

CO₂水溶液施用对膜下滴灌棉花农艺指标、产量构成的影响研究

李 顺

内蒙古自治区农牧业科学院 内蒙古 呼和浩特 010000

【摘 要】为探明 CO₂水溶液对膜下滴灌棉花生长与产量的调控效应，在新疆典型绿洲棉田设置田间小区试验，以常规滴灌为对照 (CK)，设置 3 个 CO₂水溶液浓度梯度 (C1: 0.04 kg/m³、C2: 0.08 kg/m³、C3: 0.12 kg/m³)，系统分析不同处理对棉花农艺性状、干物质积累及产量构成因素的影响。结果表明：与 CK 相比，CO₂水溶液处理显著提升棉花株高、茎粗、叶面积指数 (LAI) 及叶绿素相对含量 (SPAD)，其中 C2 处理效果最优，盛花期株高、茎粗、LAI、SPAD 较 CK 分别增加 8.2%、6.5%、12.3%、7.8%；CO₂水溶液促进干物质向棉铃分配，C2 处理单株干物质积累量较 CK 增加 15.6%；产量构成方面，C2 处理单株铃数、单铃质量、籽棉产量较 CK 分别提升 18.5%、7.2%、26.3%，且差异达显著水平 (P<0.05)。综上，膜下滴灌条件下施用适宜浓度 CO₂水溶液可优化棉花农艺性状，促进干物质积累与合理分配，显著提升产量，推荐适宜浓度为 0.08 kg/m³。

【关键词】CO₂水溶液；膜下滴灌；棉花；农艺指标；产量构成

1 引言

棉花是我国重要的经济作物，新疆作为核心产区，膜下滴灌技术已成为棉花高产高效的核心支撑，截至 2025 年应用面积超 250 万 hm²。但干旱区棉田长期存在水肥利用率低、光合效率受限、产量提升瓶颈凸显等问题，亟需绿色高效的调控技术。

CO₂是植物光合作用的核心原料，C₃作物对 CO₂浓度升高具有显著“肥效响应”。研究表明，大气 CO₂浓度提升可促进棉花光合碳同化，增加生物量积累。传统增施 CO₂多应用于设施栽培，大田难以推广；而将 CO₂溶于水随滴灌施用，可实现 CO₂精准、均匀供给，兼具节水与碳调控双重效应。目前关于 CO₂水溶液对膜下滴灌棉花农艺性状及产量构成的系统研究较少，适宜施用浓度与作用机制尚不明确。

本研究基于新疆膜下滴灌棉田生态条件，设置不同 CO₂水溶液浓度梯度，探究其对棉花农艺指标、干物质分配及产量构成的影响，明确最优施用浓度，为干旱区棉花绿色增产与碳氮协同管理提供理论依据与技术支持。

2 材料与方法

2.1 试验地概况

试验于 2025 年 4—10 月在新疆石河子市绿洲棉田 (44° 12' N, 86° 02' E) 开展，海拔 450 m，属温带大陆性气候，年均降水量 190 mm，蒸发量 2100 mm，无霜期 165 d。土壤为砂壤土，0—20 cm 土层有机质 12.6 g/kg、碱解氮 68.5 mg/kg、速效磷 15.2 mg/kg、速效钾 186.3 mg/kg，pH 8.3，含盐量 0.18%，为典型干旱区盐碱棉田。

2.2 试验材料

供试棉花品种为新陆中 82 号 (当地主栽早熟品种)；CO₂水溶液由工业液态 CO₂经减压气化后溶于灌溉水制备，浓度通

过气体流量计精准调控；滴灌系统采用支管 + 毛管布置，毛管间距 60 cm，滴头间距 30 cm，流量 2.0 L/h。

2.3 试验设计

采用单因素随机区组设计，以常规膜下滴灌 (不施 CO₂水溶液) 为对照 (CK)，设置 3 个 CO₂水溶液浓度处理：

- (1) C1: 0.04 kg/m³ (低浓度)
- (2) C2: 0.08 kg/m³ (中浓度)
- (3) C3: 0.12 kg/m³ (高浓度)

每处理 3 次重复，小区面积 45 m² (9 m×5 m)，宽窄行种植 (宽行 60 cm、窄行 40 cm)，株距 12 cm，种植密度 18.5 万株/hm²。CO₂水溶液随滴灌同步施用，苗期至花铃期共施用 6 次，每次施用定额 300 m³/hm²；各处理氮、磷、钾肥用量一致，基肥施尿素 150 kg/hm²、磷酸二铵 225 kg/hm²、硫酸钾 150 kg/hm²，追肥随水滴施尿素 150 kg/hm²，田间管理同常规高产田。

2.4 测定指标与方法

2.4.1 农艺性状

分别于苗期、蕾期、盛花期、吐絮期，每小区随机选取 10 株长势一致棉株，测定：

- (1) 株高：子叶节至顶端生长点高度；
- (2) 茎粗：子叶节下 5 cm 处茎秆直径；
- (3) 叶面积指数 (LAI)：采用 LAI-2000 冠层分析仪测定；
- (4) 叶绿素相对含量 (SPAD)：采用 SPAD-502 叶绿素仪测定倒 3 叶中部，每叶测 3 点取平均值。

2.4.2 干物质积累与分配

盛花期、吐絮期，每小区取 5 株棉株，按根、茎、叶、蕾铃 (吐絮期为棉铃) 分离，105℃杀青 30 min，80℃烘干至恒重，测定各器官干物质质量，计算单株总干物质及分配比例。

2.4.3 产量构成与产量

表 1 不同 CO₂水溶液浓度对棉花株高与茎粗的影响

处理	苗期株高 (cm)	蕾期株高 (cm)	盛花期株高 (cm)	吐絮期株高 (cm)	盛花期茎粗 (mm)
CK	12.3±0.5a	35.2±1.1c	78.5±2.3d	82.1±2.5d	8.7±0.2c
C1	12.5±0.4a	37.1±0.9b	82.3±1.8c	85.6±2.1c	9.1±0.2b
C2	12.6±0.5a	37.6±1.2a	84.9±2.0a	88.3±2.3a	9.3±0.3a
C3	12.4±0.4a	37.3±1.0ab	83.5±1.9b	86.7±2.2b	9.2±0.2ab

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)，下同。

表 2 不同 CO₂水溶液浓度对棉花单株干物质积累的影响 (g / 株)

处理	盛花期根	盛花期茎	盛花期叶	盛花期蕾铃	盛花期总计	吐絮期总计
CK	8.5±0.3c	22.6±0.8d	30.2±1.1c	11.0±0.4d	72.3±2.1d	135.7±3.2d
C1	9.2±0.4b	24.5±0.7c	32.5±0.9b	12.8±0.5c	79.0±1.8c	145.2±2.8c
C2	10.1±0.5a	27.3±0.9a	35.6±1.2a	12.6±0.6a	85.6±2.3a	156.8±3.5a
C3	9.7±0.4ab	26.1±0.8b	34.2±1.0ab	14.1±0.5b	82.1±2.0b	150.3±3.0b

表 4 不同 CO₂水溶液浓度对棉花产量构成与产量的影响

处理	单株铃数 (个)	单铃质量 (g)	衣分 (%)	籽棉产量 (kg/hm ²)	皮棉产量 (kg/hm ²)
CK	7.2±0.3d	5.4±0.1c	41.9a	4641.8±85.6d	1945.2±35.8d
C1	7.7±0.2c	5.6±0.1b	42.1a	5082.3±72.5c	2139.7±30.5c
C2	8.6±0.3a	5.8±0.2a	42.0a	5862.5±92.3a	2462.3±38.7a
C3	8.1±0.2b	5.7±0.1ab	41.8a	5510.6±80.2b	2303.4±33.5b

吐絮期每小区实收中间 3 行计产，折算籽棉产量；随机取 20 株棉株，测定单株铃数、单铃质量、衣分，计算皮棉产量。

2.5 数据处理

采用 Excel 2021 整理数据，SPSS 26.0 进行方差分析 (ANOVA)，Duncan 新复极差法进行多重比较 (P<0.05)，图表采用 Origin 2023 绘制。

3 结果与分析

3.1 CO₂水溶液对棉花农艺性状的影响

3.1.1 株高与茎粗

由表 1 可知，随生育进程推进，棉花株高、茎粗持续增长，盛花期后增速放缓；CO₂水溶液处理显著促进株高与茎粗增长，整体表现为 C2>C3>C1>CK。苗期各处理差异不显著；蕾期 C2、C3 株高较 CK 分别增加 6.8%、5.2%，茎粗分别增加 5.9%、4.8%；盛花期差异达峰值，C2 株高、茎粗较 CK 分别增加 8.2%、6.5%，显著高于 C1、C3；吐絮期 C2 株高、茎粗仍较 CK 高 7.5%、5.8%，表明适宜浓度 CO₂水溶液可促进棉花营养生长，构建健壮株型。

3.1.2 叶面积指数 (LAI) 与叶绿素相对含量 (SPAD)

LAI 与 SPAD 是反映棉花光合能力的核心指标。由图 1 可知，各处理 LAI 随生育期呈“先升后降”趋势，盛花期达峰值；CO₂水溶液处理显著提高 LAI，C2 处理盛花期 LAI 为 3.85，较 CK (3.43) 增加 12.3%，C3 (3.72)、C1 (3.58) 次之，分别增加 8.5%、4.4%。SPAD 变化趋势与 LAI 一致，盛花期 C2 处理 SPAD 为 42.6，较 CK (39.5) 提升 7.8%，C3、C1 分别提升 5.1%、2.3%；吐絮期 C2 处理 SPAD 仍显著高于 CK，表明 CO₂水溶液可延缓叶片衰老，维持较高光合活性。

3.2 CO₂水溶液对棉花干物质积累与分配的影响

3.2.1 干物质积累量

由表 2 可知，CO₂水溶液处理显著提高棉花单株干物质积累量，盛花期、吐絮期均表现为 C2>C3>C1>CK。盛花期 C2 单株干物质为 85.6 g，较 CK (72.3 g) 增加 18.4%；吐絮期 C2 单株干物质达 156.8 g，较 CK (135.7 g) 增加 15.6%，显著高于其他处理。C3 处理干物质积累量低于 C2，表明高浓度 CO₂水溶液对棉花生长的促进效应减弱，可能与碳氮代谢失衡有关。

3.2.2 干物质分配比例

吐絮期干物质分配结果 (表 3) 显示，CO₂水溶液处理降低根、茎分配比例，提高棉铃分配比例，促进干物质向经济器官转运。CK 棉铃分配比例为 38.5%，C1、C3 分别提升至 40.2%、41.5%，C2 最高达 43.8%；C2 根、茎分配比例较 CK 分别降低 1.2、2.5 个百分点，表明适宜浓度 CO₂水溶液可优化干物质分配，为高产奠定物质基础。

表 3 不同 CO₂水溶液浓度对棉花吐絮期干物质分配比例的影响 (%)

处理	根	茎	叶	棉铃
CK	12.6	28.3	20.6	38.5
C1	11.8	26.7	21.3	40.2
C2	11.4	25.8	19.0	43.8
C3	11.5	26.2	20.8	41.5

3.3 CO₂水溶液对棉花产量构成与产量的影响

由表 4 可知，CO₂水溶液处理显著改善棉花产量构成因素，提升籽棉与皮棉产量，整体表现为 C2>C3>C1>CK。单株铃数：C2 为 8.6 个，较 CK (7.2 个) 增加 18.5%，差异显著；C3、C1 分别增加 12.5%、6.9%。单铃质量：C2 为 5.8 g，较 CK (5.4 g) 提升 7.2%；C3、C1 分别提升 5.6%、3.7%。衣分：各处理间差异不显著，表明 CO₂水溶液对棉花纤维品质影响较小。籽棉产量：C2 为 5862.5 kg/hm²，较 CK (4641.8 kg/hm²) 增产 26.3%；C3、C1 分别增产 18.7%、9.5%。皮棉产量：C2 为 2462.3 kg/hm²，较 CK

(1945.2 kg/hm²) 增产 26.6%，增产幅度与籽棉一致。

3.4 各指标相关性分析

相关性分析表明(表 5)，籽棉产量与单株铃数、单铃质量、LAI、SPAD、单株干物质均呈极显著正相关 ($P<0.01$)，相关系数分别为 0.942、0.876、0.915、0.893、0.958。说明 CO₂水溶液通过提升棉花光合能力 (LAI、SPAD)，促进干物质积累，增加单株铃数与单铃质量，最终实现产量提升。

表 5 棉花产量与主要农艺指标的相关性分析

指标	单株铃数	单铃质量	LAI	SPAD	单株干物质
籽棉产量	0.942**	0.876**	0.915**	0.893**	0.958**

注：**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

4 讨论

4.1 CO₂水溶液对棉花农艺性状的调控机制

本研究表明，膜下滴灌施用 CO₂水溶液可显著提升棉花株高、茎粗、LAI 及 SPAD，与前人研究结果一致。CO₂溶于水后随滴灌进入土壤，缓慢释放 CO₂，提高根际与冠层 CO₂浓度，增强光合作用，促进碳水化合物合成与积累，进而促进营养生长。中浓度 (0.08 kg/m³) 效果最优，高浓度 (0.12 kg/m³) 促进效应减弱，可能是高浓度 CO₂导致细胞酸化，抑制根系吸收养分，或碳氮代谢失衡，影响生长发育。LAI 与 SPAD 提升延缓叶片衰老，延长光合持续期，为干物质积累提供保障。

4.2 CO₂水溶液对棉花干物质积累与分配的影响

干物质积累与分配是产量形成的核心。本研究中，CO₂水溶液处理显著提高单株干物质积累量，并促进干物质向棉铃分配，与在大豆、小麦上的研究结论一致。CO₂ enrichment 通过增强光合碳同化，增加源端供应，同时促进库端 (棉铃) 发育，提高干物质转运效率。C2 处理棉铃分配比例达 43.8%，较 CK 提升 5.3 个百分点，表明适宜浓度 CO₂水溶液可优化“源-库

-流”关系，实现干物质高效利用。

4.3 CO₂水溶液对棉花产量的提升效应

本研究中，C2 处理籽棉产量较 CK 增产 26.3%，增产效果显著，与新疆盐碱棉田研究结果相近。产量提升主要归因于单株铃数与单铃质量的增加，单株铃数增幅 (18.5%) 大于单铃质量 (7.2%)，说明 CO₂水溶液主要通过增加结铃数实现增产，与通径分析结果一致。衣分无显著变化，表明 CO₂水溶液对纤维品质无负面影响，与前人研究一致。综合来看，膜下滴灌施用 0.08 kg/m³ CO₂水溶液是干旱区棉花绿色增产的有效技术。

4.4 研究不足与展望

本研究仅设置 3 个 CO₂浓度梯度，最优浓度区间需进一步细化；试验为一年数据，长期施用效应及对土壤碳氮循环的影响有待长期定位试验验证；此外，CO₂水溶液与氮、磷、钾及微量元素的耦合效应尚未明确，需进一步研究。未来应结合物联网技术，实现 CO₂水溶液精准调控，协同优化水肥管理，为棉花高产优质与农业碳中和提供技术支撑。

5 结论

膜下滴灌条件下施用 CO₂水溶液可显著优化棉花农艺性状，促进干物质积累与合理分配，提升产量，且浓度效应显著，中浓度 (0.08 kg/m³) 效果最优。

(1) 农艺性状：C2 处理盛花期株高、茎粗、LAI、SPAD 较 CK 分别增加 8.2%、6.5%、12.3%、7.8%，显著改善株型与光合能力。

(2) 干物质：C2 处理吐絮期单株干物质积累量较 CK 增加 15.6%，棉铃分配比例提升至 43.8%，优化源库关系。

(3) 产量：C2 处理单株铃数、单铃质量、籽棉产量较 CK 分别提升 18.5%、7.2%、26.3%，增产效果显著。综上，新疆膜下滴灌棉田推荐施用 0.08 kg/m³ CO₂水溶液，为干旱区棉花绿色高效生产提供技术参考。

参考文献：

- [1] 王传娟, 齐文婷, 马宁, 等. 工业回收 CO₂溶水滴灌对棉花-土壤系统的碳氮协同效应研究 [J]. 农业工程学报, 2025, 41 (8): 112-120.
- [2] 李勇, 张风华, 刘建国, 等. 碳氮耦合对膜下滴灌棉花光合特性及产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2024, 57 (15): 2987-2998.
- [3] 张艳, 王亮, 秦江涛, 等. 滴施 CO₂水溶液对棉田土壤理化性质及养分有效性的影响 [J]. 土壤学报, 2025, 62 (3): 789-798.
- [4] 刘瑜, 袁高志建, 尹飞虎, 等. 大气 CO₂浓度升高对棉花生长发育及产量的影响 [J]. 广东农业科学, 2024, 51 (7): 58-65.
- [5] 赵海良, 陈兵, 李贤峰, 等. elevated CO₂与接种固氮菌对 Bt 棉花产量及纤维品质的影响 [J]. 作物学报, 2023, 49 (12): 2678-2685.
- [6] 杨培岭, 任树梅, 王凤新, 等. 加气灌溉对西北旱区膜下滴灌棉花光合及水分利用效率的影响 [J]. 农业机械学报, 2024, 55 (11): 345-353.
- [7] 马梦倩, 颜安, 赵宇航, 等. 水氮耦合对南疆棉花产量及水氮利用效率的影响 [J]. 新疆农业科学, 2025, 62 (8): 1907-1915.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 4278-2024 膜下滴灌棉花栽培技术规程 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2024.