

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。