

分类号:

密 级: 公开

学 号: 20212012036

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



不同 CO₂ 施肥方式及浓度对设施内葡萄光合特性、产量及果实品质的影响

学 位 申 请 人	周钰凡
指 导 教 师	于坤副教授
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	园艺学
研 究 方 向	果树学
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子

2024年5月

分类号:

密 级: 公开

学 号: 20212012036

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



不同 CO₂ 施肥方式及浓度对设施内葡萄光合特性、产量及果实品质的影响

学 位 申 请 人	周钰凡
指 导 教 师	于坤副教授
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	园艺学
研 究 方 向	果树学
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子

2024 年 5 月

**Effects of CO₂ Fertilization Methods and Concentrations on the
Photosynthetic Traits, Yield, and Fruit Quality of Greenhouse-Grown
Grapes**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Zhou yu-fan

(Horticulture)

Dissertation Supervisor: Prof. Yu Kun

May, 2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：周轻凡

时间 2024 年 5 月 20 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：周轻凡

时间：2024 年 5 月 20 日

导师签名：于坤

时间 2024 年 5 月 20 日

摘要

目的：设施葡萄在密闭环境的生产实际中，常因为光合代谢旺盛时 CO₂ 供应不足，造成葡萄光合作用强度下降，导致葡萄品质降低甚至减产。设施内传统 CO₂ 施肥技术往往存在施用不均匀，成本过高等问题，同时适合设施葡萄生产的最佳 CO₂ 浓度尚未可知，精准控制 CO₂ 施肥量仍是目前温室生产中存在的挑战。本研究提出了一种将 CO₂ 施肥和加气灌溉技术相结合的 CO₂ 加气灌溉施肥模式，通过探究不同 CO₂ 施肥方式及浓度对葡萄光合特性、产量及果实品质的影响，以验证这种 CO₂ 加气灌溉施肥模式的可行性，并筛选出设施葡萄生产的最佳 CO₂ 浓度。为未来温室葡萄可控条件下加气灌溉技术的应用提供一定理论依据。

方法：本研究以 5 年生‘弗雷无核’葡萄为试验材料，为探究设施葡萄生产中 CO₂ 的最佳施肥方式和最适浓度，设置 CO₂ 加气灌溉施肥（结合加气地下滴灌管道施加 CO₂，IW）、CO₂ 传统施肥（利用化学反应袋缓释 CO₂，TW）、不施肥（空白对照组，CK）3 种不同施肥方式处理以及 500 ppm（CO₂ 浓度为 $500 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ）、700 ppm（CO₂ 浓度为 $700 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ）、850 ppm（CO₂ 浓度为 $850 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ）、1000 ppm（CO₂ 浓度为 $1000 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ）4 种不同 CO₂ 浓度处理。

结果：

(1) 结合加气灌溉系统的 CO₂ 加气灌溉施肥方式能显著提高葡萄叶片光合色素含量以及光合特征。在同一灌水周期内，CO₂ 加气灌溉施肥方式处理中葡萄光饱和点、表观量子效率和最大净光合速率均达到最大值，光补偿点则最低。此外，新型 CO₂ 施肥方式显著提高了叶片 CO₂ 饱和点、CO₂ 补偿点、SOD、CAT、POD、PPO 和 Rubisco 活性，且葡萄产量最高，为 $13875.61 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(2) CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时显著提高了葡萄叶片光合色素含量，降低了叶绿素 a/b；CO₂ 浓度为 700 ppm 时葡萄叶片净光合速率、水分利用效率均最高。CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时显著降低了葡萄叶片蒸腾速率和气孔导度。葡萄光饱和点和表观量子效率均在 CO₂ 浓度为 850 ppm 时达到最大值，700 ppm 次之，此外，CO₂ 浓度为 700 ppm 时显著提高了叶片最大净光合速率、SOD、CAT、POD、PPO 和 Rubisco 活性，且葡萄产量最高，为 $14541.37 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3) 结合加气灌溉系统的 CO₂ 加气灌溉施肥方式显著提高了葡萄果实品质，增加了果实着色程度。提高了果皮中酚类物质的含量。CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时均显著提高了葡萄果实可溶性固形物、可溶性糖含量和百粒重，降低了可滴定酸含量。CO₂ 浓度为 700 ppm 时葡萄果皮总叶绿素和类胡萝卜素含量均最低。CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时果实成熟期（花后 65 天）葡萄果实颜色指数（CIRG）分别高达 4.79 和 4.45。CO₂ 浓度为 700 ppm 时果皮类黄酮、花色苷和总酚含量均最高。

结论：增施 CO₂ 显著提升了设施葡萄叶片光合色素含量和光合性能，促进了果实着色，提高了葡萄产量和品质，其中 CO₂ 加气灌溉施肥方式的效果要优于传统 CO₂ 施肥方式。在不同 CO₂ 浓度比较试验中，当 CO₂ 浓度为 700 ppm 时对设施葡萄光合特性、产量及果实品质的促进效果最佳。

关键词：加气灌溉；CO₂；葡萄；光合作用；果实品质

Abstract

Objective: In the operational reality of protected grape cultivation within controlled environments, the exuberant photosynthetic metabolism often encounters challenges due to inadequate CO₂ provision, resulting in diminished photosynthetic activity and consequent compromises in grape quality, potentially leading to decreased yields. Conventional CO₂ fertilization practices within these facilities frequently suffer from issues such as uneven application and exorbitant costs. Furthermore, the optimal CO₂ concentration conducive to grape cultivation under protected conditions remains undetermined, thereby rendering the precise regulation of CO₂ fertilization a persistent challenge within contemporary greenhouse operations. This thesis introduces a novel approach by integrating CO₂ fertilization with aeration irrigation techniques, proposing a CO₂-aeration irrigation fertilization paradigm. Through a comprehensive examination of diverse CO₂ fertilization modalities and concentrations and their impacts on grape photosynthetic parameters, yield metrics, and fruit quality attributes, this thesis aims to ascertain the viability of the CO₂-aeration irrigation fertilization paradigm. Additionally, it endeavors to identify the optimal CO₂ concentration requisite for protected grape cultivation. This provides a theoretical basis for the future application of aeration irrigation technology under controlled conditions for greenhouse grape production.

Methods: This study used 5-year-old 'Flame Seedless' grapes as test materials. To explore the best CO₂ fertilization method and the most suitable CO₂ concentration for greenhouse grape production, three different aeration methods were set: intelligent aeration (new CO₂ aeration mode, IW), traditional aeration (CO₂ reaction bag, TW), and no aeration (control group, CK), along with four different concentration treatments of 500ppm (CO₂ concentration of $500 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 700ppm (CO₂ concentration of $700 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 850ppm (CO₂ concentration of $850 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), and 1000ppm (CO₂ concentration of $1000 \pm 30 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Results:

(1) The novel CO₂ aeration method combined with the subsurface drip irrigation system significantly improved the chlorophyll content and photosynthetic characteristics of grape leaves. Within the same irrigation cycle, the grape light saturation point, apparent quantum efficiency, and maximum net photosynthetic rate all reached their maximum values under the new CO₂ fertilization method, while the light compensation point was lower than the other treatments. Additionally, this method significantly enhanced the leaf CO₂ saturation point, CO₂ compensation point, SOD, CAT, POD, PPO, and Rubisco activity, with the highest grape yield reaching 13875.61 kg·hm⁻².

(2) CO₂ concentrations of 700 ppm and 850 ppm significantly increased the chlorophyll content of grape leaves and significantly reduced the chlorophyll a/b ratio; at 700 ppm, the net photosynthetic rate and

water use efficiency of grape leaves were the highest. The grape light saturation point and apparent quantum efficiency reached their maximum values at a CO₂ concentration of 850 ppm, followed by 700 ppm. Moreover, at 700 ppm, the maximum net photosynthetic rate, SOD, CAT, POD, PPO, and Rubisco activity were significantly increased, with the highest grape yield reaching 14541.37 kg·hm⁻².

(3) The novel CO₂ aeration method combined with the subsurface drip irrigation system significantly improved the quality of grape fruits, increasing the degree of fruit coloring. It also increased the content of phenolic compounds in the fruit skin. At CO₂ concentrations of 700 ppm and 850 ppm, the soluble solids content, soluble sugar content, and hundred-grain weight of grape fruits were significantly increased, while the titratable acid content was reduced. At 700 ppm, the total chlorophyll and carotenoid content in grape skin were the lowest. At CO₂ concentrations of 700 ppm and 850 ppm, the color index of ripening grape fruits (CIRG) reached 4.79 and 4.45, respectively, with the highest flavonoid, anthocyanin, and total phenolic content in the fruit skin at 700 ppm.

Conclusion: Supplementing CO₂ significantly enhanced the photosynthetic pigment content and photosynthetic performance of greenhouse grape leaves, promoted fruit coloration, and improved grape yield and quality. Among these, the effect of the novel CO₂ enrichment method surpassed that of the traditional CO₂ enrichment method. In experiments comparing different CO₂ concentrations, the optimal enhancement of photosynthetic characteristics, yield, and fruit quality in greenhouse grapes was observed at CO₂ concentration of 700 ppm.

Key words: Aerated irrigation; CO₂; Grapes; Photosynthesis; Fruit quality

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
主要符号及缩略表 (Acronyms and Symbols)	VIII
引言.....	1
第 1 章 文献综述.....	3
1.1 加气灌溉技术的研究进展.....	3
1.1.1 加气灌溉中加气方式的研究进展.....	3
1.1.2 加气灌溉对植物光合特性的影响.....	3
1.1.3 加气灌溉对植物果实品质及产量形成的影响.....	4
1.2 日光温室内 CO ₂ 施肥的现状与作用.....	5
1.2.1 设施内 CO ₂ 施肥技术研究现状.....	5
1.2.2 温室 CO ₂ 施肥方法的研究进展.....	5
1.2.3 高浓度 CO ₂ 对植物光合作用的影响.....	6
1.2.4 高浓度 CO ₂ 对植物果实品质及产量的影响.....	6
1.3 研究目的、意义和技术路线.....	7
1.3.1 研究目的和意义.....	7
1.3.2 研究内容.....	7
1.3.3 研究路线.....	9
第 2 章 不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄光合特性及产量的影响.....	10
2.1 材料与方法.....	10
2.1.1 试验材料.....	10
2.1.2 CO ₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成.....	10
2.1.3 CO ₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式.....	12
2.1.4 试验处理.....	12
2.1.5 测定项目与方法.....	13
2.1.6 数据处理与分析.....	14
2.2 结果与分析.....	15
2.2.1 不同 CO ₂ 施肥方式处理的气室内 CO ₂ 浓度变化.....	15
2.2.2 不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片光合色素的影响.....	15
2.2.3 不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片光合特征的影响.....	16

2.2.4	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片光响应曲线和 CO ₂ 响应曲线的影响	17
2.2.5	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片相关酶活性的影响	19
2.2.6	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄产量的影响	20
2.2.7	各指标相关性分析	21
2.3	讨论	22
2.3.1	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄产量的影响	22
2.3.2	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片光合色素含量的影响	22
2.3.3	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片光合特征的影响	23
2.3.4	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片光响应曲线和 CO ₂ 响应曲线的影响	23
2.3.5	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄叶片抗氧化酶及 Rubisco 活性的影响	24
2.4	小结	25
第 3 章	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果实品质、果实色泽以及酚类物质的影响	26
3.1	材料与方法	26
3.1.1	试验材料	26
3.1.2	CO ₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成	26
3.1.3	CO ₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式	26
3.1.4	试验处理	26
3.1.5	测定项目与方法	27
3.1.6	数据处理与分析	28
3.2	结果与分析	29
3.2.1	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果实品质相关指标的影响	29
3.2.2	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果皮中叶绿素与类胡萝卜素的影响	30
3.2.3	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果皮中花色苷和类黄酮的影响	31
3.2.4	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果实颜色指数的影响	31
3.2.5	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄总酚含量的影响	32
3.3	讨论	33
3.3.1	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果实品质相关指标的影响	33
3.3.2	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果实色泽的影响	33
3.3.3	不同 CO ₂ 施肥方式对葡萄果实中酚类物质的影响	34
3.4	小结	34
第 4 章	不同 CO ₂ 浓度对葡萄光合特性及产量的影响	35
4.1	材料与方法	35
4.1.1	试验材料	35
4.1.2	CO ₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成	35

4.1.3 CO ₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式	35
4.1.4 试验处理	35
4.1.5 测定项目与方法	36
4.1.6 数据处理与分析	36
4.2 结果与分析	37
4.2.1 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片光合色素的影响	37
4.2.2 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片光合特征的影响	38
4.2.3 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片光响应曲线和 CO ₂ 响应曲线的影响	39
4.2.4 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片相关酶活性的影响	41
4.2.5 不同 CO ₂ 浓度对葡萄产量的影响	42
4.2.6 各指标相关性	42
4.3 讨论	43
4.3.1 不同 CO ₂ 浓度对葡萄产量的影响	43
4.3.2 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片光合色素含量的影响	44
4.3.3 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片光合特征的影响	45
4.3.4 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片光响应曲线和 CO ₂ 响应曲线的影响	45
4.3.5 不同 CO ₂ 浓度对葡萄叶片抗氧化酶及 Rubisco 活性的影响	46
4.4 小结	47
第 5 章 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果实品质、果实色泽以及酚类物质的影响	48
5.1 材料与方法	48
5.1.1 试验材料	48
5.1.2 CO ₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成	48
5.1.3 CO ₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式	48
5.1.4 试验处理	48
5.1.5 测定项目与指标	49
5.1.6 数据处理与分析	49
5.2 结果与分析	50
5.2.1 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果实品质相关指标的影响	50
5.2.2 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果皮中花色苷和类黄酮的影响	51
5.2.3 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果皮中叶绿素与类胡萝卜素的影响	52
5.2.4 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果实颜色指数的影响	53
5.2.5 不同 CO ₂ 浓度对葡萄总酚含量的影响	53
5.3 讨论	54
5.3.1 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果实品质相关指标的影响	54

5.3.2 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果实色泽的影响	54
5.3.3 不同 CO ₂ 浓度对葡萄果实中酚类物质的影响	55
5.4 小结	55
第 6 章 研究结论与创新点	56
6.1 结论	56
6.2 创新点	57
6.3 展望	57
参考文献	58
致谢	70

主要符号及缩略表 (Acronyms and Symbols)

缩略词	英文名称	中文名称
AQE	Apparent quantum efficiency	表观量子效率
CAT	Catalase	过氧化氢酶
CCP	CO ₂ compensation point	CO ₂ 补偿点
Ci	Intercellular CO ₂ concentration	胞间 CO ₂ 浓度
CO ₂	Carbon dioxide	二氧化碳
CSP	CO ₂ saturation point	CO ₂ 饱和点
Gs	Stomatal conductivity	气孔导度
H ₂ O ₂	Hydrogen peroxide	过氧化氢
IW	Intelligent filling way	智能加气方式
LCP	Light compensation point	光补偿点
LSP	Light saturation point	光饱和点
O ₂	Oxygen	氧气
PAR	Photosynthetically active radiation	光合有效辐射
Pn	Net photosynthetic rate	净光合速率
POD	Peroxidase	过氧化物酶
ppm	Parts per million	百万分之一
PPO	Polyphenol oxidase	多酚氧化酶
Rp	Photorespiration rate	光呼吸速率
Rubisco	Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase	核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶
SOD	Superoxide dismutase	超氧化物歧化酶
Tr	Transpiration rate	蒸腾速率
TW	Traditional aerating way	传统加气方式
WUE	Water use efficiency	水分利用效率

引言

葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 是一种人们常吃的浆果类水果, 属于葡萄科葡萄属, 原产于欧洲和亚洲西部, 生长期分一年或多年生 (马晓宣等, 2024)。葡萄因其适应性强、结果早、产量高以及口感鲜甜等特点深受世界各地农户和消费者的喜爱 (张琴等, 2023)。截至 2022 年底, 世界葡萄栽培面积达 730.2 万 hm^2 , 中国葡萄栽培面积已达 78.3 万 hm^2 , 仅次于栽培面积第一的西班牙 (武曦等, 2023)。其中, 鲜食葡萄不仅果实鲜美多汁、酸甜适中, 还具有非常高的食用营养价值 (郭俊强等, 2021)。
'弗雷无核' 是一种在广受人们喜爱的红色鲜食葡萄, 但在实际生产中常常会因为各种内部或外界因素造成树体光合下调或者果实品质较差。葡萄的品质主要由它的硬度、可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、色泽以及总酚等因素决定, 另一方面, 葡萄果实品质的形成需要依靠树体进行光合作用不断积累, 因此葡萄叶片光合能力的强弱直接影响了当年甚至来年的果实产量和品质 (杨江山等, 2024)。

二氧化碳 (CO_2) 作为植物光合作用最重要的的基本原料, 其浓度的变化对植物的光合效率有着显著的影响。研究表明, 在一定的浓度范围内, CO_2 浓度的提升能够显著增加植物的光合作用 (Inamoto et al., 2022)。然而自然环境中的 CO_2 浓度却远低于植物进行最佳光合作用所需的浓度, 从而抑制了植物的生长发育 (韦忆, 2023)。在封闭的设施农业环境中, 例如日光温室和塑料大棚等, 由于其内部气体与外界空气的交换受限, CO_2 浓度往往要低于外界环境, 特别是在光合有效辐射强、作物生长迅速的条件下, CO_2 的供应严重不足, 导致设施内植物光合作用受到阻碍, 进而影响植物的产量、品质和生长速率 (杨一璐等, 2016); Liu 等 (2022) 研究发现温室内 CO_2 浓度过高时, 反而会导致果树叶片发生卷曲甚至畸变, 进而干扰光合作用功能的发挥, 徐芬等 (2023) 研究也有类似发现, 当 CO_2 浓度过高时, 植物呼吸会受到抑制, 使之不能正常发育, 加速植物体的老化。不同 CO_2 施肥方式对植物生长发育的影响也存在差异。Hidaka 等 (2022) 研究发现局部富集 CO_2 施肥技术与传统 CO_2 施肥技术相比, 对草莓生长发育及产量的促进效果更强。目前国内温室 CO_2 施肥方式主要有悬挂 CO_2 反应袋、 CO_2 钢瓶直接注入和燃烧产气等, 但这些施肥方式都存在着成本过高、施用不均匀、用量粗放等一系列问题, 而这些问题往往会抑制植物的生长, 导致减产量降低 (Li et al., 2023)。因此, 选择适宜的 CO_2 施肥方式和浓度, 对促进植物光合上调、增产和品质提升十分重要。

加气滴灌作为一种新型的节水灌溉技术, 在设施农业中得到广泛应用, 加气地下滴灌是滴灌的一种重要形式, 是一种常见的高效节水灌溉技术, 具有少量多次、节水增产

和预防病害等特点（周兴龙，2022）。目前，加气灌溉多以空气、 O_2 为主，对于 CO_2 气肥的应用却少有研究，本研究将 CO_2 施肥技术和加气灌溉技术相结合，利用加气滴灌已有的管道输送 CO_2 气体至植物体附近，并通过自主研发的 CO_2 注气系统精准控制 CO_2 的施用量，这大大降低了物料和人工成本，同时也使 CO_2 的施用更加均匀，提高了 CO_2 的施肥效率，本试验旨在研究不同加气方式和 CO_2 浓度对葡萄光合作用、产量及果实品质的影响，从而验证这种 CO_2 加气灌溉施肥方式的可行性并筛选出温室内适合葡萄生产的最佳 CO_2 浓度。

第 1 章 文献综述

1.1 加气灌溉技术的研究进展

加气灌溉作为地下滴灌系统的技术创新，已有近 30 年的研究历史，众多研究者已经在此领域取得了丰富的研究成果。相关研究表明，在灌溉过程中注入空气或氧气，并将其随灌溉水一同输送至植物根际土壤中，能够有效地缓解灌溉过程可能引起的土壤缺氧等问题，有利于提高根系活力，促进根系对营养物质的吸收和转运 (Li et al., 2020)。同时，加气灌溉技术能够促进植物的光合作用，从而对改善作物生长迟缓、病害频发以及果实品质下降等问题起到积极作用 (Essah and Holm, 2020)。目前，加气灌溉的研究重点主要在空气、O₂ 对于植物根系活力的影响 (Zhang et al., 2024; Andreat et al., 2022)，忽视了 CO₂ 等气体在植物光合作用过程中所起到的作用。因此，研究不同气体的加气灌溉对植物生长发育的影响在农业实践生产中具有重要的意义。

1.1.1 加气灌溉中加气方式的研究进展

近年来，加气灌溉技术因其提高土壤透气性、促进植物生长等优点而受到关注。加气方式主要有水气分离法和水气结合法两种加气方式。其中水气分离法又称灌后加气，通常是在灌水后通过地下预先铺设好的注气管道或直接使用地下滴灌管道向土壤中直接通入空气或 O₂。水气结合法主要包括微气泡技术、纳米气泡技术和溶氧增强技术等。微气泡技术是一种常见的加气方法，通过生成直径小于 50 微米的微气泡，有效提高水中的溶解氧水平 (马筱建等, 2018)。Wang 等 (2023) 研究表明，微气泡灌溉能显著提高草莓的生长速度和产量，证明了其在农业灌溉中的应用价值。纳米气泡技术则利用更小的气泡 (直径小于 200 nm)，可以在水中稳定存在较长时间，从而长期提供更高的溶解氧。Qian 等 (2022) 发现，纳米气泡灌溉不仅改善了土壤的物理结构，还增强了植物的抗逆性，如抗旱和抗盐碱能力。目前大多数研究者对水气结合法的研究较为广泛，设施温室内多采用微纳米发生器等气泡发生装置对灌溉水进行富氧处理，但气泡发生器对设施内管道要求严格，成本高昂，因此在农业实际生产的推广应用上受到极大的限制。

1.1.2 加气灌溉对植物光合特性的影响

加气灌溉作为一种先进的灌溉技术，通过向灌溉水中注入空气或其他气体，显著改善了植物的生长环境。近几年的研究表明，这种灌溉方法对植物的光合作用产生了积极

影响。Han 等 (2022) 研究指出加气灌溉 (空气) 能提高植物光合作用能力, 加速植物体内的干物质积累, 从而促进植物生长发育, 并且这种促进效果在强光照或高温条件下更加显著。林之栋等 (2023) 的研究发现, 在加气灌溉 (O_2) 条件下, 小麦的净光合速率比传统灌溉下提高了 15%, 气孔导度和蒸腾速率也得到了一定提升, 这主要是因为土壤中氧含量的增加改善了根系环境, 进而促进了根部对水分和养分的吸收。Andreas 等 (2022) 对番茄的研究也支持了这一发现, 指出加气灌溉 (O_2) 显著提升了番茄叶片的光合色素含量和水分利用效率, 保证了植物光合系统的稳定运行。这些研究结果表明, 加气灌溉 (空气/ O_2) 通过提高土壤的透气性和改善根系的生长条件, 对植物的光合作用产生了直接或间接的积极影响 (Mvondo-She et al., 2024)。然而, 加气灌溉具体的影响程度可能因植物种类、灌溉水中气体的种类和浓度以及环境条件等因素而异。植物光合作用直接受环境中 CO_2 浓度影响, 但加气灌溉中关于 CO_2 气体种类的研究尚未出现, 这要求未来的研究中进行更为全面和系统的探索。

1.1.3 加气灌溉对植物果实品质及产量形成的影响

植物产量与品质的高低直接影响了果实的经济效益, 所以它是众多研究者关于加气灌溉对植物生长影响研究的重点。加气灌溉作为农业生产应用中最重要灌溉模式之一, 不仅可以改善植物光合作用, 而且对提高植物果实品质及产量也产生了显著影响 (Yu et al., 2022)。近期相关研究成果进一步证实了这一点, Zhu 等 (2020) 研究表明, 加气灌溉 (空气) 显著提高了番茄果实的可溶性固形物含量和维生素 C 含量, 与传统灌溉方式相比, 其产量提高了约 18%。这说明加气灌溉能够促进果实中营养物质的积累, 进而提高果实的综合品质。Ouyang 等 (2023) 在研究加气灌溉 (O_2) 对黄瓜生长的影响时发现, 该技术不仅提高了温室内土壤的氧含量, 还显著增加了黄瓜果实的硬度和重量, 证明了加气灌溉对提升黄瓜品质和促进正常生长的积极作用。一项在辣椒上的研究发现, 加气灌溉可以显著提高辣椒的干物质积累和产量, 暗示了加气灌溉技术在提高作物产量方面具有潜在的应用价值 (金翠翠, 2023)。这些研究结果强调了加气灌溉在促进植物生长和提高果实品质方面的重要作用, 同时也指出了其在提高作物产量方面的潜力。以上研究表明, 加气灌溉技术不仅有助于提高植物的光合效率, 还有利于改善植物的抗逆性, 最终促进果实品质的提升和产量的增加。未来的研究需进一步探索不同气体种类以及浓度对加气灌溉技术的响应, 以实现植物生产的最优化管理。

1.2 日光室内 CO₂ 施肥的现状与作用

1.2.1 设施内 CO₂ 施肥技术研究现状

20 世纪末人们开始广泛研究设施栽培技术，为植物生长创造更为有力的环境条件，缩短植物熟制，更好的满足人们的需求（李敖等，2024）。随着 21 世纪初期我国设施栽培面积的不断扩大，该领域所存在的问题也逐步显现。尤其是设施环境中二氧化碳（CO₂）浓度过低的问题尤为突出，这直接影响了植物的光合作用，导致植物减产、品质下降及病害问题加剧（胡瑾等，2024）。为应对这些问题，CO₂ 施肥技术的应用提供了一条有效的解决路径。随着科技的持续进步以及对植物光合作用机制更深入的理解，欧美等发达地区已经率先在设施栽培中普及 CO₂ 施肥技术（Yamanaka and Kawashima, 2022）。据 Suzuki 等（2024）的研究发现，挪威和荷兰在设施栽培中 CO₂ 施肥技术的普及率超过一半，而美国和日本等国家也紧跟其后。通过增施 CO₂ 气肥，不仅可以显著提升设施内植物的产量，还能增强植物的抗逆性，从而大幅度提高果实品质（Chen et al., 2023b）。因此，在设施作物的高产优质栽培中，CO₂ 施肥技术扮演着至关重要的角色，对于指导现代农业生产具有重要的实践意义。目前，我国设施内 CO₂ 施肥技术多以悬挂 CO₂ 反应袋和燃烧产气为主，这些方式不仅成本过高，还施加不均匀，往往容易导致温室内 CO₂ 局部浓度过高，从而导致作物生长缓慢减产。我国对于 CO₂ 相关施肥技术的研究及实施尚处于试验与刚刚起步阶段，而如何利用完善及推广此技术，已成为目前仍需解决的技术问题。

1.2.2 温室 CO₂ 施肥方法的研究进展

温室增施 CO₂ 气肥已经成为设施农业未来的发展趋势。荷兰、加拿大等国家使用规模化的作业方式，在低温短日照的冬春季白天采取直接燃烧天然气的方式进行，在专门特制的燃烧器中燃烧后通过管道将产生的 CO₂ 输送到设施内的植物生长环境中（李靖，2018）。而到了光照时间较长的夏季，由于空气温度本身就高，同时植物也进入生长期，通常采用大型钢瓶直接施气的方式（Mochizuki et al., 2022）。Jung 等（2022）采用 CO₂ 富集装置对设施内芒果进行施肥处理。虽然大部分学者已经开展了 CO₂ 施肥对设施内植物生长和产量的影响，但是仍然没有一个规范的科学施肥模式，用于指导相关产业将这项技术广泛应用到设施栽培中。在传统 CO₂ 施肥方法中，例如化学反应、燃烧集气、通风换气、土壤施肥等，或多或少都存在着施肥浓度不均匀、高污染、高成本、持续时间太短效率低以及装置可延续性差等制约农业发展的的问题，极大的限制了 CO₂ 施肥技术的推广。而本研究利用地下滴灌的灌溉管道进行 CO₂ 施肥，降低了成本的同时对环境不造成污染，并且释放均匀可做到精准施肥，为未来设施内 CO₂ 施肥提供了理论依据。同

时 CO₂ 气源主要来源于工业废气的收集，合理运用可以节能减排，具有良好的可持续效益。

1.2.3 高浓度 CO₂ 对植物光合作用的影响

近年来，大气中二氧化碳 (CO₂) 浓度的显著上升对植物的光合作用产生了深远影响。光合作用中吸收光能的色素被称为光合色素。相关研究发现，高浓度 CO₂ 可以有效提高小麦旗叶的光合色素含量，其中类胡萝卜素含量的增幅小于叶绿素含量，表明 CO₂ 浓度的升高对叶绿素含量的促进效果更佳 (Ma and Wang, 2021)。高浓度 CO₂ 条件下的植物叶片叶绿素 a/b 比值会降低，暗示 CO₂ 浓度提升促进了叶绿素 b 的形成，可以有效增强叶绿体对光的吸收能力 (Kim et al., 2018)。然而，高 CO₂ 浓度条件下生长的向日葵，随着叶片的发育光合色素含量反而降低，这可能是由于高 CO₂ 浓度导致的 H₂O₂ 水平升高和抗氧化酶活性降低所引起的氧化胁迫所致。植物对抗胁迫的能力减弱可能会增加叶绿体中活性氧的浓度，进而影响光合色素含量 (Liang et al., 2019)。袁潮等 (2018) 指出，大气 CO₂ 浓度的增加对农业影响呈现出直接和间接两种效应。作为光合反应的基本原料，CO₂ 的浓度上升促进了农作物及杂草的生长，其中 C₃ 植物比 C₄ 植物更易受到影响。前人研究表明，当大气中 CO₂ 浓度翻倍时，植物的蒸腾速率降低了 34% (Yan et al., 2023)。Gao 等 (2021) 研究发现高浓度 CO₂ 促进了植物光合能量转换和光合电子传递效率，最终提高了植物的光饱和点和净光合速率。有相关研究发现 CO₂ 浓度的提升在一定程度上降低了植物的光呼吸速率，这也进一步提高了植物的净光合效率 (Wujeska-Klaue et al., 2019)。大气 CO₂ 浓度倍增可促进植物在逆境胁迫下的生长，提高植物水分利用率 (Uddin et al., 2023)。Opoku 等 (2024) 研究发现 CO₂ 浓度升高可以有效增加高粱的碳吸收并直接刺激光合作用，提高高粱叶片与植株的水分利用效率，使水分利用效率分别提高 15% ~ 35%。在植物光合作用中，光合反应速率主要受限于 Rubisco 的活性。相关研究表明，随着 CO₂ 浓度的升高，两种落叶树叶片 Rubisco 活性逐渐升高 (Byeon et al., 2022)。Doddrell 等 (2023) 研究也有类似发现，在高 CO₂ 浓度条件下，温室内番茄叶片 Rubisco 活性要高于大气 CO₂ 浓度条件下的。目前大多数的研究者只关注到 CO₂ 浓度的升高对植物光合作用的促进作用，未来需要进一步探索不同植物品种对不同 CO₂ 浓度之间的响应差异。

1.2.4 高浓度 CO₂ 对植物果实品质及产量的影响

近期研究表明，提高大气中二氧化碳 (CO₂) 浓度能够显著增强植物叶片的光合作用能力，从而促进植物生长和提升产量 (Yang et al., 2024)，Shiin 等 (2022) 研究发现，在高 CO₂ 浓度条件下，蔬菜产量可显著增加，增幅达到 69% ~ 139%。Cai 等 (2023)

的研究指出, 增加 CO₂ 供应能够显著促进甜瓜果实品质的形成, 并进一步提高产量。随着人们生活水平的提高, 消费者对水果的口感和营养价值的追求越来越高, 满足这些需求则成为了我们农业生产者的目标。目前, 大气 CO₂ 浓度的提升被视为促进植物生长、提高产量及品质的宝贵自然资源。Karim 等 (2020) 研究发现, CO₂ 富集能够增加番茄果实中的可溶性糖、维生素 C 和类胡萝卜素含量, 从而提高了番茄的风味品质。Haghighi 等 (2022) 观察到, CO₂ 富集能够增加番茄中的葡萄糖和果糖含量, 并加深果实颜色。Mochizuki 等 (2023) 也指出, 植物冠层内 CO₂ 浓度的升高可以促进草莓中抗氧化物质的积累, 如抗氧化酶活性、总酚类物质、类黄酮和维生素 C。然而, CO₂ 浓度的增加并不是对所有品质指标都产生积极影响, 不同植物会表现出不同的响应。Du 等 (2023) 的研究发现, CO₂ 浓度过高时对番茄果实的品质会产生不利影响, 导致其可溶性糖、维生素 C 和番茄红素含量显著降低, 而 pH 和可溶性固形物有所增加。Yao 等 (2021) 观察到, 马铃薯块茎中葡萄糖、果糖和总还原性碳水化合物浓度与 CO₂ 浓度水平呈显著负相关。目前, 大部分相关研究集中在蔬菜类作物上, 而对果树的研究相对较少, 同时也缺乏关于不同植物品种最佳 CO₂ 浓度的研究。未来的研究需要在这些领域进行深入探索, 以优化 CO₂ 施肥策略, 实现植物生产的高效和可持续性发展。

1.3 研究目的、意义和技术路线

1.3.1 研究目的和意义

本研究以‘弗雷无核’葡萄作为试验材料, 通过温室内试验, 将 CO₂ 施肥技术与加气灌溉技术相结合, 利用自主设计的 CO₂ 加气灌溉系统和封闭式人工气候室, 研究不同 CO₂ 施肥方式及浓度对温室‘弗雷无核’葡萄光合特性、产量及果实品质的影响, 揭示了 CO₂ 加气灌溉施肥模式对温室葡萄叶片光合能力的促进和调节作用, 探讨了不同 CO₂ 浓度对‘弗雷无核’葡萄光合特性、果实品质和产量的影响并筛选出最佳的 CO₂ 浓度, 为未来温室葡萄可控条件下加气灌溉技术的应用提供一定理论依据, 也为“富碳果园”的建设提供了技术指导。

1.3.2 研究内容

(1) 结合 CO₂ 施肥技术和加气灌溉技术在温室内进行灌溉管道以及装置的实地组装和测试, 自主设计并模拟运行智能 CO₂ 注气系统, 根据试验区域搭建封闭式人工气候室。

(2) 通过测定葡萄同一灌水周期内的叶片光合色素、光合特征、光响应曲线、CO₂ 响应曲线以及叶片相关酶活性, 得出不同 CO₂ 施肥方式以及浓度对葡萄光合特性的影响。

(3) 通过测定葡萄在转色后不同时期的果实可溶性固形物、pH、颜色指数 (CIRG)、可滴定酸、百粒重、硬度、类黄酮、花色苷和总酚等, 得出不同 CO₂ 施肥方式以及浓度对葡萄果实品质形成的影响

(4) 测定单粒重、百粒重和单穗重这些产量构成因子来明确不同 CO₂ 施肥方式和浓度对葡萄产量形成的影响。

1.3.3 研究路线

技术路线如图 1-1 所示

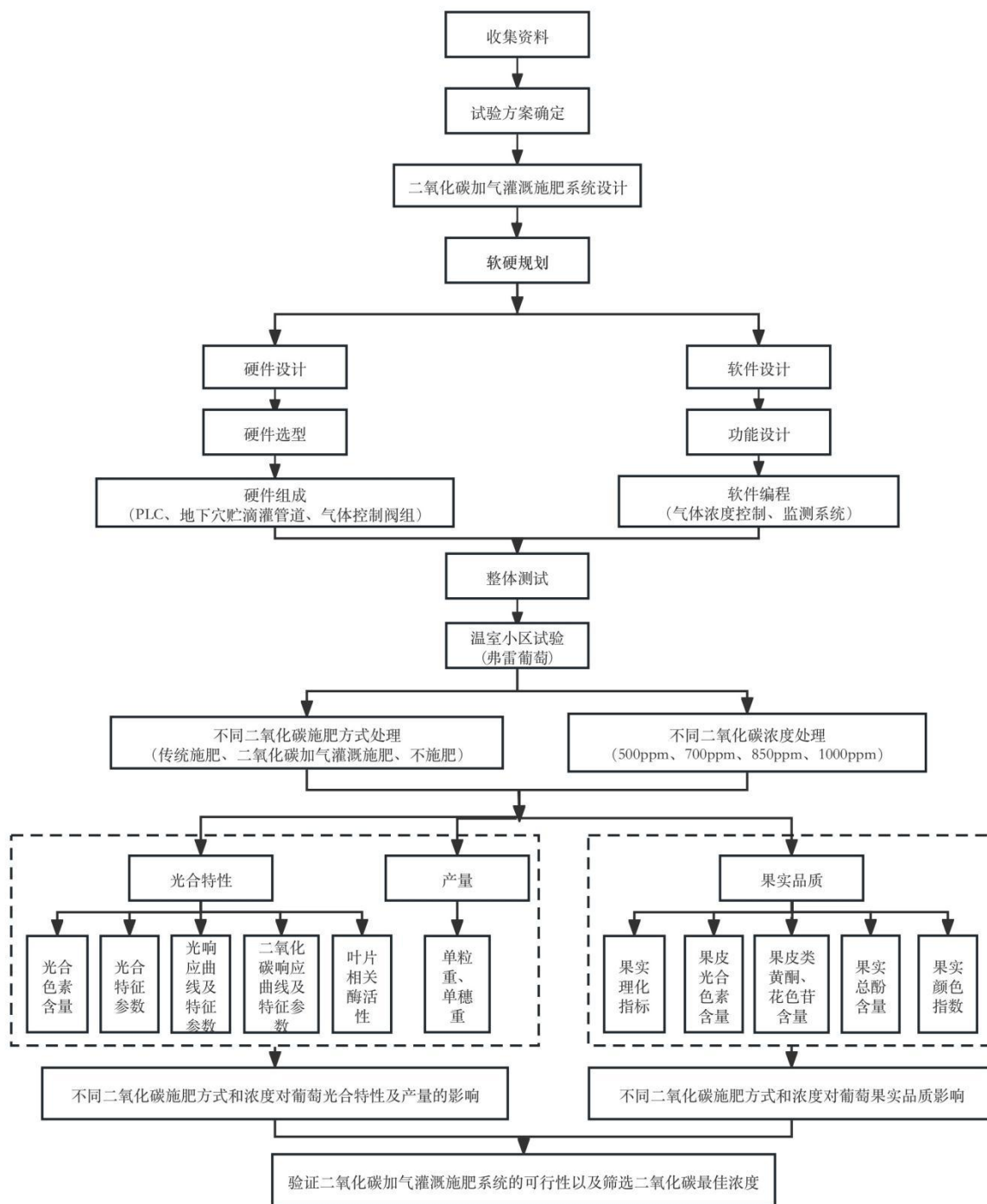


图 1-1 技术路线

Figure 1-1 Technical route

第2章 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄光合特性及产量的影响

2.1 材料与方法

2.1.1 试验材料

试验于2022年6月至2023年12月在新疆石河子大学综合实验基地(北纬45°20'N, 东经86°03'E)日光温室内进行。温室内土壤质地为沙质土, 土壤基本理化性质为: pH 7.21, 有机质 13.67 g·kg⁻¹, 总氮 0.38 g·kg⁻¹、速效磷 25.6 mg·kg⁻¹、速效钾 21.3 mg·kg⁻¹。温室内葡萄品种均为鲜食葡萄‘弗雷无核’(Flame Seedless), 于2018年定植, 采用单篱架, 架面位于葡萄树东, 南北行向, 葡萄行两端竖立水泥支柱, 其上拉4道镀锌铁丝, 架高约为1.5 m。每行种植5棵葡萄, 种植行距为2.5 m, 株距为0.8 m, 每棵葡萄在春季修剪时均保留6根结果枝。利用地下穴贮滴灌系统对温室内葡萄进行灌溉和施肥。温室内采用由PE薄膜制作而成的封闭式人工气室(2.5 m × 7 m × 2.3 m)对每行葡萄进行隔断, 各气室与外界环境均不存在气体交换。

2.1.2 CO₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成

如图2-1、2-2和2-3所示, 本研究提出了一种适合温室栽培生产的CO₂加气灌溉施肥模式, 将加气灌溉、CO₂施肥和CO₂注气控制系统三种技术模式结合在一起, 温室内CO₂施肥的作用是通过升高环境内CO₂浓度直接增强植物体光合作用的强度, 最终提高植物的产量和品质。加气滴灌的作用主要是对每个植株进行精准可控灌溉, 提高植物根系活力和减少灌溉成本等。CO₂注气系统可以精准控制CO₂的释放量, 实时检测环境中CO₂浓度, 保证CO₂的均匀释放。加气灌溉技术在温室内的应用主要采用地下穴贮式加气灌溉模式(图2-2、2-3), 本试验在温室内每行葡萄附近铺设直径8 cm的地下滴灌主管道, 材质为聚氯乙烯(PE), 将直径10 cm、高10 cm的圆柱形硬质PVC穴贮罐埋于深25 cm的圆形土坑中, 土坑位于葡萄南边5 cm处, 穴贮罐的底部开口, 罐身均匀分布着直径为1.5 cm的小孔, 顶部封口与主管道之间使用外径为6 mm的气管进行连接。CO₂钢瓶发生器总容量为40 L, 并通过直径为6 mm的高压输气管与气体控制阀组和主管道间进行连接, CO₂的实际释放量由CO₂控制系统的实时检测值和预设值共同决定。

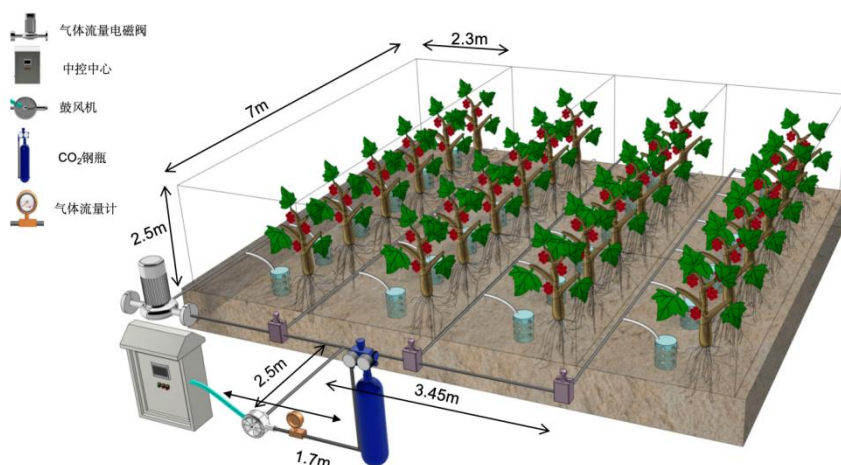


图 2-1 CO₂ 加气灌溉施肥系统示意图。该系统包括中央控制节点 (PLC 和通信端口)、施气节点 (气体电磁阀、气体电磁流量计和对流装置) 和监测节点 (CO₂ 浓度传感器)

Figure 2-1 Schematic diagram of CO₂ aerated irrigation and fertilization system. The system includes a central control node (PLC and communication ports), a gas application node (gas solenoid valve, gas electromagnetic flowmeter, and convection device), and a monitoring node (CO₂ concentration sensor)

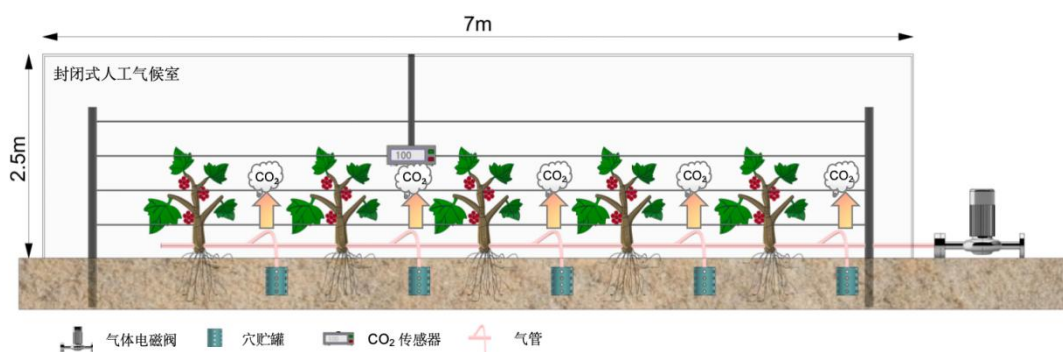


图 2-2 封闭式人工气候室示意图

Figure 2-2 Schematic diagram of closed artificial climate



图 2-3 CO₂ 钢瓶发生器、地下穴贮式灌溉管道和 CO₂ 控制系统温室内实物图

Figure 2-3 Physical view inside the greenhouse of the CO₂ cylinder generator, underground cavern storage filling irrigation and CO₂ control system

2.1.3 CO₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式

针对本文中所提出的 CO₂ 加气灌溉施肥方式，需要设计合适的 CO₂ 注气控制系统。CO₂ 加气灌溉施肥系统包括中控节点、监测节点和施气节点（图 2-1、2-4）。监测节点由电源模块和 CO₂ 浓度监测模块组成，主要负责温室环境信息的采集，该节点获取环境内 CO₂ 浓度数据，通过导线将环境参量以电流信号传输至中控节点。施气节点包括电源模块、气体电磁阀、对流装置以及气体电磁流量计，主要完成终端命令的执行与调控信息的反馈，该节点获取终端命令解析得控制指令，决定气体电磁阀的开闭，同时利用气体电磁流量计监测实时流量值，最终将信号反馈至中控节点维护系统稳定运行。中控节点由电源模块、工控机开发组件和串口通信模块，主要负责温室环境信息的交互与模型的处理，该节点通过具有人机交互的工控机进行模型处理，结合气体电磁流量计的的反馈信息，进而下发控制信号至施气节点。中控节点担任开启自动化设备的任务，放置于温室北侧较远区域，防止人为干扰影响试验效果；CO₂ 浓度传感器放置于气室正中间位置，该点可以反映整个气室内 CO₂ 的平均浓度；施气节点放置于主控节点附近，气体通过导气管道引流进入温室环境内。

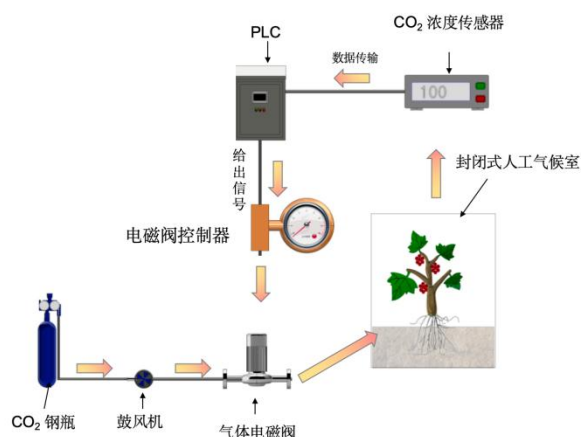


图 2-4 CO₂ 加气灌溉施肥控制系统工作原理示意图

Figure 2-4 Schematic diagram of the working principle of CO₂ aerated irrigation and fertilization control system

2.1.4 试验处理

试验布局采用随机区组设计，随机选择 3 行生长势一致的葡萄，每个处理 5 株葡萄，重复 5 次，试验共设置 3 个处理：TW 处理（传统 CO₂ 施肥方式）、IW 处理（CO₂ 加气灌溉施肥方式）和 CK 对照（不进行 CO₂ 施肥）三个处理，于 2023 年 6 月 25 日（花后 30 天）至 2023 年 7 月 30 日间进行施气处理，共处理 35 天，TW 处理通过在气室内悬挂 CO₂ 产气袋的方式施入 CO₂，CO₂ 产气袋均悬挂于气室内上部，悬挂时间为处理期间每日 9:00 ~ 14:00 以及 17:00 ~ 22:00 之间，每个气室内 CO₂ 气肥反应物总重约 10kg，

10h 产气量约为 30L; IW 处理采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式进行施气处理, CO₂ 气源为钢瓶发生器, 将同等量气肥反应物 (10kg) 放置于钢瓶发生器中, 设置 CO₂ 固定输出压为 0.05 Mpa, 于 9:00 ~ 14:00 以及 17:00 ~ 22:00 之间均速通入稳压 CO₂ 气体, 通气总量约为 30 L。各处理均为灌后施气。CO₂ 注气系统中的工控机 (PLC) 通过实时接收和分析各气室 CO₂ 浓度监测值来控制气体电磁阀的开闭, 利用气体对流装置 (气室对角各放置两台小型冷风扇) 来降低气室 CO₂ 浓度升高的梯度进而保证气室内 CO₂ 气体均匀分散。气室外表面每 3d 用清水进行清洗, 避免空气中灰尘、沙石降低薄膜透光率。于 6 月 25 日起, 每日实时采集气室内光照强度、空气温湿度以及 CO₂ 浓度, 每 10min 记录一次。

2.1.5 测定项目与方法

2.1.5.1 光合色素含量的测定

不同 CO₂ 施肥方式处理第 25 d, 在同一灌水周期的第 1、4、7、10 d (2023 年 7 月 21 日 ~ 30 日) 采集样品。每个处理 5 个重复, 每个重复随机选择 3 条长势相似的枝条, 采集自基部向上第 4 ~ 6 片功能叶并立刻装入密封袋, 用装有冰袋的泡沫箱带回实验室测定葡萄叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量, 并计算叶绿素 a/b 测定方法采用分光光度法。

$$\text{叶绿素 a 浓度 (Chl}_a\text{)} = 12.21 \times \text{OD}_{663} - 2.81 \times \text{OD}_{646}$$

$$\text{叶绿素 b 浓度 (Chl}_b\text{)} = 20.13 \times \text{OD}_{646} - 5.03 \times \text{OD}_{663}$$

$$\text{类胡萝卜素浓度} = (1000\text{OD}_{470} - 3.27C_a - 104C_b) / 229$$

$$\text{叶绿素 a/b} = \text{Chl}_a / \text{Chl}_b$$

式中: OD——不同波长下吸光值, L/(g·cm)

C_a——叶绿素 a 浓度, mg/g

C_b——叶绿素 b 浓度, mg/g

2.1.5.2 光合特征的测定

不同 CO₂ 施肥方式处理第 25d, 在同一灌水周期的第 1、4、7、10 d 使用 LI-6800 便携式光合仪测定叶片光合特征相关参数 (2023 年 7 月 21 日-30 日), 共测量 4 天。测量当天均为晴天无云天气, 分别于 9:00-14:00 期间选取新鲜葡萄叶片 (自基部向上的第 4 至第 6 片叶), 测定叶片净光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (Gs)、水分利用率 (WUE)。叶室参数设定如下: 光合有效辐射 (PAR) 1500 μmol·m⁻²·s⁻¹, VPD 0.1 kPa, 流速 500 μmol·s⁻¹, 参比室 CO₂ 浓度为 400 μmol·mol⁻¹, 叶室温度为 30 °C。

2.1.5.3 光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的测定

不同 CO₂ 施肥方式处理第 35 d 进行光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的测定, 每个处理随机选择功能叶各 3 片。使用 Li-6800 便携式光合仪进行测量。测量光响应曲线过程中只改变光强, 设置光强梯度: 1800、1500、1200、900、600、300、200、150、100、50 和 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光强每次改变时, 最小稳定时间为 120 s, 最大稳定时间为 200 s。设置温度为 30 °C, 相对湿度在 50 %左右, CO₂ 浓度为 400 μmolmol^{-1} , 利用测定数据模拟光响应曲线, 得出光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP)、最大净光合速率 ($P_{n\max}$) 以及表观量子效率 (AQE)。测量 CO₂ 响应曲线过程中只改变光强设置 CO₂ 浓度梯度: 400、300、200、100、50、400、600、800、1000、1200、1500 μmolmol^{-1} , CO₂ 浓度每次改变时, 最小稳定时间为 120 s, 最大稳定时间为 180 s。测量过程中只改变 CO₂ 浓度, 设置温度为 30 °C, 相对湿度在 60%左右, 光照强度为 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。利用测定数据进行 CO₂ 响应曲线的模拟, 计算出最大羧化效率 ($V_{c\max}$)、最大电子传递速率 (J_{\max})、CO₂ 补偿点 (CCP) 等参数。

2.1.5.4 叶片抗氧化酶和 Rubisco 酶活性的测定

不同 CO₂ 施肥方式处理第 35d 采集葡萄叶片样品。每个处理随机选择 5 条长势相似的葡萄枝条, 采集自基部向上第 4~6 片功能叶, 用去离子水洗净后剪碎, 进行相关酶活性的测量。

抗氧化酶的测定参照 Cakmak 等 (1992) 的方法; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮兰 G-250 法测定。

Rubisco 酶活性的测定参照 Reid 等 (1980) 的方法, 使用植物酶联免疫分析试剂盒 (苏州科铭生物技术有限公司生产) 测定 Rubisco 酶活性。

2.1.5.5 葡萄产量的测定

每个处理随机选择 3 株葡萄树, 采集葡萄树上所有达到成熟期的果穗测定葡萄单穗重和单粒重, 用以计算葡萄产量, 随机选取 3 串果穗用精度为 0.01 的天平称量单穗重和单粒重, 并根据单穗重和小区面积换算最终产量: 随机选取葡萄果穗上、中、下部共 10 颗果粒用于测定果实单粒重。

2.1.6 数据处理与分析

使用 Excel 2010 进行试验数据整理, 使用 SPSS22.0 软件进行显著性分析, 用平均

值±标准误表示测定结果；相关性分析采用 Pearson 法；使用 origin 2022 软件进行作图。

2.2 结果与分析

2.2.1 不同 CO₂ 施肥方式处理的气室内 CO₂ 浓度变化

由图 2-5 可知，在 9:00~14:00 和 17:00~21:00 之间，CK 处理的 CO₂ 浓度均呈逐渐下降的趋势。在 9:00~11:00 之间，IW 处理 CO₂ 浓度的上升趋势与 TW 处理相比更均匀、平缓；由图 2-5a 可知，在 9:00~14:00 之间，IW 处理的实时 CO₂ 浓度均高于 TW 处理。由图 2-5b 可知，在 17:00~18:00 和 19:00~22:00 之间，IW 处理的实时 CO₂ 浓度均高于 TW 处理，且 IW 处理 CO₂ 浓度的变化趋势较 TW 处理更均匀、平缓。

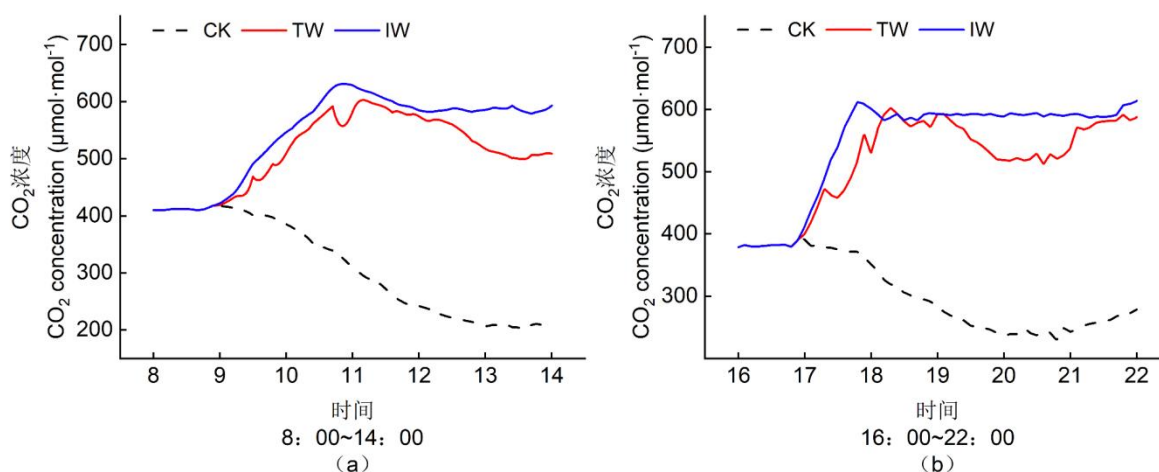


图 2-5 封闭式人工气候室内 CO₂ 浓度施肥期间日变化

Figure. 2-5 Daily variation of CO₂ concentration in enclosed artificial climate indoor during gas application period

2.2.2 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光合色素的影响

如表 2-1 所示，不同施肥方式处理下，IW 处理的叶绿素 a 含量在灌水后 4 d、7 d 和 10 d 均高于 TW 处理和 CK，且灌水后 4 d、7 d 和 10 d 的叶绿素 b 含量均表现为 IW > TW > CK。在灌水后 4 d、7 d 和 10 d，IW 处理的叶片叶绿素 a 含量分别比 CK 高出 17.8%、17.7%和 19.0%，差异显著 ($P < 0.05$)。不同施肥方式处理下，灌水后 1d、7d 和 10d 的类胡萝卜素含量均表现为 IW > TW > CK。IW 和 TW 处理的叶绿素 a/b 在灌水后 4 d、7 d 和 10 d 均显著高于 CK ($P < 0.05$)。

表 2-1 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光合色素含量的影响Table 2-1 Effects of different CO₂ aerating methods on photosynthetic pigment content of grape leaves

灌溉后天数 Days after irrigation (d)	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	类胡萝卜素 Carotenoids (mg·g ⁻¹)
1	CK	1.36 ± 0.06b	0.54 ± 0.03b	2.52 ± 0.10a	0.22 ± 0.02b
	TW	1.49 ± 0.08a	0.65 ± 0.01a	2.29 ± 0.12b	0.33 ± 0.06a
	IW	1.47 ± 0.04a	0.62 ± 0.02a	2.47 ± 0.11a	0.34 ± 0.01a
4	CK	1.51 ± 0.06b	0.69 ± 0.05a	2.18 ± 0.05b	0.26 ± 0.03b
	TW	1.74 ± 0.13a	0.71 ± 0.01a	2.45 ± 0.13a	0.41 ± 0.02a
	IW	1.78 ± 0.18a	0.73 ± 0.02a	2.51 ± 0.04a	0.35 ± 0.03a
7	CK	1.47 ± 0.09b	0.64 ± 0.05a	2.30 ± 0.24b	0.25 ± 0.00b
	TW	1.71 ± 0.03a	0.68 ± 0.01a	2.51 ± 0.02a	0.38 ± 0.02a
	IW	1.73 ± 0.00a	0.69 ± 0.04a	2.53 ± 0.04a	0.39 ± 0.00a
10	CK	1.42 ± 0.02b	0.62 ± 0.04b	2.29 ± 0.15b	0.21 ± 0.04b
	TW	1.67 ± 0.06a	0.71 ± 0.01a	2.35 ± 0.04b	0.34 ± 0.00a
	IW	1.69 ± 0.02a	0.72 ± 0.02a	2.53 ± 0.09a	0.36 ± 0.02a

2.2.3 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光合特征的影响

由图 2-6a 可知, 不同施肥方式处理的叶片净光合速率 (Pn) 在同一灌水周期内均呈先上升后下降的趋势; 灌水后 1 d、7 d 和 10 d, 各处理的 Pn 均表现为 IW > TW > CK。在灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d, IW 处理的叶片 Pn 分别比 CK 高出 31.0%、30.1%、31.5% 和 27.2%, 差异显著 ($P < 0.05$)。由图 2-6b 和图 2-6c 可知, 各处理的叶片气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 在同一灌水周期内均呈先上升后下降的趋势。在同一灌水周期内, IW 处理的叶片 Gs 和 Tr 均低于 CK, 各处理的叶片 Tr 和 Gs 在灌水后 4 d 和 7 d 均表现为 CK > TW > IW; 在灌水后 1 d 和 4 d, IW 处理的叶片 Tr 分别比 CK 低 42.6% 和 47.5%, 差异显著 ($P < 0.05$)。灌水后 4 d 和 7 d, IW 处理的叶片 Gs 分别比 CK 低 24.5% 和 13.1%, 差异显著 ($P < 0.05$)。由图 2-6d 所示, 在同一灌水周期内, 各处理的葡萄叶片水分利用率 (WUE) 均呈先上升后下降的趋势, 其中 IW 处理在灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d 均显著高于处理 TW 和 CK ($P < 0.05$)。在灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d, IW 处理的叶片 WUE 分别比 CK 高出 128.1%、94.6%、126.6% 和 148.7% ($P < 0.05$)。

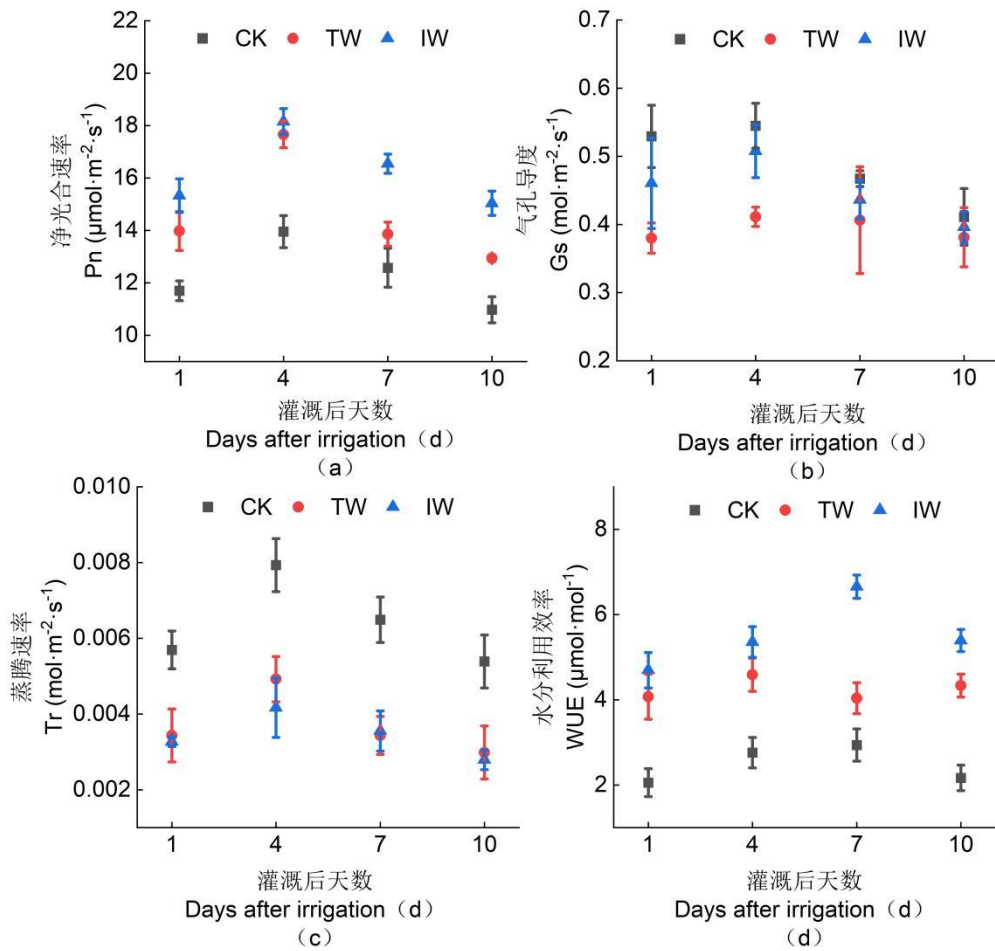
图 2-6 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光合特征的影响

Figure 2-6 Effects of different CO₂ aerating methods on photosynthetic characteristics of grape leaves

2.2.4 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的影响

据直角双曲线修正模型 (叶子飘, 2010) 拟合所得‘弗雷无核’葡萄转色期叶片的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线 (图 2-7)。不同施肥方式处理下, 随着光合有效辐射 (PAR) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 的升高, 叶片的净光合速率均出现不同程度的变化; 如图 2-7a 所示当 PAR 超过 1600 μmol·m⁻²·s⁻¹ 后, TW 处理的 Pn 的增加速率与其它处理相比较为高。如图 2-7b 所示当 C_i 在 1200 ~ 1600 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时, TW 处理的 Pn 随着 C_i 的增加而出现下降, 其余处理均趋于平缓。由表 2-2 可知, 不同施肥方式处理下, 光饱和点和最大净光合速率均表现为 IW > TW > CK, 光补偿点则表现为 CK > TW > IW。处理 TW 和 IW 的光饱和点分别比 CK 高出 11.8% 和 18.4%, 最大净光合速率分别高出 10.7% 和 21.0%, 差异显著 (P < 0.05)。处理 TW 和 IW 的表观量子效率均显著高于 CK (P < 0.05)。由表 2-3 可知, TW 和 IW 处理的 CO₂ 饱和点、CO₂ 补偿点和最大光合能力均显著高于 CK (P < 0.05)。其中 CO₂ 饱和点表现为 IW > TW > CK。TW 和 IW 处理的最大光合能力

分别比 CK 显著高出 14.4%和 18.7% ($P < 0.05$)。如图 2-8 所示, 各处理的最大羧化效率和最大电子传递速率均表现为 $IW > TW > CK$ 。IW 处理的最大羧化速率和最大电子传递速率分别比 CK 高出 60.0%和 66.0%, 差异显著 ($P < 0.05$)。

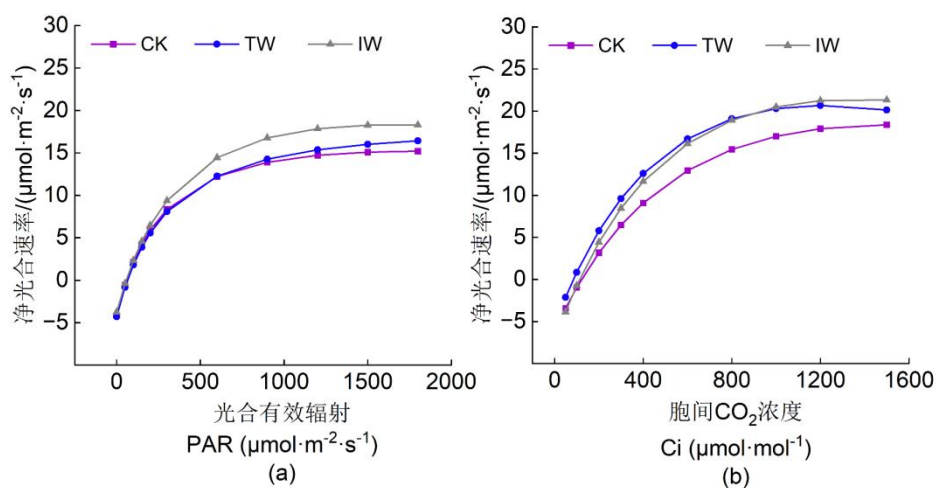


图 2-7 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的影响

Figure 2-7 The influence of different CO₂ fertilization methods on the light response curve and CO₂ response curve of grapes

表 2-2 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光响应曲线特征参数的影响

Table 2-2 Effects of different CO₂ aerating methods on the characteristic parameters of the light response curve of grapevine leaves

处理 Treatment	光饱和点 Light saturation point (LSP)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点 Light compensation point (LCP)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate ($P_{n\max}$)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	表观量子效率 Apparent quantum efficiency (AQE)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	1513.76 ± 174.32b	45.35 ± 3.62a	15.21 ± 1.21b	0.032 ± 0.00b
TW	1693.12 ± 128.33a	44.31 ± 1.98a	16.83 ± 1.32b	0.041 ± 0.00a
IW	1792.31 ± 186.45a	39.32 ± 5.21b	18.41 ± 2.01a	0.040 ± 0.00a

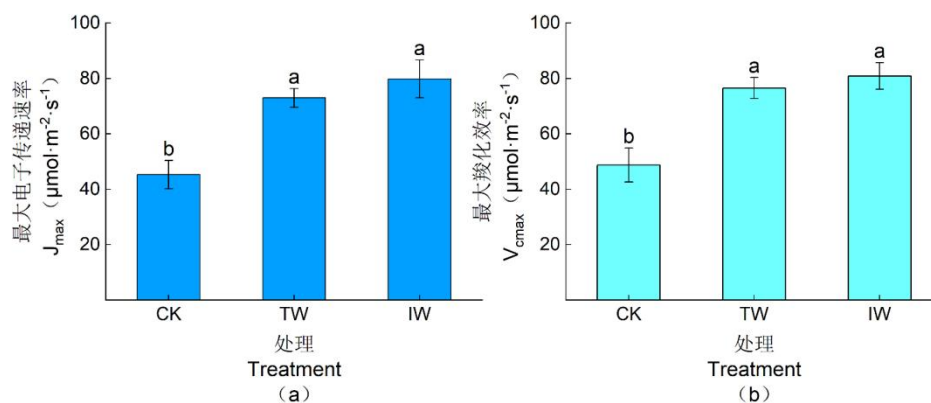
图 2-8 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片最大羧化效率和最大电子传递速率的影响

Figure 2-8 Effect of different CO₂ aerating methods on maximum carboxylation efficiency and maximum electron transfer rate of grape leaves

表 2-3 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片 CO₂ 响应曲线特征参数的影响

Table 2-3 Effects of different CO₂ aerating methods on the characteristic parameters of the CO₂ response curve of grape leaves

处理 Treatment	CO ₂ 饱和点 CO ₂ saturation point (CSP)($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	CO ₂ 补偿点 CO ₂ compensation point (CCP) ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	光呼吸速率 Rate of photorespiration (Rp)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大光合能力 Maximum photosynthetic capacity (Amax)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	998.62 ± 123.42b	69.12 ± 9.31b	6.10 ± 0.98a	18.21 ± 2.01b
TW	1261.47 ± 135.23a	82.31 ± 7.34a	6.24 ± 0.84a	20.83 ± 1.82a
IW	1322.41 ± 178.84a	82.81 ± 9.12a	6.22 ± 0.68a	21.61 ± 1.43a

2.2.5 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片相关酶活性的影响

由图 2-9a、c 可知, 各处理的 CAT 和 SOD 均表现为 IW > TW > CK。由图 2-10b、d 可知各处理的 POD 和 PPO 均显著高于 CK, 其中 IW 处理的 POD 显著高于其它处理 ($P < 0.05$)。如图 2-9e 所示, 各处理的 Rubisco 活性呈现与 CAT、SOD、POD 和 PPO 相同的趋势, 与 CK 相比, TW 和 IW 处理的 Rubisco 活性分别显著提高了 56.0% 和 123.7% ($P < 0.05$)。

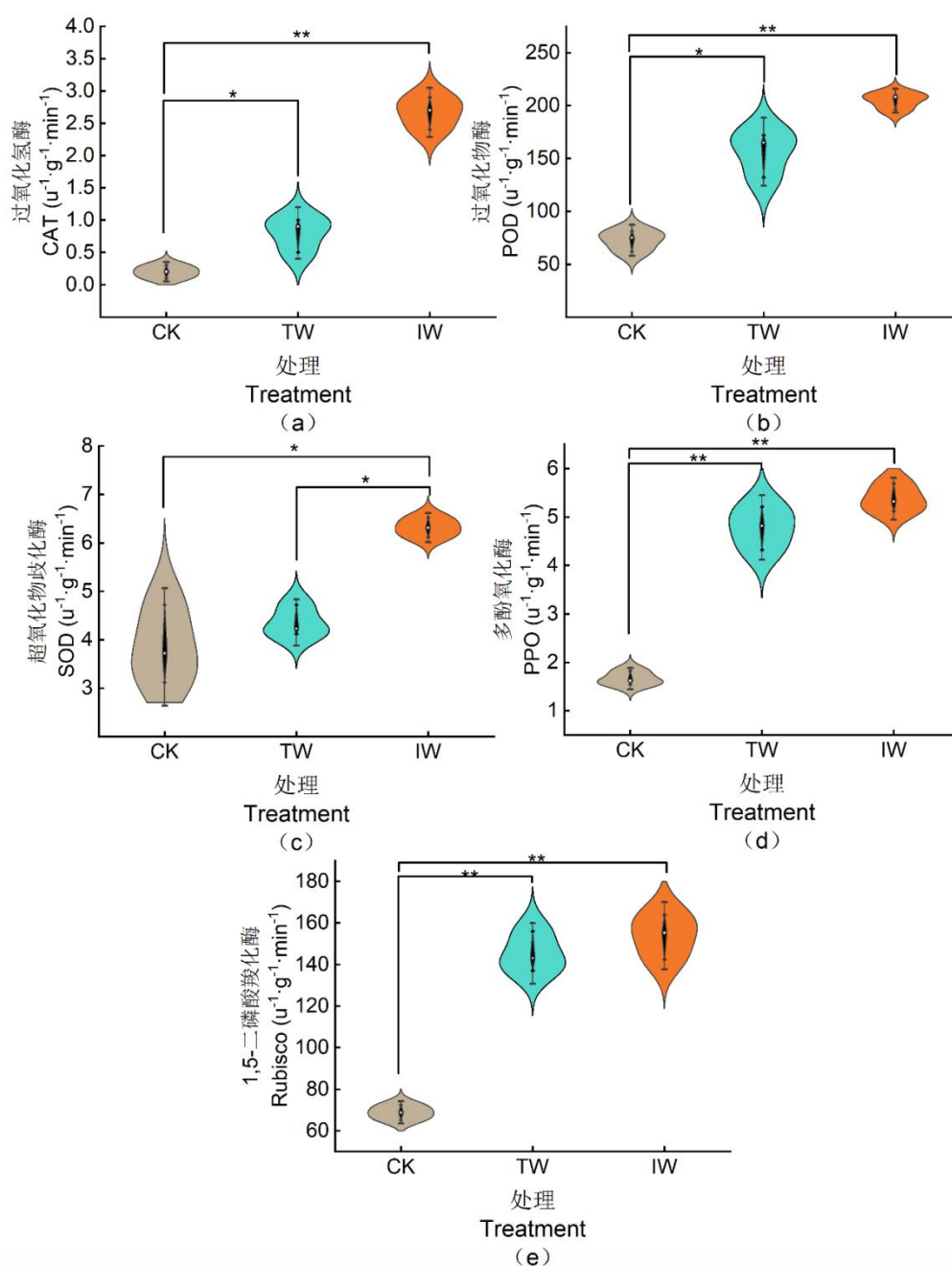
图 2-9 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片相关酶活性的影响

Figure 2-9 The effect of different CO₂ fertilization methods on enzyme activities in grape leaves

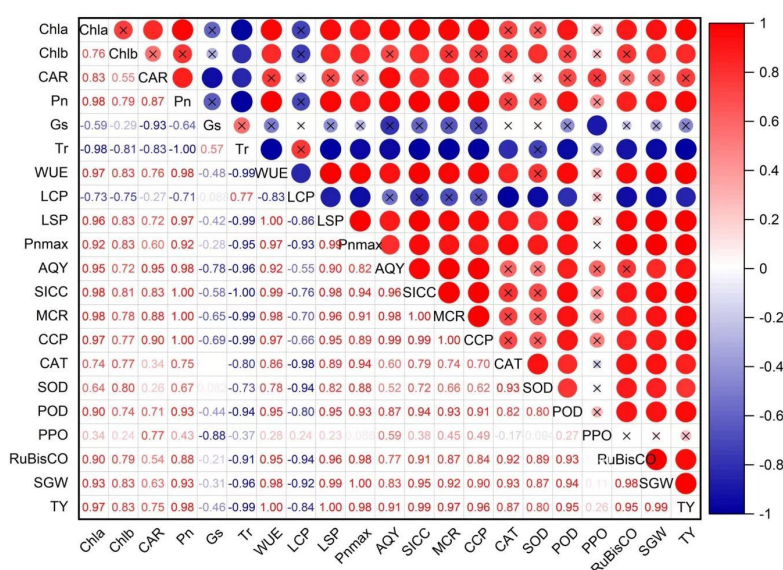
2.2.6 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄产量的影响

如表 2-4 所示, 不同 CO₂ 施肥方式处理的单粒重、单穗重、产量均表现为 IW > TW > CK。TW 和 IW 处理的单粒重分别比 CK 高了 31.1 % 和 58.3 %, 差异显著 ($P < 0.05$)。TW 和 IW 处理的产量分别为 12731.58 和 13875.61 $kg \cdot hm^{-2}$, 分别比 CK 处理高出 2409.74 和 3553.77 $kg \cdot hm^{-2}$ 。

表 2-4 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实产量的影响Table 2-4 Effect of different CO₂ aerating methods on grapevine fruit yield

处理	单粒重	单穗重	产量
Treatment	Single grain weight(g)	Spikelet weight(g)	Yield(kg·hm ⁻²)
CK	1.80 ± 0.08c	531.72 ± 10.32c	10321.84 ± 210.32c
TW	2.36 ± 0.09b	632.71 ± 11.32b	12731.58 ± 197.35b
IW	2.85 ± 0.10a	672.83 ± 13.56a	13875.61 ± 225.44a

2.2.7 各指标相关性分析

图 2-10 叶片光合色素含量、光合特性、光合 CO₂ 曲线特征参数及相关酶活性与果实产量的相关性Figure 2-10 Correlation of leaf photosynthetic pigment content, photosynthetic characteristics, characteristic parameters of photosynthetic CO₂ curve and related enzyme activities with fruit yield

注：红色和蓝色表示显著的正相关和负相关，而白色表示无显著相关性。CAR：叶片中类胡萝卜素含量，CCP：CO₂ 补偿点，Pn：净光合速率，LCP：光补偿点，SICC：CO₂ 饱和点，SGW：单果重，LSP：光饱和点，MCR：叶片最大羧化速率，Tr：蒸腾速率，Gs：气孔导度，WUE：水分蒸发速率，AQE：表观量子效率，POD：过氧化物酶；CAT：过氧化氢酶；SOD：超氧化物歧化酶；PPO：多酚氧化酶；Pnmax：最大净光合速率；Chla：叶绿素 a 含量，Chlb：叶绿素 b 含量，YT：果实产量，RuBisCO：Rubisco 活性

Note: Red and blue indicate significant positive and negative correlations, respectively, while white denotes no significant correlation. CAR: Carotenoid content in leaves; CCP: CO₂ compensation point; Pn: Net photosynthetic rate; LCP: Light compensation point; SICC: CO₂ saturation point; SGW: Single fruit weight; LSP: Light saturation point; MCR: Maximum carboxylation rate in leaves; Tr: Transpiration rate; Gs: Stomatal conductance; WUE: Water use efficiency; AQE: Apparent quantum yield; POD: Peroxidase; CAT: Catalase; SOD: Superoxide dismutase; PPO: Polyphenol oxidase; Pnmax: Maximum net photosynthesis rate; Chla: Chlorophyll a content; Chlb: Chlorophyll b content; YT: Fruit yield; RuBisCO: Rubisco activity.

如图 2-10 所示，弗雷葡萄果实单粒重与光合色素含量、光饱和点、最大羧化速率、

净光合速率、水分利用效率和 Rubisco 活性呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与表观量子效率正相关 ($P < 0.05$)。果实产量与光合色素含量、光饱和点、净光合速率、水分利用效率、最大羧化速率和 Rubisco 活性呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与抗氧化酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$)。产量和单粒重与 CO₂ 补偿点和蒸腾速率均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与气孔导度均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。Rubisco 活性与光合色素含量、净光合速率、抗氧化酶活性和最大羧化效率呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

2.3 讨论

2.3.1 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄产量的影响

CO₂ 施肥对植物果实产量有明显的增产作用 (Markovic et al., 2021)，高宇等 (2018) 在研究不同 CO₂ 浓度对黄瓜产量和经济效益后发现，经过 CO₂ 加富处理的白根黄瓜产量比不施用气肥的果实产量增加了 9.71%，26.82%，30.91%，白籽嫁接的黄瓜产量分别提高 9.25%，27.72%，31.23%；黑籽嫁接的黄瓜产量分别提高 11.60%、26.98%，30.38%。有类似研究发现，经过 CO₂ 加富处理过的番茄与未经过 CO₂ 加富处理的对照相比，单果重增高了 25 g，每亩产量提高了 11% (魏秀翠等，2008)。本试验发现 CO₂ 浓度的升高显著提高了葡萄单粒重和产量，其中以 IW 处理的增幅最高，其中 TW 和 IW 处理的产量较 CK 处理分别高出 2409.74 和 3553.77 kg·hm⁻²。CO₂ 作为植物光合作用重要原料之一，其浓度的变化直接影响了光合产物的合成，进而影响植物干物质的积累，最终影响产量的形成 (Zhang et al., 2023, Peng et al., 2020)。

2.3.2 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光合色素含量的影响

光合作用是利用叶绿素等光合色素，将植物体吸收的 CO₂ 和水转化为有机物贮存起来。叶绿素是植物叶片光合作用的物质基础，其含量的高低能反映植物的生长状况和叶片光合能力 (袁嫚嫚等，2018)。相关研究发现，适度增施 CO₂ 能提高植物叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量 (Gardner et al., 2022)。沈维等 (2017) 通过研究加气地下滴灌对黄瓜叶片生长特性的影响后发现加气地下滴灌显著提高了土壤耕作层孔隙度进而加速了植物根系的气体流通，从而促进叶片叶绿素含量、可溶性蛋白的合成。本研究表明，在同一灌水周期内，两种施肥方式处理的葡萄叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量与 CK 处理相比均有一定的提升，其中 IW 处理的叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量均达到最高值，与上述研究一致，说明在同一 CO₂ 浓度条件下，采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式对‘弗雷无核’

叶绿素含量的增效最高。同时有研究表明叶绿素 a/b 的提高,可以促进植物生物量及产量的形成 (Simkin et al., 2022)。本研究中,CO₂ 加气灌溉施肥方式处理的叶绿素 a/b 显著高于其余处理。说明 CO₂ 加气灌溉施肥方式对植物叶片叶绿素 a 含量的提升效果要优于叶绿素 b,可以有效提高叶片对光能的吸收和转化能力。类胡萝卜素作为光合色素中的辅助色素,主要功能为吸收和传递光能,对叶绿素也有一定的保护作用。马冲等 (2024) 研究发现高浓度 CO₂ 可以有效提高 C3 植物的类胡萝卜素含量。同时也有研究发现,加气灌溉可以有效提高植物叶片中的类胡萝卜素含量 (Surabhi et al., 2022)。本研究中,两种施肥方式处理的葡萄叶片类胡萝卜素含量在同一灌水周期内均显著高于 CK 处理,但两种施肥方式之间没有显著差异,说明 CO₂ 加气灌溉施肥方式对‘弗雷无核’叶片类胡萝卜素含量的提升效果不明显。

2.3.3 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光合特征的影响

光合作用是植物生长发育过程中至关重要的一环。CO₂ 作为光合作用的重要底物之一,其浓度的变化也直接影响植物光合能力的强弱。净光合速率是光合作用强弱的一个重要反映 (Chen et al., 2023a)。净光合反应速率受气孔导度、光合色素及光合反应相关酶活性等多种因子的共同调控 (裴书瑶等, 2024)。叶片气孔是作物进行气体交换的主要场所。气孔导度表示植物气孔的开张程度,影响着植物的蒸腾作用、光合作用和呼吸作用,不断为植物体水分、养分的吸收转化提供动力 (Kirschbaum and McMillan, 2018)。Liu 等 (2019) 研究发现温室内增施 CO₂ 提高了植物净光合速率和水分利用效率,降低了叶片蒸腾速率和气孔导度 (Liu et al., 2019)。Baram 等 (2023) 对生菜叶片光合指标的研究表明,良好的根际通气条件可以提高净光合速率、气孔导度和水分利用效率。刘永晨等 (2020) 研究发现,土壤通气可以显著提高甘薯光合作用,改善根区透气性提高土壤氧气含量,对促进根系生长、提高叶片光合速率具有重要意义。本试验中,在同一 CO₂ 浓度条件下, IW 处理的净光合速率和水分利用效率在同一灌水周期内的提升效果要高于 TW,说明采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式相比于传统施肥方式效果更好。同时本研究还发现 IW 处理较 TW 处理的葡萄叶片气孔导度在同一灌水周期内均有一定提升,暗示了 CO₂ 加气灌溉施肥方式可以缓解高浓度 CO₂ 对葡萄叶片气孔导度的抑制。

2.3.4 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的影响

光响应曲线和 CO₂ 响应曲线可以反映出植物在不同光照和不同 CO₂ 浓度下潜在光合能力 (李敏等, 2017)。本试验中对光响应值和 CO₂ 响应值进行拟合相关系数较高,能很好地反映不同施肥方式处理对不同光照条件和不同 CO₂ 浓度下的净光合速率变化。表观量子效率 (AQE) 反映了植物光合作用对光能的利用效率 (Huang et al., 2023),

本试验中, 两种施肥方式处理的 AQE 均显著高于 CK 处理, 但处理 TW 和 IW 之间差异不显著, 说明适当提高 CO₂ 浓度可增大‘弗雷无核’最大净光合速率潜能, 并对施肥方式的限制较小, 同时本试验中 IW 处理的最大净光合速率 Pn_{max} 显著高于其余处理, 这与前者结果相一致。对于光饱和点 (LSP) 两种施肥方式均显著高于 CK 对照, 其中 IW 处理的 LSP 最大, 说明采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式对‘弗雷无核’LSP 的增效最佳, 使植株能够适应更宽广的光强范围, 更大的光能力和光能捕获的能力。光补偿点 (LCP) 反映植物对弱光的耐受能力 (Lubin et al., 2023), 本试验中两种施肥方式处理的 LCP 均显著高于 CK 处理, 其中以 IW 处理的 LCP 最低, 说明 CO₂ 加气灌溉施肥方式可以有效增强‘弗雷无核’对强光和弱光的耐受能力。

V_{cmax} 和 J_{max} 可以反映出植物的光合能力 (Lu et al., 2022)。本试验中两种施肥方式处理的 V_{cmax} 和 J_{max} 均显著高于 CK 对照, 且两种处理之间均差异不显著, 说明增施 CO₂ 可以提高‘弗雷无核’最大羧化效率和最大电子传递速率, 且不受施肥方式所影响。最大光合能力 (A_{max}) 表现了植物叶片的最大光合潜力 (Ofori-Amanfo et al., 2021), 本试验中两种处理均显著高于 CK 对照, 说明适当提高 CO₂ 浓度能够显著增加‘弗雷无核’光和潜能, 而且两种施肥方式处理对光合能力所增加的幅度也不相同, 以 IW 处理增加幅度最大, 这暗示了在同一 CO₂ 浓度条件下, CO₂ 加气灌溉施肥方式对‘弗雷无核’A_{max} 的促进效果最佳。光呼吸速率 (R_p) 是揭示植物细胞呼吸作用强度的指标 (Khan et al., 2022), 本试验中, 各处理 R_d 之间差异不显著, 说明 CO₂ 的不同施加方式对‘弗雷无核’R_p 无显著影响或影响较小。同时本研究中 IW 处理的叶片 CO₂ 饱和点 (CSP) 最大, 说明 CO₂ 加气灌溉施肥方式使‘弗雷无核’能够适应更宽广的 CO₂ 浓度范围, 更大的吸收利用 CO₂ 的能力。

2.3.5 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄叶片抗氧化酶及 Rubisco 活性的影响

随着生育进程的推进, 葡萄会逐渐衰老, 光合能力下降严重影响葡萄的可持续经营。活性氧的积累被认为是导致植物光合系统损伤的关键因素 (Ma et al., 2021)。植物细胞中的抗氧化酶, 如超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和多酚氧化酶 (PPO) 等在防御细胞过氧化反应中扮演着至关重要的角色, 它们能够有效清除体内过量的活性氧, 这对于植物避免氧化损伤至关重要。叶片的衰老是植株老化的直观表现之一, 这一过程与根系生长状况密切相关, 根区受到低氧胁迫明显抑制了植物地上部分的生长发育 (Mushtaq et al., 2022)。当根部氧气含量低于植物生长所需的浓度时, 根系的呼吸与代谢活动将会受阻, 进一步导致根系功能部分受损, 继而影响植株地上部分的功能并加速衰老过程 (张溪荷, 2016)。随着叶片衰老的进程, 植物体内抗氧化酶的活性会逐渐下降, 清除活性氧的能力减弱, 活性氧水平的累积导致膜脂过氧化, 进一步加剧叶片衰老过程 (钟淑芳等, 2024)。郭益昌等 (2020) 研究发现长期的通气

有效减缓了雷竹叶片内四种酶的下降速度，从而延缓了衰老。本研究中，两种施肥方式处理的葡萄叶片 SOD、POD、CAT 和 PPO 活性与 CK 处理相比均有不同程度的提高，其中 IW 处理的四种酶活性均最高，说明采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式可以有效提高‘弗雷无核’抗氧化酶活性，能及时清除细胞内产生的活性氧以降低伤害，从而延缓衰老，促进果园的可持续经营。Rubisco 作为光合作用 C₃ 碳反应中最重要的羧化酶，其活性直接反映了植物光合碳同化效率的强弱 (Sakoda et al., 2021)。本研究中，IW 处理的叶片 Rubisco 活性显著高于其余处理，说明采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式对 Rubisco 活性的提升效果最好。

2.4 小结

在本试验条件下增施 CO₂ 明显提高了葡萄叶片光合色素含量和光合生理特性，促进了葡萄产量的增加。其中 CO₂ 加气灌溉施肥方式处理的光合色素含量、净光合速率和水分利用效率均显著高于其余处理，气孔导度和蒸腾速率则显著低于其余处理。CO₂ 加气灌溉施肥方式处理的光饱和点、CO₂ 饱和点和最大光合能力均为最大值，抗氧化酶活性高于其余处理，且产量最高，为 13875.61 kg·hm⁻²，与对照相比增产 3553.77 kg·hm⁻²。说明 CO₂ 加气灌溉施肥方式与传统施肥方式相比对植物的促进效果更佳。

第3章 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实品质、果实色泽以及酚类物质的影响

3.1 材料与方法

3.1.1 试验材料

同 2.1.1

3.1.2 CO₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成

同 2.1.2

3.1.3 CO₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式

同 2.1.3

3.1.4 试验处理

试验布局采用随机区组设计, 随机选择 3 行生长势一致的葡萄, 每个处理 5 株葡萄, 重复 5 次, 试验共设置 3 个处理: TW 处理 (传统 CO₂ 施肥方式)、IW 处理 (CO₂ 加气灌溉施肥方式) 和 CK 对照 (不进行 CO₂ 施肥) 三个处理, 于 2023 年 6 月 25 日 (花后 30 天) 至 2023 年 7 月 30 日间进行施气处理, 共处理 35 天, TW 处理通过在气室内悬挂 CO₂ 产气袋的方式施入 CO₂, CO₂ 产气袋均悬挂于气室内顶部, 悬挂时间为处理期间每日 9:00 ~ 14:00 以及 17:00 ~ 22:00 之间, 每个气室内 CO₂ 气肥反应物总重约 10 kg, 10 h 产气量约为 30 L; IW 处理采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式进行施气处理, CO₂ 气源为钢瓶发生器, 将同等量气肥反应物 (10kg) 放置于钢瓶发生器中, 设置 CO₂ 固定输出压为 0.05 Mpa, 于 9:00 ~ 14:00 以及 17:00 ~ 22:00 之间均速通入稳压 CO₂ 气体, 通气总量约为 30 L。各处理均为灌后施气。CO₂ 注气系统中的工控机 (PLC) 通过实时接收和分析各气室 CO₂ 浓度监测值来控制气体电磁阀的开闭, 利用气体对流装置 (气室对角各放置两台小型冷风扇) 来降低气室 CO₂ 浓度升高的梯度进而保证气室内 CO₂ 气体均匀分散, 最终保持气室内 CO₂ 浓度处于不同设定范围内, 气室外表面每 3 d 用清水进行清洗, 避免空气中灰尘、沙石降低薄膜透光率。于 6 月 25 日起, 每日实时采集气室内光照强度、空气温湿度以及 CO₂ 浓度, 每 10 min 记录一次。于花后 44 d (7 月 9 日, 果实转色期)、

51 d (7月16日, 果实转色期)、58d (7月23日, 果实转色期) 和 65 d (7月30日, 果实成熟期), 分别从每个处理中随机采集 3 穗果实进行果实品质的测定, 均重复三次。

3.1.5 测定项目与方法

3.1.5.1 果实品质相关指标的测定

(1) 百粒重: 使用电子分析天平测定葡萄百粒重, 在花后的四个时期每个处理随机选择 100 粒果实, 结果取平均值;

(2) 硬度: 每个重复随机选取 10 粒葡萄果实, 用手持硬度计进行测量, 选取直径 5.0mm 的探头测定葡萄果实的中心硬度。

(3) 可溶性固形物: 每个重复随机选取 10 粒葡萄果实, 使用数字折光仪进行测定, 将浆果挤压至滴出果汁, 将果汁滴入测糖仪棱镜表面, 读取数值。

(4) 酸碱度 (pH): 每个重复随机选取 10 粒葡萄果实, 将浆果挤压至滴出果汁, 用 PH 计直接浸泡电极的方法测定果汁的 pH 值。

(5) 可滴定酸: 每个重复随机选取 10 粒葡萄果实, 将浆果挤压至滴出果汁, 用 0.02 mol L⁻¹ NaOH 滴定 10mL 果汁至 pH 8.2, 以每 100 mL 果汁中酒石酸当量克表示。

(6) 可溶性糖: 采用苯酚-硫酸法测量可溶性糖含量, 每个重复随机选取 10 粒葡萄果实, 进行洗涤和捣碎, 称取 1 g 新鲜葡萄组织液作为测试样品, 加入 5mL 80%的乙醇溶液, 在 80℃ 水浴中浸提 30 min, 冷却至室温其次, 4500 rpm/min, 离心 10 min, 将上清液移至 25 mL 容量瓶中, 上下摇匀。取制备好的可溶性糖溶液 10mL 至试管中备用, 称取 0.2 g 蒽酮于 84%的硫酸溶液中, 制备出硫酸蒽酮试剂, 向含有可溶性糖溶液的试管中加入 2 mL 的硫酸蒽酮试剂, 并迅速混合。将摇匀的混合物在沸水浴中加热 10 min 后, 取出后静置至室温, 使用分光光度计在特定波长 (620 nm) 下测定样品吸光度。通过与葡萄糖标准溶液的吸光度值绘制的标准曲线比较, 计算样品中的可溶性糖含量。

3.1.5.2 果实色度值的测量

从每个重复中随机采集 9 个葡萄浆果 (3 个果穗的上、中和下部), 并使用色度计 Minolta® CR-200 测量浆果颜色。首先对色度计进行校准, 然后将采集的葡萄果实用去离子水洗净, 擦干, 放置于色度计的测量窗口处, 确保葡萄表面平坦且完全覆盖测量区。随后, 按照仪器的操作指南启动色度测量程序, 记录下葡萄表皮的 L* (亮度)、a* (红绿色调) 和 b* (黄蓝色调) 值, 色度值 (C*) = [(a*)² + (b*)²]^{0.5}。色调角 h° = tan⁻¹ (b*/a*); 当 a* < 0, b* > 0 时, h° = 180 + tan⁻¹(b*/a*); 其中 h° 值为 0° 表示红紫色, h° 值为 90° 时表示黄色, h° 值为 180° 表示蓝绿色, h° 值为 270° 时表示为蓝色。为了提高数据的准确性和

可靠性, 对每个葡萄样本进行多点测量, 并计算平均色度值。最后, 根据测得的色度值计算葡萄的颜色指数, 葡萄颜色指数 (CIRG) 的计算公式如下: $CIRG = (180-h^{\circ}) / (L^*+C^*)$, 根据 CIRG 大小, 将葡萄分为 5 类, 即绿黄色 (< 1.5)、粉红色 (1.5~2.5)、红色 (2.5~3.5)、紫色 (3.5 ~ 4.5) 和暗紫色 (> 5.0) (Liu et al., 2013)。在整个过程中, 保持仪器稳定和环境条件一致是确保测量精确性的关键。

3.1.5.3 果皮花色苷和类黄酮含量的测定

每个重复随机选取 10 粒葡萄果实, 用去离子水洗净, 将葡萄果皮从果肉中分离, 使用液氮冷冻后, 用研磨机研磨成粉末。称取约 0.5 g 的葡萄果皮粉末, 放入具有密封盖的离心管中。向离心管中加入 10 mL 的 50% 甲醇溶液 (含 0.1% 的盐酸), 以增加花色苷的提取效率。使用超声波处理 30 分钟。4500 rpm/min, 离心 10 min, 收集上清液, 通过 0.22 μm 的滤膜过滤提取液, 以去除可能存在的固体颗粒。使用高效液相色谱仪进行分析, 选用适合的色谱柱, 移动相可选择乙腈-水-醋酸体系。乙腈和水的比例可根据目标化合物的极性进行调整。测定波长: 对于花色苷, 可选择 520nm; 对于类黄酮, 可选择 350 nm。注射样品量为 20 μL, 流速设定为 1 mL/min。通过与已知浓度的标准品进行比较, 计算样品中花色苷和类黄酮的含量。

3.1.5.4 果皮中叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

果皮中叶绿素含量的测定用乙醇混合法测定, 每个重复随机选取 10 粒葡萄果实剥取果皮, 将果皮研碎至粉末状, 充分混匀后称取 0.5 g 果皮, 用 95 % 乙醇定容至 20 ml, 4℃ 冰箱放置 24 h, 12000 rpm 离心 20 min, 取上清液用紫外分光光度计测定在 470 nm、649 nm 和 665 nm 处吸光值, 以 95 % 乙醇为空白组。

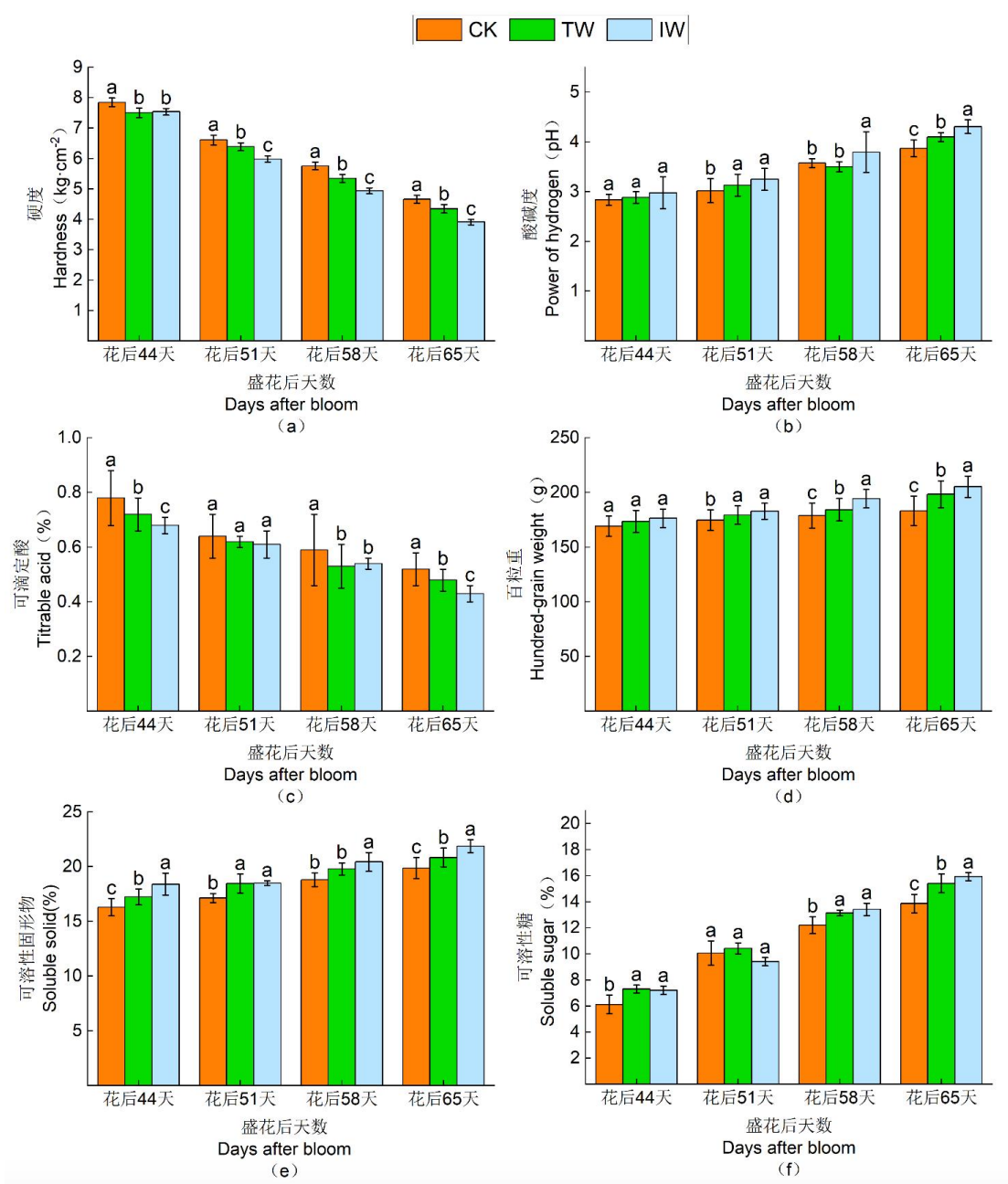
3.1.5.5 葡萄总酚含量的测定

用福林酚方法测定葡萄果皮中的总酚含量, 以没食子酸为标准, 结果以没食子酸等价值表示。称取 2g 样品, 加入蒸馏水 20mL, 溶解。4000 r/min 离心 10 min 后, 取其上清液为提取物。将 1mL 葡萄提取液加入 0.3 ml 甲醇、1.2mL 7 % Na₂CO₃ 溶液和 1.5 mL Folin-Ciocalteu 试剂 (用无水乙醇 1:1 对福林酚进行稀释, 现配现用, 避光保存)。将得到的混合物匀浆, 在室温下避光反应 2 h。用分光光度计在 750nm 处进行比色并记录样品吸光度。以没食子酸为标准(50-1000 mg/L), 得到标准曲线。以每 100 g 葡萄鲜重没食子酸当量 (最终换算为 mg/kg) 表示样品中总酚的含量。

3.1.6 数据处理与分析

同 2.1.6

3.2 结果与分析

3.2.1 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实品质相关指标的影响图 3-1 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实品质相关指标的影响Figure 3-1 Effects of different CO₂ aerating methods on grapevine quality related indexes

由图 3-1a、c 可知, 不同施肥方式处理后, 葡萄果实的硬度和可滴定酸随着果实的成熟呈逐渐下降的趋势。在花后 65 天, 各处理葡萄果实的硬度和可滴定酸均表现为 CK > TW > IW。如图 3-1b、d、e、f 所示, 各处理葡萄果实的可溶性固形物含量, 百粒重、可溶性糖含量和 pH 随着果实的成熟呈逐渐上升的趋势。不同处理间的可溶性固形物的含量存在差异, 在花后 44d 和 65d, IW 处理的可溶性固形物的含量显著高于其他处理。各处理葡萄果实的百粒重和 pH 在花后 44 天差异不大, 但在花后 58 天和 65 天各个处理的百粒重和 pH 均显著高于对照 CK ($P < 0.05$)。在花后 65 天, IW 和 TW 处理葡萄果实的百粒重分别比 CK 高了 12.7% 和 8.1%, 差异显著 ($P < 0.05$)。IW 和 TW 处理在花后 44 天、58 天以及 65 天的葡萄果实中可溶性糖含量均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。在花后 58 天~65 天, 各处理的葡萄果实中可溶性糖含量均表现为 IW > TW > CK。在花后 65 天, TW 和 IW 处理的可溶性糖含量分别比 CK 处理显著高出 10.4%、22.3% ($P < 0.05$)。

3.2.2 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果皮中叶绿素与类胡萝卜素的的影响

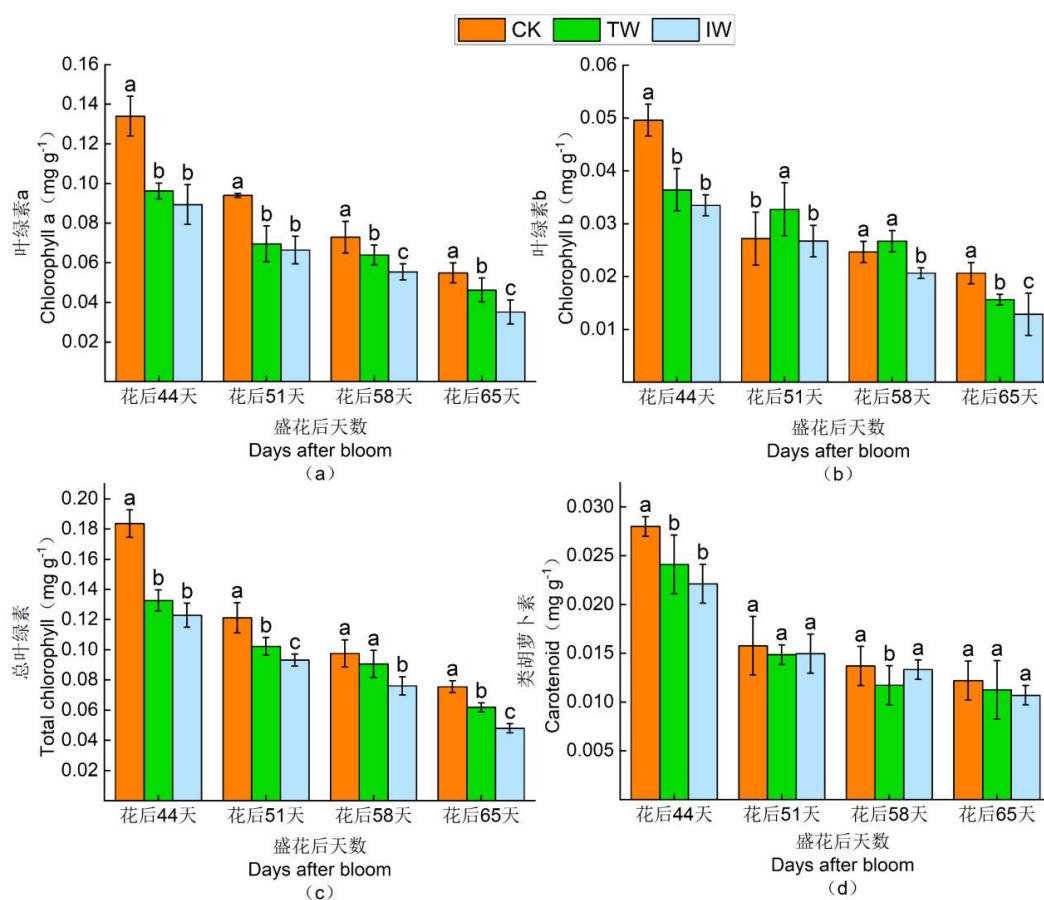


图 3-2 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果皮叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Figure 3-2 Effect of different CO₂ aerating methods on chlorophyll and carotenoid content of grape skins

如图 3-2a、b 所示，随着葡萄果实的成熟，果皮中叶绿素 a 和 b 的含量逐渐下降。IW 和 TW 处理的叶绿素 a 含量在花后 44 天、51 天、58 天和 65 天均显著低于 CK ($P < 0.05$)，在花后 65 天，TW 和 IW 处理的叶绿素 a 含量分别比 CK 低 15.7% 和 36.0%，差异显著 ($P < 0.05$)。各处理的叶绿素 b 含量在花后 51 天和 58 天均表现为 TW > CK > IW。在花后 44 天和 65 天，IW 处理的叶绿素 b 含量分别比 CK 低 32.5% 和 37.7%，差异显著 ($P < 0.05$)。如图 3-2d 所示，随着果实的成熟，各处理果皮中类胡萝卜素的含量均呈现下降的趋势。在花后 44 天，IW 处理的类胡萝卜素含量比 CK 低 21.0%，而在果实成熟期（花后 65 天），各处理间差异不显著。如图 3-2c 所示，TW 和 IW 处理的各个时期，果皮总叶绿素均显著低于 CK ($P < 0.05$)。在花后 65 天，TW 和 IW 处理果皮中总叶绿素的含量与 CK 相比分别显著降低了 18.1% 和 36.3% ($P < 0.05$)。

3.2.3 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果皮中花色苷和类黄酮的影响

如图 3-3 所示，不同施肥方式处理的葡萄果皮中花色苷与类黄酮的含量随着果实成熟均呈现逐渐上升的趋势。在每个时期，IW 和 TW 处理的葡萄果皮中花色苷和类黄酮的含量均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。各处理在花后 58 天~65 天均表现为 IW > TW > CK。在花后 65 天，IW 处理的花色苷和类黄酮分别比 CK 高了 26.7% 和 43.3%，差异显著 ($P < 0.05$)。

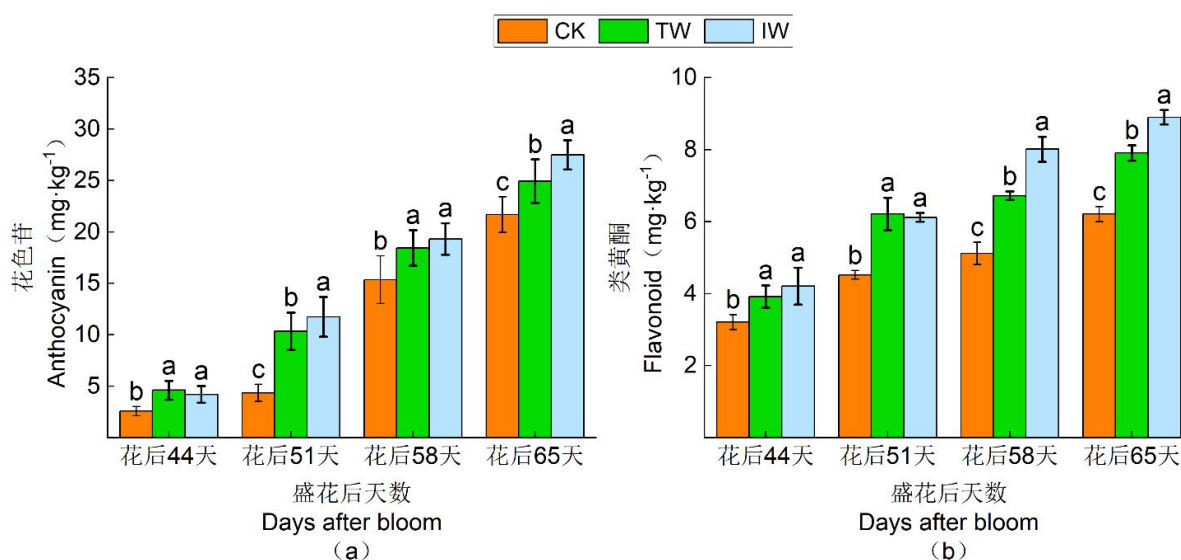


图 3-3 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果皮叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Figure 3-3 Effect of different CO₂ aerating methods on chlorophyll and carotenoid content of grape skins

3.2.4 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实颜色指数的影响

CIRG 值代表红色葡萄的颜色指数。如表 3-1 所示，随着葡萄果实的成熟，CIRG 逐

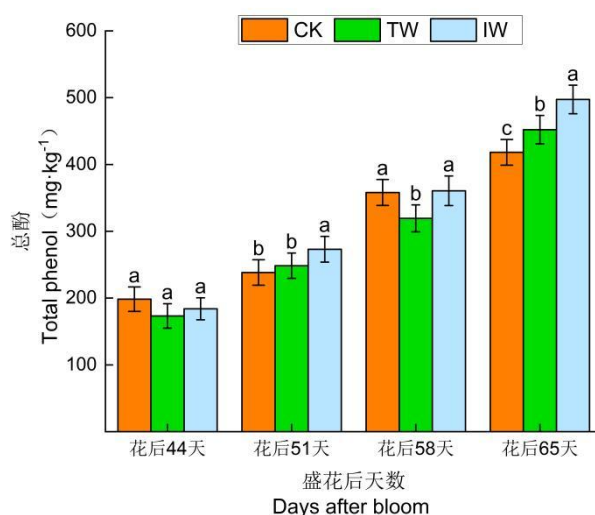
渐升高,在花后44天、58天和65天时, IW 处理葡萄果皮的 CIRG 值始终高于 CK 处理。各处理的 CIRG 值,除花后44天和51天外其余时期均表现为 IW > TW > CK。在花后58天和65天, IW 处理的 CIRG 值与 CK 处理相比分别高了16.1%和12.5%,差异显著 ($P < 0.05$)。在花后58天和65天, TW 处理的 CIRG 值分别比 CK 高10.8%和7.1%,差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3-1 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实颜色指数 (CIRG) 的影响Table 3-1 Effect of different CO₂ aerating methods on grapevine color index (CIRG)

处理 Treatment	花后44天 44 days after flowering	花后51天 51 days after flowering	花后58天 58 days after flowering	花后65天 65 days after flowering
CK	1.62 ± 0.05a	2.45 ± 0.07b	3.72 ± 0.05b	4.23 ± 0.01c
TW	1.58 ± 0.03a	2.93 ± 0.02a	4.12 ± 0.04a	4.53 ± 0.05b
IW	1.68 ± 0.02a	2.84 ± 0.05a	4.32 ± 0.06a	4.76 ± 0.03a

3.2.5 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄总酚含量的影响

如图 3-4 所示,不同施肥方式处理后的葡萄总酚含量随着果实成熟均呈现逐渐上升的趋势。与花后44天~51天相比, IW 处理的总酚含量在花后51天~65天上升较为明显。在花后51~65天, TW 和 IW 处理的葡萄中总酚含量均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$),其中在花后65天, TW 和 IW 处理的总酚含量与 CK 处理相比分别高了10.4%、22.3%。

图 3-4 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄总酚含量的影响Figure 3-4 Effect of different CO₂ aerating methods on total phenolic content of grapes

3.3 讨论

3.3.1 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实品质相关指标的影响

葡萄的品质与果实中的可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、维生素 C、pH 等密切相关 (王竞 et al., 2024)。糖、酸不仅是水果中重要的营养物质,也是重要的风味物质 (刘金莹等, 2023)。果实的甜酸风味是可溶性糖和有机酸共同作用的结果。糖作为光合作用的主要产物之一 (林炎娟等, 2024),既为植物生长发育提供能量,也作为植物体内的一种信号分子参与并调控植物的生长发育进程 (崔岩等, 2023)。CO₂ 浓度的变化显著影响苹果果实的硬度和可溶性固形物含量,CO₂ 浓度升高时,果实硬度和可溶性固形物含量也会随之增加 (Bettoni et al., 2017)。本研究中,与 CK 对照相比,两种施肥方式处理均显著提高了葡萄同一时期的果实可溶性固形物,其中以 IW 处理的增效最高。然而各处理却显著降低了果实硬度,这可能是因为 CO₂ 浓度的升高促进了果实糖分积累的效率,缩短了葡萄的成熟时间。Yang 等 (2022) 研究发现地下通气可以有效改善土壤的空气环境,在增强光合作用的同时也促进了矿质养分向地上部分的运输,并且有效提高了甘蔗的可溶性糖含量,降低了可滴定酸含量 (Yang et al., 2022)。本研究中, IW 处理的可溶性糖含量在所有时期均显著高于其余处理。在果实达到成熟期后,两种施肥方式处理的可滴定酸的含量均显著低于 CK 对照。相关研究发现,随着葡萄的成熟,果实内 pH 值逐渐升高 (Heidari et al., 2006)。本研究中也有相似的结果,随着葡萄的成熟, IW 处理的 pH 值与其余处理相比上升速率较快。这可能是因为随着果实的不断成熟,有机酸含量不断降低,从而减少了果实酸度,说明 CO₂ 加气灌溉施肥方式可以有效促进果实的成熟,缩短果实熟制。

3.3.2 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实色泽的影响

在葡萄果实的成熟过程中,叶绿素、类胡萝卜素和花青素之间的相互作用及其含量变化对于果实色泽的转变扮演着至关重要的角色 (Huang et al., 2019)。在转色阶段之前,果实尚未成熟,此时细胞内叶绿素含量较高,不仅参与太阳光的吸收和光合作用,而且有效地保护植物细胞免受自由基的伤害。然而,当果实进入成熟期,叶绿素的存在开始抑制果实着色,不利于红色色素的形成 (Schupp and Greene, 2004)。随着成熟过程的进展,水解酶对叶绿素的分解作用增强,促使类胡萝卜素的形成及含量增加,与此同时,花青素的合成也开始增加,并在果实中不断累积 (张小月, 2022),同时,果实的表面颜色主要由花色苷决定。张上隆等 (2007) 的研究表明,柑橘果皮的不同颜色表现是由叶绿素和类胡萝卜素的含量及其比例差异所致,叶绿素含量超过类胡萝卜素时,会掩盖果皮的橙红色表达。本试验研究结果表明,叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量

在成熟过程中均表现出下降趋势，TW 和 IW 处理显著低于 CK 对照，其中以 IW 处理的降幅最高，可能是因为叶绿素的合成受到外界持续的胁迫作用的阻碍而降低，而色素的氧化降解作用得到强化，导致叶绿素含量的降低 (Chen et al., 2022)。Hernandez 等 (2022) 研究发现加气灌溉降低了植株叶片类胡萝卜素含量 (Hernandez et al., 2022)。本研究中也得到了类似的结果，IW 处理的类胡萝卜素含量在转色后各个时期均显著低于其余处理。

3.3.3 不同 CO₂ 施肥方式对葡萄果实中酚类物质的影响

在葡萄果实的正常生长和成熟过程中，植物体内的次生代谢产物——酚类物质起到了至关重要的保护作用 (江旭升等, 2023)，这些物质不仅存在于葡萄的果皮、果籽和果梗中，而且其总酚含量被广泛认为是一种全面且综合的指标，可用于评估葡萄果实的品质及其营养价值 (Qaderi et al., 2024)；花色苷作为一种通过苯丙烷生物合成途径合成的重要化合物 (杜昱彤等, 2021)，其合成受到多种生物和非生物因素的调控，包括环境中的 CO₂ 浓度和加气灌溉等。Ferreyra 等 (2009) 的研究表明，对 20 至 25 cm 深的土壤层进行通气处理，尤其是在葡萄果实转色期进行该处理，可以显著增加果实中总酚含量的积累。加气灌溉可以通过增加植物根系土壤孔隙度来促进花色苷的合成 (Wei et al., 2020)。本研究发现花色苷在果实成熟过程中持续累积，并且 IW 处理的增幅最大，可能是 CO₂ 浓度的升高以及根系土壤环境的改善使果实中的糖含量升高，而花色苷的形成离不开糖代谢，最终使得 CK 处理的花色苷含量显著低于各处理。各处理总酚和类黄酮含量在葡萄果实进入转色期并成熟的过程中均表现出逐渐上升的趋势，其中 IW 处理在果实达到成熟期时总酚和类黄酮含量均显著高于其余处理。

3.4 小结

本研究结果表明不同 CO₂ 施肥方式处理均可以促进‘弗雷无核’葡萄的着色，并提高果实品质。在果实进入转色期并成熟的过程中，两种施肥方式处理的可溶性固形物、pH 和可溶性糖含量升高，可滴定酸含量和果实硬度降低，同时也降低了果皮叶绿素含量和类胡萝卜素含量，提高了颜色指数 (CIRG)，从而提高果实着色程度；各个处理类黄酮、花色苷和总酚含量在成熟期均达到最大值。其中采用 CO₂ 加气灌溉施肥方式进行注气的处理对果实着色和品质提升效果最好。

第4章 不同 CO₂ 浓度对葡萄光合特性及产量的影响

4.1 材料与方法

4.1.1 试验材料

同 2.1.1

4.1.2 CO₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成

同 2.1.2

4.1.3 CO₂ 加气灌溉施肥控制系统的运行模式

同 2.1.3

4.1.4 试验处理

试验布局采用随机区组设计, 选取温室内生长势一致的 4 行葡萄进行试验, 每行为 1 个处理, 每个处理 5 株葡萄, 重复 5 次, 于 2023 年 6 月 25 日 (花后 30 天) 至 2023 年 7 月 30 日间进行施气处理, 共处理 35 天, 以液态 CO₂ 钢瓶为气源, 施入的 CO₂ 浓度分别为(500 ± 30)、(700 ± 30)、(850 ± 30) 和 (1000 ± 30) μmol·mol⁻¹, 分别记作 500ppm、700ppm、850ppm 和 1000ppm, 各气室的 CO₂ 施加方式均采用 CO₂ 加气灌溉施肥模式, 即 CO₂ 从气源释放后, 经过 CO₂ 加气灌溉施肥系统的控制均匀进入到葡萄根系附近的穴贮罐中, 随后通过穴贮罐上的小孔逸散到整个气室。每日 9:00 至 14:00、17:00 至 22:00 对每个气室进行 10h 的注气处理, 气室通风及阴雨天气均不注气。使用悬挂在 0.5m 高度的 4 个 CO₂ 浓度传感器监测每个气室内的 CO₂ 浓度 (图 4-2), CO₂ 注气系统中的工控机 (PLC) 通过实时接收和分析各气室 CO₂ 浓度监测值来控制气体电磁阀的开闭, 利用气体对流装置 (气室对角各放置两台小型冷风扇) 来降低气室 CO₂ 浓度升高的梯度进而保证气室内 CO₂ 气体均匀分散, 最终保持气室内 CO₂ 浓度处于不同设定范围内, 气室外表面每 3d 用清水进行清洗, 避免空气中灰尘、沙石降低薄膜透光率。于 6 月 25 日起, 每日实时采集气室内光照强度、空气温湿度以及 CO₂ 浓度, 每 10 min 记录一次。

4.1.5 测定项目与方法

4.1.5.1 光合色素含量的测定

同 2.1.5.1

4.1.5.2 光合特征的测定

同 2.1.5.2

4.1.5.3 光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的测定

同 2.1.5.3

4.1.5.4 叶片抗氧化酶和 Rubisco 酶活性的测定

同 2.1.5.4

4.1.5.5 葡萄产量的测定

同 2.1.5.5

4.1.6 数据处理与分析

同 2.1.6

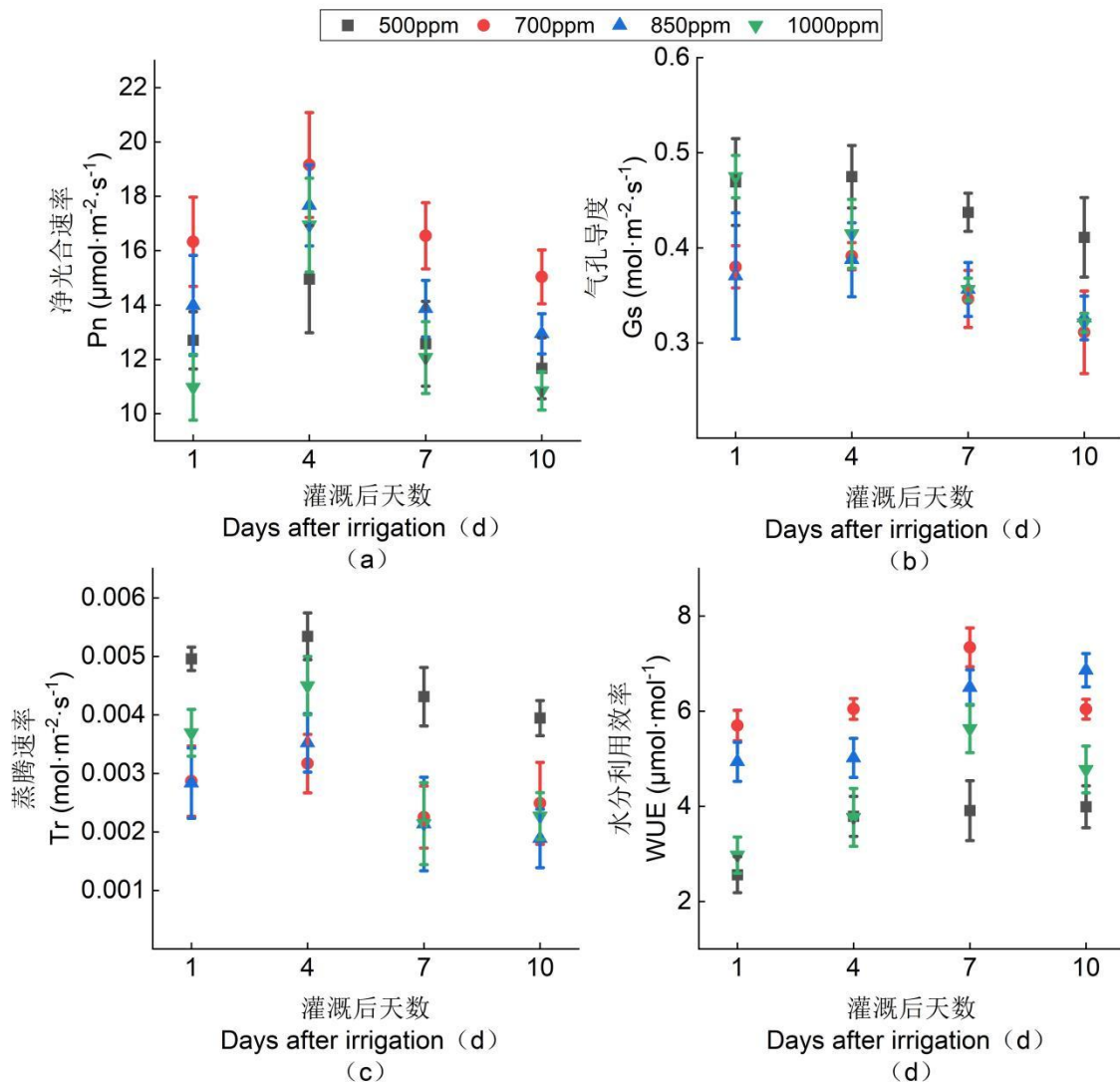
4.2 结果与分析

4.2.1 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光合色素的影响

表 4-1 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光合色素含量的影响Table 4-1 Effect of different CO₂ concentrations on the content of photosynthetic pigments in grape leaves

灌溉后天数 Days after irrigation (d)	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	类胡萝卜素 Carotenoids (mg·g ⁻¹)
1	500ppm	1.43 ± 0.05b	0.67 ± 0.00b	2.15 ± 0.12b	0.14 ± 0.02c
	700ppm	1.57 ± 0.04a	0.73 ± 0.00a	2.15 ± 0.08b	0.37 ± 0.05a
	850ppm	1.39 ± 0.04c	0.75 ± 0.05a	1.85 ± 0.18c	0.32 ± 0.03a
	1000ppm	1.35 ± 0.07c	0.59 ± 0.08c	2.28 ± 0.04a	0.20 ± 0.02b
4	500ppm	1.73 ± 0.02b	0.87 ± 0.00c	1.99 ± 0.10b	0.19 ± 0.02b
	700ppm	1.98 ± 0.12a	1.20 ± 0.04a	1.65 ± 0.17d	0.40 ± 0.09a
	850ppm	1.80 ± 0.10b	0.99 ± 0.03b	1.81 ± 0.09c	0.38 ± 0.04a
	1000ppm	1.66 ± 0.03c	0.75 ± 0.02d	2.21 ± 0.09a	0.24 ± 0.02b
7	500ppm	1.63 ± 0.07b	0.83 ± 0.01b	1.99 ± 0.12b	0.18 ± 0.01c
	700ppm	1.88 ± 0.07a	0.96 ± 0.02a	1.92 ± 0.04b	0.39 ± 0.05a
	850ppm	1.70 ± 0.01b	0.84 ± 0.02b	2.02 ± 0.07b	0.35 ± 0.03a
	1000ppm	1.56 ± 0.02c	0.72 ± 0.01c	2.17 ± 0.15a	0.23 ± 0.01b
10	500ppm	1.64 ± 0.05b	0.70 ± 0.02b	2.34 ± 0.12b	0.16 ± 0.01c
	700ppm	1.83 ± 0.09a	0.91 ± 0.04a	2.01 ± 0.12c	0.37 ± 0.04a
	850ppm	1.65 ± 0.01b	0.72 ± 0.04b	2.29 ± 0.31b	0.37 ± 0.04a
	1000ppm	1.54 ± 0.01c	0.58 ± 0.00c	2.66 ± 0.05a	0.23 ± 0.01b

如表 4-1 所示, 不同 CO₂ 浓度处理下, 700 ppm 处理叶片叶绿素 a 含量在灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d 显著高于 500 ppm、850 ppm 和 1000 ppm ($P < 0.05$) ; 灌水后 4 d、7 d 和 10 d 的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均表现为 700 ppm > 850 ppm > 500 ppm > 1000 ppm。在灌水后 4 d、7 d 和 10 d, 700 ppm 处理叶片叶绿素 b 含量均显著高于 500 ppm 处理, 分别高了 37.9%、15.7% 和 30.0% ($P < 0.05$)。不同 CO₂ 浓度处理下, 灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d 的类胡萝卜素含量均表现为 700 ppm > 850 ppm > 1000 ppm > 500 ppm。灌水后 1d、4d、7d 和 10d, 叶绿素 a/b 随着 CO₂ 浓度的升高均呈先下降后上升的趋势; 灌水后 4 d、7 d 和 10 d, 700 ppm 处理下叶绿素 a/b 显著低于 500 ppm、850 ppm 和 1000 ppm ($P < 0.05$)。

4.2.2 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光合特征的影响图 4-1 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光合特征的影响Figure 4-1 Effects of different CO₂ concentrations on photosynthetic characteristics of grape leaves

由图 4-1a 可知，不同 CO₂ 浓度处理的叶片净光合速率 (Pn) 在同一灌水周期内均呈先上升后下降的趋势。灌水后 4 d、7 d 和 10 d，各处理的 Pn 均表现为 700 ppm > 850 ppm > 500 ppm > 1000 ppm。在灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d，700 ppm 处理的叶片 Pn 均显著高于 500 ppm 处理，分别高出 28.6 %、28.1 %、31.6 % 和 28.8 % ($P < 0.05$)。由图 4-1b 和图 4-1c 可知，各处理的叶片气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 在同一灌水周期内均呈先上升后下降的趋势。灌水后 4 d、7 d 和 10 d，700 ppm 处理的叶片 Gs 和 Tr 均显著低于其余处理 ($P < 0.05$)。各处理的叶片 Tr 和 Gs 在灌水后 4 d 和 7 d 均表现为 500 ppm > 1000 ppm > 850 ppm > 700 ppm。在灌水后 1 d 和 4 d，700 ppm 处理的叶片 Tr 与 500 ppm 处理相比分别低了 42.2 % 和 40.7 %。由图 4-1d 所示，在同一灌水周期内，各处理的葡萄叶片水分利用率 (WUE) 均表现与 Pn 相同的趋势。其中 700 ppm 在灌水

后 1 d、4 d、7 d 和 10 d 均显著高于 500 ppm、850 ppm 和 1000 ppm 处理 ($P < 0.05$)。在灌水后 1 d、4 d、7 d 和 10 d, 700 ppm 处理的叶片 WUE 比 500 ppm 处理分别高 122.4%、116.2%、151.7% 和 104.1% ($P < 0.05$)。

4.2.3 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的影响

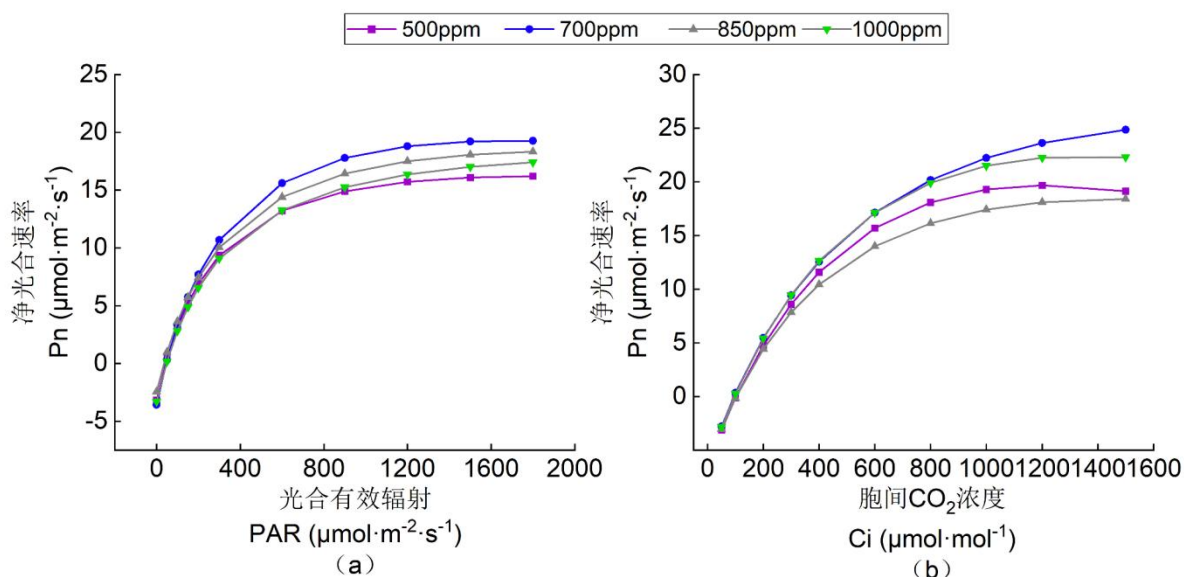


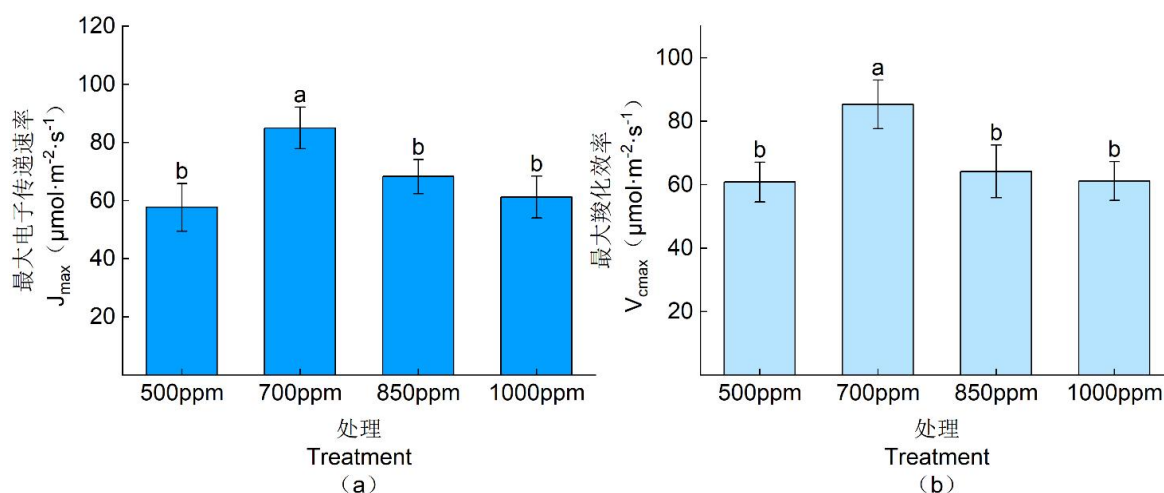
图 4-2 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的影响

Figure 4-2 Effects of different CO₂ concentrations on the light response curve and CO₂ response curve of grape leaves

表 4-2 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光响应曲线特征参数的影响

Table 4-2 Effects of different CO₂ concentrations on the characteristic parameters of the light response curve of grapevine leaves

处理 Treatment	光饱和点 Light saturation point (LSP)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点 Light compensation point (LCP)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate (P_{max})($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	表观量子效率 Apparent quantum efficiency (AQE)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
500ppm	1669.12±201.42b	49.35±3.27a	16.89±1.08b	0.048±0.00a
700ppm	1736.93±147.56a	46.31±7.43a	19.83±0.92a	0.050±0.00a
850ppm	1752.31±253.91a	42.32±2.41a	18.73±2.13a	0.054±0.00a
1000ppm	1727.93±103.38a	32.11±3.57b	17.49±1.85b	0.047±0.00a

图 4-3 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片最大羧化效率和最大电子传递速率的影响Figure 4-3 Effect of different CO₂ concentrations on maximum carboxylation efficiency and maximum electron transfer rate in grape leaves表 4-3 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片 CO₂ 响应曲线特征参数的影响Table 4-3 Effects of different CO₂ concentrations on the characteristic parameters of CO₂ response curve of grapevine leaves

处理 Treatment	CO ₂ 饱和点 CO ₂ saturation point (CSP)($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	CO ₂ 补偿点 CO ₂ compensation point (CCP)($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	光呼吸速率 Rate of photorespiration (Rp)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大光合能力 Maximum photosynthetic capacity (Amax)($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
500ppm	1158.86±98.33c	84.71±9.73a	8.18±1.82b	22.56±3.86b
700ppm	1348.24±147.23b	88.31±9.67a	9.73±0.29a	31.66±2.91a
850ppm	1383.17±291.73b	90.09±8.41a	9.39±1.59a	30.97±2.32a
1000ppm	1462.97±132.52a	92.93±6.03a	8.73±0.92a	30.19±1.77a

根据直角双曲线修正模型 (叶子飘, 2010)拟合所得葡萄转色期叶片的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线 (图 4-2)。二者分别反映了叶片净光合速率 (Pn) 随着光合有效辐射 (PAR) 和胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的改变而变化的规律。由图 4-2a 可以看出, 当 PAR 超过 1600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, 700 ppm 处理的 Pn 的增加速率与其余处理相比最低。如图 4-2b 所示, 当 Ci 在 1200 ~ 1600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 500 ppm 处理的 Pn 随着 Ci 的增加而出现下降, 其余处理的增长趋势均趋于平缓。由表 4-2 可知, 随着 CO₂ 浓度的增加, 光补偿点呈逐渐下降趋势, 光饱和点、最大净光合速率和表观量子效率均呈先升高后降低的趋势。各处理下光饱和点表现为 850 ppm > 700 ppm > 1000 ppm > 500 ppm, 与 500 ppm 处理相比, 700 ppm、850 ppm 和 1000 ppm 处理下的光饱和点分别显著提高了 4.06 %、4.98 % 和 3.39 % (P < 0.05)。不同 CO₂ 浓度处理下, 700 ppm 处理下最大净光合速率最高, 850 ppm 处理下次之。各处理下表观量子效率表现为 850 ppm > 700 ppm > 500 ppm > 1000 ppm。

由表 4-3 可知,随着 CO₂ 浓度的增加,CO₂ 饱和点和 CO₂ 补偿点呈逐渐增长的趋势,最大光合能力和光呼吸速率均呈先上升后下降的趋势。其中 CO₂ 补偿点表现为 850 ppm > 700 ppm > 1000 ppm > 500 ppm,叶片最大光合能力和光呼吸速率则均表现为 700ppm > 850ppm > 1000ppm > 500ppm。如图 4-4 所示,随着 CO₂ 浓度的增加,最大羧化效率和最大电子传递速率均呈与最大光合能力相同的趋势,其中 700 ppm 处理的最大羧化效率和最大电子传递速率最高,850ppm 处理次之。与 500 ppm 处理相比,700 ppm 处理下最大羧化速率和最大电子传递速率分别显著提高了 54.57%和 51.37% ($P < 0.05$)。

4.2.4 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片相关酶活性的影响

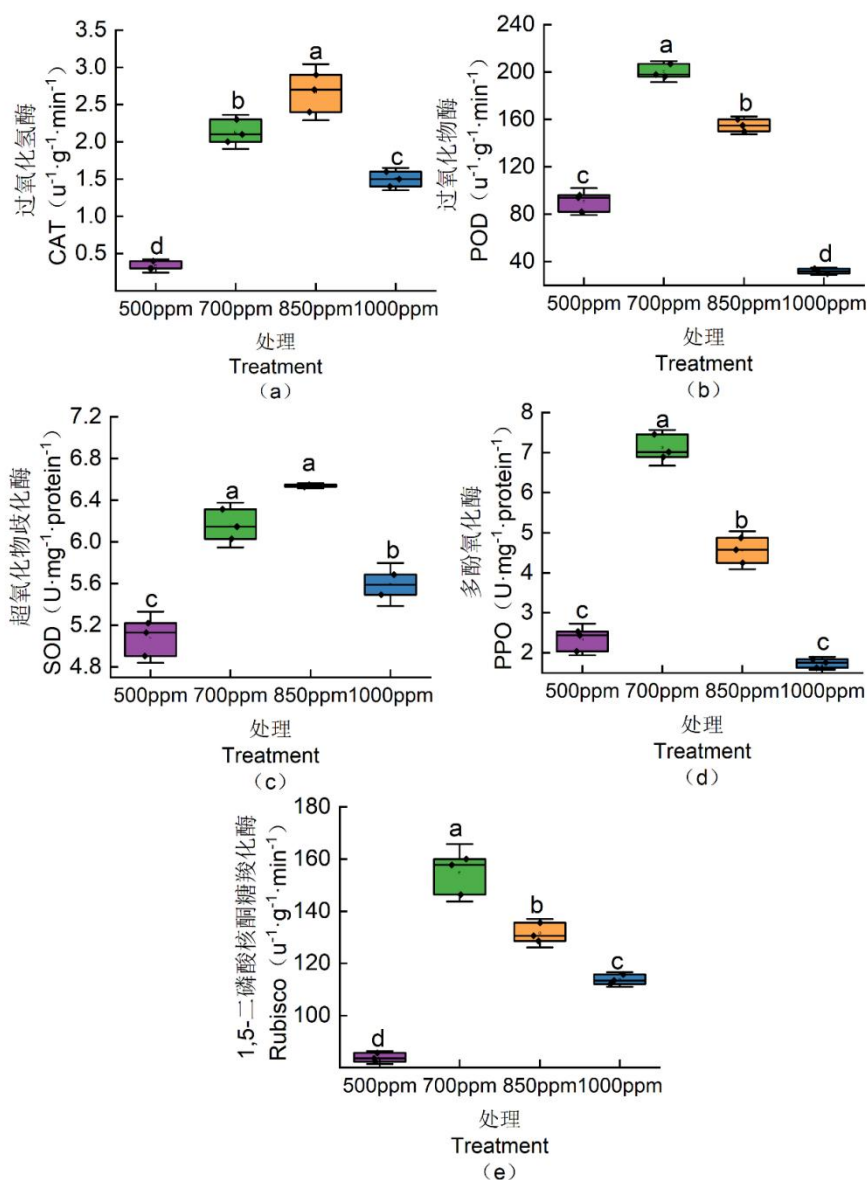


图 4-4 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片抗氧化酶活性的影响

Figure 4-4 Effect of different CO₂ concentrations on antioxidant enzyme activities of grape leaves

由图 4-4 可知, 随着 CO₂ 浓度的升高, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性均呈先上升后下降的趋势。各处理的 CAT 和 SOD 均表现为 850 ppm > 700 ppm > 1000 ppm > 500 ppm, POD 和 PPO 在各处理下则表现为 700 ppm > 850 ppm > 500 ppm > 1000 ppm。如图 4-6e 所示, 随着 CO₂ 浓度的升高, Rubisco 活性呈现与 CAT、SOD、POD 和 PPO 相同的趋势。与 500 ppm 处理相比, 700 ppm 和 850 ppm 处理的 Rubisco 活性分别显著提高了 89.11 % 和 66.12 % ($P < 0.05$)。

4.2.5 不同 CO₂ 浓度对葡萄产量的影响

如表 4-4 所示, 不同 CO₂ 浓度处理的单粒重、单穗重、产量均表现为 700 ppm > 850 ppm > 1000 ppm > 500 ppm。与 500 ppm 处理相比, 700 ppm、850 ppm 和 1000 ppm 处理的单粒重分别显著增加 37.9 %、26.8 % 和 21.8 % ($P < 0.05$) , 其中, 700 ppm 和 850 ppm 处理的产量分别为 14541.37 和 12911.41 kg·hm⁻², 比 500 ppm 处理分别高出 3038.48 和 1408.55 kg·hm⁻²。

表 4-4 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实产量的影响

Table 4-4 Effect of different CO₂ concentrations on grapevine fruit yield

处理 Treatment	单粒重 Single grain weight(g)	单穗重 Spikelet weight(g)	产量 Yield(kg·hm ⁻²)
500ppm	2.80 ± 0.05c	573.25 ± 9.30c	11502.86 ± 212.63c
700ppm	3.86 ± 0.13a	694.02 ± 12.56a	14541.37 ± 272.60a
850ppm	3.55 ± 0.03b	639.48 ± 5.63b	12911.41 ± 113.72b
1000ppm	3.41 ± 0.04b	613.32 ± 6.70b	12032.75 ± 131.39b

4.2.6 各指标相关性

如图 4-5 所示, 弗雷葡萄果实单粒重与光饱和点、最大羧化速率、净光合速率、水分利用效率和 Rubisco 活性呈极显著正相关 ($P < 0.01$) , 与叶绿素 a 和叶绿素 b 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$) 。果实产量与叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量、光饱和点、净光合速率、水分利用效率、最大羧化速率、CAT、POD 和 Rubisco 活性呈显著正相关 ($P < 0.01$) , 与气孔导度和蒸腾速率呈极显著负相关 ($P < 0.01$) 。产量和单粒重与类胡萝卜素含量均呈显著负相关 ($P < 0.05$) 。叶绿素 a 和叶绿素 b 含量与 CO₂ 补偿点、净光合速率、气孔导度和 Rubisco 活性呈显著正相关 ($P < 0.05$) 。

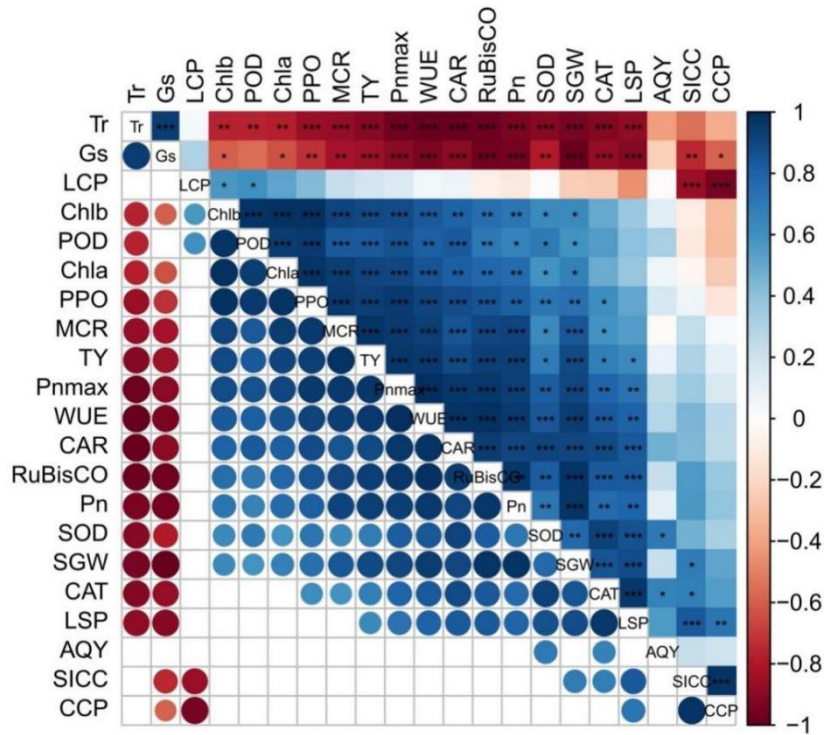


图 4-5 叶片光合色素含量、光合特性、光合 CO₂ 曲线特征参数及相关酶活性与果实产量的相关性
 Figure 4-5 Correlation of leaf photosynthetic pigment content, photosynthetic characteristics, characteristic parameters of photosynthetic CO₂ curve and related enzyme activities with fruit yield

注：蓝色和红色表示显著的正相关和负相关，而白色表示无显著相关性。*：P < 0.05；**：P < 0.01；***：P < 0.001。
 CAR: 叶片中类胡萝卜素含量, CCP: CO₂ 补偿点, Pn: 净光合速率, LCP: 光补偿点, SICC: CO₂ 饱和点, SGW: 单果重, LSP: 光饱和点, MCR: 叶片最大羧化速率, Tr: 蒸腾速率, Gs: 气孔导度, WUE: 水分蒸发速率, AQE: 表观量子效率, POD: 过氧化物酶; CAT: 过氧化氢酶; SOD: 超氧化物歧化酶; PPO: 多酚氧化酶; Pnmax: 最大净光合速率; Chla: 叶绿素 a 含量, Chlb: 叶绿素 b 含量, YT: 果实产量, RuBisCO: Rubisco 活性

Note: Blue and red colors indicate significant positive and negative correlations, while white color indicates no significant correlation. *CAR: carotenoid content in leaves, CCP: CO₂ compensation point, Pn: net photosynthetic rate, LCP: light compensation point, SICC: CO₂ saturation point, SGW: single fruit weight, LSP: light saturation point, MCR: maximum carboxylation rate of leaves, Tr: transpiration rate, Gs: stomatal conductance, WUE: water evaporation rate, AQE: apparent quantum efficiency, POD: peroxidase, CAT: catalase, SOD: superoxide dismutase, PPO: polyphenol oxidase, Pnmax: maximum net photosynthetic rate, Chla: chlorophyll a content, Chlb: chlorophyll b content, YT: fruit yield, RuBisCO: Rubisco activity

4.3 讨论

4.3.1 不同 CO₂ 浓度对葡萄产量的影响

CO₂ 浓度是影响光合作用的重要环境因子之一，CO₂ 浓度升高能够提高植物的光合反应速率，促进植物的生长和产量积累 (Yamaura et al., 2023)。前人广泛研究了大气 CO₂ 浓度升高对植物光合作用和产量的影响，他们均发现 CO₂ 浓度升高促进了植物光合

作用进而提高产量 (Akhlaq et al., 2023, Kanno et al., 2017, Choi and Kang, 2019)。本试验发现 CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时均显著提高了葡萄单粒重和产量, 其中以 CO₂ 浓度为 700 ppm 时增幅最高, 1000 ppm 最低, 其中 700 ppm 和 850 ppm CO₂ 浓度的产量较 500 ppm 分别高出 3038.48 和 1408.55 kg·hm⁻²。1000 ppm CO₂ 浓度的单粒重和产量增幅的下降可能是因为 CO₂ 浓度过高 (1000ppm) 降低了植物体内大部分矿质元素的浓度进而抑制植物产量的形成。多项研究表明植物生长发育过程中的光合色素含量、光合特征参数以及光合性能会直接影响植物的最终产量 (Markovic et al., 2021, Zhang et al., 2023, Peng et al., 2020)。

4.3.2 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光合色素含量的影响

光合色素是植物进行光合作用的基础, 其中叶绿素主要分为 Chl a 和 Chl b, 两者主要负责光能的捕获、传递和转化 (Palit et al., 2020)。多项研究表明, 增施 CO₂ 能提高番茄、水稻、小麦、玉米等叶片的叶绿素含量 (Mao et al., 2021, Mamatha et al., 2014, Ksiksi et al., 2018, Wang et al., 2013)。Ullah 等 (2021) 研究发现高 CO₂ 浓度可以有效提高小麦灌浆期叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量。本研究结果表明 CO₂ 浓度在 700 ppm 和 850 ppm 时叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量高于 500 ppm。但对樱桃的一项研究发现, 樱桃树的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量在 CO₂ 浓度为 1400 ppm 时远低于 700ppm (Druta, 2001)。Feng 等 (2022) 研究发现木荷幼苗叶绿素 b 含量在 CO₂ 浓度为 1000 ppm 时低于 400 ppm。本研究也得到了类似的结果, CO₂ 浓度为 1000 ppm 时叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量低于其他浓度, 这说明高浓度的 CO₂ 反而会使弗雷葡萄叶片叶绿素含量降低, 这可能是由于高浓度 CO₂ 会促进植物快速生长从而产生了稀释效应, 最终导致叶绿素含量降低。同时本研究还发现随着灌水后天数的增加, 700 ppm 和 850 ppm 处理的光合色素含量下降幅度较小。Han 等 (2023) 研究表明美国流苏树随着土壤水分胁迫的加深, 植物光合色素含量逐渐降低, 暗示本试验条件下 700 ppm 和 850 ppm 处理可以有效缓解干旱等逆境对植物光合色素的影响。Kant 等 (2012) 研究发现高 CO₂ 浓度会导致作物叶绿素 a/b 下降。本研究中 CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时降低了叶片叶绿素 a/b, 而高浓度 CO₂ (1000 ppm) 则提高了叶绿素 a/b, 这可能是因为高浓度 CO₂ 削弱了对叶绿素 b 的促进效果。类胡萝卜素作为光合色素中的辅助色素, 可以将吸收的光能传递给叶绿素 a (Ashikhmin et al., 2023)。Wang 等 (2015) 研究发现适宜高浓度 CO₂ 促进了 C₃ 植物类胡萝卜素含量的快速升高, CO₂ 浓度过高 (3000 ppm) 反而抑制了这种促进效果, Bao 等 (2013) 同样发现高浓度 CO₂ 会提高植物生长速率进而抑制类胡萝卜素含量的升高, 本试验中 CO₂ 浓度为 1000 ppm 时叶片类胡萝卜素含量的增幅小于 700 ppm 和 850 ppm, 说明 CO₂ 浓度过高同样会抑制弗雷葡萄叶片类胡萝卜素含量的增效。

4.3.3 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光合特征的影响

在植物生长发育过程中，光合作用起到至关重要的作用 (Cheng et al., 2023)。植物的光合作用以 CO₂ 作为底物进行反应，CO₂ 浓度上升时植物的光合能力随着 CO₂ 浓度的增加而提高 (Sanchez-Lucas et al., 2023)。前人研究发现，在一定的大气 CO₂ 浓度范围内，高浓度的 CO₂ 均会促进植株叶片的净光合速率 (Pn) 和水分利用效率 (WUE) (Khamis et al., 2023)。本研究中，700 ppm 和 850 ppm CO₂ 浓度的叶片净光合速率 (Pn) 和水分利用效率 (WUE) 均显著高于 1000 ppm，说明 CO₂ 浓度过高会抑制叶片的光合作用，这可能是由于 CO₂ 浓度过高，O₂ 浓度相对较低，植物进行无氧呼吸产生了乙醇、乳酸等物质的毒害作用，从而抑制了光合作用。Scher 等 (2022) 的研究结果也表明植株光合作用并不随着大气 CO₂ 浓度的增加而持续增加，但其能反应气孔响应和蒸腾速率的变化，有研究表明 CO₂ 浓度的升高会降低植物叶片气孔导度 (Zhang et al., 2022b)，高浓度 CO₂ 降低叶片气孔导度的同时，也出现蒸腾速率下降的现象 (Liang et al., 2023)。在本研究中，不同 CO₂ 浓度中 700 ppm 的气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 最低，但净光合速率 (Pn) 和水分利用效率 (WUE) 是最高的，CO₂ 浓度增加使植物气孔导度下降以及光合能力增加是导致植物水分利用效率增加的重要原因。同时，本研究还发现随着灌水后天数的增加，不同 CO₂ 浓度处理的 Gs 和 Pn 均呈逐渐下降的趋势，CO₂ 浓度为 700 ppm 时 Gs 和 Pn 降幅最小，说明 700 ppm 处理有效缓解了干旱等胁迫对植物光合特征的影响。

4.3.4 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的影响

植物对光能的利用在整个植物生长发育过程中具有重要作用 (Lu et al., 2019)，而植物叶片对光的响应能力可通过植物光响应曲线的变化来反映 (Serôdio et al., 2022)。利用拟合公式可以计算出葡萄叶片的光饱和点、光补偿点、最大净光合速率和表观量子效率。前人研究发现，随着 CO₂ 浓度的升高，蛇麻草的光补偿点 (LCP) 逐渐降低，表观量子效率 (AQE) 逐渐升高 (Bauerle, 2021)。Song 等 (2023) 研究表明高浓度 CO₂ 提高了烤烟光饱和点 (LSP) 和最大净光合速率 (Pn_{max})，本研究也有类似的结果，随着 CO₂ 浓度的增加，葡萄光补偿点逐渐降低，说明高浓度 CO₂ 可以提高植物对弱光的利用能力。植物光饱和点反映了植物对强光的耐受性 (Pinnamaneni et al., 2022)，最大净光合速率反映了植物的最大光合潜力 (Niu et al., 2023)，本研究中光饱和点、最大净光合速率均表现为 700 ppm > 850 ppm > 1000 ppm > 500 ppm，说明 CO₂ 浓度为 700 ppm 时植物光合潜力和强光耐受力最强，其次为 850 ppm。表观量子效率反映了植物在弱光下的光合能力 (Zhang et al., 2022a)，本研究中 850 ppm CO₂ 浓度的植物表观量子效率最高，即 CO₂ 浓度为 850 ppm 时植物对弱光的适应能力最强。本研究结果表明适宜的高浓

度 CO₂ 可以显著提高弗雷葡萄的光合曲线特征参数, 其中以 CO₂ 浓度在 700 ppm 和 850 ppm 时效果最佳。

植物对外界环境 CO₂ 的需求程度可通过 CO₂ 响应特征参数的变化来判断, CO₂ 响应曲线特征参数主要包括 CO₂ 饱和点、CO₂ 补偿点、最大光合能力、光呼吸速率、最大羧化速率 (V_{cmax}) 和最大电子传递速率 (J_{max}) 等, 其中 V_{cmax} 和 J_{max} 是表征植物光合能力的重要参数 (Bermudez et al., 2021), Fauset 等 (2019) 研究发现高浓度 CO₂ 显著提高了植物的 V_{cmax} 和 J_{max} 。本研究发现 700 ppm 和 850 ppm CO₂ 浓度的 V_{cmax} 和 J_{max} 均显著高于 500 ppm, 这可能是因为 CO₂ 浓度的适当提高增加了光合作用的底物进而提高了植物的羧化效率, 可见适当提高 CO₂ 浓度可以有效提高弗雷葡萄的羧化反应效率和电子传递速率。而 Lamba 等 (2018) 对云杉的研究表明 CO₂ 浓度过高反而抑制了 V_{cmax} 和 J_{max} 的升高。本研究也得到了类似的结果, CO₂ 浓度为 1000 ppm 时 V_{cmax} 和 J_{max} 均显著低于其他浓度。这可能是因为高浓度 CO₂ 抑制了 Rubisco 的活性进而限制了 RuBP 的羧化效率。Xiao 等 (2020) 研究表明高浓度 CO₂ 显著提高了植株 CO₂ 饱和点、CO₂ 补偿点和最大光合能力, 降低了光呼吸速率。本研究中 CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时显著提高了葡萄 CO₂ 饱和点、CO₂ 补偿点和最大光合能力, CO₂ 浓度为 1000 ppm 时反而降低了葡萄最大光合能力, 这可能是因为高浓度 CO₂ 降低了植物的水分利用效率进而抑制了植物光合作用, 从而削弱了植物最大光合能力。可见 CO₂ 浓度为 700 ppm 时弗雷葡萄拥有更高的光合性能和固碳羧化能力。

4.3.5 不同 CO₂ 浓度对葡萄叶片抗氧化酶及 Rubisco 活性的影响

CAT、POD、SOD和PPO是植物抗氧化酶系统中最为重要的4种保护酶 (Gouda et al., 2023, Sinan et al., 2020)。以往研究表明, 植物体内抗氧化酶的活性均随CO₂浓度增加而迅速增强, 到达一个峰值后又急剧或逐渐下降 (Hu et al., 2020)。在本研究中, CAT、SOD活性在CO₂浓度为500 ppm~850 ppm时, 随着CO₂浓度升高急剧上升, 在850 ppm时达到最大值, 此后急剧下降。POD、PPO活性在CO₂浓度为500 ppm~700 ppm时, 随着CO₂浓度升高急剧上升, 在700 ppm时达到最大值, 此后逐渐下降。这与前人的研究结果一致 (Zhang et al., 2020)。说明CO₂浓度在一定范围内时可以有效保护葡萄叶片防止氧化损伤, 这可能是由于CO₂升高导致气孔阻力增大, 蒸腾速率减小, 水分利用效率增加, 从而使得植物对胁迫的耐受力更强, 另一方面可能因为CO₂浓度的提高通过调节光合作用过程中的电子传递系统, 形成更多的NADPH, 从而促进抗坏血酸-谷胱甘肽循环, 提高了相关抗氧化酶活性。Aydi等 (2020) 认为抗氧化酶活性的降低是因为CO₂加富降低了细胞代谢中去除活性氧的需求。高CO₂浓度下葡萄抗氧化酶活性降低的主要原因可能是加富CO₂可提高pCO₂/O₂比率, 增加CO₂的同化, 减少因O₂作为电子受体而形成活性氧, 而且CO₂浓度的升高可以降低光呼吸形成的H₂O₂。另一方面, CO₂浓度升高

可能导致细胞对抗氧化活性需求的减少。植物的光合性能受叶片抗氧化系统和Rubisco活性等因素共同影响。Sharwood等(2016)的研究表明适宜的CO₂浓度可以促进Rubisco羧化活性进而促进植物的光合作用。本研究发现Rubisco活性在CO₂浓度为500 ppm和700 ppm时迅速上升,在700 ppm时达到最大值,此后缓慢下降。说明适度提高CO₂浓度可以有效促进弗雷葡萄叶片Rubisco活性的增强,但浓度过高时反而会抑制CO₂的初始促进效果。这可能是因为CO₂过高时影响了植物体内营养元素的分配进而抑制Rubisco的合成。

4.4 小结

在本试验条件下CO₂浓度为700 ppm和850 ppm时明显提高了葡萄叶片光合色素含量和光合生理特性,促进了葡萄产量的增加,CO₂浓度为700 ppm和850 ppm时光合色素含量均高于其余处理,其中CO₂浓度为700 ppm时叶片气孔导度和蒸腾速率均低于其余处理。CO₂浓度为700 ppm时的光饱和点、CO₂饱和点和最大光合能力均为最大值,抗氧化酶活性高于其余处理,且产量最高,为14541.37 kg·hm⁻²。比对照处理增产3038.48 kg·hm⁻²。说明CO₂浓度为700 ppm时对植物的光合作用及产量的促进效果更佳。而CO₂浓度为1000 ppm时葡萄光合作用受到抑制。

第 5 章 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实品质、果实色泽以及酚类物质的影响

5.1 材料与方法

5.1.1 试验材料

同 2.1.1

5.1.2 CO₂ 加气灌溉施肥方式的设计及组成

同 2.1.2

5.1.3 CO₂ 加气灌溉施控制系统的运行模式

同 2.1.3

5.1.4 试验处理

试验布局采用随机区组设计, 选取温室内生长势一致的 4 行葡萄进行试验, 每行为 1 个处理, 每个处理 5 株葡萄, 重复 5 次, 于 2023 年 6 月 25 日 (花后 30 天) 至 2023 年 7 月 30 日间进行施气处理, 共处理 35 天, 以液态 CO₂ 钢瓶为气源, 施入的 CO₂ 浓度分别为(500 ± 30)、(700 ± 30)、(850 ± 30) 和 (1000 ± 30) μmol·mol⁻¹, 分别记作 500 ppm、700 ppm、850 ppm 和 1000 ppm, 各气室的 CO₂ 施加方式均采用 CO₂ 加气灌溉施肥模式, 即 CO₂ 从气源释放后, 经过 CO₂ 加气灌溉系统的控制均匀进入到葡萄根系附近的穴贮罐中, 随后通过穴贮罐上的小孔逸散到整个气室。每日 9:00 至 14:00、17:00 至 22:00 对每个气室进行 10h 的注气处理, 气室通风及阴雨天气均不注气。使用悬挂在 0.5 m 高度的 4 个 CO₂ 浓度传感器监测每个气室内的 CO₂ 浓度(图 2), CO₂ 注气系统中的工控机(PLC) 通过实时接收和分析各气室 CO₂ 浓度监测值来控制气体电磁阀的开闭, 利用气体对流装置(气室对角各放置两台小型冷风扇) 来降低气室 CO₂ 浓度升高的梯度进而保证气室内 CO₂ 气体均匀分散, 最终保持气室内 CO₂ 浓度处于不同设定范围内, 气室外表面每 3d 用清水进行清洗, 避免空气中灰尘、沙石降低薄膜透光率。于 6 月 25 日起, 每日实时采集气室内光照强度、空气温湿度以及 CO₂ 浓度, 每 10 min 记录一次。于花后 44 天(7 月 9 日, 果实转色期)、51 天(7 月 16 日, 果实转色期)、58 天(7 月 23 日, 果实转色期) 和 65 天(7 月 30 日, 果实成熟期), 分别从每个处理中随机采集 3 穗果实进

行果实品质的测定，均重复三次。

5.1.5 测定项目与指标

5.1.5.1 果实理化性质的测定

同 3.1.5.1

5.1.5.2 果实色度值测量

同 3.1.5.2

5.1.5.3 果皮花色苷和类黄酮含量的测定

同 3.1.5.3

5.1.5.4 果皮中叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

同 3.1.5.4

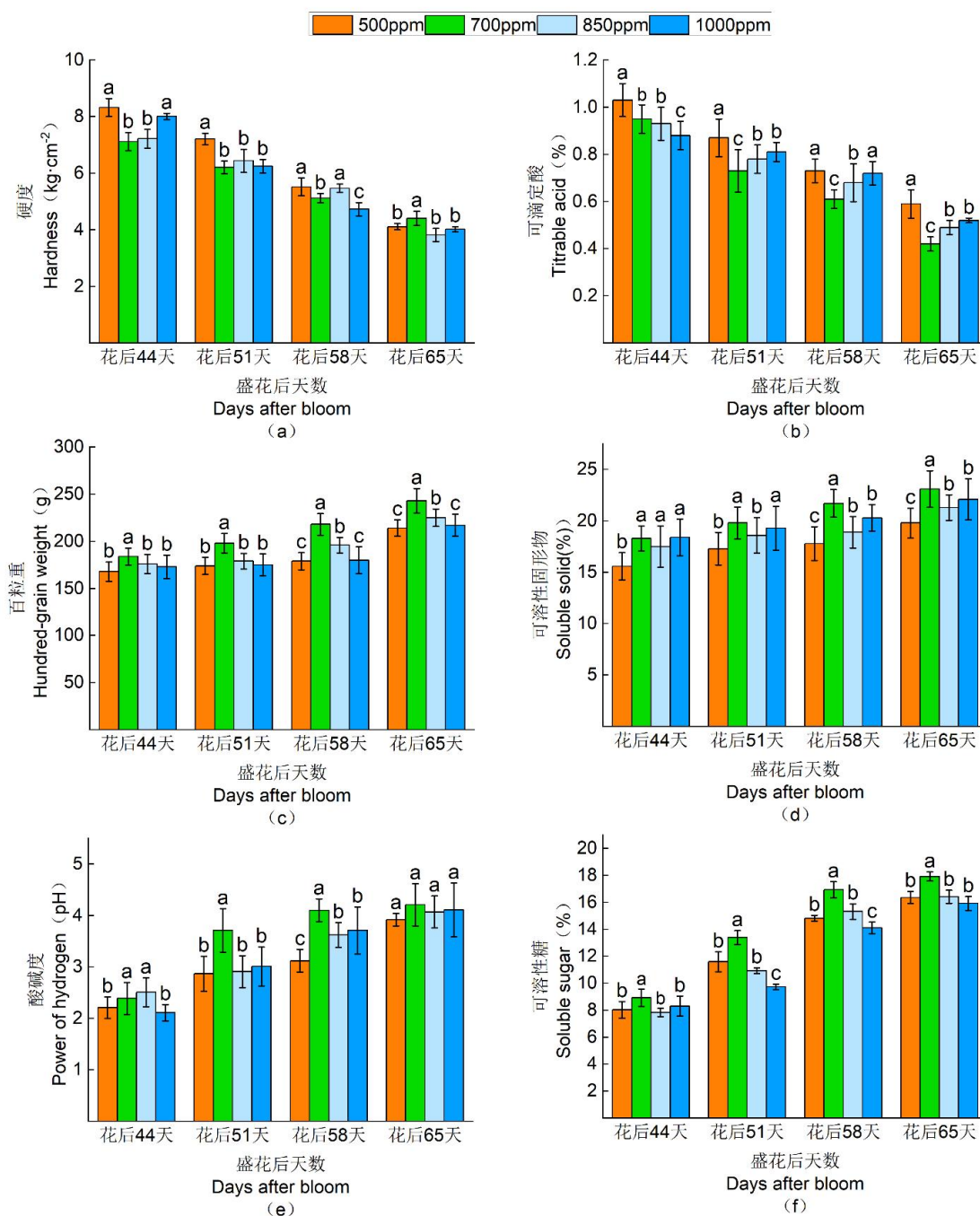
5.1.5.5 葡萄总酚含量的测定

同 3.1.5.5

5.1.6 数据处理与分析

同 2.1.6

5.2 结果与分析

5.2.1 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实品质相关指标的影响图 5-1 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实品质相关指标的影响Figure 5-1 Effects of different CO₂ concentrations on grapevine fruit quality related indexes

由图 5-1a、b 可知，不同 CO₂ 浓度处理后，葡萄果实的硬度和可滴定酸含量随着果实的成熟呈逐渐下降的趋势。在花后 58 天~65 天，700 ppm 处理的葡萄果实可滴定酸

始终低于其它处理。在花后 65 天, 700 ppm 处理的果实可滴定酸显著低于 500 ppm 处理 ($P < 0.05$)。各处理的果实硬度在花后 65 天表现为 700 ppm > 500 ppm > 1000 ppm > 850 ppm。各处理葡萄果实的可溶性固形物含量、百粒重、可溶性糖含量和 pH 随着果实的成熟均呈逐渐上升的趋势。不同处理间的可溶性固形物的含量存在差异, 在花后 58 天和 65 天, 700 ppm 处理的葡萄果实的可溶性固形物的含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。700 ppm 处理的葡萄果实百粒重和 pH 在花后 58 天和 65 天均显著高于其余处理 ($P < 0.05$)。在花后 58 天和 65 天, 700 ppm 处理的葡萄果实百粒重分别比 500 ppm 处理高 13.9% 和 11.6%, 差异显著 ($P < 0.05$)。700 ppm 处理的果实可溶性糖在每个时期均显著高于其余处理 ($P < 0.05$)。在花后 58 天~65 天, 各处理的葡萄果实中可溶性糖含量均表现为 700 ppm > 850 ppm > 500 ppm > 1000 ppm。其中在花后 58 天和 65 天, 700 ppm 处理的可溶性糖含量与 500 ppm 处理相比分别高了 13.7%、19.6%, 差异显著 ($P < 0.05$)。

5.2.2 不同 CO₂ 浓度对葡萄果皮中花色苷和类黄酮的影响

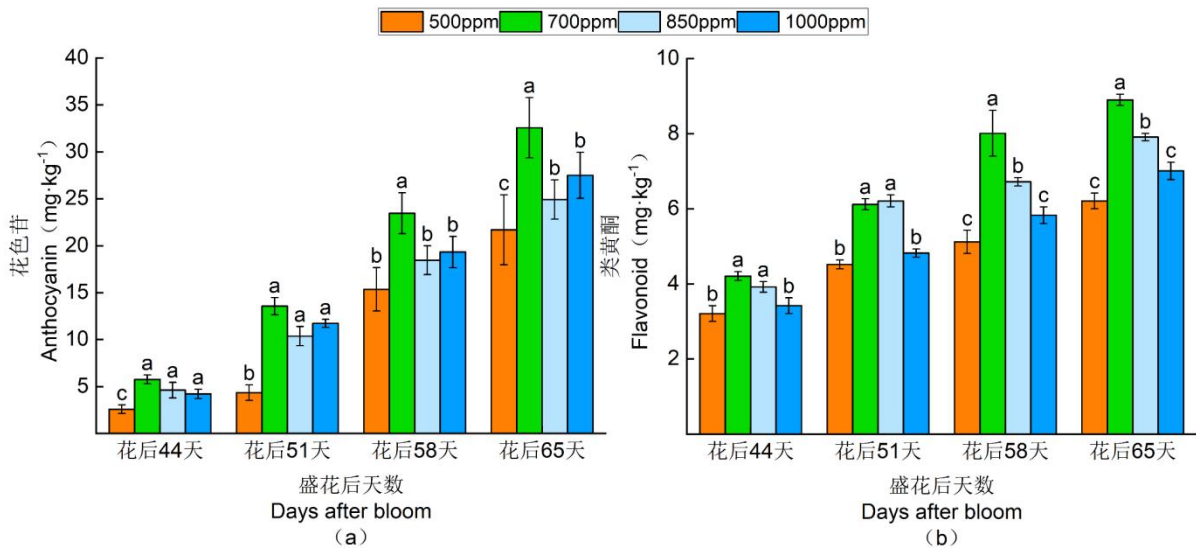
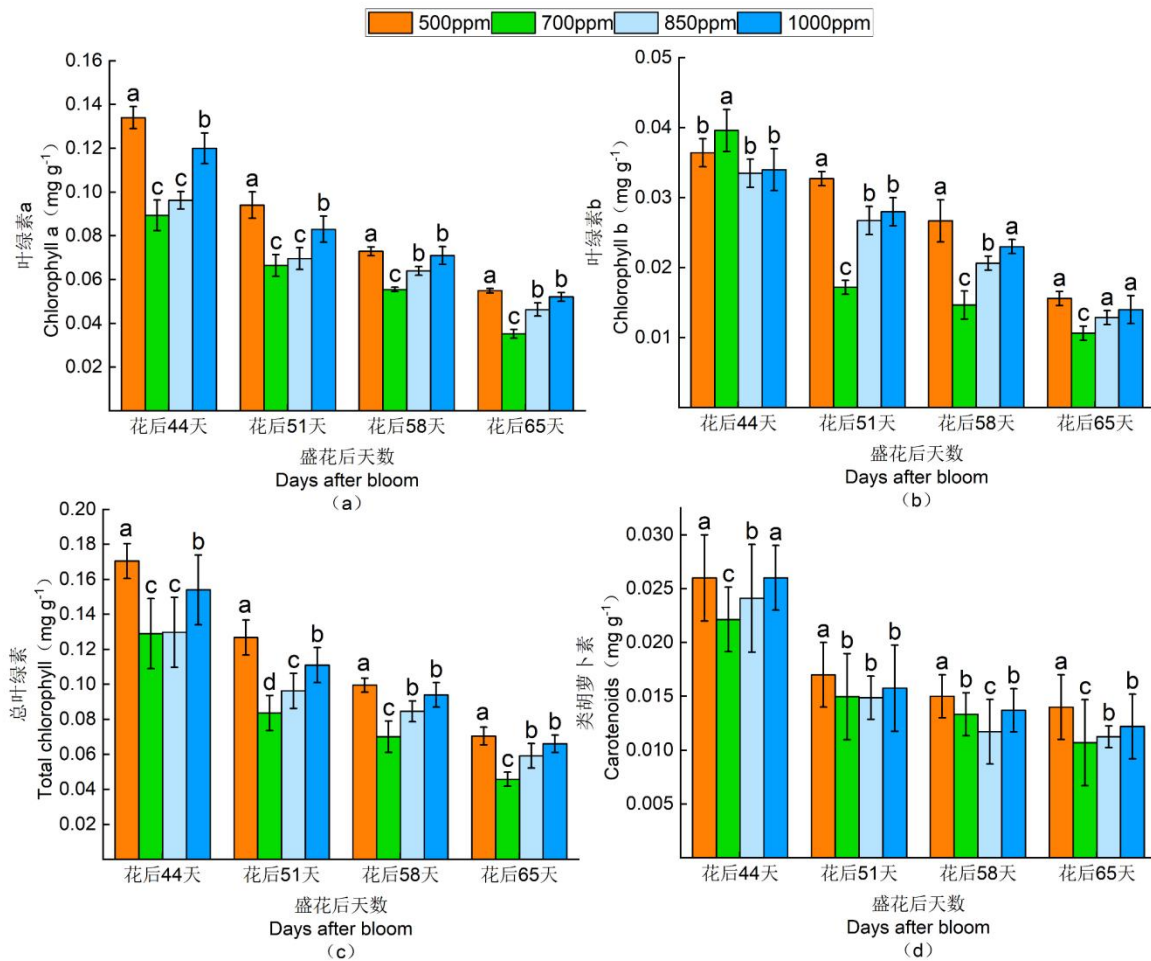


图 5-2 不同 CO₂ 浓度对果皮内花色苷和类黄酮含量的影响

Figure 5-2 Effect of different CO₂ concentrations on the content of anthocyanosides and flavonoids in pericarp

如图 5-2 所示, 不同 CO₂ 浓度处理的葡萄果皮中花色苷与类黄酮的含量随着果实成熟均呈现逐渐上升的趋势, 在每个时期, 700 ppm 处理的葡萄果皮中花色苷和类黄酮的含量均显著高于其余处理 ($P < 0.05$)。各处理果皮类黄酮在花后 58 天~65 天均表现为 700 ppm > 850 ppm > 1000 ppm > 500 ppm。各处理果皮花色在花后 51 天~65 天均表现为 700 ppm > 1000 ppm > 850 ppm > 500 ppm。与 500 ppm 处理相比, 700 ppm 处理在花后 65 天的花色苷和类黄酮分别显著提高了 38.6% 和 35.2%。

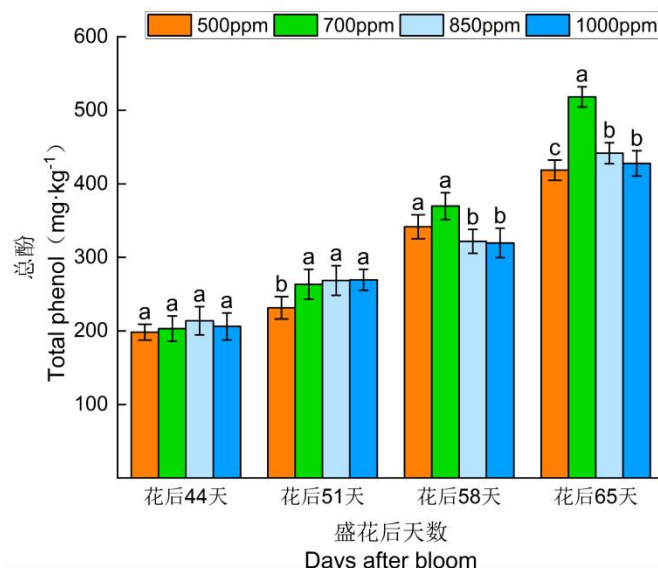
5.2.3 不同 CO₂ 浓度对葡萄果皮中叶绿素与类胡萝卜素的影響图 5-3 不同 CO₂ 浓度对葡萄果皮内叶绿素和类胡萝卜素含量的影响Figure 5-3 Effect of different CO₂ concentrations on chlorophyll and carotenoid content in grape skins

如图 5-3a、b 所示，随着葡萄果实的成熟，果皮中叶绿素 a 和 b 的含量逐渐下降。在花后 44 天、51 天、58 天和 65 天，700 ppm 和 850 ppm 处理的叶绿素 a 含量均显著低于 500 ppm 处理 ($P < 0.05$)。与 500 ppm 处理相比，700 ppm 处理和 850 ppm 处理的叶绿素 a 含量在花后 65 天分别显著降低了 29.3% 和 10.2% ($P < 0.05$)。各处理的叶绿素 b 含量在花后 51 天~65 日均表现为 500 ppm > 1000 ppm > 850 ppm > 700 ppm。在花后 51 天和 58 天，700 ppm 处理叶绿素 b 含量显著低于 500 ppm 处理，分别比 500 ppm 处理低 48.1% 和 41.5% ($P < 0.05$)。如图 5-3c、d 所示，随着 CO₂ 浓度的升高，各处理果皮中光合色素的含量均呈现先下降后上升的趋势。其中在花后 65 天 700 ppm 处理的类胡萝卜素显著低于其余处理 ($P < 0.05$)。不同 CO₂ 浓度处理后的各个时期，果皮总叶绿素均显著低于 500 ppm 处理 ($P < 0.05$)，在花后 65 天，700 ppm 处理和 850 ppm 处理的果皮中总叶绿素的含量显著低于 500 ppm 处理，分别低了 31.5% 和 15.3% ($P < 0.05$)。

5.2.4 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实颜色指数的影响表 5-1 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实颜色指数 (CIRG) 的影响Table 5-1 Effect of different CO₂ concentrations on color index (CIRG) of grape berries

处理	花后 44 天	花后 51 天	花后 58 天	花后 65 天
Treatment	44 days after flowering	51 days after flowering	58 days after flowering	65 days after flowering
500ppm	1.21 ± 0.05b	2.31 ± 0.07b	3.21 ± 0.14b	4.12 ± 0.15a
700ppm	1.53 ± 0.05a	3.45 ± 0.09a	3.93 ± 0.18a	4.79 ± 0.09a
850ppm	1.72 ± 0.03a	3.72 ± 0.12a	3.91 ± 0.07a	4.45 ± 0.07a
1000ppm	1.63 ± 0.04a	3.47 ± 0.12a	4.01 ± 0.21a	4.32 ± 0.21a

CIRG 值代表红色葡萄的颜色指数。如表 5-1 所示, 随着葡萄果实的成熟, 各处理 CIRG 值均逐渐升高。各处理的 CIRG 值在花后 44 天和 51 天均表现为 850 ppm > 1000 ppm > 700 ppm > 500 ppm; 在花后 58 天, 各处理的 CIRG 则表现为 1000 ppm > 700 ppm > 850 ppm > 500 ppm。700 ppm 处理在花后 65 天的葡萄果实 CIRG 值始终高于其它处理。在花后 65 天, 700 ppm 处理和 850 ppm 处理的 CIRG 值与 500 ppm 处理相比分别高了 16.3 % 和 8.1 % ($P < 0.05$)。

5.2.5 不同 CO₂ 浓度对葡萄总酚含量的影响图 5-4 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实总酚含量的影响Figure 5-4 Effect of different CO₂ concentrations on total phenolic content of grape berries

如图 5-4 所示, 不同 CO₂ 浓度处理后的葡萄总酚含量随着果实成熟均呈现逐渐上升的趋势。700 ppm 处理的总酚含量在花后 44 天~51 天上升缓慢, 在花后 51 天~65 天总酚含量增涨幅度较快。在花后 58 天, 各处理中葡萄总酚含量表现为 700 ppm > 500 ppm >

1000 ppm > 850 ppm; 在花后 65 天, 700 ppm 处理和 850 ppm 处理中总酚含量显著高于 500 ppm 处理, 分别高了 21.4 %、10.1 % ($P < 0.05$) 。

5.3 讨论

5.3.1 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实品质相关指标的影响

对于果实理化性质来说, 主要指构成产品营养价值的营养成分的组成及含量, 其中可溶性糖、可滴定酸、pH、可溶性固形物、百粒重和硬度都是对葡萄品质鉴定的重要组成部分 (张玉静等, 2024), 且可溶性糖、可滴定酸都是评价果实风味的重要指标 (Ren et al., 2023)。高浓度 CO₂ 可以有效提高植物的光合作用, 进而促进果实中的糖类物质转化 (Sun et al., 2020)。Han 等 (2023) 研究发现适当提高温室内的 CO₂ 浓度可以提高甜瓜成熟时可溶性糖和可溶性固形物含量, 降低可滴定酸含量。本研究也得到了类似的结果, 700ppm 和 850ppm 处理的葡萄果实在每个时期可溶性糖、可溶性固形物均始终高于 500ppm 处理, 同时 700ppm 处理的果实可滴定酸含量在花后 65 天显著低于其余处理, 但 1000ppm 处理的果实可溶性糖在花后 65 天反而低于 500 ppm 处理, 说明 CO₂ 浓度过高时反而抑制了糖类的生成。这可能是因为在 CO₂ 浓度过高的环境下, 气孔导度过低甚至关闭, 叶片中的三磷酸循环代谢被抑制。Morales 等 (2008) 研究发现苹果在逐渐成熟的过程中, 果实 pH 值会逐渐升高。本研究中, 随着葡萄的成熟, 所有处理葡萄果实 pH 值缓慢升高。果实硬度作为一个重要的感官特征, 是直接影响果实口感和储运的重要指标 (傅一凡等, 2024)。本研究中, 700 ppm 处理的葡萄果实硬度在花后 44 天~58 天时均显著低于其余处理, 但在花后 65 天时与其余处理差异不显著, 说明 CO₂ 浓度的变化对成熟期葡萄的硬度影响较小。

5.3.2 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实色泽的影响

果皮色素含量和果皮鲜艳程度是影响葡萄果皮着色的主要因素, 果皮色泽是由叶绿素 a、叶绿素 b、花青素和类胡萝卜素等物质按照相应比例进行分配综合表现的结果, 单纯某一种物质的含量不能准确描述果实的颜色 (刘路等, 2020)。^①‘弗雷无核’属于红色果皮品种, 幼果期果皮为绿色, 成熟期果皮为红色, 果皮中叶绿素含量相度较低。王文等 (2023) 认为影响葡萄着色的主要色素物质是叶绿素和花青苷, 两者因为比例分配不同而造成葡萄颜色的变化。任俊鹏等 (2013) 认为葡萄果皮的着色同样受果皮类胡萝卜素含量所影响。已有研究发现, 果园内悬挂 CO₂ 施肥袋大大降低了红富士苹果果皮叶绿素和类胡萝卜素含量。本试验研究结果表明, 随着葡萄的成熟, 各处理果皮叶绿

素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量在成熟过程中均表现出下降趋势。也有对香蕉的研究发现，高浓度 CO₂ 反而抑制了果皮叶绿素的降解（宋慕波等，2017）。而本研究中，随着 CO₂ 浓度的增加，各处理果皮叶绿素在同一时期均呈现先上升后下降的趋势，与前人研究相一致，且在每个时期 CO₂ 浓度为 700 ppm 时葡萄叶绿素和类胡萝卜素含量均显著低于其余处理。本研究得出，随着 CO₂ 浓度的升高，各时期果实颜色指数（CIRG）呈现与叶绿素相同的趋势，说明 CO₂ 浓度为 700 ppm 时‘弗雷无核’的着色效果最好。

5.3.3 不同 CO₂ 浓度对葡萄果实中酚类物质的影响

酚类物质作为植物体内的次生代谢产物，在植物果实从开花到成熟的过程中有着至关重要的作用（Mohammed et al., 2019），葡萄中主要的酚类化合物有花色苷、类黄酮等。前人研究发现，少量施加 CO₂ 肥料可以大幅度提高番石榴果实内的总酚含量（de Rezende et al., 2015）。Fang 等（2010）研究发现高浓度 CO₂ 可以显著提高大棚内草莓的花色苷和类黄酮含量。Holley 等（2022）研究发现，当温室内 CO₂ 浓度过高时，植物果皮中的花色苷与低浓度 CO₂ 处理相比出现大幅度下降。本研究随着果实的成熟，各处理的花色苷、类黄酮和总酚含量逐渐增加，其中 700 ppm 处理的增幅最大。在花后 65 天，随着 CO₂ 浓度的增加，各处理花色苷、类黄酮和总酚均先上升后下降的趋势，其中 700 ppm 处理的花色苷、类黄酮和总酚均为最大值，说明 CO₂ 浓度为 700 ppm 时对‘弗雷无核’花色苷、类黄酮和总酚的增效最佳。但 CO₂ 浓度为 1000 ppm 时葡萄酚类化合物的合成反而受到抑制，这可能是因为 CO₂ 浓度的在达到一个临界之后，会抑制植物光合和呼吸作用，导致果实中的糖含量降低，最终导致花色苷等酚类化合物的合成受阻。

5.4 小结

本研究结果表明 CO₂ 浓度为 700ppm 时促进了‘弗雷无核’葡萄的着色，并提高果实品质。在果实进入转色期并成熟的过程中，CO₂ 浓度为 700ppm 时的可溶性固形物、pH 和可溶性糖含量升高，可滴定酸含量和果实硬度降低，同时也降低了果皮叶绿素含量和类胡萝卜素含量，提高了颜色指数（CIRG），从而提高果实着色程度；CO₂ 浓度为 700ppm 时的类黄酮、花色苷和总酚含量均在成熟期达到峰值。

第6章 研究结论与创新点

6.1 结论

本试验通过研究不同 CO₂ 施肥方式以及浓度对‘弗雷无核’葡萄光合特性、果实品质和产量的影响，选择出最适合设施内果树生产的 CO₂ 施加方式，并筛选出最适宜的 CO₂ 浓度。得出主要结论如下：

(1) 采用 CO₂ 加气灌溉施肥模式明显提高了葡萄叶片光合色素含量和光合生理特性，最终促进了葡萄产量的增加。

(2) 两种施肥方式处理均促进了‘弗雷无核’葡萄的着色，并提高果实品质。在果实进入转色期并成熟的过程中，两种施肥方式处理的可溶性固形物、pH 和可溶性糖含量升高，可滴定酸含量和果实硬度降低，同时也降低了果皮叶绿素含量和类胡萝卜素含量，提高了颜色指数 (CIRG)，从而提高果实着色程度；各个处理类黄酮、花色苷和总酚含量在成熟期均达到峰值。其中采用 CO₂ 加气灌溉施肥模式进行 CO₂ 施肥对果实着色和品质提升效果最好。

(3) CO₂ 浓度为 700 ppm 和 850 ppm 时明显提高了葡萄叶片光合色素含量和光合生理特性，增强了葡萄对干旱等逆境的抗性并延缓葡萄叶片衰老，促进了葡萄产量的增加，而 CO₂ 浓度为 1000 ppm 时葡萄光合作用受到抑制。

(4) CO₂ 浓度为 700 ppm 时促进了‘弗雷无核’葡萄的着色，并提高果实品质。在果实进入转色期并成熟的过程中，CO₂ 浓度为 700 ppm 时的可溶性固形物、pH 和可溶性糖含量升高，可滴定酸含量和果实硬度降低，同时也降低了果皮叶绿素含量和类胡萝卜素含量，提高了颜色指数 (CIRG)，从而提高果实着色程度；CO₂ 浓度为 700 ppm 时的类黄酮、花色苷和总酚含量在成熟期均达到峰值。

综上所述，本试验通过比较两种 CO₂ 施肥方式和四种不同浓度对‘弗雷无核’葡萄光合特性、果实品质及产量的影响，发现 CO₂ 施肥技术有效促进了果实着色，提高了葡萄产量和品质，其中 CO₂ 加气灌溉施肥方式的效果要优于传统 CO₂ 施肥方式，在不同 CO₂ 浓度比较试验中，当 CO₂ 浓度为 700 ppm 时对设施葡萄光合特性、产量及果实品质的促进效果最佳。本研究可为未来温室葡萄可控条件下加气灌溉技术的应用提供一定理论依据。

6.2 创新点

(1) 设计并研究出结合加气灌溉技术和 CO₂ 施肥技术的 CO₂ 加气灌溉施肥模式, 不仅降低了 CO₂ 施肥成本, 还保证了 CO₂ 浓度的均匀性, 提高了 CO₂ 的施肥效率, 实现 CO₂ 精准施肥。

(2) 本研究引入了重要的环境因素 CO₂ 浓度, 探究了 CO₂ 浓度、CO₂ 施肥方式 2 因素对葡萄不同类别指标的影响, 研究 CO₂ 加气灌溉施肥模式对设施内葡萄光合特性、果实品质以及产量的影响, 从而更合理地筛选出最佳 CO₂ 浓度, 为未来设施内葡萄加气灌溉技术的应用提供一定理论基础。

6.3 展望

本试验是以 PLC 控制系统为平台, 分析研究葡萄各光合参数及果实品质对不同 CO₂ 浓度和施加方式处理的响应, 该装置虽然可以使气体的浓度保持相对稳定, 但由于其封闭性, 导致气室内环境与外界环境有一定的差异, 如温度、光照等。本研究表明结合地下加气灌溉技术的 CO₂ 加气灌溉施肥模式可以有效提高设施葡萄的产量和品质, 但这种促进效果是否可以应用于其他果树和蔬菜上, 仍然需要进一步的研究。此外, 未来可以考虑在大田中进行拓展试验, 测试这种 CO₂ 加气灌溉施肥技术在大田植物生产中的可行性, 也可以尝试结合其他气体或者激素, 同时, 在未来设施栽培研究中, 可以考虑增加葡萄品种数, 分析多个品种间响应的差异性。

参考文献

- 崔岩, 边建文, 刘瑛, 罗光宏. 微藻多糖及其衍生物在农业领域的研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(05): 1226-1236.
- 杜昱彤, 曲柏宏, 李润文. 我国红皮梨资源及果实着色机制研究进展[J]. 延边大学农学报, 2021, 43(04): 98-107.
- 傅一凡, 王周倩, 邱栋梁, 等. 防雹网对‘东红’猕猴桃果实耐贮性和品质的影响[J]. 植物科学学报, 2024: 1-22.
- 高宇. 温室 CO₂ 施肥对黄瓜嫁接植株和自根植株生长生理特性及产量的影响[D]. 内蒙古农业大学, 2018.
- 郭益昌, 庄舜尧, 胡昱彦, 桂仁意. 埋管通气对雷竹林土壤氧气体积分数的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(01): 69-75.
- 胡瑾, 杨永霞, 李远方, 等. 温室环境控制方法研究现状分析与展望[J]. 农业工程学报, 2024, 40(01): 112-128.
- 江旭升, 李庆宏, 杨勇胜, 等. 贵阳地区 8 个葡萄品种果实品质的综合评价[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2023, (03): 66-72.
- 金翠翠. 加气灌溉提升设施蔬菜氮素吸收利用和产量的作用机制[D]. 华北水利水电大学, 2023.
- 李敖, 刘善江, 段碧华, 等. 国内设施葡萄的栽培现状与发展对策[J]. 特种经济动植物, 2024, 27(03): 160-163.
- 李敏, 吉文丽, 张恒, 等. 外源 Ca²⁺对油用牡丹凤丹白幼苗光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(05): 39-45.
- 林栋, 马晖玲, 冯朝阳, 吕世海. 菊芋(*Helianthus tuberosus*)蒸腾特性与水分利用效率对光辐射和 CO₂ 浓度变化的响应[J]. 中国沙漠, 2010, 30(01): 74-79.
- 林炎娟, 叶新福, 方智振, 周丹蓉. 福红李三个成熟阶段果实营养品质与香气特征分析[J]. 核农学报, 2024, 38(04): 725-735.
- 林之栋, 师君慧, 张文山, 等. 根系氧环境对干旱胁迫下小麦幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(09): 32-38.
- 刘金莹, 孔令喜, 王威浩, 等. 草莓果实香气物质生物合成研究进展[J]. 园艺学报, 2023, 50(09): 1959-1970.
- 刘路, 刘孝平, 孙恒嵩, 等. 柑橘采后脱绿处理及果皮色素物质代谢机理的概述[J]. 植物生理学报, 2020, 56(06): 1146-1154.
- 刘永晨, 司成成, 柳洪鹃, 等. 改善土壤通气性促进甘薯源库间光合产物运转的原因解析[J]. 作物学报, 2020, 46(03): 462-471.
- 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(03): 521-531.

- 马晓宣, 张川, 秦晓雪, 等. 129 份葡萄种质资源的鉴定与综合评价[J]. 分子植物育种, 2024: 1-23.
- 马筱建, 孙景生, 刘浩, 等. 不同方式加气灌溉对温室芹菜生长及产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(04): 29-33.
- 裴书瑶, 曹红霞, 张泽宇, 等. 盆栽番茄对 NaCl 和 Na₂SO₄ 微咸水灌溉的生理响应[J]. 中国农业科学, 2024, 57(03): 570-583.
- 任俊鹏, 李小红, 董瑞奇, 等. 环剥和脱落酸处理对‘夏黑’葡萄果实着色及相关基因表达的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(06): 968-974+1107.
- 沈维, 胡德勇, 姚帮松, 等. 土壤耕作层 O₂ 含量对黄瓜各生育期根系生长特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(05): 49-56.
- 宋慕波, 帅良, 唐路平, 等. 高浓度 CO₂ 对香蕉和大蕉后熟及果皮叶绿素降解的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(06): 313-318.
- 王竞, 唐雪东, 程存刚, 等. 不同光质补光对富士苹果果实品质的影响[J]. 果树学报, 2024: 1-16.
- 王美玉. CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用对银杏光合机理的影响[D]. 沈阳农业大学, 2007
- 王文, 张柯楠, 方莫靡, 等. 果袋颜色对‘赤霞珠’葡萄果皮花色苷积累的影响[J]. 园艺学报, 2023, 50(08): 1723-1738.
- 韦忆, 韦小丽, 王明彬, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对红豆树苗木光合生理和形态的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(06): 124-132.
- 魏秀翠, 杨金明, 廖开志, 等. 温室番茄增施二氧化碳气肥试验示范小结[J]. 上海蔬菜, 2008, (02): 72.
- 武曦, 郭华, 王越, 等. 我国省际葡萄产业竞争力评价[J]. 北方园艺, 2023, (22): 138-145.
- 徐芬, 郭红岩, 喻小兵, 等. CO₂ 浓度升高和有机肥-化肥施用对水稻光合作用、抗氧化酶活性和重金属含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(12): 51-55+113.
- 杨江山, 李斗, 王春恒, 等. 调环酸钙对霞多丽葡萄生理特性及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(01): 76-88.
- 杨一路, 汪小岳, 陈景波, 等. 温室植物生长所需的 CO₂ 的补偿方法研究[J]. 农业工程技术, 2016, 36(04): 15-18.
- 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(06): 727-740.
- 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[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(09): 91-96.
- 袁嫚嫚, 朱建国, 刘钢, 等. 粳稻生育后期剑叶光合日变化和光合色素对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应——FACE 研究[J]. 应用生态学报, 2018, 29(01): 167-175.
- 张上隆. 柑橘果实品质形成与调控的分子生理[C]. 浙江大学, 2024.

- 张溪荷. 冬小麦拔节期低温对叶片光合和衰老特性及产量的影响[D]. 南京信息工程大学, 2016.
- 张小月. 负载量与调亏灌溉处理对赤霞珠葡萄果实及葡萄酒品质的影响[D]. 新疆农业大学, 2022.
- 张玉静, 赫连一歌, 栗国栋, 等. 铁锌硒配施对番茄果实品质、风味物质及矿质元素含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024: 1-12.
- 郑元, 周靖靖, 周慧, 等. 短期 CO₂ 浓度升高对黄土高原刺槐光合日变化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(03): 494-498.
- 钟淑芳, 钟明慧, 刘子晗, 等. 硼对铝胁迫下杉木生长、生理和光合特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2024: 1-9.
- 周兴龙. 高效节水灌溉技术在水利工程中的应用初探[J]. 中国设备工程, 2022, (18): 223-225.
- Akhlaq M., Chuan Z., Haofang Y., et al. Exploring adequate CO₂ elevation for optimum tomato growth and yield under protected cultivation[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 289.
- Andrean A.F., Rezende R., Wenneck G.S., et al. Air over irrigation system benefits qualitative production of cantaloupe melon in a protected environment[J]. Fruits, 2022, 77(5).
- Ashikhmin A., Bolshakov M., Pashkovskiy P., et al. The Adaptive Role of Carotenoids and Anthocyanins in *Solanum lycopersicum* Pigment Mutants under High Irradiance[J]. Cells, 2023, 12(21).
- Aydi S.S., Aydi S., Kolsi R.B.A., et al. CO₂ enrichment: Enhancing antioxidant, antibacterial and anticancer activities in *Arthrospira platensis* [J]. Food Bioscience, 2020, 35.
- Bao L., Dong J., Li X., Duan Z. Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen supply on photosynthetic pigments in cucumber leaves[J]. soil, 2016, 48(04): 653-660.
- Baram S., Weinstein M., Evans J.F., et al. Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291.
- Bauerle W.L. Intracanopy CO₂ and light interactions on *Humulus lupulus* L. net canopy carbon gain under current and future atmospheric CO₂ concentrations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 310.
- Bermudez R., Stefanski A., Montgomery R.A., Reich P.B. Short- and long-term responses of photosynthetic capacity to temperature in four boreal tree species in a free-air warming and rainfall manipulation experiment[J]. Tree Physiology, 2021, 41(1): 89-102.
- Bettoni M.M., Mogor Á.F., Pauletti V., Goicoechea N. The interaction between mycorrhizal inoculation, humic acids supply and elevated atmospheric CO₂ increases energetic and antioxidant properties and sweetness of yellow onion[J]. Horticulture, Environment,

- and Biotechnology, 2017, 58(5): 432-440.
- Byeon S., Song W., Park M., et al. Canopy height affects the allocation of photosynthetic carbon and nitrogen in two deciduous tree species under elevated CO₂[J]. Journal of Plant Physiology, 2022, 268.
- Cai Z., Bai J., Li R., et al. Water and nitrogen management scheme of melon based on yield-quality-efficiency matching perspective under CO₂ enrichment[J]. Agricultural Water Management, 2023, 285.
- Cakmak I., Marschner H. magnesium-deficiency and high light-intensity enhance activities of superoxide-dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione-reductase in bean-leaves[J]. Plant Physiology, 1992, 98(4): 1222-1227.
- Chahardoli A. Hormetic dose responses induced by nickel oxide nanoparticles (NiONPs) on growth, biochemical, and antioxidant defense systems of *Dracocephalum kotschyi*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(44): 100078-100094.
- Chen C., Zhang Y., Feng Z., et al. Photosynthetic Physiological Response of *Porphyra yezoensis* to Light Change at Different CO₂ Concentrations[J]. Water, 2023a, 15(4).
- Chen X., Tao H., Wu Y., Xu X. Effects of Cadmium on metabolism of photosynthetic pigment and photosynthetic system in *Lactuca sativa* L. revealed by physiological and proteomics analysis[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 305: 111371.
- Chen Y., Wang B., Li M., et al. Trends in Atmospheric CO₂ Fertilization Effects with Stand Age Based on Tree Rings[J]. Forests, 2023b, 14(12).
- Cheng B., Yang Z., Chen F., et al. Biomass-derived carbon dots with light conversion and nutrient provisioning capabilities facilitate plant photosynthesis[J]. Science of the Total Environment, 2023, 901.
- Choi H.G., Kang N.J. Effect of light and carbon dioxide on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and fruit yield in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) plants[J]. Journal of Berry Research, 2019, 9(1): 51-61.
- De Rezende F.M., De Souza A.P., Buckeridge M.S., et al. Is guava phenolic metabolism influenced by elevated atmospheric CO₂?[J]. Environmental Pollution, 2015, 196: 483-488.
- Doddrell N.H., Lawson T., Raines C.A., et al. Feeding the world: impacts of elevated CO₂ on nutrient content of greenhouse grown fruit crops and options for future yield gains[J]. Horticulture Research, 2023, 10(4).
- Druta A. Effect of long term exposure to high CO₂ concentrations on photosynthetic characteristics of *Prunus avium* L. plants[J]. Photosynthetica, 2001, 39(2): 289-297.
- Du B., Shukla M.K., Yang X., et al. Enhanced fruit yield and quality of tomato by photosynthetic bacteria and CO₂ enrichment under reduced irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2023, 277.

- Essah S.Y.C., Holm D.G. Air Injection of Subsurface Drip Irrigation Water Improves Tuber Yield and Quality of Russet Potato[J]. American Journal of Potato Research, 2020, 97(4): 432-438.
- Fauset S., Oliveira L., Buckeridge M.S., et al. Contrasting responses of stomatal conductance and photosynthetic capacity to warming and elevated CO₂ in the tropical tree species *Alchomea glandulosa* under heatwave conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 158: 28-39.
- Feng Y.-X., Shang H., Cao J., et al. Elevating and Nitrogen Application on the Physiological Characteristics of Schima superba Seedlings [J]. Journal of Ecology and Environment 2022, 31(09): 1773-1782.
- Ferreira R., Selles G., Pinto M., et al. Effect of Soil Air Capacity on Water Relations and Vegetative Growth of 'Thompson Seedless' Grafted on Different Rootstocks: Preliminary Results[C]. 6th International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops. Vina del Mar, CHILE,2009:145-150.
- Gao B., Hu S., Jing L., et al. Alterations in Source-Sink Relations Affect Rice Yield Response to Elevated CO₂: A Free-Air CO₂ Enrichment Study[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12.
- Garcia A., Gaju O., Bowerman A.F., et al. Enhancing crop yields through improvements in the efficiency of photosynthesis and respiration[J]. New Phytologist, 2023, 237(1): 60-77.
- Gouda M., Nassarawa S.S., Gupta S.D., et al. Evaluation of carbon dioxide elevation on phenolic compounds and antioxidant activity of red onion (*Allium cepa* L.) during postharvest storage[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 200.
- Haghighi M., Golabdar S., Abolghasemi R., et al. CO₂ enrichment changed N metabolism of tomatoes under salinity stress[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 305.
- Han R., Han L., Zhang J. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and leaf structure of American tassel seedlings[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023a, 32(03): 61-70.
- Han X., Jing Y., Xu C., et al. Root-Zone CO₂ Concentration Affects Partitioning and Assimilation of Carbon in Oriental Melon Seedlings[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(18).
- Han X., Sun Y., Chen J., et al. Effects of CO₂ Enrichment on Carbon Assimilation, Yield and Quality of Oriental Melon Cultivated in a Solar Greenhouse[J]. Horticulturae, 2023b, 9(5).
- Heidari R., Jameei R., Ghorbani M. Influence of storage temperature, pH, light and varieties of grape on the stability of anthocyanin extract[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2006, 43(3): 239-241.
- Hernandez V., Hellin P., Botella M.A., et al. Oligosaccharins Alleviate Heat Stress in

- Greenhouse-Grown Tomatoes during the Spring-Summer Season in a Semi-Arid Climate[J]. *Agronomy-Basel*, 2022, 12(4).
- Hidaka K., Nakahara S., Yasutake D., et al. Crop-local CO₂ enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 301.
- Holley J., Mattson N., Ashenafi E., et al. The Impact of CO₂ Enrichment on Biomass, Carotenoids, Xanthophyll, and Mineral Content of Lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(9).
- Hu Y., Hao Y., Wei Z., et al. Effect of 1-MCP coupling with carbon dioxide treatment on antioxidant enzyme activities and quality of fresh-cut Fuji apples[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(12).
- Huang H., Cui P., Lu G., et al. Photosynthetic and Antioxidant Responses of *Gymnocarpus przewalskii* to Simulated Rainfall Changes[J]. *Forests*, 2023, 14(4).
- Huang Z., Wang Q., Xia L., et al. Preliminarily exploring of the association between sugars and anthocyanin accumulation in apricot fruit during ripening[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 248: 112-117.
- Inamoto K., Nagasuga K., Yano T. Effect of CO₂ enrichment on the photosynthesis and dry matter accumulation in the oriental hybrid lily 'Siberia'[J]. *Horticulture Journal*, 2022, 91(4): 541-550.
- Jung D.H., Hwang I., Son J.E. Three-dimensional estimation of greenhouse-grown mango photosynthesis with different CO₂ enrichment heights[J]. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 2022.
- Kanno K., Suzuki Y., Makino A. A small decrease in rubisco content by individual suppression of rbcS genes leads to improvement of photosynthesis and greater biomass production in rice under conditions of elevated CO₂[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2017, 58(3): 635-642.
- Kant S., Seneweera S., Rodin J., et al. Improving yield potential in crops under elevated CO₂: integrating the photosynthetic and nitrogen utilization efficiencies[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2012, 3.
- Karim M.F., Hao P., Nordin N.H.B., et al. CO₂ enrichment using CRAM fermentation improves growth, physiological traits and yield of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020, 27(4): 1041-1048.
- Khamis G., Reyad A.M., Alsherif E.A., et al. Elevated CO₂ reduced antimony toxicity in wheat plants by improving photosynthesis, soil microbial content, minerals, and redox status[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14.
- Khan I., Zafar H., Chattha M.U., et al. Seed priming with different agents mitigate alkalinity induced oxidative damage and improves maize growth[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2022, 50(1).

- Kim H.-J., Han S.H., Kim S., et al. Effects of artificial CO₂ release in soil on chlorophyll content and growth of *pinus densiflora* and *quercus variabilis* seedlings[J]. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 2018, 107(4): 351-360.
- Kirschbaum M.U.F., Mcmillan A.M.S. Warming and Elevated CO₂ Have Opposing Influences on Transpiration. Which is more Important?[J]. *Current Forestry Reports*, 2018, 4(2): 51-71.
- Ksiksi T.S., Ppoyil S.B.T., Palakkott A.R. CO₂ enrichment affects eco-physiological growth of maize and alfalfa under different water stress regimes in the UAE[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2018, 24(2): 251-259.
- Li Y., Niu W., Zhang M., et al. Artificial soil aeration increases soil bacterial diversity and tomato root performance under greenhouse conditions[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(12): 1443-1461.
- Li Y., Zhang P., Sheng W., et al. Securing maize reproductive success under drought stress by harnessing CO₂ fertilization for greater productivity[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14.
- Liang J., Ma X., Li Y., et al. Effects of Bisphenol A on Growth, Photosynthesis Pigment and Antioxidant System of *Spirodela polyrrhiza*[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(6): 144-151.
- Liang X., Wang D., Ye Q., et al. Stomatal responses of terrestrial plants to global change[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1).
- Liu J., Yang F., Lin J. Interactive effects of warming and elevated CO₂ concentration on the photosynthesis of castor (*Ricinus communis*) in black soil of northeast china[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2022, 31(3A): 3352-3357.
- Liu X., Zhang H., Wang J., et al. Increased CO₂ concentrations increasing water use efficiency and improvement PSII function of mulberry seedling leaves under drought stress[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2019, 14(1): 213-223.
- Liu Y., Che F., Wang L., et al. Fruit Coloration and Anthocyanin Biosynthesis after Bag Removal in Non-Red and Red Apples (*Malus x domestica* Borkh.)[J]. *Molecules*, 2013, 18(2): 1549-1563.
- Lu T., Yu H., Li Q., et al. Improving plant growth and alleviating photosynthetic inhibition and oxidative stress from low-light stress with exogenous GR24 in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10.
- Lu X., Croft H., Chen J.M., et al. Estimating photosynthetic capacity from optimized Rubisco-chlorophyll relationships among vegetation types and under global change[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(1).
- Ma J., Wang P. Effects of rising atmospheric CO₂ levels on physiological response of cyanobacteria and cyanobacterial bloom development: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754.

- Lubin C., Jiwu C., Jia L., et al. Effects of drought stress on the leaf photosynthetic characteristics of polygonatum cyrtonema[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(4): 638-647.
- Ma J., Wang P. Effects of rising atmospheric CO₂ levels on physiological response of cyanobacteria and cyanobacterial bloom development: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754.
- Ma K., Zhang W., Zhang L., et al. Effect of pyrazosulfuron-methyl on the photosynthetic characteristics and antioxidant systems of foxtail millet[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12.
- Mamatha H., Rao N.K.S., Laxman R.H., et al. Impact of elevated CO₂ on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Arka Ashish[J]. *Photosynthetica*, 2014, 52(4): 519-528.
- Mao Q., Tang L., Ji W., et al. Elevated CO₂ and soil mercury stress affect photosynthetic characteristics and mercury accumulation of rice[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208.
- Markovic S.M., Zivancev D., Horvat D., et al. Correlation of elongation factor 1A accumulation with photosynthetic pigment content and yield in winter wheat varieties under heat stress conditions[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 166: 572-581.
- Mochizuki Y., Murakami S., Kobayashi T., et al. Local CO₂ application within strawberry plant canopy increased dry matter production and fruit yield in summer and autumn culture[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2022, 22(1): 675-685.
- Mohammed S.B., Upyr T.V., Shapoval O.M., et al. Determination of phenolic compounds in *Prunus domestica* fruits extract and its pharmacological activity[J]. *Journal of Imab*, 2019, 25(2): 2589-2594.
- Morales H., Barros G., Marin S., et al. Effects of apple and pear varieties and pH on patulin accumulation by *Penicillium expansum*[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(15): 2738-2743.
- Mushtaq N., Iqbal S., Hayat F., et al. Melatonin in micro-tom tomato: improved drought tolerance via the regulation of the photosynthetic apparatus, membrane stability, osmoprotectants, and root system[J]. *Life-Basel*, 2022, 12(11).
- Mvondo-She M.A., Mashilo J., Gatabazi A., et al. Exogenous silicon application improves chilling injury tolerance and photosynthetic performance of citrus[J]. *Agronomy-Basel*, 2024, 14(1).
- Niu Y., Lyu H., Liu X., et al. Photosynthesis prediction and light spectra optimization of greenhouse tomato based on response of red-blue ratio[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 318.
- Ofori-Amanfo K.K., Klem K., Vesela B., et al. Interactive effect of elevated CO₂ and reduced

- summer precipitation on photosynthesis is species-specific: The case study with soil-planted norway spruce and sessile oak in a mountainous forest plot[J]. *Forests*, 2021, 12(1).
- Opoku E., Sahu P.P., Findurova H., et al. Differential physiological and production responses of C3 and C4 crops to climate factor interactions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15.
- Ouyang Z., Tian J., Yan X., et al. Micro-nano oxygenated irrigation improves the yield and quality of greenhouse cucumbers under-film drip irrigation[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1).
- Palit P., Ghosh R., Tolani P., et al. Molecular and Physiological Alterations in Chickpea under Elevated CO₂ Concentrations[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2020, 61(8): 1449-1463.
- Peng X., Wang B., Wang X., et al. Effects of different colored light-quality selective plastic films on growth, photosynthetic abilities, and fruit qualities of strawberry[J]. *Horticultural Science & Technology*, 2020, 38(4): 462-+.
- Pinnamaneni S.R., Anapalli S.S., Reddy K.N. Photosynthetic response of soybean and cotton to different irrigation regimes and planting geometries[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13.
- Qaderi R., Mazzoni L., Tonanni V., et al. Investigating the tolerance of different strawberry cultivars to *Botrytis cinerea* infection and its relation with fruit quality[J]. *Journal of Berry Research*, 2024, Preprint: 1-15.
- Qian Y., Guan X., Shao C., et al. Effects of different concentrations of micro-nano bubbles on grain yield and nitrogen absorption and utilization of double cropping rice in South China[J]. *Agronomy-Basel*, 2022, 12(9).
- Reid C.D., Tissue D.T., Fiscus E.L., et al. Comparison of spectrophotometric and radioisotopic methods for the assay of Rubisco in ozone-treated plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 1997, 101(2): 398-404.
- Ren Y., Liao S., Xu Y. An update on sugar allocation and accumulation in fruits[J]. *Plant Physiology*, 2023, 193(2): 888-899.
- Sakoda K., Yamamoto A., Ishikawa C., et al. Effects of introduction of sorghum RbcS with rice RbcS knockdown by RNAi on photosynthetic activity and dry weight in rice[J]. *Plant Production Science*, 2021, 24(3): 346-353.
- Sanchez-Lucas R., Mayoral C., Raw M., et al. Elevated CO₂ alters photosynthesis, growth and susceptibility to powdery mildew of oak seedlings[J]. *The Biochemical journal*, 2023, 480(17): 1429-1443.
- Scher M.A., Barclay R.S., Baczynski A.A., et al. The effect of CO₂ concentration on carbon isotope discrimination during photosynthesis in *Ginkgo biloba*: implications for reconstructing atmospheric CO₂ levels in the geologic past[J]. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 2022, 337: 82-94.
- Schupp J.R., Greene D.W. Effect of Aminoethoxyvinylglycine (AVG) on preharvest drop, fruit quality, and maturation of 'mcIntosh' apples. I. concentration and timing of dilute applications of AVG[J]. HortScience HortSci, 2004, 39(5): 1030-1035.
- Seródio J., Moreira D., Bastos A., et al. Hysteresis light curves: a protocol for characterizing the time dependence of the light response of photosynthesis[J]. Photosynthesis Research, 2022, 154(1): 57-74.
- Sharwood R.E., Ghannoum O., Kapralov M.V., et al. Temperature responses of Rubisco from Paniceae grasses provide opportunities for improving C3 photosynthesis[J]. Nature Plants, 2016, 2(12).
- Shin J., Hwang I., Kim D., et al. Waning advantages of CO₂ enrichment on photosynthesis and productivity due to accelerated phase transition and source-sink imbalance in sweet pepper[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 301.
- Simkin A.J., Kapoor L., Doss C.G.P., et al. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta[J]. Photosynthesis Research, 2022, 152(1): 23-42.
- Sinan K.I., Martinovic L.S., Persuric Z., et al. Metabolite characterization, antioxidant, anti-proliferative and enzyme inhibitory activities of *Lophira lanceolata* Tiegh. ex Keay extracts[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 158.
- Song H., Wu P., Lu X., et al. Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal the mechanisms of CO₂ enrichment in promoting the growth and quality in *Lactuca sativa*[J]. Plos One, 2023, 18(2).
- Surabhi S., Pande V., Pandey V. Ethylenediurea (EDU) mediated protection from ambient ozone-induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) under a high CO₂ environment[J]. Atmospheric Pollution Research, 2022, 13(8).
- Suzuki K., Yamakawa T., Itoh S., et al. Determination of fossil-derived carbon ratio of tomato plants in greenhouse with CO₂ enrichment using biobased content method[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 327.
- Uddin S., Parvin S., Armstrong R., et al. Water use dynamics of dryland wheat grown under elevated CO₂ with supplemental nitrogen[J]. Crop & Pasture Science, 2023.
- Ullah A., Al-Rajhi R.S., Al-Sadi A.M., Farooq M. Wheat genotypes with higher intercellular CO₂ concentration, rate of photosynthesis, and antioxidant potential can better tolerate drought stress[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(3): 2378-2391.
- Vafiadis D.T., Papamanthos C., Ntinis G.K., et al. Influence of CO₂ enrichment in greenhouses on pepper plant (*Capsicum annuum* L.) yield under high temperature conditions[C]. International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems - Greensys. Athens, GREECE, 2012:749-754.

- Wang J., He Q., Cao K., et al. Micro-nano bubble water with potassium fertigation improves strawberry yield and quality by changing soil bacterial community[J]. *Rhizosphere*, 2023, 28.
- Wang L., Feng Z., Schjoerring J.K. Effects of elevated atmospheric CO₂ on physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analytic test of current hypotheses[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 178: 57-63.
- Wang M., Xie B., Fu Y., et al. Effects of different elevated CO₂ concentrations on chlorophyll contents, gas exchange, water use efficiency, and PSII activity on C3 and C4 cereal crops in a closed artificial ecosystem[J]. *Photosynthesis Research*, 2015, 126(2-3): 351-362.
- Wei W., Ye C., Huang H.-C., et al. Appropriate nitrogen application enhances saponin synthesis and growth mediated by optimizing root nutrient uptake ability[J]. *Journal of Ginseng Research*, 2020, 44(4): 627-636.
- Wujeska-Klaue A., Crous K.Y., Ghannoum O., et al. Lower photorespiration in elevated CO₂ reduces leaf N concentrations in mature Eucalyptus trees in the field[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(4).
- Xiao S., Zhang W., Huang F., et al. Effect of CO₂ enrichment on the photosynthetic properties of silverleaf tree seedlings leaves under salt application treatments[J]. *China Soil and Water Conservation Science*, 2020, 18(05): 127-135.
- Yamanaka R., Kawashima H. Trends in the development of energy-saving techniques for protected horticulture in Japan[J]. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*, 2022, 56(3): 237-243.
- Yamaura H., Kanno K., Iwasaki Y., et al. Controlling growth and carbohydrate utilization of tomato seedlings through day-night temperature difference and high light intensity under elevated CO₂ conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 322.
- Yan H., Wang S., Shugart H.H. Large latitudinal difference in soil nitrogen limitation on global vegetation response to elevated CO₂[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 342.
- Yang B., Yao H., Wang F. A Review of Ventilation and Environmental Control of Underground Spaces[J]. *Energies*, 2022, 15(2).
- Yang K., Huang Y., Yang J., et al. Do rice growth and yield respond similarly to abrupt and gradual increase in CO₂?[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906.
- Yao Y., Lei J., Niu H., et al. Combined Impact of Elevated CO₂ Concentration and Climatic Warming on Potato Yield and Quality in Semi-arid Regions[J]. *Potato Research*, 2021, 64(1): 97-113.
- Yu Z., Wang C., Zou H., et al. The Effects of Aerated Irrigation on Soil Respiration and the Yield of the Maize Root Zone[J]. *Sustainability*, 2022, 14(8).
- Zhang W., Li Y., Xu Y., et al. Alternate drip irrigation with moderate nitrogen fertilization

- improved photosynthetic performance and fruit quality of cucumber in solar greenhouse[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 308.
- Zhang X., Zhai P., Huang J. Leaf Carbon exchange of two dominant plant species impacted by water and nitrogen application in a semi-arid temperate steppe[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022a, 13.
- Zhang Y., Yao Q., Shi Y., et al. Elevated CO₂ improves antioxidant capacity, ion homeostasis, and polyamine metabolism in tomato seedlings under Ca(NO₃)₂-induced salt stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 273.
- Zhang Y., Zhao Y., Lu W., et al. Effects of CO₂ concentration and soil moisture content on short-term water use efficiency of plants at individual scales[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2022b, 33(06): 1505-1510.
- Zhang Z., Yang R., Sun J., et al. Root-zone aeration improves fruit yield and quality of tomato by enhancement of leaf photosynthetic performance[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 291.

致谢

总觉得来日方长，却不知岁月清浅，行文至此，百感交集。敲下“致谢”二字时，意味着我的三年研究生生涯即将落下帷幕。故事始于2021年金秋，终于2024年盛夏，三年光阴如绚烂的烟花，转瞬即逝。目之所及，皆是满满的回忆。毕业对我来说既是结束，亦是开始，纵有万不舍，但必将带着新的目标与期许踏上另一段崭新的征程。

饮水思其源，学成念吾师。感谢我的硕士生导师于坤老师，还记得初次见面，您爽朗的性格，将我纳入门下。在这三年里，经历了焦虑与迷茫，是您不断地鼓励我、引领我，从确定论文选题、构思，到建立论文框架，文献资料的搜集以及论文的定稿，您一直都在悉心指导我，严格要求我。您喜欢把事情做好提前量，在一次次组会中，您耐心地听我的阶段性汇报并认真点评，才保证了实验室项目和硕士课题的顺利进行。生活上，老师也教会了我许多为人处世的道理，让我受益终生。同时，感谢农学院园艺系所有老师三年以来在我学习与生活上的帮助。得遇良师，何其有幸。

父母之爱子，则为计之深远。感谢爸爸妈妈对我毫无保留的爱，养育之恩，无以为报，您们是我的底气，也是我这一路走来的心气。感谢您们在我成长路上的无时无刻的支持与帮助，也感谢您们在我迷茫与无助时给我力量指引我前行。研究生三年发生了太多，感谢您们陪我走过那些最痛苦的日子，默默地在背后帮助我。同时，也要感谢其他亲人在我求学旅途中给予的鼓励与支持。养育之恩，无以言表，唯有继续努力去成为他们的骄傲。唯愿吾亲身体健康，平安顺遂。

途有良伴，不觉长远。山水一程，三生有幸。感谢我的同门师姐、师兄、师弟师妹在学业和生活上指导与帮助。感谢课题组所有的小伙伴们三年以来的互帮互助与陪伴。感谢我的挚友们，谢谢你们与我一起分享喜悦，排忧解难。祝福吾友前程似锦，平安喜乐。

道阻且长，行则将至。最后感谢不曾放弃的自己，一路跌跌撞撞却并未停下脚步，无数个奋笔疾书的日夜，无数个含泪坚持的时刻，无数个自我治愈的瞬间，都是成长的印记。心若有之向往，何惧道阻且长，希望自己能继续保持热忱，坚定前行。

山水相逢，终有一别。感恩所有的相遇！北五路190号，后会有期！祝愿伟大的祖国繁荣昌盛、国泰民安！

周钰凡

2024年6月

作者简介

周钰凡，男，生于 1999 年 12 月，籍贯江苏南通。2021 年毕业于石河子大学农学院园艺专业，获得农学学士学位。同年 9 月考入石河子大学农学院园艺学专业攻读硕士学位，主要从事温室葡萄 CO₂ 加气灌溉技术应用等相关研究。

在学期间主要参与的研究项目

参加了国家自然科学基金项目（32360718）的部分研究工作

在学期间发表的文章


无

获奖情况：

无

石河子大学硕士研究生学位论文

导师评阅表

研究生姓名	周钰凡	学制	3 年制
专业	园艺学	研究方向	果树方向
<p>学术评语:</p> <p>该论文“不同 CO₂ 施肥方式及浓度对设施内葡萄光合特性、产量及果实品质的影响”，以 5 年生葡萄为实验材料，为探究设施葡萄生产中 CO₂ 的最佳施肥方式和最适浓度，设置 CO₂ 加气灌溉施肥、传统 CO₂ 施肥、不进行 CO₂ 施肥，及 4 种不同浓度处理。以验证新型 CO₂ 加气灌溉模式的可行性，并筛选出设施葡萄生产的最佳 CO₂ 浓度。选题具有一定的创新性，且对设施葡萄的加气灌溉技术应用提供了一定的理论依据，具有实际意义。结果真实可信，实验设计合理，研究内容丰富，工作量较大，满足硕士学位论文要求。论文撰写结构合理，具有逻辑性，文字表达较为准确，格式较为规范，达到硕士学位的要求，同意参加答辩。</p> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;"> <p>指导教师签字: </p> <p>2024 年 5 月 20 日</p> </div>			