

# 聚谷氨酸与灌溉定额协同调控对盐碱土壤及棉花产量的影响\*

王 闪<sup>1,2</sup>, 张金珠<sup>1,2†</sup>, 王振华<sup>1,2</sup>, 张继红<sup>1,2</sup>, 刘梦洁<sup>1,2</sup>, 马占利<sup>1,2</sup>,  
郑继亮<sup>1,3</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心, 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室, 新疆石河子 832000; 3. 新疆心连心能源化工有限公司, 新疆石河子 832000)

**摘 要:** 为探究盐碱化棉田土壤改良及棉花增效的协同调控策略, 2024 年在新疆玛纳斯县中度盐碱棉田开展田间试验。通过双因素完全组合设计, 设置 3 种聚谷氨酸 ( $\gamma$ -PGA) 施用量 (F1: 7.5 kg·hm<sup>-2</sup>、F2: 15 kg·hm<sup>-2</sup>、F3: 22.5 kg·hm<sup>-2</sup>) 和 2 个灌溉定额水平 (W1: 4 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>、W2: 4 500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>), 研究二者对土壤理化性质及棉花生理生长、产量与品质的影响。结果表明, 与 F1、F2 相比, F3 土壤盐分和 pH 峰值均降低, 多酚氧化酶、过氧化氢酶、脲酶及蔗糖酶活性均提高, 其中脲酶活性显著提高了 30.13%~35.22%, 同时促进根系生长及干物质积累, 显著增加棉花产量, 产量相关参数提高 3.02%~27.96%。此外, 提高灌溉定额会降低土壤盐分和 pH 峰值, 显著增强 4 种酶活性, 增幅为 9.16%~48.33%, 根系指标及吐絮期各器官生物量均得到提高, 产量相关参数显著提高 11.10%~30.34%。主成分分析和相关性分析显示, 土壤酶活性、根系指标与棉花产量构成要素呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 土壤盐分、pH 与棉花纤维品质呈显著负相关 ( $P<0.05$ )。综合评价表明, 4 500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> 灌溉定额配合 22.5 kg·hm<sup>-2</sup>  $\gamma$ -PGA 施用可通过改善根区土壤微环境、促进棉花干物质积累等途径, 实现盐碱地棉花生产的提质增效。

**关键词:** 盐碱地; 聚谷氨酸; 灌溉定额; 土壤改良; 棉花产量和品质

中图分类号: S27

文献标志码: A

## Interactive Effects of Poly- $\gamma$ -Glutamic Acid and Irrigation Quota on Saline-Alkali Soil Properties and Cotton Yield

WANG Shan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinzhu<sup>1,2†</sup>, WANG Zhenhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Jihong<sup>1,2</sup>, LIU Mengjie<sup>1,2</sup>, MA Zhanli<sup>1,2</sup>, ZHENG Jiliang<sup>1,3</sup>

(1.College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Technology Innovation Center for Agricultural Water and Fertilizer Efficiency Equipment of Xinjiang Production & Construction Corps, Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3. Xinjiang

\*新疆生产建设兵团科技计划项目 (2025YD17)、兵团第三师“揭榜挂帅”项目 (KY2024JBGS07) 和粮食作物精准水肥一体化技术研究与应用 (2024NC062) 资助 Supported by the Science and Technology Program of XPCC, China (No. 2025YD17), the Project of 'Unveiling Commander' in the Third Division of the Corps, China (No. KY2024JBGS07), and the Research and Application of Precision Water-Fertilizer Integration Technology for Grain Crops, China (No. 2024NC062)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: xjshzzjz@shzu.edu.cn

作者简介: 王 闪 (2000—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: 1205827498@qq.com

收稿日期: 2025-06-13; 收到修改稿日期: 2025-10-11;; 网络首发日期 (www.cnki.net):

**Abstract: 【Objective】** To establish scientifically grounded, synergistic regulatory approaches for the comprehensive mitigation of the persistent challenge of saline-alkali soil degradation in cotton-growing systems, this study conducted a controlled field experiment during the 2024 cotton season on moderately saline-alkali soils in Manas County, Xinjiang. The objective was to elucidate how the integrated application of poly- $\gamma$ -glutamic acid ( $\gamma$ -PGA) and regulated irrigation influences soil biochemical processes, cotton physiological performance, yield formation, and fibre quality under field conditions. **【Method】** A two-factor randomized block design was established, involving three  $\gamma$ -PGA rates (F1:  $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; F2:  $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; F3:  $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and two irrigation quotas (W1:  $4\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; W2:  $4\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ). Comprehensive measurements included soil physicochemical indices (Electrical conductivity (EC) -based salinity and pH variations across growth stages), key enzymatic activities (polyphenol oxidase, catalase, urease, sucrase), root morphological traits (length, diameter, biomass ratios), organ-specific dry matter accumulation, and yield and fibre parameters (boll number, lint percentage, composite quality index). **【Result】** Compared with F1 and F2, the F3 treatment effectively suppressed peak soil salinity and pH, concurrently elevating enzymatic activity, particularly urease, which increased by 30.13%-35.22 %. Nevertheless, the response plateaued beyond the F3 level, suggesting diminishing returns under higher  $\gamma$ -PGA concentrations. Enhanced enzymatic activity and improved rhizosphere conditions promoted root proliferation and biomass accumulation, resulting in a moderate but statistically significant yield increase (3.02%–27.96 %). Likewise, a higher irrigation quota (W2) alleviated surface salt accumulation and improved enzyme activities by 9.16%-48.33%, although excessive irrigation risked secondary salinization through capillary rise and nutrient leaching. Also, multivariate analyses (Principal component analysis and Pearson correlation) revealed a strong positive correlation ( $P < 0.05$ ) between enzyme activity and yield traits. At the same time, soil salinity and alkalinity showed negative correlations with fibre quality indices, emphasizing the trade-off between osmotic stress alleviation and fibre maturation under saline conditions. **【Conclusion】** The combined application of  $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$   $\gamma$ -PGA with  $4\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  irrigation proved the most efficient configuration within the tested range, primarily by ameliorating the rhizosphere microenvironment (lower EC/pH and enhanced enzymatic turnover) and optimizing photosynthate allocation to reproductive organs. However, the overall improvement remains conditional on soil salinity thresholds, long-term stability, and economic feasibility. Thus, while the integrated  $\gamma$ -PGA-irrigation strategy significantly enhances cotton yield and fibre quality in saline-alkali soils, its scalability and sustainability under variable climatic and hydrological regimes warrant further investigation. **Key words:** Saline-alkali soil; Poly- $\gamma$ -glutamic acid- $\gamma$ -PGA; Irrigation quota; Soil improvement; Cotton yield and quality

土壤盐碱化是全球性的环境问题, 严重威胁陆地生态系统和可持续农业发展<sup>[1]</sup>。我国盐碱地总面积约  $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 占可利用土地的 4.88%<sup>[2]</sup>。其中, 新疆盐碱化耕地面积达 233.1 万  $\text{hm}^2$ , 占总耕地面积的 37.7%, 随着不合理的人为活动和气候变化加剧, 盐碱地面积仍不断增加<sup>[3]</sup>, 严重制约新疆农业的可持续发展。土壤盐碱化会使盐分向表层迁移, 削弱土壤肥力, 加剧土壤侵蚀与退化风险, 进而恶化作物根区环境, 并引发严重水土流失<sup>[4]</sup>, 最终削弱作物种植效益, 造成农业生态系统资源枯竭<sup>[5]</sup>。传统土壤改良剂成本高且易造成二次污染, 亟需利用新型环境友好型材料加以替代<sup>[6]</sup>。

聚谷氨酸 (Poly- $\gamma$ -glutamic acid, 以下简称  $\gamma$ -PGA) 是以 D-谷氨酸和 L-谷氨酸单体通过  $\alpha$ -氨基和  $\gamma$ -羧基经酰胺键聚合的一种多肽线性分子, 具有良好的保水性、吸附性和可降解性, 能增强土壤持水能力、改变土壤水分剖面分布形态的良好性能<sup>[7]</sup>。此外, 有研究表明,  $\gamma$ -PGA 通过激活脯氨酸合成途径、促进脯氨酸积累, 提高幼苗对盐碱胁迫的抗性<sup>[8]</sup>。Ma 等<sup>[9]</sup>研究表明,  $\gamma$ -PGA 可通过影响土壤微生物的组成和活性, 进一步影响植物的生长和产量。张绍武等

[10]研究表明,  $\gamma$ -PGA 能显著提高白菜对氮、磷和钾的吸收, 增强其对养分的利用效率。Bai 等[11]试验证明,  $\gamma$ -PGA 使用量对甘蓝增产及肥料利用率提高也有显著影响。

适当增加灌溉定额可通过调控水盐动态平衡, 提升水分利用效率, 还可改善土壤孔隙度, 为作物根系提供适宜的养分, 有助于改善土壤环境[12], 从而减轻作物对盐碱环境的影响。此外, 优化灌溉定额能为作物创造更优的根区水盐环境, 促进作物根系发育、增强其养分吸收能力[13], 促进盐碱土降盐和棉花增产, 实现产量与经济效益最大化[14]。不合理的灌溉制度会导致土壤肥力降低, 改变土壤理化性质, 抑制作物生长发育。然而, 目前对  $\gamma$ -PGA 的应用研究多集中于改善土壤团聚结构、提高土壤持水能力、降低土壤养分流失等方面。且尚未明确灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 协同作用对棉花生长的影响, 也较少涉及  $\gamma$ -PGA 对土壤盐分及 pH 等的影响。

为此, 本研究于 2024 年在新疆典型中度盐碱棉田开展试验。本研究的主要目标为: (1) 揭示  $\gamma$ -PGA 施用量与灌溉定额对土壤水盐运移及酶活性的影响; (2) 解析  $\gamma$ -PGA 施用量与灌溉定额协同对棉花根系生长及物质分配的调控路径; (3) 明确  $\gamma$ -PGA 施用量及灌溉定额对棉花产量和品质的影响。研究结果旨在为  $\gamma$ -PGA 的科学使用提供理论依据和技术支撑, 为新疆盐碱土的化学改良及其合理开发提供新的方法和参考, 最终达到高产、高效、节水的目标。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2024 年 4—10 月在新疆玛纳斯县农业基地大草滩村 (44°16'1"N, 86°24'43"E) 进行。该区属典型温带大陆性干旱气候, 海拔 412 m。年均日照时间为 2 865 h, 年平均降水量为 207 mm, 年平均气温为 23.6 °C (图 1)。年均蒸发量为 1 660 mm, 其中大于 10 °C 积温为 3 463.5 °C, 无霜期为 170 d。试验地土壤类型为灰漠土, 0~100 cm 土壤平均盐分含量为 6.98 g·kg<sup>-1</sup>, pH 为 8.0~9.0。试验地基本土壤性质如表 1。

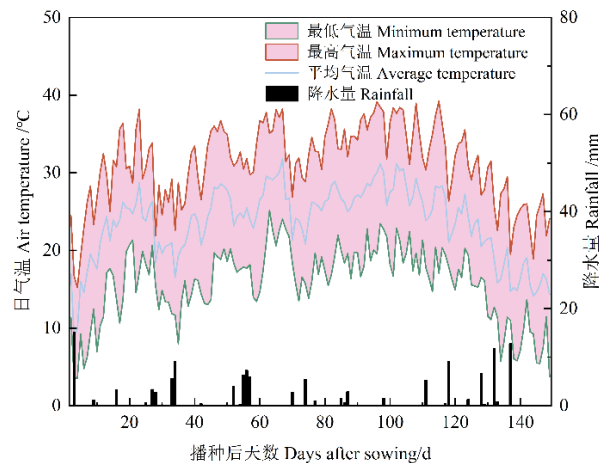


图 1 2024 年棉花生育期内逐日气温及降水量

Fig.1 Daily air temperature and rainfall patterns during the 2024 cotton growing season in Manas County, Xinjiang

**Table 1** Soil physicochemical properties of the experimental site before cotton sowing

| 土层            | 有机质                                  | 全氮                            | 土壤 pH   | 全盐                                |
|---------------|--------------------------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------------|
| Soil depth/cm | Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> ) | Total N/(g·kg <sup>-1</sup> ) | Soil pH | Total salts/(g·kg <sup>-1</sup> ) |
| 0~20          | 18.89                                | 18.89                         | 7.35    | 6.53                              |
| 20~40         | 16.13                                | 16.13                         | 7.39    | 7.16                              |
| 40~60         | 4.98                                 | 6.39                          | 7.65    | 6.67                              |
| 60~80         | 4.55                                 | 6.88                          | 7.93    | 7.74                              |
| 80~100        | 6.88                                 | 7.44                          | 7.94    | 6.82                              |

## 1.2 试验方法

本试验采用双因素完全随机试验设计, 设  $\gamma$ -PGA 施加量 (F1:  $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、F2:  $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、F3:  $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和灌溉定额 (W1:  $4\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、W2:  $4\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 2 因素, 共 6 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 18 个小区。每个小区面积为  $45 \text{ m}^2$  ( $3 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ ), 边界设置  $0.6 \text{ m}$  隔离带, 避免边际干扰。

棉花于 2024 年 4 月 24 日播种, 9 月 20 日收获, 全生育期为 150 d。采用“一膜三管六行”种植模式, 膜宽 205 cm, 株距 10 cm, 宽行距 66 cm, 窄行距 10 cm, 播种密度为每公顷 24 万株。滴灌带使用新疆天业公司生产的低密度聚乙烯管, 管径 16 mm, 滴头间距 0.3 m, 滴头设计流量  $1.3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据当地棉花种植经验, 全生育期灌溉施肥 10 次, 试验肥料施用尿素  $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N 质量分数为 46.4%) 和磷酸二氢钾  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $\text{P}_2\text{O}_5$  质量分数为 51.5%,  $\text{K}_2\text{O}$  质量分数为 34.0%), 其他田间管理措施均保持一致。种植模式如图 2。各小区均配备独立水表和施肥罐, 精准控制灌溉施肥, 表 2 为灌水施肥方案。

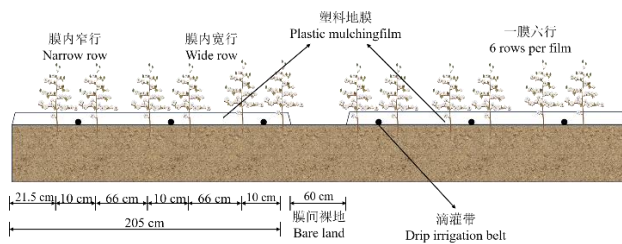


图 2 种植模式图

Fig.2 Schematic diagram of the cotton cropping system used in the experiment

表 2 灌水施肥方案

**Table 2** Irrigation and fertilization regime applied during the cotton growing season

| 生育期 Growth period            | 灌水次数 <sup>①</sup> | 施肥次数 <sup>②</sup> | 灌水比例 <sup>③</sup> /% | 施肥比例 <sup>④</sup> /% |
|------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 苗期 Seedling stage            | 1                 | 1                 | 5                    | 5                    |
| 蕾期 Budding stage             | 2                 | 2                 | 15                   | 15                   |
| 花铃期 Flowering and boll stage | 5                 | 5                 | 65                   | 65                   |
| 吐絮期 Boll-opening stage       | 2                 | 2                 | 15                   | 15                   |
| 全生育期 Whole growth period     | 100               | 100               | 100                  | 100                  |

① Irrigation frequency, ② Fertilization frequency, ③ Irrigation ratio, ④ Fertilization ratio.

### 1.3 测定项目及方法

**1.3.1 土壤理化性质测定** 采用不锈钢土钻（直径 5 cm）于棉花各生育期末在随机选取的 3 株植株根区进行分层取样。沿土壤剖面垂直方向按 0~10 cm、10~20 cm 直至 90~100 cm 深度梯度分层采集，每层独立装袋标记。样品经剔除可见植物残体、根系及砾石后，置于阴凉通风处避光自然风干，研磨，过 1 mm 孔径尼龙筛网。

土壤 pH 测定: 称取 10 g 风干土样, 采用水土质量比 2.5:1 混合后振荡 30 min, 静置 24

h 后使用 pH 仪 (Mettler Toledo FE28-Standard, 瑞士) 测定。

土壤盐分分析: 称取 10 g 风干土样, 采用水土质量比 5:1 浸提, 振荡 30 min 后取 20 mL 滤液, 转移至已恒重的蒸发皿中, 105 °C 烘干至恒重, 冷却后称重, 并利用 Origin 2021 拟合出式 (1) 计算全盐量<sup>[15]</sup>。

$$SC = 6.59EC + 0.83 \quad (R^2 = 0.96) \quad (1)$$

式中, SC 为全盐量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; EC 为电导率,  $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

**1.3.2 土壤酶活性测定** 棉花吐絮末期, 每处理随机选取 3 株棉花采集根区土壤。铲除表层凋落物及浮土后, 垂直根系方向采集 0~40 cm 深土壤。土样避光通风处自然风干, 粗磨剔除杂质<sup>[16]</sup>, 过 0.4 mm 筛得均质化土样。按照试剂盒 (格锐思生物, 苏州格锐思生物科技有限公司) 说明书测定土壤酶活性: 多酚氧化酶、过氧化氢酶均采用可见光光度法测定; 脲酶采用靛酚蓝比色法测定; 蔗糖酶采用二硝基水杨酸比色法测定。

**1.3.3 根系指标测定** 在棉花吐絮期末每个处理随机选择具有代表性的 3 株, 将其清洗干净, 放入根盘中, 用植物根系扫描仪 (EPSON Expression 12000XL, 印度尼西亚; 分辨率为 600 dpi) 扫描成图像, 后用根系分析软件 (WinRHIZO 2021) 自动分析, 得到总根长和根平均直径<sup>[17]</sup>。

**1.3.4 地上部干物质积累量测定** 在棉花吐絮期末随机选择具有代表性的植株 3 株, 将其根、茎、叶、铃分别剪下、洗净, 放置于烘箱, 在 105 °C 下杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒重, 测干物质质量<sup>[18]</sup>。

**1.3.5 根冠比与根部结铃能力测定** 通过获得的不同器官的干物质质量, 利用式 (2) 计算根冠比 (R/S), 式 (3) 计算根部结铃能力 (BCR)<sup>[19]</sup>。

$$\text{根冠比(R/S)} = \frac{\text{根系干物质质量}}{\text{地上部干物质质量}} \quad (2)$$

$$\text{根部结铃能力(BCR)} = \frac{\text{铃干物质质量}}{\text{根系干物质质量}} \quad (3)$$

**1.3.6 棉花产量及品质测定** 产量构成: 棉花收获期, 在每个小区选取 2 m×2 m 的标准样方, 3 次重复, 调查收获株数和总成铃数, 计算单株铃数; 将采集的棉花称重得籽棉产量, 轧花后求得皮棉产量, 计算出衣分率。并用式 (4) 求得收获指数 (HI)。

$$HI = \frac{Y}{M} \quad (4)$$

式中, Y 为籽棉产量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; M 为地上部干物质积累量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

品质测定: 棉花收获后, 在各小区采集成熟棉铃样品 200 g (鲜物质质量), 每个处理设置 3 次重复, 经人工剔除苞叶及杂质后, 使用锯齿轧花机完成去籽。委托中国农业科学院棉花研究所检测品质, 主要检测上半部平均长度、整齐度指数、断裂比强度、马克隆值以及伸长比。然后利用式 (5) 计算棉纤维品质指数 (FQI)。

$$FQI = FS \times L \times U \div MV \quad (5)$$

式中, FS 表示断裂比强度,  $\text{cN} \cdot \text{tex}^{-1}$ ; L 表示上半部平均长度, mm; U 表示整齐度, %; MV 表示马克隆值。

## 1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2019 进行数据整理与分析, 采用 Origin 2021 进行数据整理、图形绘制和相关性分析, 使用 SmartPLS 4 构建结构方程模型, 用 SPSS 26 统计软件进行主成分分析, 采用隶属函数<sup>[20]</sup>对处理进行综合评价。

若测定指标与棉花产量呈正相关关系, 选择式 (6); 若呈负相关关系, 则选择式 (7)。

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) \div (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

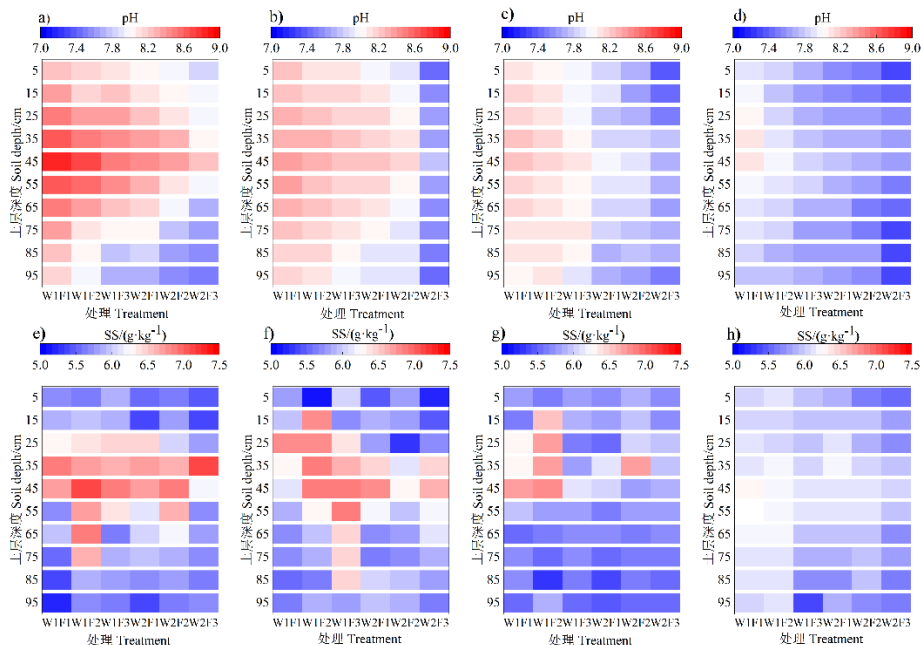
$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) \div (X_{\max} - X_{\min}) \quad (7)$$

式中,  $U(X_i)$  表示某指标的隶属函数值;  $X_i$  表示该指标的测定值;  $X_{\max}$  表示该指标的最大值;  $X_{\min}$  表示该指标的最小值。

## 2 结果

### 2.1 $\gamma$ -PGA 和灌溉定额协同调控下的土壤 pH 和盐分

土壤 pH 分布如图 3a~图 3d 所示。根区土壤 pH 随生育进程呈时序性酸化趋势, 且随着土层加深呈先增后减的特征。25~65 cm 土层的 pH 最高, 0~50 cm 土层 pH 随深度增加而上升, 50~100 cm 则随深度增加而降低。如图 3e~图 3h 所示, 土壤盐分随生育进程呈递减规律, 沿土层深度呈抛物线状分布, 盐分主要积累于 25~55 cm 土层。其中, 0~50 cm 盐分含量随着土层深度增加而增多, 50~100 cm 盐分含量随着土层深度增加而降低。



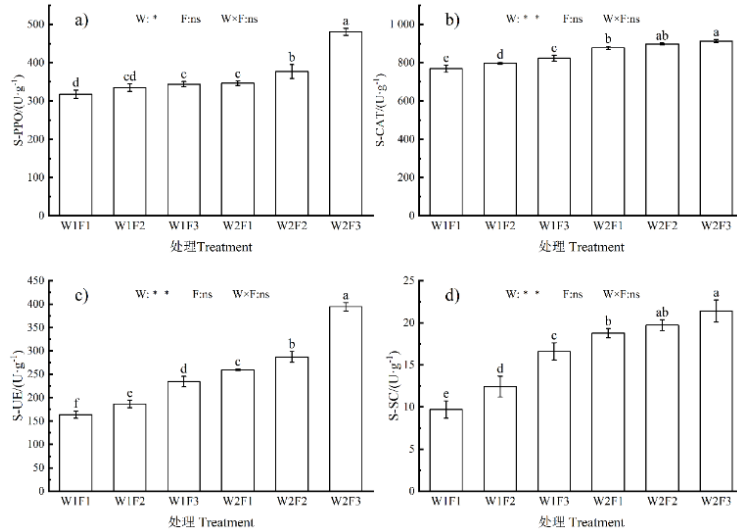
注: pH, 土壤 pH, SS, 土壤盐分含量, W1F1, 灌溉定额  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\gamma$ -PGA 施加量  $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , W1F2, 灌溉定额  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\gamma$ -PGA 施加量  $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , W1F3, 灌溉定额  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\gamma$ -PGA 施加量  $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , W2F1, 灌溉定额  $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\gamma$ -PGA 施加量  $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , W2F2, 灌溉定额  $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\gamma$ -PGA 施加量  $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , W2F3, 灌溉定额  $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\gamma$ -PGA 施加量  $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。下同。Note: pH, Soil pH, SS, Soil salinity, W1F1: Irrigation quota of  $4000 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$  and  $\gamma$ -PGA application rate of  $7.5 \text{ kg hm}^{-2}$ , W1F2: Irrigation quota of  $4000 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$  and  $\gamma$ -PGA application rate of  $15 \text{ kg hm}^{-2}$ , W1F3: Irrigation quota of  $4000 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$  and  $\gamma$ -PGA application rate of  $22.5 \text{ kg hm}^{-2}$ , W2F1: Irrigation quota of  $4500 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$  and  $\gamma$ -PGA application rate of  $7.5 \text{ kg hm}^{-2}$ , W2F2: Irrigation quota of  $4500 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$  and  $\gamma$ -PGA application rate of  $15 \text{ kg hm}^{-2}$ , W2F3: Irrigation quota of  $4500 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$  and  $\gamma$ -PGA application rate of  $22.5 \text{ kg hm}^{-2}$ . The same below.

图 3 不同处理下不同生育期 0~100 cm 土层的 pH (a. 苗期, b. 蕾期, c. 花铃期, d. 吐絮期) 及盐分含量 (e. 苗期, f. 蕾期, g. 花铃期, h. 吐絮期)

Fig.3 Soil pH (a-d) and salinity (e-h) in the 0–100 cm soil layer under different treatments, corresponding to the seedling, budding, flowering and boll, and boll-opening stages, respectively

### 2.2 $\gamma$ -PGA 和灌溉定额协同调控下的土壤酶活性

如图 4 所示, 在相同灌溉定额条件下, 4 种酶活性随着  $\gamma$ -PGA 用量增加而增加。在 W1 处理中,  $\gamma$ -PGA 用量增加显著提升过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性 ( $P<0.05$ ), 增幅分别为 3.70%~6.65%、12.23%~30.13%、21.99%~41.55%; W2 处理中, 多酚氧化酶和脲酶活性显著提高 ( $P<0.05$ ), 分别增加了 8.07%~27.95%、9.67%~34.22%。在相同  $\gamma$ -PGA 用量条件下, W2 处理的 4 种酶活性均活性均显著高于 W1 ( $P<0.05$ ), 增幅范围分别为: 多酚氧化酶 9.16%~39.78%、过氧化氢酶 9.85%~12.44%、脲酶 35.09%~40.62%、蔗糖酶 22.49%~48.33%。



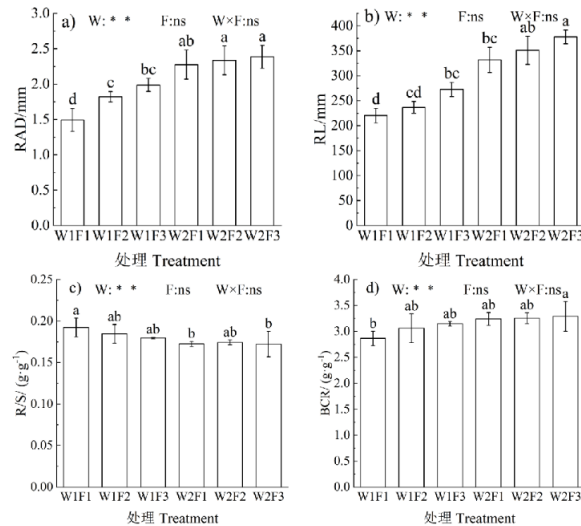
注: S-PPO, 多酚氧化酶, S-CAT, 过氧化氢酶, S-UE, 脲酶, S-SC 蔗糖酶; W, 灌溉定额处理, F,  $\gamma$ -PGA 用量处理。图中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ); \*:  $P<0.05$ , \*\*:  $P<0.01$ , ns:  $P>0.05$ 。下同。Note: S-PPO, Soil-Polyphenol oxidase, S-CAT, Soil-Catalase, S-UE, Soil-Urease, S-SC, Soil-Surase; W, irrigation quota treatment, F,  $\gamma$ -PGA application rate treatment. Bars followed by different lowercase letters are significantly different at  $P < 0.05$  according to Duncan's multiple range test. \*:  $P<0.05$ , \*\*:  $P<0.01$ , ns:  $P>0.05$ . The same below.

图 4 不同处理对土酶活性的影响

Fig.4 Effects of different treatments on soil enzyme activities

### 2.3 $\gamma$ -PGA 和灌溉定额协同调控下的棉花根系发育

不同处理对棉花根系平均直径 (Root average diameter, RAD) 的影响如图 5a 所示。在相同  $\gamma$ -PGA 水平下, W2 处理均显著高于 W1 ( $P<0.05$ ), 增幅达 16.69%~34.35%。在 W1 处理中, RAD 随  $\gamma$ -PGA 用量的增加而增加, F3、F2 较 F1 有显著影响, 分别增加了 24.82%、17.93%。不同处理对棉花根长的影响如图 5b 所示。在 W1 处理中, 根长随  $\gamma$ -PGA 用量的增加而增长, F3 较 F1 显著增加了 6.88% ( $P<0.05$ ); 相同  $\gamma$ -PGA 用量下, W2 各处理中的 RL 较 W1 显著增加了 27.86%~33.56% ( $P<0.05$ )。如图 5c 所示, 根冠比随着灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 用量增加呈下降趋势。如图 5d 所示, 在相同灌溉定额 W1 处理条件下, 随  $\gamma$ -PGA 用量的增加, 根部结铃能力有增加趋势。

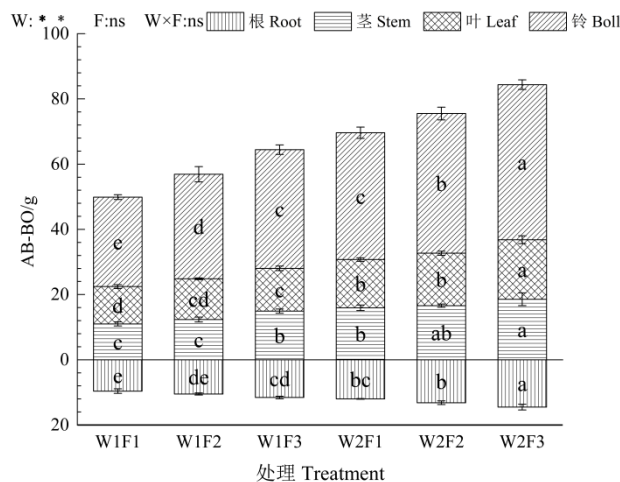


注: RAD, 根平均直径, RL, 根长, R/S, 根冠比, BCR, 根部结铃能力。下同。Note: RAD, Root average diameter, RL, Root length, R/S, Root to shoot ratio, BCR, Boll setting capacity on roots. The same below.

图 5 不同处理对棉花根平均直径 (a)、根长 (b)、根冠比 (c) 及根部结铃能力 (d) 的影响  
Fig.5 Effects of different treatments on cotton root average diameter (a), root length (b), root-shoot ratio (c), and root boll-setting capacity (d)

## 2.4 $\gamma$ -PGA 和灌溉定额协同调控下的吐絮期干物质积累量

吐絮期各器官干物质积累如图 6 所示。相同灌溉定额下, 根、茎、叶和铃的单株干物质均随  $\gamma$ -PGA 施用量的增加而呈上升趋势, 其中, 铃的干物质积累受  $\gamma$ -PGA 促进作用显著 ( $P < 0.05$ )。F3 和 F2 处理的铃干物质较 F1 分别提高了 18.19%~24.63%和 9.15%~14.45%。相同  $\gamma$ -PGA 用量下, W2 处理各器官干物质均显著高于 W1 ( $P < 0.05$ ), 根、茎、叶、铃的增幅分别为 20.00%~20.35%、19.57%~31.03%、22.36%~28.22%和 23.45%~29.48%。



注: AB-B0, 吐絮期干物质积累, 图中不同小写字母表示相同部位不同处理间差异显著, 下同。Note: AB-B0, Aerial biomass at the boll opening stage, different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same site. The same below.

图 6 不同处理下棉花吐絮期干物质积累量

Fig.6 Aerial biomass of cotton at the boll-opening stage under different treatments

## 2.5 $\gamma$ -PGA 和灌溉定额协同调控下的产量构成及品质

产量构成指标如表 3 所示, 灌溉定额相同时, F3 处理的籽棉产量、单株铃数和衣分率均显著高于 F2、F1 ( $P < 0.05$ )。与 F1 相比, F3 籽棉产量增加了 7.37%~12.15%, 单株铃数增加了 3.02%~4.00%, 衣分率增加了 26.13%~27.96%; 与 F2 相比, F3 的籽棉产量提高

15.07%~20.61%，单株铃数提高 14.76%~21.20%，衣分率提高 6.00%~6.07%；相同  $\gamma$ -PGA 用量下，W2 的籽棉产量、单株铃数和衣分率均较 W1 显著增加了 18.81%~24.95%、25.48%~30.34%、11.10%~12.06% ( $P<0.05$ )。

表 3 不同处理对棉花产量的影响

Table 3 Effects of different treatments on cotton yield

| 处理 Treatment | SCY/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | BPP/(plant <sup>-1</sup> ) | LP           |
|--------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| W1F1         | 5 139±83e                  | 5.83±0.44d                 | 0.413±0.01d  |
| W1F2         | 5 730±23d                  | 6.71±0.51d                 | 0.427±0.01cd |
| W1F3         | 6 522±5c                   | 7.90±0.18c                 | 0.440±0.01c  |
| W2F1         | 6 847±82c                  | 8.17±0.60cb                | 0.470±0.01b  |
| W2F2         | 7 740±425b                 | 9.00±0.33b                 | 0.480±0.01b  |
| W2F3         | 8 033±116a                 | 11.34±0.58a                | 0.500±0.01a  |

注：SCY，籽棉产量；BPP，单株铃数；LP，衣分率。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。Note: SCY, Seed cotton yield; BPP, Bolls per plant; LP, Lint percentage. Different letters within a column indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

棉花品质指标如表 4 所示。不同处理对棉花的整齐度指数、马克隆值以及伸长比均无显著影响 ( $P>0.05$ )，仅 W2F1 处理的上半部平均长度和断裂比强度较 W1F1 分别显著提高了 5.90%和 7.73% ( $P<0.05$ )。

表 4 不同处理对棉花纤维品质的影响

Table 4 Effects of different treatments on cotton fiber quality

| 处理 Treatment | MUL/mm       | UI/%        | BT/(cN·tex <sup>-1</sup> ) | MV         | ER/%       |
|--------------|--------------|-------------|----------------------------|------------|------------|
| W1F1         | 26.63±0.97b  | 82.33±1.01a | 27.80±1.56b                | 4.80±0.26a | 6.67±0.58a |
| W1F2         | 27.40±0.46ab | 82.27±0.64a | 28.43±0.84ab               | 5.10±0.17a | 6.70±0.00a |
| W1F3         | 27.13±0.21ab | 83.10±0.26a | 28.90±0.60ab               | 5.10±0.10a | 6.70±0.00a |
| W2F1         | 28.30±0.62a  | 84.10±0.90a | 30.13±0.40a                | 4.83±0.31a | 6.70±0.00a |
| W2F2         | 27.93±0.29ab | 83.40±0.85a | 29.60±0.44ab               | 4.80±0.00a | 6.70±0.00a |
| W2F3         | 27.67±1.29ab | 82.80±1.73a | 29.13±0.98ab               | 5.00±0.58a | 6.67±0.58a |

注：MUL，上半部平均长度；UI，整齐度指数；BT，断裂比强度；MV，马克隆值；ER，伸长比。下同。Note: MUL, Mean upper length; UI, Uniformity index; BT, Breaking tenacity; MV, Micronaire value; ER, Elongation ratio. The same below.

图 7 为不同处理对棉纤维品质指数的影响，可利用此指标对棉花品质进行综合评价。由图 7 可以看出，不同灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 用量对棉纤维品质指数无显著影响 ( $P>0.05$ )。

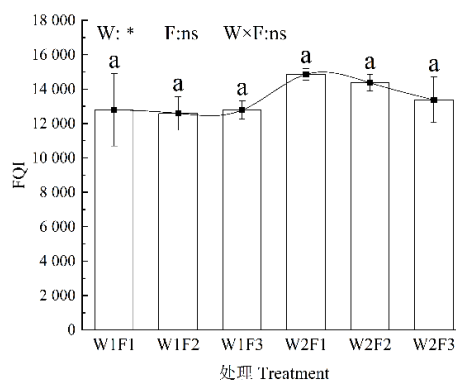


图 7 不同处理对棉纤维品质指数 (FQI) 的影响

Fig.7 Effects of different treatments on fiber quality index (FQI)

## 2.6 影响棉花产量的因素

为综合评价棉花产量及其相关性状，本文采用主成分分析法（PCoA）对包括土壤 pH、土壤盐分含量、多酚氧化酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性、总根长、根平均直径、吐絮期地上部总干物质积累量、根冠比、根部结铃能力、籽棉产量以及棉纤维品质指数 13 个指标进行降维统计分析。取样适切性量数（KMO）和 Bartlett 球状检验结果显示：KMO=0.76>0.6，且 Bartlett 检验显著（ $P<0.01$ ），故该数据适用于主成分分析。

分析共提取出两个特征值大于 1 的主成分，累计贡献率为 91.644%，能充分代表原始变量信息。第一主成分（贡献率 83.11%）主要代表土壤盐分、过氧化氢酶活性、脲酶活性、总根长、吐絮期干物质积累量、根冠比、根部结铃能力及籽棉产量的综合信息；第二主成分（贡献率 8.53%）主要反映土壤 pH、多酚氧化酶活性、蔗糖酶活性、根平均直径及棉纤维品质的特征信息。基于主成分得分，结合式（6）与式（7）对各处理进行综合评分与排序，结果显示：W2F3 处理综合得分最高（0.903），表现最优；而 W1F2 处理得分最低（0.171），综合表现最差（表 5），表明灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 施用量的协同调控对产量及相关性状具有显著影响。

表 5 棉花评价综合得分

Table 5 Comprehensive evaluation score for cotton performance

| 处理 Treatment | 综合得分 Comprehensive | 排名 Ranking |
|--------------|--------------------|------------|
| W1F1         | 0.590              | 3          |
| W1F2         | 0.171              | 6          |
| W1F3         | 0.354              | 5          |
| W2F1         | 0.532              | 4          |
| W2F2         | 0.660              | 2          |
| W2F3         | 0.903              | 1          |

相关性分析（图 8）表明，籽棉产量与蔗糖酶活性、多酚氧化酶活性、过氧化氢酶活性、脲酶活性、总根长、根系平均直径、吐絮期地上部干物质积累量以及根部结铃能力均呈显著正相关（ $P<0.05$ ），与土壤 pH、土壤盐分含量以及根冠比呈显著负相关（ $P<0.05$ ）；棉纤维品质指数与土壤 pH 呈显著负相关（ $P<0.05$ ）。

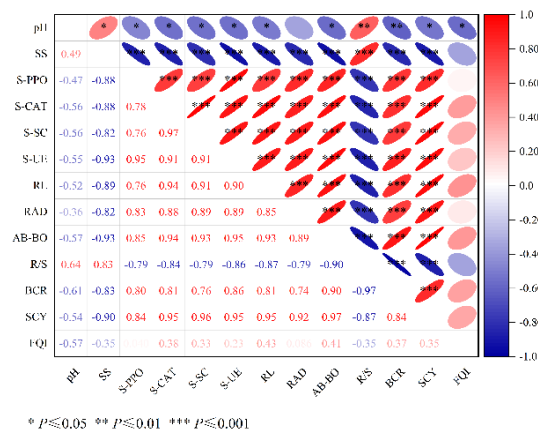
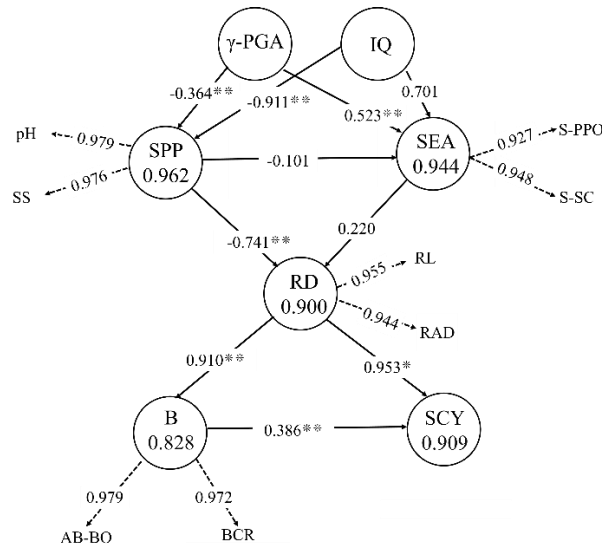


图 8 各评价指标间相关性分析

Fig.8 Correlation analysis among the evaluated indicators

为进一步明确不同处理对棉花产量影响的作用路径，采用偏最小二乘法结构方程模型（PLS-SEM）进行表征（图 9）。在结构模型的判定指标方面，潜在因子间的共线性诊断采用方差膨胀因子 VIF 值进行判别，临界值为 5<sup>[21]</sup>，故 VIF 大于 5 的因子先剔除。模型显示，灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 与土壤理化性质存在负向响应（路径系数为-0.911、-0.364），并正向影响酶活性（路径系数为 0.701、0.523），从而促进根系生长（路径系数为-0.741、0.220）；

进一步增加棉花生生物量的积累(路径系数为 0.910),并且提高棉花的产量(路径系数为 0.953)。此外,改善土壤理化性质会进一步增强土壤酶活性(路径系数为-0.101)。



注: IQ, 灌溉定额; SPP, 土壤理化性质; SEA, 土壤酶活性; RD, 根系生长; B, 生物量,  $\rightarrow$  上的数字表示标准化后的路径系数;  $\dashrightarrow$  上的数字表示因子荷载; \* 表示路径系数差异达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ); \* 表示路径系数差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。Note: IQ, Irrigation quota, SPP, Soil physicochemical properties, SEA, Soil enzyme activities, RD, Root development, B, Biomass,  $\rightarrow$  the numbers on the paths indicate standardized path coefficients:  $\dashrightarrow$  the numbers adjacent to the variables (or measurement items) indicate factor loadings; \*\* indicates a statistically significant path coefficient; \* indicates a highly statistically significant path coefficient.

图9 偏最小二乘法结构方程模型构建

Fig.9 Constructing a partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)

### 3 讨论

土壤理化性质与酶活性的协同作用是调控盐碱化棉田微环境的关键机制,灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 协同调控对改善土壤环境具有显著效果<sup>[22]</sup>。本研究表明,增加灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 施用量可有效降低土壤 pH 和盐分峰值(图 3)。灌溉定额的提升促进水分入渗,淋洗钠离子至作物根层以下,减轻钠离子对土壤胶体颗粒的分散程度,从而缓解土壤 pH 的升高和盐分积累<sup>[23]</sup>,故对土壤 pH 和盐分的路径系数为负数(图 9)。同时,  $\gamma$ -PGA 对酸、碱有较好的缓冲能力,可有效平衡土壤中的酸碱度<sup>[24]</sup>。此外,灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 的协同作用可有效提升土壤酶活性(图 4)。这可能是因为灌溉定额的增加可加速酶促反应物的流动,同时刺激微生物活性,这与 Trseder<sup>[25]</sup>的结论相似。土壤 pH 和盐分随着土层深度先升后降(图 3),可能是因为表层土壤中,水分的蒸发会导致盐分浓缩,使得表层的盐分和 pH 升高。而随着深度增加,下层土壤可能因为水分的向下渗透和迁移而带走盐分,从而使得这部分土壤的盐分和 pH 降低(图 3)。当土壤理化性质得到改善后,会进一步提高土壤中酶活性(图 9),实现盐分淋溶和养分固持的协同优化,可进一步改善土壤环境。 $\gamma$ -PGA 与灌溉定额协同改善土壤盐分、pH 与酶活性,这不仅缓解了表层盐害威胁,更为棉花根系的适应性生长提供了关键环境基础,该协同模式对于干旱区农业可持续发展具有潜在应用意义。

作物根系是吸收利用土壤中水分和养分的重要器官,会直接影响作物的生长发育。本研究发现,土壤环境直接影响棉花根系生长,灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 的协同施加对棉花根系生长具有显著正向影响(图 9)。这是因为增加灌溉定额会提高叶片蒸发量,增强光合作用<sup>[26]</sup>,从而提升根系吸收养分的能力。此外,  $\gamma$ -PGA 可改善土壤理化性质,增加土壤透气性,促进作物根系发育<sup>[27]</sup>。棉花植株的根系和地上部分是统一的整体,根系的发达程度会直接影响到棉花的生长和产量<sup>[28]</sup>,而根冠比反映了根和地上部分生长的协调性,根部结铃能力可揭示根

和棉铃之间的关系<sup>[29]</sup>。研究表明,根冠比与棉花的干物质积累量及产量品质密切相关<sup>[30]</sup>。现已有研究表明,增加灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 用量,干物质积累量呈线性增加,根冠比下降,根系结铃能力增强<sup>[31]</sup>,与本试验研究结果(图 5)一致。可能是施加  $\gamma$ -PGA 能提升光合速率,从而促进根系生长,提高作物对养分的吸收<sup>[32]</sup>,有利于其干物质积累。根系生长与根冠比的动态调整(图 5),表明灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 可通过协同作用优化地下部结构,增强棉花抗逆性与物质分配能力,该机制为解释产量提升提供依据。

基于上述地下部结构的优化及其对棉花生长发育的显著促进作用,试验表明,增加灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 用量能协同提高棉花产量,尤其显著增加了单株铃数(表 3);然而,二者对棉花纤维品质的改善存在局限性(表 4)。这反映了纤维发育调控的内在复杂性,可能是因为纤维质量主要是受基因型的影响<sup>[33]</sup>,与本实验研究结果(表 4)相似。然而,单一指标评估体系难以反映某一组合的优劣,因此,本研究通过主成分分析和隶属函数结合的方法进行综合评估,得出灌溉定额为  $4\,500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\gamma$ -PGA 用量为  $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (W2F3)处理为盐碱棉田最优管理方案(表 5)。此外,通过相关性分析可知,相关指标之间存在较复杂的联动与响应,故利用结构方程模型路径解析多级传导路径(图 9),灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 增加的交互作用可通过降低土壤盐分和 pH 缓解盐碱胁迫,能提高土壤酶活性,改善棉花土壤生长环境,从而促进棉花的根系生长,进一步提高棉花生物量的积累,达到提高棉花产量的目的,为盐碱地作物管理提供了理论依据。

## 4 结 论

本研究以棉花为研究对象,基于不同灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 施用量的双因素试验,系统分析了土壤理化性质、酶活性、根系发育、生长指标及产量品质变化,得出以下结论:(1)灌溉定额为  $4\,500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\gamma$ -PGA 施用量为  $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  为最优组合模式,该模式可显著改善土壤环境,促进棉花根系发育,降低根冠比( $0.16\%\sim 1.20\%$ ),提高根部结铃能力( $1.15\%\sim 1.51\%$ ),有效促进干物质积累,进而提高产量;(2)高灌溉定额与  $\gamma$ -PGA 协同可显著提升盐碱土壤中多酚氧化酶、过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶的活性,改善土壤生物功能,为棉花生长提供良好环境基础;(3)结构方程模型分析表明,灌溉定额和  $\gamma$ -PGA 通过两条路径影响产量:一是通过优化土壤理化性质,进而调节酶活性,促进根系发育与干物质积累;二是通过直接提高酶活性,增强根系功能,最终提升产量水平。综上,采用  $4\,500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$  灌溉定额与  $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$   $\gamma$ -PGA 施用量的管理模式,可有效改善盐碱土壤结构,促进棉花根系与地上部协调生长,为提升北疆盐碱棉田增产提供参考。然而,本研究未测定具体的土壤离子交换过程,鉴于土壤盐分与 pH 的耦合关系主要依赖于此机制,本研究的讨论与结论在深入解析离子交换机制方面存在局限。后续研究应结合离子组成测定,进一步阐明灌溉与  $\gamma$ -PGA 作用下盐碱土壤中离子迁移、交换与平衡的具体过程及其对土壤环境和作物生长的调控机理。

## 参考文献 (References)

- [1] Montanarella L, Chude V, Yagi K, et al. Status of the world's soil resources (SWSR)-main report[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- [2] Su Y, Tian C Y, Mai W X, et al. Progress and prospect of biological salt removal from farmland under drip irrigation in arid area of Northwest China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 925-938. [苏媛, 田长彦, 买文选, 等. 滴灌条件下西北干旱区农田生物排盐研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 925-938.]
- [3] Huo W G, Peng Y, Zhang S M, et al. Long-term observation of effects on soil salinity and fertility in saline-alkali land reclamation under drip irrigation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(1): 69-80. [霍伟歌, 彭懿, 张少民, 等. 滴灌条件下盐碱地垦殖对土壤盐度和肥力影响的长期观测[J]. 土壤学报, 2025, 62(1): 69-80.]

- [4] Dilinur A, Huang J, Qi T, et al. Study on the effect of washing and desalting of soil in saline-alkali land of Xinjiang by the breaking of the barrier by the deep pine ridge[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(9): 1754-61.[迪力努尔·阿布拉, 黄建, 祁通, 等. 粉垄深松障碍对新疆盐碱地土壤洗盐脱盐效果[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(9): 1754-61.]
- [5] Shang X L, Pei Z F, Lan T, et al. Coupling effect of salt dynamics and SOC changes before and after irrigation in saline-alkali farmland under straw returning[J]. Soils, 2025, 57(3): 568-578. [尚星玲, 裴志福, 兰天, 等. 秸秆还田下盐碱农田灌水前后盐分动态和有机碳变化耦合作用[J]. 土壤, 2025, 57(3): 568-578.]
- [6] Qadir M, Quill  rou E, Nangia V, et al. Economics of salt-induced land degradation and restoration[J]. Natural Resources Forum, 2014, 38(4): 282-295.
- [7] Shi W J, Liang J P, Tao W H, et al.  $\gamma$ -PGA additive decreasing soil water infiltration and improving water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 94-100. [史文娟, 梁嘉平, 陶汪海, 等. 添加 $\gamma$ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 94-100.]
- [8] Lei P, Xu Z Q, Liang J F, et al. Poly ( $\gamma$ -glutamic acid) enhanced tolerance to salt stress by promoting proline accumulation in *Brassica napus* L[J]. Plant Growth Regulation, 2016, 78(2): 233-241.
- [9] Ma H Z, Li P P, Xiao N, et al. Poly- $\gamma$ -glutamic acid promoted maize root development by affecting auxin signaling pathway and the abundance and diversity of rhizosphere microbial community[J]. BMC Plant Biology, 2022, 22(1): 521.
- [10] Zhang S W, Hu T T, Liu J, et al. Soil nitrate residue as affected by the amount of water and nitrogen applications under drip fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 56-63.[张绍武, 胡田田, 刘杰, 等. 滴灌施肥下水肥用量对温室土壤硝态氮残留的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 56-63.]
- [11] Bai N L, Zhang H L, Li S X, et al. Effects of application rates of poly- $\gamma$ -glutamic acid on vegetable growth and soil bacterial community structure[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103405.
- [12] Zhang L, Yang X M, Gao D C, et al. Effects of poly- $\gamma$ -glutamic acid ( $\gamma$ -PGA) on plant growth and its distribution in a controlled plant-soil system[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6090.
- [13] Kadirjiang M, Xiaokaitijiang K, Abudukayimu A, et al. Effects of different water and fertilizer treatments on the growth and yield of cotton under drip irrigation in North Xinjiang[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(8): 100-104. [卡地尔江·米吉提, 晓开提江·卡斯木, 阿布都卡依木·阿布力米提, 等. 不同水肥处理对北疆膜下滴灌棉花产量及生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(8): 100-104.]
- [14] Qi C, Cao H X, He Z J, et al. Effects of surface-subsurface relay drip irrigation on soil water and salt transport and cotton yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(2): 120-133. [祁辰, 曹红霞, 何子建, 等. 地表-地下接力式滴灌淋洗对土壤水盐运移及棉花产量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 120-133.]
- [15] Ma Z L, Wang Z H, Liu J, et al. Effects of planting patterns on growth and yield of drip-irrigated cotton in northern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 9-15. [马占利, 王振华, 刘健, 等. 膜下滴灌配置模式对北疆地区棉花生长与产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 9-15.]
- [16] Jin F, Liu T H, Mou L L, et al. Isolation and identification of aerobic actinomycetes in soil in Guizhou[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(3):114-117. [金方, 刘涛华, 牟丽丽,等. 贵州地区土壤中需氧放线菌的分离鉴定[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(3):114-117.]
- [17] Liu H L. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on the growth of cotton and study on root water uptake model[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024. [刘海龙.  $\gamma$ -聚谷氨酸对棉花生长的影响及根系吸水模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.]
- [18] Meng Y, Wang Z H, Li W H, et al. Effects of degradable film mulching on soil hydrothermal variation and growth of maize under drip irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(2): 192-202. [孟玉, 王振华, 李文昊, 等. 降解膜覆盖对滴灌玉米土壤水温变化及其生长的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(2): 192-202.]
- [19] Ma Z L, Liu J, Wen Y, et al. Optimizing cotton yield through appropriate irrigation water salinity: Coordinating above- and below-ground growth and enhancing photosynthetic capacity[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 154: 127095.

- [20] Zhang Z H, Wang Y Q, Ren G Y, et al. Evaluation of fermentation quality of corn straw silage treated with different additives based on principal component analysis and membership function analysis[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(4): 2677-2688. [张志恒, 王玉琴, 任国艳, 等. 基于主成分分析和隶属函数分析评价不同添加剂处理的玉米秸秆青贮的发酵品质[J]. 动物营养学报, 2022, 34(4): 2677-2688.]
- [21] Sarstedt M, Hair J F Jr, Ringle C M. “PLS-SEM: indeed a silver bullet” – Retrospective observations and recent advances[J]. Journal of Marketing Theory and Practice, 2023, 31(3): 261-275.
- [22] Lin F M. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on soil moisture, nutrients and soybean growth under different irrigation methods[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. [林凤妹. 不同灌水方式下  $\gamma$ -聚谷氨酸对土壤水分、养分及大豆生长的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.]
- [23] Zhang H O. Application of different materials in the saline-alkali soil improvement[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(12): 39-42. [张海欧. 浅谈不同材料在盐渍化土壤改良中的应用[J]. 农学学报, 2019, 9(12): 39-42.]
- [24] Yang M L, Ji Q X, Li Z M, et al. Effects of adsorption of carbon with polyglutamic acid on soil environment and wheat yield[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(8): 155-158. [杨曼利, 吉庆勋, 李志明, 等. 炭吸附聚谷氨酸对土壤环境及小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(8): 155-158.]
- [25] Truesdel K K. Nitrogen additions and microbial biomass: A meta-analysis of ecosystem studies[J]. Ecology Letters, 2008, 11(10): 1111-1120.
- [26] Song G Y, Guo Y W, Xue J, et al. Effects of different fertilizer and water treatments on fruit quality of 7 table grapes in greenhouses[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(7): 1-12. [宋光永, 郭雅文, 薛婧, 等. 不同肥水处理对 7 个设施鲜食葡萄果实品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2025, 27(7): 1-12.]
- [27] Du H Y. Occurrence and prevention and control technology of wheat crown rot[J]. Agriculture of Henan, 2025(1): 57. [杜红叶. 小麦茎基腐病的发生与防控技术[J]. 河南农业, 2025(1): 57.]
- [28] Guo Z W, Li Y S, Chen M N, et al. Effects of long-term straw returning and organic fertilizer application on the soil chemical properties and microbial quantity of continuous cropping cotton field[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(11): 177-186. [郭振威, 李永山, 陈梦妮, 等. 长期秸秆还田和施用有机肥对连作棉田土壤化学性质及微生物数量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 177-186.]
- [29] Xue W, Li X Y, Zeng F J. Inter-annual variations of seed cotton yield in relation to soil organic carbon and harvest index in reclaimed desertified land[J]. Field Crops Research, 2021, 272: 108267.
- [30] Zhang Y X, Kuai J L, Ma Y X, et al. Study on irrigation system of tomato substrate cultivation in non-arable land solar greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2): 215-225. [张玉鑫, 蒯佳琳, 马彦霞, 等. 非耕地日光温室番茄基质栽培灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2): 215-225.]
- [31] Zheng J X. Application of subokra gene and genetic differentiation of alleles in *Gossypium hirsutum* L[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2020. [郑锦秀. 地棉亚鸡脚叶基因的应用及等位基因的遗传分化[D]. 济南: 山东师范大学, 2020.]
- [32] Diao Q, Wang B, Cao H, et al. Effect of  $\gamma$ -polyglutamic acid on the growth and yield of rice, corn and soybean[J]. South China Agriculture, 2020, 14(28): 48-52. [刁倩, 王斌, 曹辉, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对水稻、玉米、大豆生长及产量的影响[J]. 南方农业, 2020, 14(28): 48-52.]
- [33] Tian J M, Yin W, Luo L Y, et al. The effect of different fertilization combinations on sandy soil health indicators in the southern edge of Horqin sandy land[J]. Fertilizer & Health, 2024, 51(1): 12-17. [田佳美, 尹微, 罗利艳, 等. 不同施肥组合对科尔沁沙地南缘沙地土壤健康指标的影响[J]. 肥料与健康, 2024, 51(1): 12-17.]

(责任编辑: 陈荣府)