生长发育<sup>[4]</sup>。在相对密闭的设施条件下进行  $CO_2$  施肥可以一定程度提高蔬菜的光合作用,增加蔬菜的产量和品质。

黄瓜是世界性的重要蔬菜,也是我国设施蔬菜的主栽品种之一,其营养价值和经济价值都较高<sup>[5]</sup>。一般设施大棚中的大气  $CO_2$  浓度远远低于黄瓜光合作用的  $CO_2$  饱和点,成为黄瓜生长和产量形成的主要限制因子之一。此外,对矿质营养的吸收与利用,直接影响黄瓜的生长发育和产量品质的形成<sup>[6]</sup>。在所有必需矿质元素中,氮是限制植物生长和形成产量的首要因素,对改善作物品质有明显作用。磷是植物生长发育不可缺少的营养元素,它既是植物体内许多重要有机化合物的组分,同时又以多种方式参与植物体内各种代谢过程,并且对于作物高产及保持品种的优良特性具有明显作用<sup>[7]</sup>。因此,氮素与磷素是设施蔬菜生长中最为重要的两种矿质元素。

随着设施生产中  $CO_2$  施肥的普及与相关研究的深入,单纯的  $CO_2$  施肥也暴露出一些问题。首先是作物组织中的氮、磷等营养元素含量的降低,使得果

实营养价值降低;而纤维素含量的升高,使得口感变差<sup>[8]</sup>。其次是  $CO_2$  施肥增产的持久性问题。许多研究表明,随着  $CO_2$  施肥时间的延长,其对作物的增产效果逐渐减弱<sup>[9]</sup>。这些问题都与植物体内碳素与氮、磷等矿质营养元素的比例失衡有关<sup>[10]</sup>。为了解决  $CO_2$  施肥条件下矿质元素的缺乏和植株体内碳与氮、磷等矿质元素的比例失调问题,最简便有效的方法就是额外施加矿质肥料。然而矿质肥料的施用如何与  $CO_2$  气肥匹配,两者如何影响作物生长、是否存在交互作用等问题的研究相对较少。此外,许多研究指出,作物生长在高浓度  $CO_2$  条件下,其根系结构和形态会发生很多的改变<sup>[11]</sup>。众所周知,植物根系形态的改变对养分吸收会带来明显的影响<sup>[12]</sup>。

针对这些问题,本试验以黄瓜为试验材料,研究大气  $CO_2$  浓度升高以及不同供氮、供磷条件下黄瓜根系形态的变化,以阐明  $CO_2$  气肥与氮、磷供应水平对黄瓜植株根、茎、叶各部位矿质元素含量的影响机制,为  $CO_2$  施肥条件下矿质元素供应配比的调整提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

供试作物为黄瓜(*Cucumis sativus* L.),津绿 3 号,天津黄瓜研究所培育,种子购买于天津市绿丰园艺新技术开发有限公司。 $CO_2$  设 3 个浓度水平,为 400  $\mu mol/mol$  (对照,大气  $CO_2$  浓度, C1), 625  $\mu mol/mol$  (C2), 1 200  $\mu mol/mol$  (C3)。水培营养液总氮浓度设 3 个水平,为 3.5 mmol/L (低氮, N1), 14 mmol/L (中氮、N2), 21 mmol/L (高氮、N3), 并保持  $NO_3^-/NH_4^+=13:1$  (n/n)。总磷浓度设 2 个水平,为 0.1 mmol/L (低磷, P1), 1 mmol/L (中磷, P2)。试验共 18 个处理,每个处理 5 个重复。

本试验在中国科学院南京土壤研究所温室内的 3 个开顶式生长箱中进行<sup>[13]</sup>。生长箱内大气  $CO_2$

浓度的控制使用自主设计的 CO<sub>2</sub> 自动控制系统, CO<sub>2</sub> 浓度由红外检测仪(Ultramat 6, Siemens, Munich, Germany)控制, 精度能够控制在  $\pm 50 \mu\text{mol/mol}$ 。每个生长箱内设置 1 个 CO<sub>2</sub> 浓度, 每两周将一个生长箱内的水培罐随机更换到另一个生长箱中, 并调整新生长箱中 CO<sub>2</sub> 浓度为原先植株的 CO<sub>2</sub> 浓度处理值, 以减小生长箱间的差异。同一个生长箱内氮、磷处理的水培罐随机摆放。

2017 年 3 月 27 日将黄瓜种子用 10% 的次氯酸钠消毒 15 min, 完全清洗后置于 25℃ 恒温培养室中催芽, 种子露白后播种于装有育苗基质的育苗穴盘内。黄瓜苗长到两叶一心时, 定植于容量为 1 L 的 PVC 栽培罐中。栽培罐中装有在山崎黄瓜营养液基础上调整氮、磷浓度的营养液, 并由鼓气泵每日向栽培罐内间歇通气, 每日 6:00—18:00 每小时通气 30 min, 18:00—次日 6:00 每两小时通气 30 min。定植

后第二天开始进行 CO<sub>2</sub> 施肥, 中午当生长室中温度高于 30℃ 时停止 CO<sub>2</sub> 施肥并打开生长室侧门通风, 待温度回落之后关闭生长室继续 CO<sub>2</sub> 施肥处理。每日用配置的营养液补足各处理, 每周更换一次营养液, 使用 0.1 mmol/L 的 NaOH 或 0.05 mmol/L 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节营养液 pH 到 6.5 左右。

本试验在 2017 年 3—5 月进行。每个栽培罐定植一株幼苗。营养液物质组成见表 1。微量元素使用 Arnon 营养液通用配方<sup>[14]</sup>, 用量(mg/L)为 Na<sub>2</sub>Fe-EDTA(29.27)、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(2.86)、MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O(2.03)、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O(0.22)、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O(0.08)和(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O(0.02)。试验期间, C1 生长箱内温度为 24.8℃ $\pm$ 5.9℃, 湿度为 59.2% $\pm$ 22.2%; C2 生长箱内温度为 25.1℃ $\pm$ 5.6℃, 湿度为 58.6% $\pm$ 21.8%; C3 生长箱内温度为 25.0℃ $\pm$ 5.9℃, 湿度为 54.7% $\pm$ 20.9%。在 CO<sub>2</sub> 施肥处理 54 d 后采收全部黄瓜植株。

表 1 各处理营养液中盐类化合物的含量(mmol/L)

Table 1 Concentrations of salt compounds in nutrient solution under different treatments

处理	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	KNO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub>
N1P1	1.50	—	0.25	2.00	3.00	0.05	1.50
N2P1	3.00	6.00	1.00	2.00	—	0.05	—
N3P1	6.00	6.00	1.50	2.00	—	0.05	—
N1P2	1.50	—	0.25	2.00	3.00	0.50	1.50
N2P2	3.00	6.00	1.00	2.00	—	0.50	—
N3P2	6.00	6.00	1.50	2.00	—	0.50	—

注: 各处理营养液氮、磷元素物质的量浓度 N1: 3.5 mmol/L, N2: 14 mmol/L, N3: 21 mmol/L; P1: 0.1 mmol/L, P2: 1.0 mmol/L。营养液使用实验室分析纯和去离子水配制。

## 1.2 测定方法

黄瓜植株根、茎和叶全氮和全磷含量在样品用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化法消煮后, 使用化学分析仪(Smartchem200, Alliance, France)分别测定。根、茎和叶中矿质元素 K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量在样品用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 法消煮后, 使用 ICP-AES 测定(Iris-Advantage, Thermo Electron, USA)。

黄瓜采摘后鲜根立即用 Epson perfection V700 根系扫描仪(Epson, Nagano, Japan)进行扫描, 之后扫描的图像用 WinRHIZO Pro software (Version 2013, Regent Co. Ltd., Quebec, Canada)进行分析, 得出总根长和总根表面积, 根系平均直径可用总表面积/(根系长度 $\times$  $\pi$ )得到。

## 1.4 数据分析

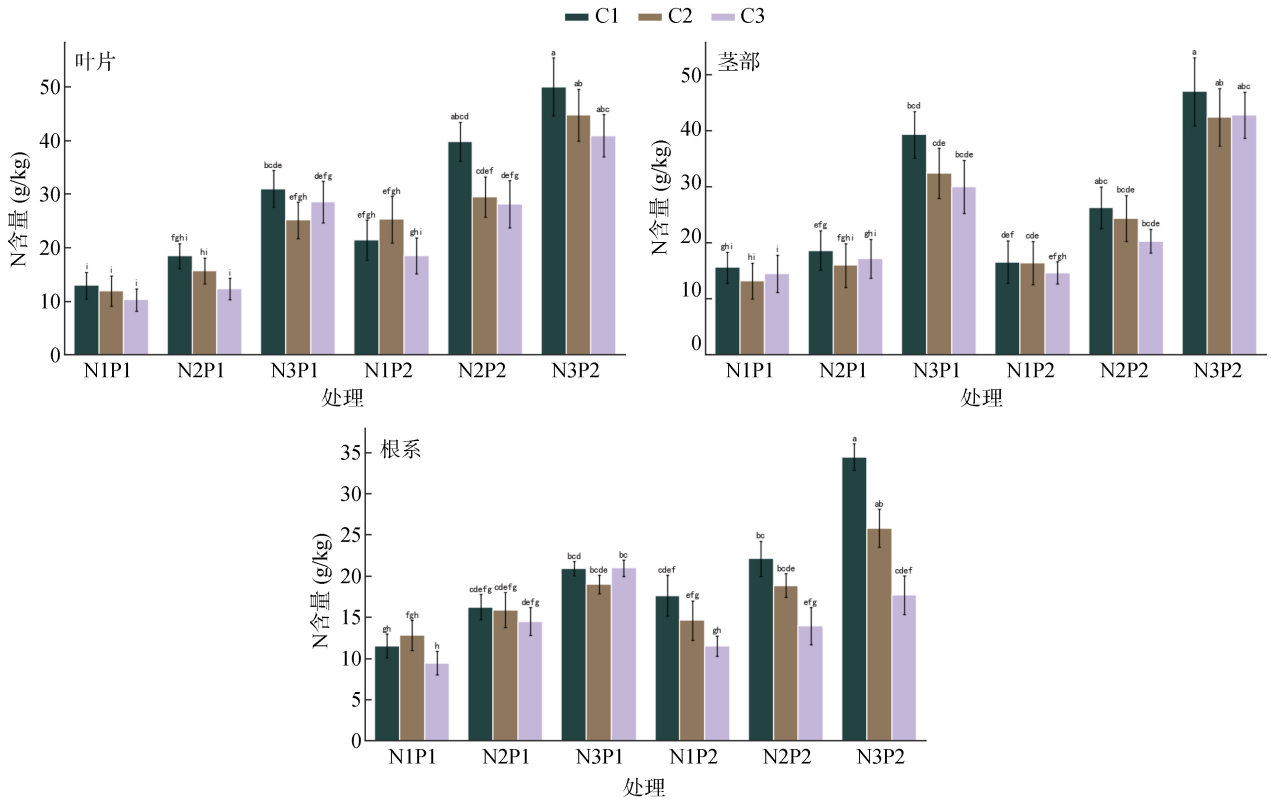
试验数据用 Microsoft Excel(16.21)和 R 语言(3.5.0)统计软件进行方差分析, 获得试验 CO<sub>2</sub>、氮、磷处理的主效应和交互作用。

## 2 结果分析

### 2.1 黄瓜植株各组织氮、磷元素含量对大气 CO<sub>2</sub> 浓度与氮磷供应水平的响应

2.1.1 氮元素含量的响应 图 1 表明, 在相同大气 CO<sub>2</sub> 浓度以及相同供磷条件下, 黄瓜植株叶片、茎部和根系的 N 含量都随着氮素供应水平的提高呈增加的趋势, 并且在 N3 水平下, 植株各部分的 N 含量基本都明显高于 N1、N2 水平。而在相同供氮与供磷水平下, CO<sub>2</sub> 浓度升高会使得植株中 N 含量相对下降, 特别是根部在 P2 处理下, N 含量随 CO<sub>2</sub> 浓度升高下降趋势表现的更为明显。在 CO<sub>2</sub> 浓度和供氮水平相同条件下, 相较于 P1 水平, P2 水平会显著提高植株各部位的 N 含量。对于 N 含量在黄瓜植株内的分布而言, 叶片和茎部明显高于根部。

2.1.2 磷元素含量的响应 从图 2 可以看出, 在 CO<sub>2</sub> 浓度和供氮水平相同条件下, 植株各部位的 P 含



(柱图上方不同字母小写字母表示处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著, 下同)

图 1 不同 CO<sub>2</sub> 浓度及氮磷供应水平下黄瓜植株各组织 N 元素含量

Fig. 1 N concentrations in different cucumber organs under different CO<sub>2</sub> concentrations, N and P supply levels

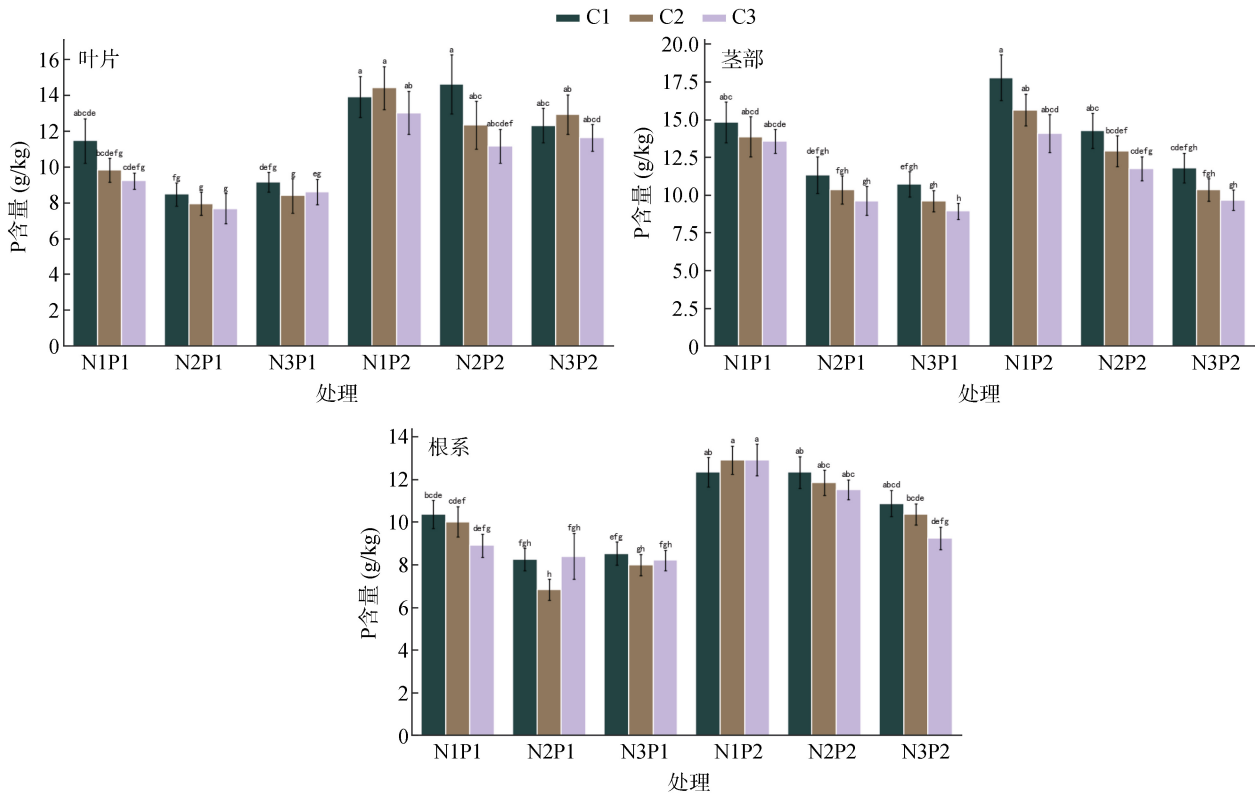


图 2 不同 CO<sub>2</sub> 浓度及氮磷供应水平下黄瓜植株各组织磷元素含量

Fig. 2 P concentrations in different cucumber organs under different CO<sub>2</sub> concentrations, N and P supply levels

量在 P2 条件下显著高于 P1 条件。在相同 CO<sub>2</sub> 浓度和供磷条件下, 黄瓜植株叶片、茎部和根系的 P 含量随氮素供应水平的增加有一定的降低趋势, 其中茎部 P 含量下降趋势最明显, 总体上 N1 水平下植株各部位 P 含量最高。在相同供氮、磷条件下, CO<sub>2</sub> 浓度升高会引起植株 P 含量有减少的趋势, 但大部分条件下差异并不显著。此外, 对于 P 含量的分布而言, 茎部

的 P 含量相对来说略高于叶片和根系的含量。

## 2.2 大气 CO<sub>2</sub> 浓度与氮磷供应水平对黄瓜植株各组织其他矿质元素含量的影响

从表 2、表 3 可以看出, 对于黄瓜根系, CO<sub>2</sub> 施肥浓度对 N、Ca 和 Cu 的含量有极显著影响, CO<sub>2</sub> 浓度升高极显著降低了 N、Ca 含量, 显著增加了 Cu 含量, Fe 含量显著降低, 对其余元素含量没有显著

表 2 黄瓜植株各组织中其他矿质元素含量  
Table 2 Other mineral nutrient concentrations in cucumber leaves

植株组织	处理	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
叶片	C1N1P1	40.8 ab	31.8 e	11.9 def	0.097 a	0.180 cdef	0.033 bc	0.120 b
	C1N2P1	42.4 ab	37.2 de	13.2 bcde	0.091 a	0.176 cdef	0.029 bc	0.100 b
	C1N3P1	34.9 b	44.1 cde	8.4 f	0.055 a	0.126 f	0.024 bc	0.081 b
	C1N1P2	41.5 ab	54.4 bcd	15.2 bcd	0.060 a	0.250 abc	0.047 bc	0.135 ab
	C1N2P2	49.5 a	76.8 a	21.7 a	0.093 a	0.371 a	0.036 bc	0.104 b
	C1N3P2	42.6 ab	83.1 a	12.6 cdef	0.060 a	0.158 def	0.010 c	0.148 ab
	C2N1P1	39.7 ab	42.5 cde	15.3 bcd	0.060 a	0.245 bc	0.026 bc	0.145 ab
	C2N2P1	37.9 b	42.4 cde	14.2 bcde	0.120 a	0.178 cdef	0.024 bc	0.150 ab
	C2N3P1	35.6 b	49.9 bcde	10.6 df	0.116 a	0.144 ef	0.041 bc	0.098 b
	C2N1P2	39.3 ab	51.0 bcde	16.6 bc	0.074 a	0.265 ab	0.041 bc	0.131 ab
	C2N2P2	38.1 b	54.2 bcde	17.5 b	0.074 a	0.198 bcdef	0.015 bc	0.084 b
	C2N3P2	37.5 b	75.1 a	13.5 bcde	0.068 a	0.157 def	0.030 bc	0.082 b
	C3N1P1	42.4 ab	36.6 de	13.6 bcde	0.077 a	0.226 bcd	0.035 bc	0.206 a
	C3N2P1	40.2 ab	40.3 cde	13.6 bcde	0.095 a	0.203 bcde	0.053 b	0.127 ab
	C3N3P1	37.8 b	52.2 bcd	10.6 df	0.080 a	0.160 def	0.032 bc	0.129 ab
	C3N1P2	36.7 b	36.5 de	12.3 cdef	0.062 a	0.209 bcde	0.104 a	0.140 ab
	C3N2P2	40.5 ab	57.3 bc	16.6 bc	0.094 a	0.201 bcdef	0.025 bc	0.188 b
	C3N3P2	42.9 ab	68.4 ab	12.8 cde	0.089 a	0.154 def	0.038 bc	0.188 b
茎系	C1N1P1	68.3 abc	12.528 h	2.9 cde	0.028 a	0.061 cde	0.0025 abcd	0.045 ab
	C1N2P1	88.0 a	18.5 efgh	3.7 abcde	0.029 a	0.073 bcd	0.0024 abcd	0.065 ab
	C1N3P1	60.0 bc	24.8 cdef	3.2 abcde	0.023 a	0.055 de	0.0022 abcd	0.051 ab
	C1N1P2	69.5 abc	22.5 defg	3.7 abcde	0.014 a	0.106 a	0.0029 abcd	0.066 ab
	C1N2P2	81.5 ab	19.2 efgh	4.3 ab	0.020 a	0.063 cde	0.0031 abc	0.040 ab
	C1N3P2	76.2 abc	38.870 a	4.456 a	0.015 a	0.079 de	0.0032 a	0.074 a
	C2N1P1	77.4 ab	19.5 efgh	3.7 abcde	0.023 a	0.088 abc	0.0031 ab	0.061 ab
	C2N2P1	66.3 bc	17.7 efgh	3.1 bcde	0.017 a	0.068 cde	0.0022 abcd	0.045 ab
	C2N3P1	55.7 c	26.2 bcde	3.2 abcde	0.019 a	0.049 de	0.0019 d	0.043 ab
	C2N1P2	62.8 bc	14.9 gh	2.5 e	0.024 a	0.061 cde	0.0028 abcd	0.041 ab
	C2N2P2	77.9 ab	20.1 efgh	3.8 abcd	0.019 a	0.053 de	0.0028 abcd	0.038 b
	C2N3P2	79.6 ab	33.2 abc	4.0 abcd	0.017 a	0.039 e	0.0022 abcd	0.033 b
	C3N1P1	63.6 bc	16.3 fgh	3.2 abcde	0.034 a	0.096 ab	0.0032 a	0.072 a
	C3N2P1	74.3 abc	21.4 defgh	3.5 abcde	0.030 a	0.077 abcd	0.0023 abcd	0.057 ab
	C3N3P1	60.6 bc	30.0 bcd	3.4 abcde	0.024 a	0.060 cde	0.0021 cd	0.055 ab
	C3N1P2	64.7 bc	14.4 gh	2.7 de	0.022 a	0.073 bcd	0.0022 bcd	0.052 ab
	C3N2P2	75.2 abc	19.5 efgh	4.4 a	0.020 a	0.053 de	0.0029 abcd	0.038 b
	C3N3P2	70.5 abc	34.3 ab	4.0 abc	0.017 a	0.048 de	0.0022 abc	0.051 ab

续表

植株组织	处理	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
根部	C1N1P1	47.9 abcd	16.0 c	5.2 c	0.714 bc	0.163 c	0.0124 ab	0.128 abcd
	C1N2P1	52.1 abc	17.6 c	5.7 c	0.783 b	0.171 bc	0.0104 ab	0.162 a
	C1N3P1	36.3 bcdef	16.1 c	5.9 bc	0.423 bc	0.135 c	0.0084 b	0.123 abcd
	C1N1P2	56.7 a	15.9 c	5.1 c	0.315 c	0.347 abc	0.0131 ab	0.141 ab
	C1N2P2	9.7 g	34.7 a	6.3 abc	1.328 a	0.517 a	0.0096 ab	0.062 e
	C1N3P2	5.8 cdef	32.3 ab	5.2 c	0.640 bc	0.326 abc	0.0112 ab	0.137 ab
	C2N1P1	55.9 a	16.6 c	5.4 c	0.616 bc	0.288 bc	0.0085 b	0.111 bcd
	C2N2P1	48.3 abcd	17.4 c	6.2 bc	0.515 bc	0.267 bc	0.00089 b	0.138 ab
	C2N3P1	44.1 abcde	19.6 c	6.6 abc	0.460 bc	0.225 bc	0.0083 b	0.023 abcd
	C2N1P2	53.7 ab	16.5 c	5.0 c	0.326 c	0.244 bc	0.0065 b	0.101 bcde
	C2N2P2	34.2 def	23.9 abc	6.7 abc	0.622 bc	0.411 ab	0.0089 b	0.093 cde
	C2N3P2	33.7 def	26.1 abc	7.6 ab	0.533 bc	0.287 abc	0.0077 b	0.110 bcd
	C3N1P1	44.4 abcde	15.4 c	4.8 c	0.551 bc	0.220 bc	0.0158 a	0.128 abcd
	C3N2P1	42.6 abcde	16.3 c	5.7 c	0.738 bc	0.184 bc	0.0083 b	0.117 bcd
	C3N3P1	34.5 cdef	18.7 c	5.9 bc	0.621 bc	0.155 c	0.0075 b	0.115 bcd
	C3N1P2	41.8 abcde	17.5 c	5.7 c	0.325 c	0.319 abc	0.0077 b	0.130 abc
	C3N2P2	29.7 ef	23.1 bc	6.9 abc	0.610 bc	0.358 abc	0.0082 b	0.108 bcd
	C3N3P2	19.5 fg	34.9 a	8.6 a	0.594 bc	0.416 ab	0.0074 b	0.084 de

注：表中数据为平均值；同列不同小写字母表示同一部位处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著。

影响。供氮水平对 N、P、K 和 Ca 含量都有极显著影响，显著增加了 N、K 及 Ca 含量，P 含量显著减少。供磷水平对 N、P、K、Ca、Mn 和 Zn 含量有极显著影响，显著增加了 N、P、Ca 和 Mn 含量，K、Zn 含量显著降低。CO<sub>2</sub> 施肥与磷水平对 N 含量有极显著的交互作用，对 Ca 和 Zn 含量有显著的交互作用；供氮和供磷水平对 P、Ca、Fe 含量有极显著的交互作用，对 Cu 含量有显著的交互作用。CO<sub>2</sub>、供氮、供磷三者之间的仅对 Ca 含量有极显著的交互作用。

对于黄瓜茎部，CO<sub>2</sub> 施肥仅对 P 含量有极显著影响，供氮水平对 N、P、Ca、Mg 及 Mn 含量皆有极显著影响，极显著增加 Ca 和 Mg 的含量，减少 Mn 的含量。供磷水平对 N、P、Ca、Mg 和 Cu 含量有极显著的增加作用，使 K 含量显著增加，Mn 含量显著降低。CO<sub>2</sub> 施肥与供氮水平、CO<sub>2</sub> 施肥与供磷水平对所测的元素含量都没有显著的交互作用，供氮和磷水平对 K 和 Mg 含量有极显著的交互作用，对 Cu 含量有显著的交互作用。三者之间对所测元素皆没有显著交互作用。

对于黄瓜叶片，CO<sub>2</sub> 施肥显著减少了 N 含量，显著增加了 Fe 含量，极显著增加 Cu 和 Zn 含量。供氮水平对 N、P、Ca、Mg、Mn、Cu 和 Zn 含量有极显著影响，极显著增加 Ca 的含量，降低了 Mg、Mn、

Cu 和 Zn 的含量。供磷水平仅对 N、P 含量有显著影响。CO<sub>2</sub> 施肥与氮水平对所测的元素皆没有显著交互作用；CO<sub>2</sub> 和磷水平对 Ca 和 Mn 含量有极显著的交互作用，供氮和供磷水平对 Cu 含量有极显著交互作用，对 Ca 含量有显著的交互作用。三者之间仅对 Zn 含量有显著的交互作用。

### 2.3 黄瓜根系生长对大气 CO<sub>2</sub> 浓度与氮磷供应水平的响应

由图 3 可见，在 P1 条件和相同 CO<sub>2</sub> 施肥条件下，总根长和总根表面积随着供氮水平的提高而呈明显增加趋势，而在 P2 条件下，无明显的变化趋势。在氮水平和磷水平相同条件下，随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加，总根长与总根表面积有一定的增大趋势。在相同 CO<sub>2</sub> 施肥和供氮条件下，P1 条件下的总根长和总表面积明显大于 P2 条件下，尤其是在 N2 和 N3 条件下。从图 3 看出，CO<sub>2</sub> 施肥与不同供氮、磷水平下对根平均直径大小的影响趋势并不是很明显。

从表 4 可知，CO<sub>2</sub> 施肥对 3 个根系形貌参数都没有显著影响，供氮水平和供磷水平对总根长和总根表面积都有极显著影响。CO<sub>2</sub> 分别与供氮水平和供磷水平对 3 个根系形貌参数都没有显著的交互作用。供氮水平和供磷水平对总根表面积和根平均直径的影响有较强的交互作用。CO<sub>2</sub> 施肥和供氮、磷三者之间仅对总根长的影响有显著交互作用。

表 3 大气 CO<sub>2</sub> 浓度及氮、磷供应水平对黄瓜植株各组织矿质元素含量影响的方差分析  
Table 3 ANOVA of effects of [CO<sub>2</sub>], N and P levels on element concentrations in cucumber roots

植株组织	因素	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
叶片	CO <sub>2</sub>	*↓	ns	ns	ns	ns	*↓	ns	**↑	***↑
	供氮	***↑	**↓	ns	***↑	**↓	ns	***↓	**↓	**↓
	供磷	***↑	*↑	ns	***↑	***↑	ns	*↓	ns	ns
	CO <sub>2</sub> ×供氮	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CO <sub>2</sub> ×供磷	ns	ns	ns	**	ns	ns	**	ns	ns
	供氮×供磷	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	ns
	CO <sub>2</sub> ×供氮×供磷	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
茎部	CO <sub>2</sub>	ns	**↓	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	供氮	***↑	***↓	ns	***↑	***↑	ns	***↓	ns	ns
	供磷	**↑	**↑	*↑	***↑	***↑	ns	*↓	***↑	ns
	CO <sub>2</sub> ×供氮	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CO <sub>2</sub> ×供磷	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	供氮×供磷	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	*	ns
	CO <sub>2</sub> ×供氮×供磷	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
根系	CO <sub>2</sub>	***↓	ns	ns	**↓	ns	*↓	ns	**↓	ns
	供氮	***↑	***↓	***↓	***↑	ns	ns	ns	ns	ns
	供磷	***↑	***↑	**↓	***↑	ns	ns	***↑	ns	***↓
	CO <sub>2</sub> ×供氮	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CO <sub>2</sub> ×供磷	***	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*
	供氮×供磷	ns	**	ns	***	ns	**	ns	*	ns
	CO <sub>2</sub> ×供氮×供磷	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns

注：表中显著性水平为两维方差分析结果；ns、表示差异不显著( $P>0.05$ )、\*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示显著性水平为  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  和  $P<0.001$ 。↑ 和 ↓ 分别表示随 CO<sub>2</sub> 浓度、供氮或磷水平升高而升高和降低。下同。

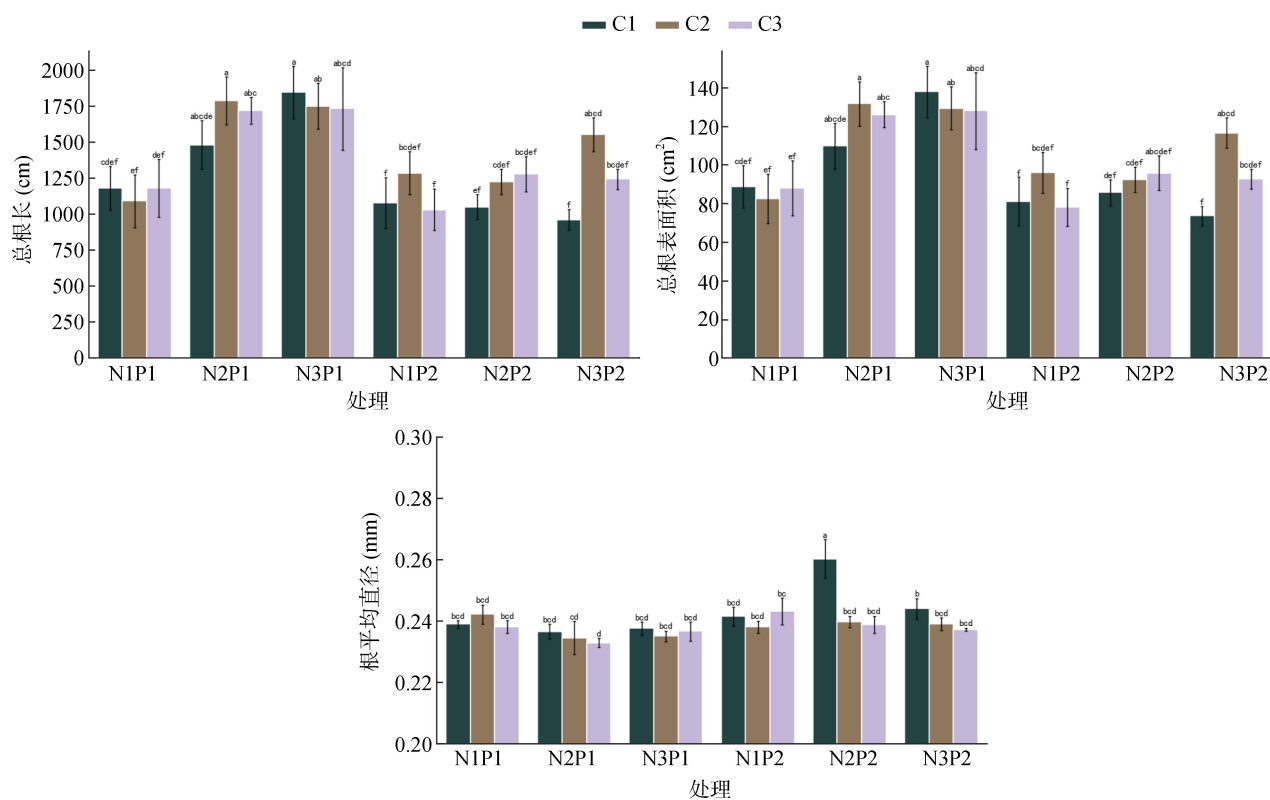


图 3 不同 CO<sub>2</sub> 浓度及氮磷供应水平下黄瓜的总根长、总根表面积和根系平均直径

Fig. 3 Total lengths, total surface areas and root average diameters of cucumbers under different CO<sub>2</sub> concentrations, N and P supply levels

表 4 大气 CO<sub>2</sub> 浓度及氮、磷供应水平对黄瓜根系生长影响的方差分析  
Table 4 ANOVA of effects of [CO<sub>2</sub>], N and P levels on root growths of cucumbers

生长指标	CO <sub>2</sub>	供氮	供磷	CO <sub>2</sub> ×供氮	CO <sub>2</sub> ×供磷	供氮×供磷	CO <sub>2</sub> ×供氮×供磷
总根长	ns	***↑	***↓	ns	ns	ns	*
总根表面积	ns	***↑	***↓	ns	ns	*	ns
根平均直径	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns

### 3 讨论

在高浓度 CO<sub>2</sub> 条件下生长的植物, 植株体内元素含量通常低于在正常浓度 CO<sub>2</sub> 条件下生长的植物, 这一现象的生理机制有多种解释<sup>[15]</sup>, 其中最具有代表性的假说是由于非结构性碳水化合物积累而引起的“稀释效应”<sup>[16]</sup>。稀释作用理论认为 CO<sub>2</sub> 施肥促进植物固碳, 造成更多碳水化合物的积累, 从而相对稀释植物组织内的元素浓度。在对 CO<sub>2</sub> 施肥影响植物养分代谢机理还未深刻认知的情况下, 稀释作用确实可以在很多情况下很好解释矿质元素含量下降的原因<sup>[17]</sup>。

前人研究表明, 不同氮肥用量处理下, CO<sub>2</sub> 浓度增高都能使作物地上部分 N 含量降低, 其降低的幅度随着氮肥用量的增加而减小, 而根系 N 含量受到氮肥水平和土壤水分状况的复杂影响, 植株总 N 含量也有明显下降, 低氮处理时下降幅度更为显著<sup>[18]</sup>。

本试验中, 在相同供氮、供磷水平下, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, 黄瓜植株各部位的 N 含量有下降的现象, 且 CO<sub>2</sub> 浓度对不同部位产生不同的效果。而在相同供氮、磷水平下, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, 黄瓜各部位 P 含量也呈下降趋势。CO<sub>2</sub> 浓度的升高往往降低植物体部分营养元素含量, 但也有不同的研究结果, 有研究报道在 CO<sub>2</sub> 施肥条件下, 除了 N 含量, 其他元素含量和在正常环境中相比没有变化, 且 Zn 和 Mn 含量有明显的增长趋势<sup>[19]</sup>。由此可见, 稀释效应并不是植物体内矿质元素含量降低的唯一机理<sup>[14]</sup>。多数研究认为, 虽然稀释作用确实一定程度上降低矿质元素含量, 但不能解释 CO<sub>2</sub> 施肥对各种元素影响并不相同的现象<sup>[16,20]</sup>。原因可能有: ①现有研究对稀释作用理论的适用范围并没有一个很好的界定; ②各种矿质元素在植物体内的吸收、转运和代谢有很大差异。植物根系吸收能力的改变也可能在其中起到很大作用<sup>[21]</sup>。植物对矿质元素的吸收还受到植物品种、培养机制、土壤类型、元素供应状况及植物生长环境条件等因素的影响<sup>[22]</sup>。

本试验中, 在 CO<sub>2</sub> 浓度和供磷水平条件一致的情况下, 随着供氮水平的提高, 黄瓜叶片、茎部和根系的氮元素含量有较为明显增加的趋势, 在 N3 条件

下最为明显。在不同氮素水平下对番茄磷钾吸收和分配的研究中显示, 氮可以促进植物对磷的吸收, 提高磷肥利用率<sup>[23]</sup>。而在本试验中, 在 C1 和 P2 条件下的叶片由 N1 到 N2 以及 C2、P1 条件下的根系中 N2 至 N3 的情况下与该结果一致。

并且在本试验中, 正常供磷条件下的 N 含量高于低磷条件下, 说明磷元素会促进黄瓜植株对氮素的吸收。磷是氮素代谢过程中一些重要酶的组分, 磷能促进植物更多地利用硝态氮, 且磷也是生物固氮所必需, 缺磷将使氮素代谢明显受阻<sup>[7]</sup>。本试验中植株各部分 P 含量随供磷水平的升高而增加, 但增加量不如供氮水平提高 N 含量那样极显著, 可能是因为本试验只有两个磷水平, 且这两个磷水平对黄瓜生长的影响并不显著<sup>[24]</sup>。

根据本试验数据的统计分析结果, CO<sub>2</sub> 浓度、供氮水平及供磷水平对各种矿质元素含量在黄瓜植株各部位的影响不同。对于黄瓜根部, 根部 N 含量随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而极显著降低, 随氮水平和磷水平的升高而极显著增加, 且 CO<sub>2</sub> 浓度与供氮水平存在明显的交互作用。氮水平和磷水平的增加极显著地促进了根部 P 含量的增加, 并且两者存在极显著的交互作用; 根部的 Ca 含量随 CO<sub>2</sub> 浓度的升高而显著降低, 氮和磷水平的升高极显著地增加了其含量, 且 CO<sub>2</sub> 浓度与供磷水平、供氮与供磷水平以及这三者之间存在明显的交互作用。供氮、供磷水平的升高极显著地提高了黄瓜叶片中 Ca 的含量以及茎部中 Mg 的含量, 且两者存在明显的交互作用。Ca 是植物中某些酶的活化剂, 是叶片细胞壁等细胞结构的组成部分, 还以钙调蛋白来行使第二信使的功能; Mg 参与蛋白和脂肪的合成, 以及叶绿素和多种酶的活化<sup>[25]</sup>。Ca 和 Mg 含量随供氮、磷水平的提高而增加可能是由于充足的氮素有利于发挥地上部光合潜力, 使更多光合产物运输到地下部用于根系生长<sup>[26]</sup>, 从而促进 N、P、Ca、Mg 等矿质养分的吸收<sup>[27]</sup>; 此外, 磷可以使植株根系快速扩展, 从而加强其吸收能力<sup>[28]</sup>; 也可能与 N、P 与 Ca、Mg 元素之间吸收的协同增效作用有关<sup>[29]</sup>。

植物根系对养分的吸收能力一直受到研究者的关注<sup>[30]</sup>, CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 地上部营养元素含量



的变化主要由干物重的增加比例和根系的吸收能力导致,植物根系的形态会直接影响到植物对水分、矿质元素以及重金属元素的吸收。许多研究表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,其根系的长度、密度、粗细及根毛发育等形态特征会发生明显的改变<sup>[31]</sup>。本试验发现,在供磷水平相同的条件下,CO<sub>2</sub> 浓度的升高和供氮水平的增加都明显增加了总根长、总根表面积,根平均直径并没有显著的变化。在相同 CO<sub>2</sub> 施肥和供氮水平下,P1 条件下的总根长和总根表面积大于 P2 条件下。供磷水平对总根长、总表面积和根平均直径造成的影响均有显著差异,CO<sub>2</sub> 浓度和供氮、磷水平的两两交互及三者的作用效应对本试验中所测的根系形态各有不同。

本试验研究时间较短,并没有对氮素、磷素供应配比的全面深入的分析,三者交互作用的内在机理仍需进一步的深入研究。

#### 4 结论

CO<sub>2</sub> 浓度和不同供氮、磷水平对黄瓜根系生长和各组织中元素含量的变化有着显著的影响,CO<sub>2</sub> 浓度升高促进了蔬菜的生长发育和矿质养分的吸收,因此在 CO<sub>2</sub> 施肥的同时对矿质元素的供应也需要合理的增加与配比。

#### 参考文献:

- [1] 汪永钦,刘荣花,王良启. 日光温室蔬菜栽培中人工增施 CO<sub>2</sub> 技术[J]. 应用气象学报, 1997, 8(4): 76–84.
- [2] 张真和,马兆红. 我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点——中国蔬菜协会副会长张真和访谈录[J]. 中国蔬菜, 2017(5): 1–5.
- [3] 喻景权. “十一五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2011(2): 11–23.
- [4] 寇太记,朱建国,谢祖彬,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥水平对麦田土壤有机碳更新的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 459–465.
- [5] 刘玉梅,王云诚,于贤昌,等. 黄瓜单叶净光合速率对二氧化碳浓度、温度和光照强度响应模型[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 883–887.
- [6] 王凤婷,艾希珍,刘金亮,等. 钾对日光温室黄瓜糖、维生素 C、硝酸盐及其相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 682–687, 703.
- [7] 陆景陵/国别: . 植物营养学(上册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [8] Norby R J, Cotrufo M F, Ineson P, et al. Elevated CO<sub>2</sub>, litter chemistry, and decomposition: a synthesis[J]. *Oecologia*, 2001, 127(2): 153–165.
- [9] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, et al. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO<sub>2</sub>[J]. *Nature*, 2006, 440(7086): 922.
- [10] 闫秋艳,段增强,李汛,等. 根区温度对黄瓜生长和土壤养分利用的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 752–760.
- [11] Ferris R, Taylor G. Increased root growth in elevated CO<sub>2</sub>: a biophysical analysis of root cell elongation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45(11): 1603–1612.
- [12] 王月,章永松,方萍,等. 不同供磷状况下 CO<sub>2</sub> 浓度升高对番茄根系生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 871–876.
- [13] 宝俐,董金龙,李汛,等. CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮素供应对黄瓜叶片光合色素的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 653–660.
- [14] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [15] Taub D R, Wang X Z. Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO<sub>2</sub>? A critical examination of the hypotheses[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(11): 1365–1374.
- [16] Kuehny J S, Peet M M, Nelson P V, et al. Nutrient dilution by starch in CO<sub>2</sub>-enriched chrysanthemum[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1991, 42(6): 711–716.
- [17] Gifford R M, Barrett D J, Lutze J L. The effects of elevated [CO<sub>2</sub>] on the C: N and C: P mass ratios of plant tissues[J]. *Plant and Soil*, 2000, 224(1): 1–14.
- [18] 李伏生,康绍忠,张富仓. CO<sub>2</sub> 浓度升高、氮与土壤水分对春小麦生长及干物质积累的效应[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 43–46.
- [19] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, et al. The impact of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(2): 128–140.
- [20] McGrath J M, Lobell D B. Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO<sub>2</sub> concentrations[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(3): 697–705.
- [21] BassiriRad H, Gutschick V P, Lussenhop J. Root system adjustments: regulation of plant nutrient uptake and growth responses to elevated CO<sub>2</sub>[J]. *Oecologia*, 2001, 126(3): 305–320.

- [22] 庞静, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由空气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对水稻营养元素吸收和籽粒中营养元素含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 350–354.
- [23] 汤明尧, 张炎, 胡伟, 等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1238–1245.
- [24] 林志豪, 冯健禹, 郭勇祥, 等. 供磷水平对黄瓜测序品种“中国龙”生长及磷吸收的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(3): 54–58.
- [25] 王琪贞. 肥料学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [26] 王文明, 张振华, 宋海星, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和供氮水平对油菜中微量元素吸收及转运的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2057–2062.
- [27] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物–土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展[J]. 土壤, 2019, 51(1): 1–10.
- [28] 蔡绍珍, 陈振德. 蔬菜的营养与施肥技术[M]. 青岛: 青岛出版社, 1997.
- [29] 官纪元, 樊卫国. 供磷水平对刺梨幼苗生长和养分含量及其相关生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(7): 1315–1324.
- [30] Uraguchi S, Mori S, Kuramata M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2677–2688.
- [31] Rogers H H, Peterson C M, McCrimmon J N, et al. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(6): 749–752.