

张 萱, 罗文秀, 徐 萍, 等. CO₂浓度升高对灯盏花幼苗光合特性、抗氧化系统及有效成分积累的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 32-40.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.004

CO₂ 浓度升高对灯盏花幼苗光合特性、抗氧化系统及有效成分积累的影响

张 萱¹, 罗文秀¹, 徐 萍¹, 米 琪¹, 于梦雯¹, 王 丰¹, 欧征刚², 郑国伟¹, 陈 佳³
(1. 云南中医药大学中药学院, 云南 昆明 650500; 2. 普拉底乡人民政府农业综合服务中心, 云南 怒江 673501; 3. 云南中医药大学民族医药学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为探究 CO₂ 浓度对灯盏花生长发育的影响, 本研究以灯盏花为试验材料, 采用人工气候室调控 CO₂ 浓度, 设置 400 μmol/mol (CK) 和 800 μmol/mol (T) 两个处理, 处理 60 d 后, 系统测定幼苗气体交换参数、光合色素含量、渗透调节物质含量、有效成分含量、酶活性等指标。结果表明, 与 CK 相比, T 处理灯盏花气孔密度、气孔长度、蒸腾速率和气孔导度分别显著下降 19.43%、13.51%、69.09% 和 70.41% ($P < 0.05$), 胞间 CO₂ 浓度与水分利用率分别显著升高 85.60% 和 231.60% ($P < 0.05$)。表明高浓度 CO₂ 条件下, 灯盏花通过缩小或者关闭气孔以减少水分流失, 提升水分利用效率。与 CK 相比, T 处理丙二醛 (MDA) 含量和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性分别显著升高 145.74% 和 121.68% ($P < 0.05$), 超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性分别显著升高 40.66%、12.78% ($P < 0.05$), 谷胱甘肽还原酶 (GR) 与硝酸还原酶 (NR) 活性分别显著下降 62.53% 和 36.69% ($P < 0.05$)。表明 CO₂ 浓度升高通过降低光合色素含量、抑制氮同化关键酶活性对灯盏花造成氧化胁迫, 植株通过增强抗氧化酶活性减轻膜脂过氧化损伤。与 CK 相比, T 处理野黄芩苷、叶绿素 a、类胡萝卜素含量分别显著下降 25.26%、22.64%、27.87% ($P < 0.05$)。表明高浓度 CO₂ 条件下, 灯盏花有效成分含量显著降低。本研究结果为灯盏花适应性栽培提供了理论依据。

关键词: 灯盏花; CO₂浓度; 光合作用; 生理生化; 野黄芩苷

中图分类号: S681.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)01-0032-09

Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic characteristics, antioxidant system and active ingredient accumulation in *Erigeron breviscapus* (Vaniot) Hand.-Mazz seedlings

ZHANG Xuan¹, LUO Wenxiu¹, XU Ping¹, MI Qi¹, YU Mengwen¹, WANG Feng¹, OU Zhenggang², ZHENG Guowei¹, CHEN Jia³

(1. School of Chinese Materia Medica, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China; 2. Agricultural Comprehensive Service Center, People's Government of Puladi Township, Nujiang 673501, China; 3. College of Ethnomedicine, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China)

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82360751); 云南中医药大学高层次人才计划项目 (2019YZG07); 云南青年精英人才项目 (YNWR-QNBJ-2020-289)

作者简介: 张 萱 (1995-), 女, 贵州剑河人, 硕士研究生, 研究方向为药用植物栽培生理学。(E-mail) 2428892896@qq.com

通讯作者: 郑国伟, (E-mail) 2633822198@qq.com; 陈 佳, (E-mail) chenjia@ynutcm.edu.cn

Abstract: To investigate the effects of CO₂ concentration on the growth and development of *Erigeron breviscapus*, this study used *E. breviscapus* as the experimental material and regulated CO₂ concentration in an artificial climate chamber. Two treatments were set up, namely 400 μmol/mol (CK) and 800 μmol/mol (T). After 60 days of

treatment, a systematic determination was conducted on various indices of the seedlings, including gas exchange parameters, photosynthetic pigment content, osmotic adjustment substance content, active ingredient content, and enzyme activity. The results showed that compared with CK, the stomatal density, stomatal length, transpiration rate and stomatal conductance of *E. breviscapus* under T treatment decreased significantly by 19.43%, 13.51%, 69.09% and 70.41%, respectively ($P < 0.05$), while the intercellular CO₂ concentration and water use efficiency increased significantly by 85.60% and 231.60%, respectively ($P < 0.05$). These findings indicated that under elevated CO₂ conditions, *E. breviscapus* reduced water loss and improved water use efficiency by narrowing or closing stomata. Compared with CK, the malondialdehyde (MDA) content and ascorbate peroxidase (APX) activity under T treatment increased significantly by 145.74% and 121.68%, respectively ($P < 0.05$), the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) increased significantly by 40.66% and 12.78%, respectively ($P < 0.05$). Whereas the activities of glutathione reductase (GR) and nitrate reductase (NR) decreased significantly by 62.53% and 36.69%, respectively ($P < 0.05$). This suggested that elevated CO₂ concentration induces oxidative stress in *E. breviscapus* by reducing photosynthetic pigment content and inhibiting the activity of key enzymes involved in nitrogen assimilation, and the plants alleviate membrane lipid peroxidation damage by enhancing the activity of antioxidant enzymes. In addition, compared with CK, the contents of scutellarin, chlorophyll a and carotenoids under T treatment decreased significantly by 25.26%, 22.64% and 27.87%, respectively ($P < 0.05$), indicating that the content of active ingredients in *E. breviscapus* decreased significantly under elevated CO₂ conditions. Overall, the results of this study provide a theoretical basis for the adaptive cultivation of *Erigeron breviscapus*.

Key words: *Erigeron breviscapus* (Vaniot) Hand.-Mazz; CO₂ concentration; photosynthesis; physiology and biochemistry; scutellarin

CO₂ 是光合作用暗反应阶段的关键原料, 适量增加 CO₂ 浓度可以提高植物光合作用速率, 进而促进其生长发育^[1-4]。研究表明, CO₂ 浓度升高可显著提高枸杞幼苗的净光合速率和水分利用效率, 但随处理时间延长, 枸杞幼苗光饱和点、蒸腾速率和气孔导度呈下降趋势^[5]。张茜茜等^[1] 研究表明, CO₂ 浓度升高使冬小麦叶片近轴面气孔面积、长度、宽度和周长显著减小。短期高浓度 CO₂ 处理使滇重楼皂苷 VII 和皂苷 H 积累量显著提高^[6]。高浓度 CO₂ 处理使霍山石斛药用部位茎的产量及多糖含量显著提高, 生物碱含量显著降低^[7]。高浓度 CO₂ 能够促进吉祥草叶绿素的合成^[8]。高浓度 CO₂ 处理使虎耳草的丙二醛 (MDA) 含量显著下降, 可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量及超氧化物歧化酶 (SOD) 活性均显著升高^[9]。

灯盏花 [*Erigeron breviscapus* (vant.) Hand. Mazz.] 别名短葶飞蓬或灯盏细辛, 是菊科飞蓬属多年生草本植物, 主要分布于中国西南地区^[10]。研究表明, 灯盏花富含黄酮类和咖啡酰奎宁酸类等多种化学成分, 其具有广泛的药理作用, 在心脑血管保护、神经保护、抗癌、抗氧化以及抗炎等方面均有突出表现^[11-14]。在这些化学成分中, 黄酮类物质是灯盏花的主要有效成分, 其中以灯盏甲素和灯盏乙

素为主^[15]。目前, 关于灯盏花的研究主要集中于施肥管理^[16]、种子萌发^[17]、病虫害胁迫^[18] 等方面, 而大气环境因素对其影响的研究较少。本研究拟测定不同 CO₂ 浓度条件下灯盏花气体交换参数、光合色素含量、渗透调节物质含量、酶活性、光合生理生化过程的变化, 分析 CO₂ 浓度对其光合生理生化过程的影响, 进而解析灯盏花对高浓度 CO₂ 的光合响应特征与适应机制, 以期对灯盏花的栽培管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设计

灯盏花种子采集于云南省曲靖市宣威市热水镇, 播种于云南中医药大学教学实验区 (102.82°E, 24.84°N), 该地海拔 1 887.60 m。选取长势一致且健康的灯盏花幼苗移栽至规格为长 10.50 cm × 宽 12.00 cm × 高 13.00 cm 的育苗盆中, 每盆定植 3 株。栽培基质采用腐殖土与红土以 5 : 1 的体积比混合配制。将移栽后的灯盏花随机分为 2 组, 每组 108 株。先置于育苗环境中适应生长 7 d, 随后转移至人工气候室培养 60 d。人工气候室培养条件设置如下: 昼/夜温度 22 °C / 18 °C, 光照度 200 μmol / (m² · s), 相对湿度 60%, 光周期 12 h 光照 / 12 h 黑暗。培养期间设置 2 个 CO₂ 含量处理, 分别为 CO₂ 含量 400 μmol / mol

(CK)、CO₂含量 800 μmol/mol(T)。

1.2 气体交换参数测定方法

选择 5 株长势一致的灯盏花,以植株自上而下第 4 张完全展开的成熟叶片为测定对象,避开叶脉,利用便携式光合-荧光测量仪(型号 LI-6800,美国 LI-COR 公司产品)测定灯盏花叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO₂浓度(C_i)、气孔导度(G_s),根据测定值计算灯盏花叶片的水分利用效率(WUE)。

1.3 气孔特征测定方法

参照郑云普等^[19]的方法测量气孔特征,取灯盏花完整叶片浸泡在福尔马林-乙酸-乙醇固定液中进行固定。取叶片下表皮于显微镜下观察,记录 5 个视野并拍照,利用 Image 软件测量并计算叶片气孔面积、气孔密度、气孔长度和气孔宽度。

1.4 光合色素含量测定方法

采用 *N,N*-二甲基甲酰胺法^[20]测定灯盏花叶片光合色素含量。具体步骤如下:取 5.0 g 叶片完全浸泡于 *N,N*-二甲基甲酰胺中,放置于 4 °C 冰箱避光浸提至叶片完全褪色。利用紫外-可见分光光度计分别在 480 nm、647 nm、664 nm 波长下测定提取液的吸光度,根据 Lichtenthaler 公式计算叶片类胡萝卜素、叶绿素 b、叶绿素 a 和总叶绿素含量。

1.5 渗透调节物质含量测定方法

可溶性糖含量测定采用蒽酮硫酸法^[21];脯氨酸含量采用茚三酮法^[22]测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[23]测定;丙二醛含量采用 2-硫代巴比妥酸法^[24]测定。

1.6 酶活性测定方法

参照高俊凤^[25]提到的方法进行过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)及抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定。参照 Knörzer 等^[26]的方法测定谷胱甘肽还原酶(GR)活性,参照王三根^[27]的方法测定硝酸还原酶(NR)活性。

1.7 有效成分含量测定方法

称取野黄芩苷 3.20 mg、绿原酸 3.30 mg、异绿原酸 A 2.90 mg、异绿原酸 C 3.30 mg,加入 3 mL 纯甲醇溶解,定容至 5 mL,得到混合对照品溶液。称取灯盏花叶片粉末 15.00 mg,置于 15 mL 离心管中,加入 5 mL 纯甲醇,超声提取 30 min,室温静置冷却。5 000 r/min 离心 10 min,取上清液过滤,将滤液收集到液相小棕瓶中,得到供试品溶液。

参考李晓波等^[28]方法,采用高效液相色谱(HPLC)法测定灯盏花中有效成分含量。吸取混合对照品溶液与供试品溶液各 10 μL,注入高效液相色谱仪(HPLC)。色谱柱为 Horizon C₁₈/AR(5 μm, 250.0 mm×4.6 mm),流动相由乙腈(B相)和 0.3% 磷酸水溶液(A相)组成。梯度洗脱程序为:0~10 min,12%~15% B相;10~32 min,15% B相;32~33 min,15%~20% B相;33~60 min,20%~22% B相。柱温 30 °C,流速 1 mL/min,进样量 10 μL,检测波长分别为 335 nm(用于野黄芩苷含量测定)和 327 nm(用于绿原酸类物质含量检测)。

采用外标法计算样品中各有效成分含量,具体步骤如下:以各成分对照品含量(mg/mL)为横坐标(x)、对应峰面积为纵坐标(Y)绘制标准曲线,得到如表 1 所示的线性回归方程与相关系数。将供试品中野黄芩苷、绿原酸、异绿原酸 A 及异绿原酸 C 的峰面积代入相应回归方程,计算各成分在样品中的含量。

表 1 灯盏花有效成分的线性回归方程

Table 1 Linear regression equations for the active ingredients of *Erigeron breviscapus*

有效成分	回归方程	线性范围	相关系数
绿原酸	$Y = 23\ 043x - 17.352$	0.002 1~0.137 5	0.999 9
野黄芩苷	$Y = 25\ 743x - 204.54$	0.008 3~0.133 3	0.999 6
异绿原酸 A	$Y = 34\ 514x - 43.342$	0.001 9~0.120 8	0.999 8
异绿原酸 C	$Y = 37\ 705x - 64.799$	0.002 1~0.137 5	0.999 8

1.8 数据分析

利用 SPSS 19.0 软件分析试验数据,利用 GraphPad Prism 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 CO₂浓度升高对灯盏花植株表型和气孔特征的影响

如图 1 所示,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶边卷,地上部分和地下部分长度没有显著差异,但是 T 处理灯盏花根系数量多于 CK。

2.2 CO₂浓度升高对灯盏花植株表型和气孔特征的影响

如表 2 所示,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片气孔密度和气孔长度分别显著降低 19.43% 和 13.51% ($P < 0.05$)。



A: 400 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ (CK) 条件下植株的地上部形态; B: 800 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ (T) 条件下植株的地上部形态; C: 400 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ (左) 和 800 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ (右) 条件下植株的地上部形态。

图 1 CO₂ 浓度对灯盏花植株表型的影响

Fig.1 Effects of CO₂ concentration on the phenotype of *Erigeron breviscapus* plants

表 2 CO₂ 浓度对灯盏花气孔特征的影响

Table 2 Effects of CO₂ concentration on the stomatal characteristics of *Erigeron breviscapus*

处理	气孔密度 (个, 1 mm ²)	气孔长度 (μm)	气孔宽度 (μm)	气孔面积 (μm^2)
CK	86.09±13.39a	14.88±1.31a	5.57±0.91a	56.11±10.85a
T	69.36±10.69b	12.87±1.67b	4.99±1.06a	51.01±10.31a

CK: CO₂ 含量 400 $\mu\text{mol/mol}$; T: CO₂ 含量 800 $\mu\text{mol/mol}$ 。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 CO₂ 浓度对灯盏花气体交换参数的影响

如表 3 所示, 与 CK 相比, T 处理灯盏花叶片 C_i 与 WUE 分别显著升高 85.60% 和 231.40% ($P <$

0.05), T 处理灯盏花叶片 T_r 与 G_s 分别显著降低 69.09% 和 70.41% ($P < 0.05$)。

表 3 CO₂ 浓度对灯盏花气体交换参数的影响

Table 3 Effects of CO₂ concentration on the gas exchange parameters of *Erigeron breviscapus*

处理	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	C_i [mmol/mol]	G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	WUE ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)
CK	0.67±0a	0.55±0.05a	353.91±3.12b	31.43±2.72a	1.21±0.12b
T	0.69±0.06a	0.17±0.03b	656.85±21.52a	9.30±1.50b	4.01±0.71a

P_n : 净光合速率; T_r : 蒸腾速率; C_i : 胞间 CO₂ 浓度; G_s : 气孔导度; WUE : 水分利用效率。CK: CO₂ 含量 400 $\mu\text{mol/mol}$; T: CO₂ 含量 800 $\mu\text{mol/mol}$ 。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 CO₂ 浓度对灯盏花光合色素含量的影响

如表 4 所示, 叶绿素含量能够反映植物物质同化能力。与 CK 相比, T 处理灯盏花叶片叶绿素 a 与类胡萝卜素含量分别显著下降 22.64% 和 27.87% ($P < 0.05$)。T 处理灯盏花叶片叶绿素 b 和总叶绿素含量与 CK 相比没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 CO₂ 浓度对灯盏花渗透调节物质含量的影响

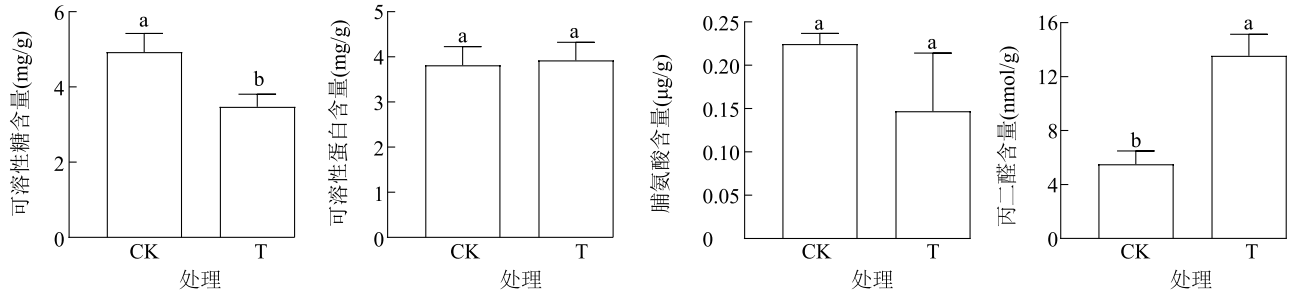
如图 2 所示, 与 CK 相比, T 处理灯盏花叶片可溶性糖含量显著降低 29.52% ($P < 0.05$), T 处理灯盏花叶片 MDA 含量显著升高 145.74% ($P < 0.05$)。T 处理脯氨酸和可溶性蛋白含量与 CK 相比没有显著差异 ($P > 0.05$)。

表 4 CO₂ 浓度对灯盏花光合色素含量的影响

Table 4 Effects of CO₂ concentration on the photosynthetic pigment content of *Erigeron breviscapus*

处理	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	总叶绿素含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)
CK	1.06±0.12a	0.39±0.15a	1.46±0.27a	53.29±6.96a
T	0.82±0.03b	0.23±0.03a	1.08±0.06a	38.44±2.08b

CK; CO₂ 含量 400 μmol/mol; T; CO₂ 含量 800 μmol/mol。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。



CK; CO₂ 含量 400 μmol/mol; T; CO₂ 含量 800 μmol/mol。图柱上不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。

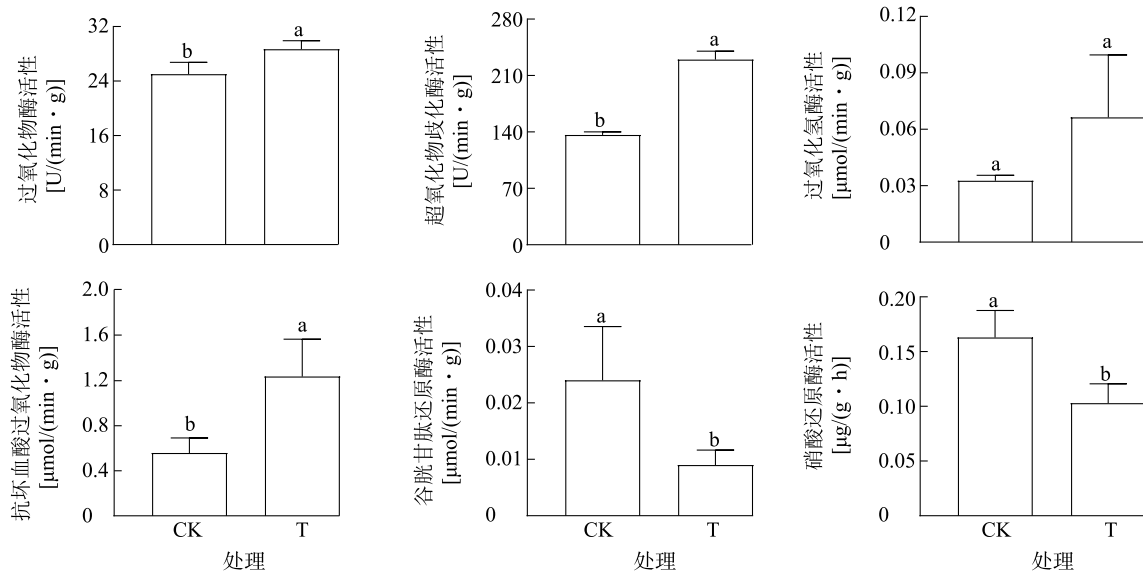
图 2 CO₂ 浓度对灯盏花渗透调节物质含量的影响

Fig.2 Effects of CO₂ concentration on the osmotic adjustment substance contents of *Erigeron breviscapus*

2.6 CO₂ 浓度对灯盏花酶活性的影响

如图 3 所示,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性分别显著升高 40.66%、

12.78% 和 121.68% (P<0.05), T 处理灯盏花叶片谷胱甘肽还原酶 (GR)、硝酸还原酶 (NR) 活性分别显著降低 62.53% 和 36.69% (P<0.05)。



CK; CO₂ 含量 400 μmol/mol; T; CO₂ 含量 800 μmol/mol。图柱上不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。

图 3 CO₂ 浓度对灯盏花酶活性的影响

Fig.3 Effects of CO₂ concentration on the enzyme activities of *Erigeron breviscapus*

2.7 CO₂ 浓度对灯盏花有效成分含量的影响

如表 5 所示,各处理灯盏花地上部分和地下部

分绿原酸与异绿原酸 C 含量没有显著差异。灯盏花地下部分未检测到野黄芩苷, T 处理灯盏花地上

部分野黄芩苷含量显著低于 CK ($P<0.05$)。CK 和 T 处理灯盏花地下部分异绿原酸 A 含量均显著高于

地上部分 ($P<0.05$)。与 CK 相比, T 处理灯盏花地上部分野黄芩苷含量显著下降 25.26% ($P<0.05$)。

表 5 CO₂浓度对灯盏花有效成分含量的影响

Table 5 Effects of CO₂ concentration on the active ingredient content of *Erigeron breviscapus*

处理	部位	绿原酸含量(%)	野黄芩苷含量(%)	异绿原酸 A 含量(%)	异绿原酸 C 含量(%)
CK	地上部分	0.09±0.02a	0.95±0.11a	0.12±0.02b	0.08±0.01a
	地下部分	0.12±0.03a	-	0.30±0.11a	0.09±0.01a
T	地上部分	0.09±0.02a	0.71±0.18b	0.17±0.06b	0.09±0.01a
	地下部分	0.11±0.01a	-	0.34±0.03a	0.09±0.01a

CK:CO₂含量 400 μmol/mol;T:CO₂含量 800 μmol/mol。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。-表示未检测到该数据。

2.8 灯盏花各指标间的相关性分析

如表 6 所示,灯盏花叶片气孔长度与净光合速率呈显著负相关($P<0.05$),气孔宽度与气孔密度、蒸腾速率、野黄芩苷含量呈显著负相关($P<0.05$)。灯盏花叶片蒸腾速率与气孔导度、GR 活性、绿原酸含量呈显著正相关($P<0.05$),与总叶绿素含量呈显著负相关($P<0.05$);灯盏花叶片胞间 CO₂浓度与水分利用率呈显著负相关($P<0.05$);气孔导度与总叶绿素含量呈显著负相关($P<0.05$),与绿原酸含量呈显著正相关($P<0.05$),与谷胱甘肽还原酶(GR)活性呈显著正相关($P<0.01$)。灯盏花叶片总叶绿素含量与谷胱甘肽还原酶(GR)活性、绿原酸含量、野黄芩苷含量呈显著负相关($P<0.05$),类胡萝卜素含量与野黄芩苷含量呈显著正相关($P<0.05$)。灯盏花叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性与过氧化氢酶(CAT)活性呈显著正相关($P<0.05$),谷胱甘肽还原酶(GR)活性与绿原酸含量呈显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论与结论

植物的生长发育与形态构建是植物个体与环境共同作用的结果,植株通过调控自身形态特征以适应环境的变化^[29]。前人研究表明,CO₂浓度升高可促进植物根系发育^[30]。本研究中,高浓度 CO₂处理使灯盏花根系数量增加。光合速率和蒸腾速率是影响植物有机物积累、水分调节及营养物质分配的关键生理指标。高浓度 CO₂处理可提高花生蒸腾速率和光合速率^[31]。随着高浓度 CO₂处理时间延长,小麦蒸腾速率下降幅度逐渐减小,甚至最终消失^[32]。本研究发现,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片 C_i与 WUE 分别显著升高 85.60%和 231.40% ($P<0.05$),T 处理灯盏花叶片 T_r与 G_s分别显著降低

69.09%和 70.41% ($P<0.05$)。表明高浓度 CO₂条件下,灯盏花通过缩小或者关闭气孔减少水分流失,提升水分利用效率。叶绿素含量能够反映植物叶片的光合作用能力^[33]。不同植物对高浓度 CO₂的响应存在差异;CO₂浓度升高使水稻剑叶叶绿素含量显著升高^[34],而使甜椒的光合色素含量降低^[35]。本研究中,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片叶绿素 a 与类胡萝卜素含量分别显著下降 22.64%和 27.87% ($P<0.05$)。

植物通过动态调整生理生化代谢来适应不良环境。丙二醛是细胞膜脂过氧化的标志性产物,是衡量植物逆境损伤程度的指标之一^[36-40]。本研究发现,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片可溶性糖含量显著降低 29.52% ($P<0.05$),T 处理灯盏花叶片 MDA 含量显著升高 145.74% ($P<0.05$)。与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性分别显著升高 40.66%、12.78%和 121.68% ($P<0.05$),表明 CO₂浓度升高对灯盏花造成了氧化胁迫,植株通过增强 SOD、POD 和 APX 等抗氧化酶活性,促进活性氧的清除,从而减轻膜脂过氧化对细胞膜造成的损伤。硝酸还原酶(NR)是植物进行氮同化的关键酶,前人研究发现,幼苗期水稻硝酸还原酶活性会随大气 CO₂浓度的增加而增加^[41]。本研究中,与 CK 相比,T 处理灯盏花叶片谷胱甘肽还原酶(GR)活性显著降低 62.53% ($P<0.05$)。表明 CO₂浓度升高可能不利于灯盏花的氮素同化代谢。

CO₂浓度影响植物活性成分的积累。高浓度 CO₂会抑制宁夏枸杞总糖的积累,但能促进多糖和其他生物活性物质的积累^[42]。同时高浓度 CO₂能够提高辣椒叶和辣椒果实中维生素 C 和叶片中糖

表 6 灯盏花各指标间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients among various indicators of *Erigeron breviscapus*

指标	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26		
V1	1.000																											
V2	0.060	1.000																										
V3	-0.937*	0.062	1.000																									
V4	0.883	0.360	-0.471	1.000																								
V5	0.986	0.252	-0.998*	0.990	1.000																							
V6	-0.339	-0.997*	0.241	-0.311	-0.175	1.000																						
V7	0.953	0.668	-0.917	-0.917	0.943	0.888	1.000																					
V8	0.982	0.233	-0.996	0.987	1.000*	-0.156	0.879	1.000																				
V9	-0.940	-0.697	0.901	-0.930	-0.870	0.639	-0.999*	-0.860	1.000																			
V10	0.904	0.761	-0.856	0.891	0.819	-0.708	0.991	0.808	-0.996	1.000																		
V11	0.629	0.968	-0.546	0.605	0.448	-0.945	0.835	0.471	-0.856	0.901	1.000																	
V12	-0.973	-0.190	0.991	-0.979	-0.998*	0.112	-0.857	-0.999*	0.836	-0.781	-0.432	1.000																
V13	0.946	0.093	-0.974	0.955	0.987	-0.015	0.803	0.990	-0.779	0.716	0.342	-0.995	1.000															
V14	-0.784	-0.382	0.650	-0.843	-0.975	0.390	-0.968	-0.970	0.958	-0.926	-0.671	0.959	-0.926	1.000														
V15	0.707	-0.353	-0.776	0.728	0.816	0.436	0.460	0.828	-0.425	0.337	-0.105	-0.852	0.898	-0.667	1.000													
V16	0.748	-0.296	-0.812	0.768	0.850	0.370	0.512	0.860	-0.478	0.393	-0.045	-0.882	0.923	-0.711	0.998*	1.000												
V17	-0.115	-0.953	0.012	-0.085	0.055	0.973	-0.410	0.074	0.446	-0.528	-0.845	-0.118	0.214	0.169	0.621	0.573	1.000											
V18	0.982	0.232	-0.996	0.987	1.000*	-0.155	0.879	1.000*	-0.859	0.807	0.470	-0.999*	0.990	0.907	0.828	0.860	0.075	1.000										
V19	0	-0.911	-0.103	0.030	0.169	0.941	-0.303	0.188	0.340	-0.427	-0.778	-0.231	0.325	0.055	0.707	0.663	0.993	0.198	1.000									
V20	0.977	0.207	-0.994	0.983	0.999*	-0.129	0.866	1.000*	-0.846	0.792	0.447	-1.000*	0.993	-0.963	0.842	0.873	0.101	1.000*	0.214	1.000								
V21	0.817	0	-0.904*	0.378	0.991	-0.440	0.820	0.994	-0.797	0.737	0.369	-0.998*	1.000*	-0.776	0.885	0.912	0.185	0.994	0.297	0.996	1.000							
V22	0.990	0.536	-0.970	0.985	0.952	-0.469	0.986	0.946	-0.979	0.956	0.732	-0.930	0.890	-0.996	0.600	0.647	-0.254	0.945	-0.141	0.937	0.903	1.000						
V23	0.500	-0.584	-0.586	0.526	0.639	0.645	0.214	0.654	-0.176	0.082	-0.359	-0.687	0.754	-0.451	0.966	0.949	0.803	0.655	0.866	0.647	0.735	0.373	1.000					
V24	0.562	0.911	-0.610	0.314	0.329	-0.987	0.726	0.311	-0.753	0.811	0.985	-0.268	0.173	-0.623	-0.277	-0.218	-0.925	0.310	-0.875	0.285	0.525	0.603	-0.516	1.000				
V25	0.852	-0.126	-0.901	0.868	0.928	0.203	0.654	0.935	-0.624	0.547	0.129	-0.950	0.976	-0.822	0.973	0.985	0.422	0.936	0.523	0.954	0.969	0.770	0.879	-0.045	1.000			
V26	0.182	-0.822	-0.821	0.211	0.345	0.864	-0.125	0.363	0.164	-0.256	-0.651	-0.404	0.491	-0.127	0.824	0.778	0.956	0.364	0.983	0.388	0.465	0.041	0.942	-0.773	0.669	1.000		

** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)；* 表示相关性显著 ($P < 0.05$)。V1: 气孔密度; V2: 气孔长度; V3: 气孔宽度; V4: 气孔面积; V5: 蒸腾速率; V6: 净光合速率; V7: 胞间 CO₂ 浓度; V8: 气孔导度; V9: 水分利用率; V10: 叶绿素 a 含量; V11: 叶绿素 b 含量; V12: 总叶绿素含量; V13: 类胡萝卜素含量; V14: 过氧化氢酶 (POD) 活性; V15: 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; V16: 过氧化氢酶 (CAT) 活性; V17: 抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性; V18: 谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性; V19: 硝酸还原酶 (NR) 活性; V20: 地上部分绿原酸含量; V21: 地上部分野黄芩苷含量; V22: 地上部分异绿原酸 A 含量; V23: 地上部分异绿原酸 C 含量; V24: 地下部分绿原酸含量; V25: 地下部分异绿原酸 A 含量; V26: 地下部分异绿原酸 C 含量。

类化合物含量^[43]。活性物质野黄芩苷主要积累于灯盏花地上部分^[44]。李秀华等^[45]研究发现,CO₂浓度升高可使组培灯盏花幼苗叶片中灯盏乙素含量增加10.07%。本研究发现,T处理灯盏花地上部分野黄芩苷含量显著低于CK ($P < 0.05$),而灯盏花地下部分均未检测到野黄芩苷,可能是因为未到达采收期。

参考文献:

- [1] 张茜茜,王海峰. 大气CO₂浓度倍增和增温对冬小麦气孔特征的协同效应[J]. 东北农业科学,2021,46(1):25-30.
- [2] 宗毓铮,张函青,李 萍,等. 大气CO₂与温度升高对北方冬小麦旗叶光合特性、碳氮代谢及产量的影响[J]. 中国农业科学,2021,54(23):4984-4995.
- [3] 周 青,黄晓华,戴玉锦. CO₂倍增对植物的生态生理效应[J]. 自然杂志,2002,24(1):20-26.
- [4] KIMBALL B A. Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N, and temperature[J]. Current Opinion in Plant Biology,2016,31:36-43.
- [5] 侯晶东,曹 兵,宋丽华. CO₂浓度倍增对宁夏枸杞光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(5):71-76.
- [6] 米 琪,罗文秀,徐 萍,等. 模拟CO₂浓度升高对滇重楼光合作用及有效成分的影响[J]. 时珍国医国药,2024,35(1):177-182.
- [7] 何 梅,李 杰,叶庆生,等. CO₂倍增对霍山石斛光合特性和生长的影响[J]. 热带作物学报,2021,42(5):1335-1341.
- [8] 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[J]. 北方园艺,2022(14):101-108.
- [9] 邓小红,王健健. 模拟大气CO₂浓度升高对虎耳草生理特性和药用品质的影响[J]. 生态科学,2023,42(2):9-16.
- [10] 黄格朗. 灯盏花素神经保护机制的研究进展[J]. 广西医学,2021,43(1):112-115.
- [11] 刘 宇. 如何做强“十大云药”品牌[J]. 致富天地,2021(4):25-27.
- [12] WU R X, LIANG Y, XU M, et al. Advances in chemical constituents, clinical applications, pharmacology, pharmacokinetics and toxicology of *Erigeron breviscapus* [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021,12:656335.
- [13] 郭 欣,林 珊,吴丽明,等. 灯盏细辛化学成分及药理作用研究进展[J]. 中成药,2019,41(2):393-402.
- [14] 普元柱,苏 灿. 灯盏细辛及其活性成分防治阿尔茨海默病的药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志,2020,45(23):5650-5657.
- [15] 方 睿,杜树山. 灯盏花素制剂研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志,2011,17(4):233-237.
- [16] 万宇婷,陈 宇,鲁泽刚,等. 中微肥施用对灯盏花产量和品质的影响[J]. 中药材,2020,43(3):536-540.
- [17] 李宇赤,王婉丽,杨 灵. CO₂激光处理对灯盏花种子萌发的影响研究[J]. 种子,2019,38(5):114-116.
- [18] 林丽飞,洪 亮,杨文跃,等. 外源精胺对南方根结线虫胁迫下灯盏花生理生化的影响[J]. 江西农业大学学报,2019,41(2):267-272.
- [19] 郑云普,徐 明,王建树,等. 玉米叶片气孔特征及气体交换过程对气候变暖的响应[J]. 作物学报,2015,41(4):601-612.
- [20] INSKEEP W P, BLOOM P R. Extinction coefficients of chlorophyll a and B in *N,N*-dimethylformamide and 80% acetone [J]. Plant Physiology,1985,77(2):483-485.
- [21] 胡德分,刘金美,李凤娇,等. 蒽酮-硫酸法测定乌天麻多糖含量的条件优化[J]. 云南民族云南民族大学学报(自然科学版),2023,32(6):687-694.
- [22] 李绍军,龚月桦,王俊儒,等. 关于茛三酮法测定脯氨酸含量中脯氨酸与茛三酮反应之探讨[J]. 植物生理学通讯,2005,41(3):365-368.
- [23] 祝连彩,唐士金,周 丽. 考马斯亮蓝 G 250 法测定蛋白质含量的教学实践及方法学探讨[J]. 教育教学论坛,2020(23):266-269.
- [24] DUAN B L, LU Y W, YIN C Y, et al. Physiological responses to drought and shade in two contrasting *Picea asperata* populations [J]. Physiologia Plantarum,2005,124.
- [25] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [26] KNÖRZER O C, BURNER J, BOGER P, et al. Alterations in the antioxidative system of suspension-cultured soybean cells (*Glycine max*) induced by oxidative stress [J]. Physiologia Plantarum, 2008,97(2):388-396.
- [27] 王三根. 植物生理学实验教程[M]. 北京:科学出版社,2017.
- [28] 李晓波,汪瑞波,沈 勇,等. HPLC 测定灯盏花不同部位绿原酸、灯盏乙素、3,5-二咖啡酰奎宁酸和 4,5-二咖啡酰奎宁酸含量[J]. 中国中药杂志,2013,38(14):2237-2240.
- [29] 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[D]. 贵阳:贵州大学,2022.
- [30] 赵 广,张扬建. 大气CO₂浓度升高对土壤碳库稳定性的影响[J]. 生态学报,2023,43(20):8493-8503.
- [31] LAZA H E, BAKER J T, YATES C, et al. Effect of elevated CO₂ on peanut performance in a semi-arid production region [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2021(308/309):108599.
- [32] 范金杰,俞杨浏,左 强,等. 大气CO₂浓度升高对小麦蒸腾耗水与根系吸水的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(3):92-98.
- [33] 李晓东,侯晓星,王柯月. 天麻幼苗光合特性研究[J]. 安徽农业科学,2022,50(5):152-155.
- [34] 金殿玉,谢立勇,赵洪亮,等. 大气CO₂浓度升高条件下稻稗共生系统中稗草对水稻光合生理的影响[J]. 中国农业气象,2022,43(3):204-214.
- [35] 王 璐,张小琴,李 萍,等. 温度和CO₂浓度升高对甜椒光合生理和虫害发生的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(12):4022-4030.
- [36] BAO G, TANG W, AN Q, et al. Physiological effects of the com-

- bined stresses of freezing-thawing, acid precipitation and deicing salt on alfalfa seedlings [J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 204.
- [37] 陈睿, 鲜小林. 褪黑素和海藻酸对高温胁迫下高山杜鹃抗氧化酶系统的影响[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(10): 2875-2885.
- [38] 任佳辉, 高捍东, 陈哲楠, 等. 杂交新美柳苗对盐渍胁迫的生长和生理响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(2): 57-66.
- [39] 田浩天, 方晶莹, 闵炜芳, 等. 宁夏盐碱地水稻根系形态和生理指标与产量的相关分析及综合评价[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(6): 1619-1627.
- [40] 杜晋城, 李欣欣, 王泽亮, 等. 聚乙二醇胁迫下3个油橄榄品种生理指标响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(2): 137-143.
- [41] 喻尚其, 苟茂海, 万兆良. 模拟大气中不同CO₂含量对水稻生长发育的影响[J]. *西南农业学报*, 2004, 17(4): 455-459.
- [42] 马冲, 马亚平, 冯学瑞, 等. CO₂浓度升高对宁夏枸杞不同器官中生物活性物质含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(3): 521-531.
- [43] 袁蕊, 聂磊云, 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[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(12): 3510-3516.
- [44] 李俊雅, 李君, 梁晓. 不同采收期灯笼细辛中灯笼花乙素含量动态积累研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(10): 150-151, 155.
- [45] 李秀华, 苏文华, 周鸿, 等. 大气二氧化碳倍增对短葶飞蓬生长和有效成分积累的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1852-1856.

(责任编辑:成纾寒)