

CO₂ 加富和供磷水平对辣椒苗期生长及营养元素吸收的影响

雷云 刘月炎 王健健

(贵州大学生命科学学院/农业生物工程研究院/山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 550025, 贵州贵阳)

摘要 为探究 CO₂ 加富、供磷水平及二者交互作用对辣椒苗期生长及营养元素吸收的影响, 以艳椒 425 为试验材料, 在 2 个 CO₂ 浓度 (自然 CO₂ 400±30 μmol/mol、CO₂ 加富 800±30 μmol/mol) 及 3 个供磷水平 (0、50、250 mg/kg P) 处理下, 测定了辣椒形态指标、生物量及营养元素含量指标。结果表明, 单独 CO₂ 加富或增加供磷水平及二者交互, 均可促进辣椒形态生长及生物量积累。CO₂ 加富或增加供磷水平可使辣椒根、茎、叶中 C 含量显著增加, N、K 含量显著降低, 施磷还促进辣椒对 P 的吸收。CO₂ 加富可使辣椒 C/N、C/K、C/P、N/P 显著增大; 供磷水平对辣椒各器官 C/N、C/K 无显著影响, C/P、N/P 显著降低; 与 CK 相比, CO₂ 加富与施加磷肥交互处理下辣椒 C/N 显著增大, C/K、C/P、N/P 均显著降低。CO₂ 加富可增加辣椒整体 Mg、Fe、Mn、Zn 含量, 减少 Ca 含量, 供磷水平增加, 可增加辣椒整体 Ca、Mg、Fe、Zn 含量, 减少 Mn 含量, CO₂ 加富和供磷水平增加交互可促进辣椒吸收 Mg、Fe、Mn、Zn, 抑制对 Ca 的吸收。综上所述, 在实际生产过程中, 适当提高 CO₂ 浓度、合理适量施用磷肥有利于辣椒生长及对土壤中营养元素的吸收。

关键词 CO₂ 加富; 磷肥; 辣椒; 生长; 营养元素吸收

随着工业化程度大幅提升和人类活动的影响, 大气 CO₂ 浓度从工业革命前的 280 μmol/mol 逐年上升, 2019 年大气 CO₂ 浓度突破 415 μmol/mol, 达到历史新高^[1]。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告指出, 21 世纪末全球大气 CO₂ 浓度最高将增加至 935 μmol/mol^[2]。CO₂ 是植物进行光合作用的原料, 其浓度变化对植物生长发育、形态特征和生理生化等过程有直接或间接影响。大量研究表明, CO₂ 浓度升高对植物株高^[3]、茎粗^[4]、叶长、叶宽、叶面积^[5]等有不同程度的促进作用, 且可促进植株的生物量积累^[6-7], 环境 CO₂ 浓度升高必然会引起植株对碳 (C) 及其他营养元素吸收的变化^[8]。磷 (P) 是植物生长发育所必需的矿质元素, 参与植物体内的多种生理生化过程, 是植物生长和发育过程中不可或缺的元素之一。磷元素在植物体内以多种多样的形式存在, 参与植物细胞核的形成、细胞分裂、根系生长伸长等重要生长过程^[9], 在其中起关键作用; 参与植物的光合作用和呼吸作用^[10], 加快植物体内水分及养分的吸收、运输及转移, 促进碳水化合物的合成及转运等^[11]。

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 是茄科一年生或有限多年生的草本植物, 是我国广泛种植、经济价

值较高的蔬菜和调料作物, 其维生素 C 含量在蔬菜中居第一位, 已成为我国农业发展的关键农作物。贵州省是辣椒种植大省, 2020 年, 贵州全省辣椒种植面积 36.33 万 hm² (545 万亩)、产量 724 万 t、产值 242 亿元, 产加销规模均位列全国第一^[12]。目前, CO₂ 浓度升高或施加磷肥单因素作用对辣椒光合特性、产量及品质等影响的研究较多, 但两者交互对辣椒生长及营养元素吸收影响的研究较少。综上所述, 本文以艳椒 425 为研究对象, 通过控制辣椒生长环境中的 CO₂ 浓度及供磷水平, 探究 CO₂ 加富、施加磷肥及两者交互对辣椒生长及营养元素吸收的影响, 为提高辣椒生长活力及养分吸收提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用辣椒品种艳椒 425 购于重庆科光种苗有限公司; 过磷酸钙 (P 质量分数 17.0%~18.0%) 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

采用二因素完全随机试验设计。设置 2 个 CO₂ 浓度, 分别为自然 CO₂ (400±30 μmol/mol) 和 CO₂

作者简介: 雷云, 研究方向为植物生理生态, E-mail: 504149938@qq.com

王健健为通信作者, 研究方向为植物生理生态, E-mail: wangjj33209@163.com

基金项目: 国家自然科学基金“喀斯特地区典型药用植物对气候变化的响应及其气候调控机制研究” (31760155); 贵州省生物学一流学科建设项目“大气 CO₂ 浓度升高对几种药用植物生长及品质的影响” (GNYL [2017] 009)

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-11-20; 网络出版日期: 2024-04-09

加富（800±30 μmol/mol），3 个磷水平，分别为 0、50、250 mg/kg。农业土壤标准《中国土壤》^[13]表明，当土壤有效磷含量大于 46 mg/kg 时，表明土壤中含有较丰富的磷，而本试验土壤有效磷含量低于 10 mg/kg，设置 3 个磷水平是为了使土壤分别处于低磷、磷较丰富和磷超富集 3 种状态。试验共设 6 个处理（具体试验处理方案见表 1），每个处理 5 个重复，磷以过磷酸钙的形式添加。

表 1 CO₂ 浓度与施磷处理的试验方案
Table 1 Experimental scheme of CO₂ concentration and phosphorus fertilizer treatment

处理 Treatment	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration (μmol/mol)	磷水平 Phosphorus level (mg/kg)
CK	400±30	0
CM	400±30	50
CH	400±30	250
EK	800±30	0
EM	800±30	50
EH	800±30	250

本试验采用土培盆栽（内径 23.5 cm×高 14 cm），2022 年 9 月播种育苗，待种子发芽并长至一定高度（6 片叶，株高约 7.55 cm，茎粗约 1.65 mm）时移栽至盆内，每盆 1 株，盆内基质为混合土，黄壤:椰糠:蛭石=1:2:2，理化性质为 pH 6.38、全氮 0.37 g/kg、有效磷 8.68 mg/kg、有效钾 92.64 mg/kg、有机质 3.15 g/kg。在移栽的前一天，将各处理所需的磷肥加入试验用土中搅拌均匀后重新装盆，并做好标记。移栽后的辣椒苗放入 4 个人工气候箱（RXZ-600B-CO₂）中培养，气候箱可调控试验所需的 CO₂ 浓度，并对设置的浓度进行 24 h 监控和监测。气候箱内除 CO₂ 浓度不同，其余环境条件均一致，昼/夜温度 28 °C/22 °C，各 12 h；相对湿度（昼/夜）50%/70%；白天光照 9900 lx，12 h。不同处理条件下保持土壤湿润，并做好辣椒的病虫害管理。试验处理时间共 45 d，在辣椒幼苗期结束之际收获，并测量试验数据。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标 选用精度为 0.1 cm 的皮尺测量株高、主茎高、冠幅、叶长和叶宽，用精度为 0.02 μm 游标卡尺测量茎粗，使用叶面图像分析仪（EPSON）扫描得到叶面积和叶周长。使用扫描仪（EPSON V700）对每个处理的根系进行扫描，并使用 Win-RHIZO 软件对扫描得到的根系图像进行

分析，得到辣椒根系总根长、主根直径、根表面积、根体积、根尖数和分叉数。

1.3.2 生物量 按根、茎、叶 3 部分收获辣椒样品，经 110 °C 杀青 15 min 后置入 75 °C 烘箱，连续 72 h 烘干后，用精确度为 0.01 g 的天平分别称量不同处理条件下辣椒根、茎、叶的生物量。

1.3.3 叶绿素含量 采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪测定叶片叶绿素相对含量（SPAD 值）。

1.3.4 元素含量 采用重铬酸钾容量法（即稀释热法）测定植物有机碳（C）含量。参照白晓珂^[14]的方法，采用凯氏定氮法测定全氮含量。采用分光光度法测定全磷含量，消煮方法同 N 含量测定。采用分光光度法测定金属元素含量，采取硝酸—高氯酸消煮法。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 进行统计分析。在进行方差分析（ANOVA）前，对所有统计数据进行正态性检验。采用一元方差分析（One-Way ANOVA）对各处理间均值之间的差异通过 Duncan 检验法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒形态生长的影响

2.1.1 对地下部形态生长的影响 单独 CO₂ 加富或施加磷肥均有利于辣椒根系的生长，且本试验中表现为 CO₂ 加富对辣椒根系生长的促进作用更大（表 2）。自然 CO₂ 浓度条件下，随施磷量的增加，总根长、主根直径、根表面积、根体积、根尖数和分叉数显著增加，相比 CK，CH 处理的增幅分别为 61.23%、16.16%、30.54%、27.15%、130.20% 和 101.95%。CO₂ 加富条件下，随施磷量的增加，总根长、主根直径、根表面积、根体积显著增加，在 250 mg/kg 时达到最大，根尖数和分叉数则在 50 mg/kg 时达到最大。供磷水平相同时，总根长、主根直径、根表面积、根体积均随 CO₂ 浓度升高而显著增加，施磷量为 0、50 mg/kg 时，根尖数和分叉数随 CO₂ 浓度升高显著增加，而施磷量为 250 mg/kg 时，显著降低。

2.1.2 对地上部形态生长的影响 单独 CO₂ 加富或施加磷肥均可促进辣椒的地上部生长，且各指标均在 CO₂ 加富、施加 250 mg/kg 磷肥时达到最大值（表 3）。2 个 CO₂ 浓度处理下，株高、茎粗、冠

表 2 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒根系形态的影响

Table 2 Effects of CO₂ enrichment and applying phosphorus fertilizer on root morphology of *C. annuum* L.

处理	总根长	主根直径	根表面积	根体积	根尖数	分叉数
Treatment	Total root length (cm)	Taproot diameter (mm)	Root surface area (cm ²)	Root volume (cm ³)	Number of root tips	Number of bifurcations
CK	1541.75±117.22d	0.53±0.03d	305.71±14.61d	5.09±0.42d	5335.33±55.63e	23 930.33±1383.46e
CM	1866.54±62.50c	0.60±0.03c	399.09±11.68c	6.34±0.63c	8372.33±126.50d	30 698.67±910.47d
CH	2485.72±79.70ab	0.62±0.03c	392.78±7.23c	6.47±0.37c	12 282.00±778.53a	48 327.00±612.77a
EK	1927.81±57.73c	0.67±0.06b	412.24±20.26c	6.34±0.62c	9892.00±389.91b	30 906.33±1431.80d
EM	2396.90±108.52b	0.69±0.01b	474.32±56.08b	8.23±0.66b	10 922.33±1115.61bc	36 300.67±606.31b
EH	2593.86±109.36a	0.79±0.05a	579.24±25.13a	9.69±0.48a	9435.44±2299.85c	35 335.72±8171.19c

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

表 3 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒地上部形态指标的影响

Table 3 Effects of CO₂ enrichment and applying phosphorus fertilizer on shoot morphological indices of *C. annuum* L.

处理	株高	茎粗	主茎高	冠幅	叶长	叶宽	叶面积	叶周长
Treatment	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Main stem height (cm)	Crown width (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf area (cm ²)	Leaf circumference (cm)
CK	21.42±3.40e	4.24±0.22d	13.52±1.21b	19.10±1.77e	7.23±0.87	3.04±0.27	11.78±1.38	18.69±1.72
CM	23.74±3.41de	4.87±0.27c	14.00±2.21b	20.84±1.60de	8.27±1.43	3.36±0.04	15.14±1.29	21.91±1.91
CH	25.84±1.81cd	4.91±0.45c	14.64±1.28ab	23.20±2.34cd	8.44±1.73	3.61±0.12	17.90±2.06	23.38±1.14
EK	28.14±3.01bc	5.54±0.33b	14.98±0.64ab	25.24±3.89bc	7.31±0.69	3.41±0.10	14.89±0.69	20.60±0.47
EM	30.00±3.37b	5.86±0.43b	16.16±1.25a	27.07±2.67b	9.36±0.61	3.70±0.22	18.59±1.89	24.29±0.82
EH	35.14±5.21a	6.33±0.29a	16.28±0.91a	31.20±20.9a	11.33±0.12	4.19±0.17	25.65±1.75	30.00±1.22

幅在 250 mg/kg P 水平下显著增加，供磷水平对主茎高无显著影响。自然 CO₂ 浓度条件下，叶长、叶宽、叶面积、叶周长随供磷水平升高而显著增加，与 CK 相比，CH 处理的增幅分别为 16.74%、18.75%、51.95%、25.09%。CO₂ 加富条件下，随施磷量的增加，叶长、叶宽、叶面积、叶周长显著增大，与 EK 相比，EH 处理的增幅分别为 54.99%、22.87%、72.26%、45.63%。供磷水平相同时，CO₂ 加富处理株高、茎粗、冠幅、叶宽、叶面积均显著增大，主茎高在 50 mg/kg P 水平下显著增大，叶长、叶周长在 250 mg/kg P 水平下显著增加。

2.2 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒生物量积累的影响

CO₂ 加富和施加磷肥均显著增加辣椒根、茎、叶及总生物量（表 4）。自然 CO₂ 浓度条件下，施加磷肥后，根、茎、叶及总生物量显著增加，与 CK 相比，CH 处理的增幅分别为 56.94%、70.00%、29.03%、44.67%。CO₂ 加富条件下，施加磷肥，根、茎、叶及总生物量显著增加，与 EK 相比，EH 处理的增幅分别为 45.92%、81.70%、61.17%、63.81%。供磷水平相同时，无论供磷量多少，CO₂ 加富显著增加根、茎、叶及总生物量。CO₂ 加富与施加磷肥互作对根、茎及总生物量的影响一致，均表现为 CK<CM<CH<EK<EM<EH，叶生物量表现为 CK<CM<EK<CH<EM<EH。

表 4 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒生物量积累的影响

Table 4 Effects of CO₂ enrichment and applying phosphorus fertilizer on biomass accumulation of *C. annuum* L. g

处理	根生物量	茎生物量	叶生物量	总生物量
Treatment	Root biomass	Stem biomass	Leaf biomass	Total biomass
CK	0.72±0.27d	0.80±0.08e	1.86±0.09d	3.38±0.38e
CM	1.06±0.15cd	1.25±0.08d	2.26±0.05c	4.57±0.15d
CH	1.13±0.26cd	1.36±0.10d	2.40±0.18c	4.89±0.36d
EK	1.43±0.41bc	1.79±0.10c	2.35±0.17c	5.57±0.48c
EM	1.69±0.49ab	2.08±0.12b	2.66±0.12b	6.43±0.41b
EH	2.09±0.32a	3.28±0.06a	3.78±0.06a	9.15±0.36a

2.3 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒大量元素含量的影响

如表 5 所示，自然 CO₂ 浓度条件下，随施磷量的增加，根中的 C、P、K 含量逐渐增加，N 含量在 50 mg/kg 时达到最大；茎中 C 含量逐渐增加，N 含量无显著变化，P 含量显著增加，K 含量在 50 mg/kg 时最小；叶中 C、K 含量无显著变化，N 含量显著减少，P 含量显著增加。CO₂ 加富处理下，随施磷量的增加，根中 C 含量无显著变化，N 含量呈减少趋势，P 含量逐渐增加，K 含量在 50 mg/kg 时最大；茎中 C 含量无显著变化，与不施磷相比，N 含量在 50 mg/kg 时显著增加，P 含量小幅增加，K 含量显著减少；叶中 C 含量无显著变化，N、P 含量在 50 mg/kg 时最大，K 含量逐渐减少。供磷水平相同时，CO₂ 加富，根中 C 含量显著增加，N、P、K

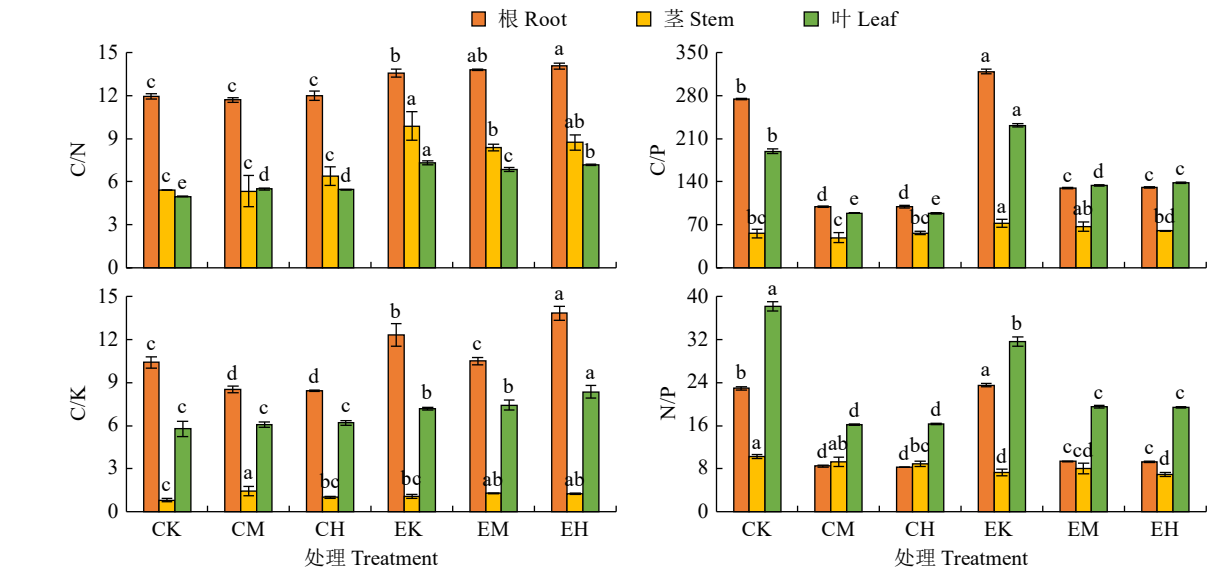
表 5 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒 C、N、P、K 含量的影响
Table 5 Effects of CO₂ enrichment and applying phosphorus fertilizer on C, N, P and K contents of *C. annuum* L. g/kg

器官 Organ	处理 Treatment	C	N	P	K
根 Root	CK	393.79±1.79c	32.94±0.65b	1.44±0.01c	37.84±1.26b
	CM	404.26±0.41b	34.54±0.49a	4.07±0.05a	47.41±1.17a
	CH	408.47±7.28b	34.11±0.31a	4.10±0.03a	48.50±0.66a
	EK	419.82±3.13a	30.95±0.85c	1.32±0.03d	34.17±1.97c
	EM	416.51±2.08a	30.21±0.18cd	3.22±0.04b	39.69±1.16b
	EH	420.88±2.34a	29.95±0.28d	3.23±0.02b	30.45±1.27d
茎 Stem	CK	60.78±6.70b	11.24±0.74a	1.09±0.04bc	75.94±3.69a
	CM	63.87±10.10ab	12.09±1.09a	1.31±0.02a	44.58±3.23d
	CH	75.66±5.84a	11.86±0.35a	1.34±0.04a	74.75±0.92a
	EK	73.75±6.43a	7.47±0.13c	1.03±0.07c	68.14±3.41b
	EM	74.21±3.20a	8.86±0.13b	1.12±0.13bc	57.98±3.02c
	EH	71.14±1.60ab	8.16±0.35bc	1.18±0.02b	56.70±1.65c
叶 Leaf	CK	425.42±0.41c	85.77±0.54a	2.25±0.04d	74.11±7.13a
	CM	430.58±0.88bc	78.46±1.12b	4.84±0.03a	70.96±1.79a
	CH	430.93±1.70bc	79.16±0.22b	4.85±0.04a	69.68±2.16a
	EK	434.49±5.08ab	59.39±0.46c	1.88±0.04e	60.32±1.26b
	EM	440.06±7.80a	64.14±0.23c	3.29±0.04b	59.23±1.71b
	EH	438.52±4.83ab	61.29±0.33d	3.17±0.03c	52.54±3.21c

含量显著减少；茎中 C 含量在不施磷时显著增加，N 含量显著减少，P 含量在供磷水平为 50 和 250 mg/kg 时显著减少，K 含量在 0 和 250 mg/kg 时显著减少；叶中 C 含量增加，N、P、K 含量显著减少。

2.4 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒大量元素生态化学计量比的影响

由图 1 可知，自然 CO₂ 浓度下，与 CK 相比，施加磷肥后辣椒根、茎 C/N 无显著变化，叶 C/N 显著增大；根 C/K 显著降低，茎 C/K 增大，叶 C/K 无显著变化。CO₂ 加富处理下，随施磷量的增加，根 C/N 呈增加趋势，茎、叶 C/N 先减后增；根 C/K 在 50 mg/kg 时最小，茎 C/K 小幅增大，未达显著水平，叶 C/K 仅在供磷水平为 250 mg/kg 时显著增大。2 个 CO₂ 浓度处理下，与 CK 相比，施加磷肥后根、叶 C/P 显著降低，茎 C/P 无显著变化，茎 C/P 在 CO₂ 加富处理下随施磷量的增加逐渐减少；根、叶 N/P 显著降低，茎 N/P 在自然 CO₂ 浓度下随施磷量



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at the $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒生态化学计量比的影响

Fig.1 Effects of CO₂ enrichment and applying phosphorus fertilizer on ecological stoichiometric ratio of *C. annuum* L.

的增加逐渐减小，在 CO₂ 加富时无显著变化。
供磷水平相同时，CO₂ 加富处理下根、茎、叶 C/N 显著增大；根、叶 C/K 显著增大，CO₂ 浓度变化对茎 C/K 无显著影响；根、叶 C/P 显著增大；茎 C/P 在 0 和 50 mg/kg 供磷水平时显著增大；根、茎 N/P 显著增大；叶 N/P 在不施磷肥时显著降低，在供磷水平为 50 和 250 mg/kg 时显著增大。与 CK 相

比，CO₂ 加富与施加磷肥交互处理下根、茎、叶 C/N 显著增大；茎、叶 C/K 均显著降低；根、叶 C/P 显著降低，茎 C/P 无显著变化；根、茎、叶 N/P 均显著降低。

2.5 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒中、微量元素含量的影响

由表 6 可知，随供磷水平增加，辣椒整体 Ca、

Mg、Fe、Zn 含量增加，Mn 含量减少。自然 CO₂ 浓度处理下，根中 Mg、Fe 含量显著增加，Mn 含量显著减少；茎中 Ca、Mg、Fe 含量显著增加；叶中 Ca 含量显著减少，Mn 含量持续增加。CO₂ 加富处理下，根、叶中 Ca、Mg 含量无显著变化，Fe、Mn、Zn 含量在 50 mg/kg P 时显著增加，在 250 mg/kg 时显著减少，叶中 Fe、Mn 含量增加，Zn 含量显著降低；茎中 Ca 含量在 250 mg/kg P 时显著减少，Fe 含量显著减少，Mn 含量在不施磷时显著减少，另

外 2 个施磷水平下显著增加，Zn 含量与 Mn 相反。单独 CO₂ 加富，整体上增加辣椒 Mg、Fe、Mn 和 Zn 含量，减少 Ca 含量；根中 Ca 含量不施磷时显著增加，施磷后显著减少，Mg 含量不施磷时显著增加，高磷下显著减少，Fe 含量显著减少，Mn 含量在不施磷时显著减少，施磷后显著增加；茎中 Ca、Mg 含量在不施磷和高磷处理下显著减少，Fe、Mn、Zn 含量均显著增加；在不施磷时，叶中 Ca 含量显著减少，Mg 含量显著增加，叶中 Fe、Zn

表 6 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn 含量的影响
Table 6 Effects of CO₂ enrichment and applying phosphorus fertilizer on Ca, Mg, Fe, Mn and Zn contents of *C. annuum* L.

器官 Organ	处理 Treatment	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
根 Root	CK	17.51±0.47c	3.42±0.59c	942.09±11.28d	1165.95±32.53a	509.59±2.61c
	CM	28.54±0.25a	4.46±0.05b	1224.20±9.33b	996.30±17.24bc	449.47±5.24d
	CH	25.43±0.77b	6.02±0.22a	1581.59±15.06a	963.58±29.55c	624.86±4.55b
	EK	24.45±1.88b	4.55±0.69b	773.23±11.96e	963.04±4.76c	394.43±12.12e
	EM	25.15±1.63b	4.82±0.67b	986.48±11.57c	1159.97±29.64a	764.14±49.34a
	EH	25.26±1.75b	4.66±0.47b	922.18±24.29d	1036.28±14.43b	461.33±8.66d
茎 Stem	CK	17.93±0.18b	6.47±0.50b	153.20±4.23f	368.32±8.25e	134.10±11.70e
	CM	12.78±0.79c	5.77±0.28c	339.90±11.60e	316.63±3.74f	126.66±4.99e
	CH	20.43±0.07a	7.42±0.37a	387.42±7.90d	583.24±9.02b	202.04±7.36d
	EK	13.50±0.39c	5.50±0.07c	844.43±5.88b	471.72±18.87c	343.03±13.40c
	EM	13.08±0.96c	5.46±0.33c	678.45±10.38c	411.05±12.12d	885.77±7.76b
	EH	11.20±0.41d	5.44±0.06c	931.09±4.11a	768.94±17.96a	912.48±4.86a
叶 Leaf	CK	22.99±2.61a	6.98±0.17c	230.92±6.08a	631.69±6.42d	367.67±8.66b
	CM	19.71±0.66b	7.54±0.37a	165.55±1.90c	665.50±3.43c	429.89±11.66a
	CH	19.64±0.42b	7.31±0.29ab	215.09±2.44b	739.34±17.39b	274.90±1.54c
	EK	19.18±0.89b	7.54±0.36a	82.86±2.79e	735.86±13.40b	273.29±1.37c
	EM	19.35±0.47b	7.57±0.23a	91.46±4.77d	753.60±7.68b	237.84±10.24d
	EH	17.79±0.44b	7.18±0.08ab	86.81±4.61de	993.15±6.31a	244.49±5.90d

含量显著降低，Mn 含量显著增加。

3 讨论

3.1 CO₂ 加富和施加磷肥对辣椒形态生长的影响

植株的生长发育与形态构成受植物个体与环境共同作用的影响，植株通过改变自身形态特征以适应环境因素的变化^[15]。本研究中，在供磷水平相同时，CO₂ 加富处理下，辣椒总根长、主根直径、根表面积和根体积显著增大，其原因在于 CO₂ 浓度升高可增强植株的光合作用，促进植株生长，对养分的需求也因此增大，为了获取更多的养分，植株将调动更多的碳同化产物运输到根系，促进根系生长。有研究^[16]表明，环境 CO₂ 浓度升高，促进植物生长，如株高、茎粗等的增大^[17-18]，还会对叶的生长和生理功能起促进作用。本研究中，CO₂ 加富处

理下，辣椒株高、茎粗和冠幅显著增大，与高宇等^[19]对日光温室中朝研牛角椒的研究结果一致，CO₂ 加富能显著增大辣椒叶宽和叶面积，叶长和叶周长也呈增大趋势，这可能是因为 CO₂ 浓度升高促进植物细胞增殖、细胞增长等基因的表达，使叶片生长速率增大^[20]。

在本研究中，CO₂ 浓度相同的条件下，随施磷量的增加，辣椒株高、茎粗、冠幅和主茎高均呈增加趋势，与任朝辉等^[21]对辣椒骄阳 1 号的研究结果类似，这是因为施加磷肥增加了辣椒生长所需的营养元素，进而促进植株的生长。研究^[22]表明，合理施肥可增大植物叶面积。本研究发现，与不施磷相比，施加磷肥后，叶长、叶宽、叶面积和叶周长有不同程度的增大，与刘士玲等^[23]的研究结果类似，可能是因为磷素供应充足时，可加速细胞的生长与

分裂,进而促进叶片生长,叶面积增大,CO₂浓度倍增与施加磷肥的交互作用使叶片生长及细胞分裂速率加快,进一步增大叶面积。

3.2 CO₂加富和施加磷肥对辣椒生物量积累的影响

生物量在不同器官的积累一定程度上反映了植物对环境变化的响应和适应策略,受基因、生长阶段等的影响,同时也受外界环境的限制^[24]。本研究中,供磷水平相同时,CO₂加富处理后,辣椒根、茎、叶及总生物量均显著增加,这是因为CO₂作为植物光合作用的底物,其浓度升高,会加快辣椒光合速率,形成更多的光合产物^[25],光合产物分配至植物不同部位,使得植物各器官生物量增加,进而提高植株总生物量^[26-27]。施加磷肥能够促进辣椒生物量积累,这是由于施磷使得土壤中养分充足,促进辣椒叶片生长,增强光合作用,且施磷促进辣椒对C、N的吸收,辣椒生长旺盛,有机物积累,生物量增加。

3.3 CO₂加富和施加磷肥对辣椒大量元素含量及生态化学计量比的影响

C、N、P、K是植物生长必需的矿质元素,也是植物生长发育中常见的限制性元素^[28]。本研究发现,与CK相比,CO₂加富后,辣椒根、茎、叶中C含量显著增加,N、P、K含量显著降低,其原因可能有以下2点:一是植物叶片中生物量和C含量的增加可通过稀释效应导致矿物质浓度降低^[29];二是CO₂浓度升高会降低植物的蒸腾速率,进而减少植株对多种矿质元素的吸收^[30]。植物生态化学计量比中C/N和C/P的大小可表征植物同化能力的强弱,能够体现其养分利用率的高低^[31]。王佳等^[32]研究表明,CO₂浓度升高,小麦根、茎、叶C/N显著增加,本研究得到一致的结果,且根、茎、叶C/P、C/K也显著增加,这主要是因为CO₂加富后,植株吸收的C含量显著增加,且高CO₂浓度抑制辣椒各器官对N、P、K的吸收。

3.4 CO₂加富和施加磷肥对辣椒中、微量元素含量的影响

中、微量元素在植物体内含量低,但也是植物生长过程中必不可少的营养元素,微量元素的缺乏会产生相应的缺素症,并严重影响植物生长^[33]。本研究中,CO₂加富和施加磷肥及二者互作均促进辣椒整株对Mg、Fe、Zn的吸收,这是因为CO₂浓度升高和施加磷肥均促进辣椒根系生长,增大吸收面积,增加对土壤中营养元素的吸收。单独CO₂加富

处理下,辣椒根中Ca含量显著增加,茎、叶中Ca含量显著降低,这可能是由于蒸腾作用减弱,使根系吸收的Ca²⁺不能及时向地上部转运而滞留在根部。CO₂浓度升高可降低辣椒Ca含量,而施磷增加辣椒Ca含量,二者互作表现为抑制Ca吸收,表明CO₂浓度升高对辣椒微量元素吸收占主导地位。

4 结论

CO₂加富和施加磷肥均可促进辣椒形态生长及生物量积累,CO₂加富处理促进植株对C的吸收,施磷还促进植株P吸收及茎、叶对N的吸收,CO₂浓度倍增和施磷处理及二者互作均促进辣椒对中、微量元素的吸收。

参考文献

- [1] 袁潮,杨文艳,孙卓,等. 大气CO₂浓度年际变化及其对农业的影响. 陕西农业科学, 2020, 66(9): 91-96.
- [2] Plattner G K. IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Journal of Romance Studies, 2014, 4(2): 85-88.
- [3] 张凯,王润元,王鹤龄,等. CO₂浓度升高对半干旱区春小麦生长发育及产量影响的试验研究. 干旱气象, 2017, 35(2): 306-312.
- [4] 王娇,李萍,宗毓铮,等. 大气CO₂浓度和气温升高对玉米灌浆期碳氮代谢的影响. 中国生态农业学报, 2023, 31(2): 325-335.
- [5] 熊露露. CO₂浓度和温度升高对薏苡生理生态特性的影响. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [6] Madhu M, Hatfield J L. Dynamics of plant root growth under increased atmospheric carbon dioxide. Agronomy Journal, 2013, 105: 657-669.
- [7] 黄兴敏,邓小红,彭海兰,等. CO₂浓度和温度升高对吉祥草生理生态特性的影响. 北方园艺, 2022(14): 101-108.
- [8] 邓小红. CO₂浓度、温度升高和氮沉降对吉祥草生理生态特性的影响. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [9] 王冰. 低磷条件下SAMS1对番茄根系生长和磷素利用的作用效果研究. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [10] 肖雨萌. 磷素营养水平对不同生育期菊芋生长及光合特性的影响. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [11] Alewell C, Ringeval B, Ballabio C, et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. Nature Communications, 2020, 11(1): 4546.
- [12] 杜涛. 贵州从“辣椒大省”迈向“辣椒强省”. 中国食品报, 2021-09-27(002).
- [13] 王文富. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [14] 白晓珂. 氮添加、增温和降雨增加对黄土高原紫花苜蓿叶片化学计量学特征的影响. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [15] 姬拉拉. 薏苡(*Coix lacryma-jobi*)对CO₂浓度升高与氮肥施加的生理响应研究. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [16] Gielen B, Calfapietra C, Claus A, et al. Crown architecture of *Populus* spp. is differentially modified by free-air CO₂ enrichment (POPFACE). New Phytologist, 2002, 153(1): 91-99.
- [17] 胡晓雪,宗毓铮,张仟雨,等. CO₂浓度升高对万寿菊生长发育与光合生理的影响. 核农学报, 2017, 31(6): 1210-1216.

- [18] 袁蕊, 袁磊云, 郝兴宇, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对辣椒光合作用及相关生理特性的影响. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3510-3516.
- [19] 高宇, 崔世茂, 宋阳, 等. CO₂ 加富对温室辣椒幼苗生长及光合特性的影响. 作物杂志, 2017(5): 80-84.
- [20] Ainsworth E A, Rogers A, Vodkin L O, et al. The effects of elevated CO₂ concentration on soybean gene expression. An analysis of growing and mature leaves. Plant Physiology, 2006, 142(1): 135-147.
- [21] 任朝辉, 田浩, 廖卫琴, 等. 磷肥不同施用量对辣椒生长农艺性状及产量的影响. 辣椒杂志, 2021, 19(1): 10-13.
- [22] Hada N, Wasnik V K, Bhadauria S S, et al. Influence of balanced nutrition, seed rate and plant geometry on fodder maize in south-eastern Rajasthan. Range Management and Agroforestry, 2017, 37(2): 243-247.
- [23] 刘士玲, 陈琳, 庞圣江, 等. 施 N、P 肥对西南桦无性系幼苗生长及叶片 N、P 含量的影响. 华南农业大学学报, 2020, 41(2): 111-116.
- [24] 肖列. CO₂ 浓度升高、干旱胁迫和施氮对白羊草生长和根际微生物的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [25] 圣倩倩, 高顺, 顾舒文, 等. CO₂ 浓度升高对植物生理生化影响的研究进展. 西部林业科学, 2021, 50(3): 171-176.
- [26] Padraic J F, Jeremy H, Mark G M. Natural genetic variation in plant photosynthesis. Trends in Plant Science, 2011, 16(6): 327-335.
- [27] 麻雪艳, 周广胜. 基于光合产物动态分配的玉米生物量模拟. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2292-2300.
- [28] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [29] Taub D R, Wang X Z. Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO₂? A critical examination of the hypotheses. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(11): 1365-1374.
- [30] 陈雨娇, 李汛, 田兴军, 等. CO₂ 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): 1129-1138.
- [31] 依里帆·艾克拜尔江, 李进, 庄伟伟. 两种荒漠豆科植物化学计量特征与生境土壤因子的关系. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1384-1395.
- [32] 王佳, 冯晓森, 卞书贞, 等. 模拟降雨量变化与 CO₂ 浓度升高对小麦光合特性和碳氮特征的影响. 水土保持研究, 2020, 27(1): 328-334.
- [33] 王雪梅, 闫帮国, 王梓丞, 等. 不同土壤和微量元素对车桑子幼苗生长的影响. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(5): 695-704.

Effects of CO₂ Enrichment and Phosphorus Level on Seedling Growth and Nutrient Element Absorption of *Capsicum annuum* L.

Lei Yun, Liu Yueyan, Wang Jianjian

(College of Life Sciences, Guizhou University/Institute of Agro-Bioengineering/Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract In order to explore the effects of CO₂ enrichment, phosphorus supply level and their interaction on the seedling growth and nutrient element absorption of *Capsicum annuum* L., Yanjiao 425 was used as the test material, and the morphological indexes, biomass and nutrient element content indexes of *C. annuum* L. were determined under the treatment of two CO₂ concentrations (natural CO₂ concentration: 400±30 μmol/mol, CO₂ enrichment: 800±30 μmol/mol) and three phosphorus supply levels (0, 50, and 250 mg/kg P). The results showed that CO₂ enrichment alone, increasing phosphorus supply level alone, and their interaction all promoted the morphological growth and biomass accumulation of chili pepper. With CO₂ enrichment or increase of phosphorus supply level, the content of C in roots, stems and leaves of chili pepper increased significantly, while the contents of N and K decreased significantly. Phosphorus application also promoted the absorption of P by chili pepper. CO₂ enrichment could significantly increase C/N, C/K, C/P, N/P of chili pepper; the phosphorus supply level had no significant effect on C/N and C/K in all organs of chili pepper, and C/P and N/P were significantly reduced. Compared with CK, the interaction between CO₂ enrichment and the application of phosphorus fertilizer significantly increased the C/N, and significantly reduced the C/K, C/P and N/P of chili pepper. CO₂ enrichment could increase the overall contents of Mg, Fe, Mn, Zn in chili pepper, and reduce Ca content. Increasing phosphorus level could increase the overall contents of Ca, Mg, Fe and Zn in chili pepper and decrease Mn content. The interaction between CO₂ enrichment and increasing phosphorus level could promote the absorption of Mg, Fe, Mn, Zn and inhibit the absorption of Ca. In summary, in the actual production process, the CO₂ concentration can be appropriately increased, and the reasonable and appropriate application of phosphorus fertilizer is conducive to the growth of chili pepper and the absorption of nutrients in soil.

Key words CO₂ enrichment; Phosphorus fertilizer; Chili pepper; Growth; Nutrient element absorption