

微咸水灌溉下盐碱土壤水盐分布及枸杞产量对微生物菌肥的响应^①

翟杰¹, 杨树青^{1*}, 刘月^{1,2}, 陈珣¹

(1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2 通辽职业学院农牧系, 内蒙古通辽 028000)

摘要: 为探究微咸水灌溉下微生物菌肥对盐碱土壤水盐分布及枸杞产量的调控机制, 并构建适用河套灌区盐碱地的微咸水-菌肥协同管理模式, 本研究以宁杞9号为供试植物, 设置4个菌肥梯度(CK: 0 kg/hm²; F1: 45 kg/hm²; F2: 75 kg/hm²; F3: 105 kg/hm²)开展田间试验。结果表明: 菌肥施用显著提高了土壤含水率, 其中F3处理土壤含水率在枸杞夏盛果期达到最高, 0~40 cm土层平均含水率达29.34%, 较CK提升25.81%; 根层(0~60 cm)储水量增幅为31.93%。微生物菌肥在不同土层均表现出良好的脱盐效果, F3处理土壤表层(0~20 cm)全盐量降低54.22%, 而F2处理土壤中深层(20~100 cm)全盐量平均降低达40.18%。F1与F2处理在0~100 cm土壤剖面上均表现出良好的调盐能力, 前期脱盐幅度分别达23.15%和21.82%; 后期积盐程度也较低, 分别为33.22%和32.78%。枸杞产量呈单峰曲线, F2处理产量较CK提升46.33%。F3处理枸杞纵、横径较CK分别增长30.05%、10.20%, 从而果形指数显著提高17.93%; F2处理枸杞横径与纵径增幅相对协调(纵径9.29%, 横径1.29%), 果形指数提高8.15%。基于偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析表明, 菌肥通过调节土壤储水量间接影响枸杞产量, 存在纵径促进与横径抑制的双重路径。综合水盐调控与枸杞产量响应, 建议菌肥施用量控制在69~76 kg/hm², 在该区间内可兼顾脱盐、保水与产量提升目标。

关键词: 微咸水灌溉; 微生物菌肥; 水盐分布; 枸杞

中图分类号: S156.4; S144.1 **文献标志码:** A

Effects of Microbial Fertilizer on Water-salt Distribution and Yield of *Lycium barbarum* in Saline Soils Under Brackish Water Irrigation

ZHAI Jie¹, YANG Shuqing^{1*}, LIU Yue^{1,2}, CHEN Yu¹

(1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2 Faculty of Agriculture and Animal Husbandry, Tongliao Vocational College, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: To investigate the regulatory effects of microbial fertilizer under brackish water irrigation on soil water-salt dynamics and *Lycium barbarum* yield in moderate salt-affected soils, and to develop a brackish water-microbial fertilizer co-management strategy suitable for the Hetao Irrigation District, a field experiment was conducted using Ningqi No.9 as the test crop, four microbial fertilizer application rates were designed: CK (0 kg/hm²), F1 (45 kg/hm²), F2 (75 kg/hm²), and F3 (105 kg/hm²). The results showed that microbial fertilizer significantly improved soil moisture. During peak fruiting stage in summer, F3 reached the highest water content in the 0–40 cm layer (29.34%), which was 25.81% higher than CK. Additionally, water storage in the 0–60 cm root zone increased by 31.93%. Microbial fertilizer reduced soil salinity across all depths. Specifically, F3 decreased total salt content in the 0–20 cm surface layer by 54.22%, while F2 reduced salt in the 20–100 cm mid-deep layer by an average of 40.18%. Both F1 and F2 showed strong salt regulation across the 0–100 cm profile. They achieved early-stage salt removal of 23.15% and 21.82%, respectively, and maintained lower late-stage salt accumulation (33.22% and 32.78%). Yield followed a unimodal response, with F2 increasing yield by 46.33% compared to CK. Under F3, the fruit's longitudinal and transverse diameters increased by 30.05% and 10.20%, respectively, resulting in a significant increase of 17.93% in the shape index. In contrast, F2 promoted more balanced growth, with transverse and longitudinal diameters increasing by 1.29% and 9.29%, respectively, leading

①基金项目: 国家自然科学基金项目(52179037, 52069023)资助。

* 通信作者(nmndysq@126.com)

作者简介: 翟杰(2001—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail: zhaijie0105@163.com

to a 8.15% increase in the fruit shape index. Partial least squares path modeling (PLS-PM) indicated that microbial fertilizer indirectly influenced yield by modulating soil water storage, with opposing effects on fruit dimensions: enhancing longitudinal diameter while suppressing transverse growth. Considering both soil water-salt regulation and yield response, the application rate of 69-76 kg/hm² of microbial fertilizer is recommended to balance desalination, water retention, and yield improvement in this study area.

Key words: Brackish water irrigation; Microbiological fertilizer; Water-salt distribution; *Lycium barbarum*

内蒙古河套灌区作为典型干旱区绿洲农业系统, 面临耕地盐渍化与黄河引水量锐减的双重胁迫^[1-2]。尽管储量达 7.21 亿 m³ 的地下微咸水^[3]被广泛用于农业灌溉, 但其长期使用会造成耕层盐分积累, 引发土壤孔隙度降低、pH 升高及有机质减少等结构劣化^[4-7], 严重威胁区域农业可持续发展。

研究表明, 微咸水灌溉会导致农田渗透势增大及土壤水势显著降低, 减缓水分由土壤向根系的运移速率^[8]。微咸水矿化度差异导致土层含水量呈现空间异质性, 如灌溉水电导率为 9.24 dS/m 时, 0~40 cm 土层含水率较淡水灌溉提升 4.21%~5.43%^[9]。土质类型通过水力特性差异影响水分分布, 沙质盐渍土因快速淋洗比泥质盐渍土具有更高的渗透率^[10]。现有研究表明, 微咸水灌溉对土壤盐分的调控具有水量依赖性。大水量灌溉虽然能淋洗土壤表层盐分(脱盐深度与入渗水量呈幂函数增加), 但对深层土壤盐分淋洗作用有限^[11]; 而小水量灌溉易引发盐分向湿润区边缘移动, 导致盐分在表层富集^[12]。盐分在根区积累导致渗透势降低, 可使作物生理性缺水^[13]。合理调控作物关键生育期的微咸水灌水量可有效避免土壤积盐问题^[14]。微咸水用于作物灌溉会给土壤带入盐分, 土壤盐分又会通过水分关系、离子毒害、营养吸收等方面来影响作物的生长与生理过程, 最终导致作物减产^[15-16]。微生物菌肥通过改善土壤结构, 增加团聚体

稳定性, 提高土壤保水能力, 还可降低土壤盐分^[17-19]; 同时微生物菌肥通过功能菌代谢产物可中和土壤碱性, 增加有机质与速效养分(氮、磷、钾), 进而促进作物产量的提高^[20-22]。

枸杞作为河套灌区特色经济作物, 对该地区的经济发展具有重要作用。本研究以枸杞为指示作物, 在微咸水灌溉条件下施加不同用量微生物菌肥, 旨在明确微生物菌肥对中度盐碱土水盐垂直调控效应, 量化菌肥施用量对作物产量的响应关系及其作用途径, 构建适用于河套灌区盐碱地的微咸水-菌肥协同管理模式。研究结果将为区域节水控盐与特色经济作物稳产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2022 年开始在内蒙古河套灌区下游红卫试验基地(108°45'E~109°36'E, 40°30'N~40°40'N)进行。试验区属中温带大陆性多风干旱气候, 年平均降水量、蒸发量、气温分别为 270 mm、2 383 mm、7.9 °C, 无霜期 146 d, ≥10 °C 有效积温 3 200 °C。供试土壤为中度盐碱土, pH 为 7.7, 田间持水量为 30.26%(质量含水率), 具体质地见表 1。试验采用微咸水灌溉, 其水质特征为: 矿化度 3.84 g/L(全盐量为 3 840 mg/L)、电导率 4.53 mS/cm、pH 8.27。

表 1 研究区土壤质地
Table 1 Soil texture in study area

土层深度(cm)	黏粒(0~0.002 mm)(g/kg)	粉粒(0.002~0.05 mm)(g/kg)	砂粒(0.05~2 mm)(g/kg)	容重(g/cm ³)	土壤类型
0~10	90.7	734.1	175.3	1.36	粉壤土
10~20	110.2	711.9	177.9	1.33	粉壤土
20~30	31.9	847.9	120.2	1.37	粉土
30~40	29.8	872.4	97.8	1.46	粉土
40~60	27.6	866.3	106.1	1.44	粉土
60~80	42.2	869.8	88.0	1.42	粉土
80~100	24.0	794.7	181.3	1.39	粉壤土

1.2 试验设计

试验设 4 个微生物菌肥梯度: CK(0 kg/hm²)、F1(45 kg/hm²)、F2(75 kg/hm²)、F3(105 kg/hm²), 每处理 3 次重复。小区规格为 2 m × 10 m, 行间设保护

带, 区间用 120 cm 隔水板进行地下防渗隔离。菌肥选用山东土秀才生物科技有限公司生产的不二菌碳, 随灌水冲施。基于本团队微咸水田间灌溉试验成果, 采用畦灌模式对处理小区进行生育期灌溉: 分 3 次(5

月 15 日、7 月 9 日、7 月 27 日)施灌微咸水, 单次灌水量 80 mm。其他管理措施与当地常规栽培一致。基肥按地方标准^[23]于 5 月一次性施入(氮 375 kg/hm²、磷 300 kg/hm²、钾 225 kg/hm², 无追肥)。供试枸杞品种为 6 年生宁杞 9 号, 种植密度 1 m × 1 m。

1.3 采样与测定

1.3.1 土壤水分 在枸杞灌水前后用土钻取样(遇雨则雨后加测 1 次), 取样深度 100 cm, 0~40 cm 每 10 cm 一土层, 40~100 cm 每 20 cm 一土层。采用烘干法测定土壤质量含水率。

1.3.2 土壤盐分 取样频率同土壤水分指标, 根据 LY/T 1251—1999《森林土壤水溶性盐分分析》^[24]测定土壤离子含量(Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻), 八大离子之和为土壤全盐量。

1.3.3 枸杞产量的测定 在枸杞收获期, 每小区随机选取 5 棵长势相近且有代表性的枸杞树进行测产, 测量枸杞果实的横径、纵径, 并折算单位面积产量。

1.3.4 土壤储盐量和储水量的计算 土壤储水量 $W(\text{mm})$ 计算公式为:

$$W = 10 \times \theta_m \times h \times \rho_b$$

式中: θ_m 为该土层质量含水量, %; ρ_b 为该土层的土壤容重, g/cm³; h 为该土层厚度, cm。

土壤储盐量 $S(\text{t/hm}^2)$ 的计算公式为:

$$S = 0.1 \times S_t \times \rho_b \times h$$

式中: S_t 为该土层土壤全盐量, g/kg; ρ_b 为该土层的土壤容重, g/cm³; h 为该土层厚度, cm。

1.4 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2019 进行整理; 运用 SPSS 26.0 进行方差分析, 采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$); 使用 Origin 2018 作图; 使用 R 4.4.3 软件进行基于偏最小二乘路径模型(PLS-PM)的分析。

2 结果与分析

2.1 不同微生物菌肥施用量对土壤水分时空分布特征的影响

如图 1 所示, 不同微生物菌肥施用量处理对枸杞各生育期土壤含水率的影响存在明显差异。总体来

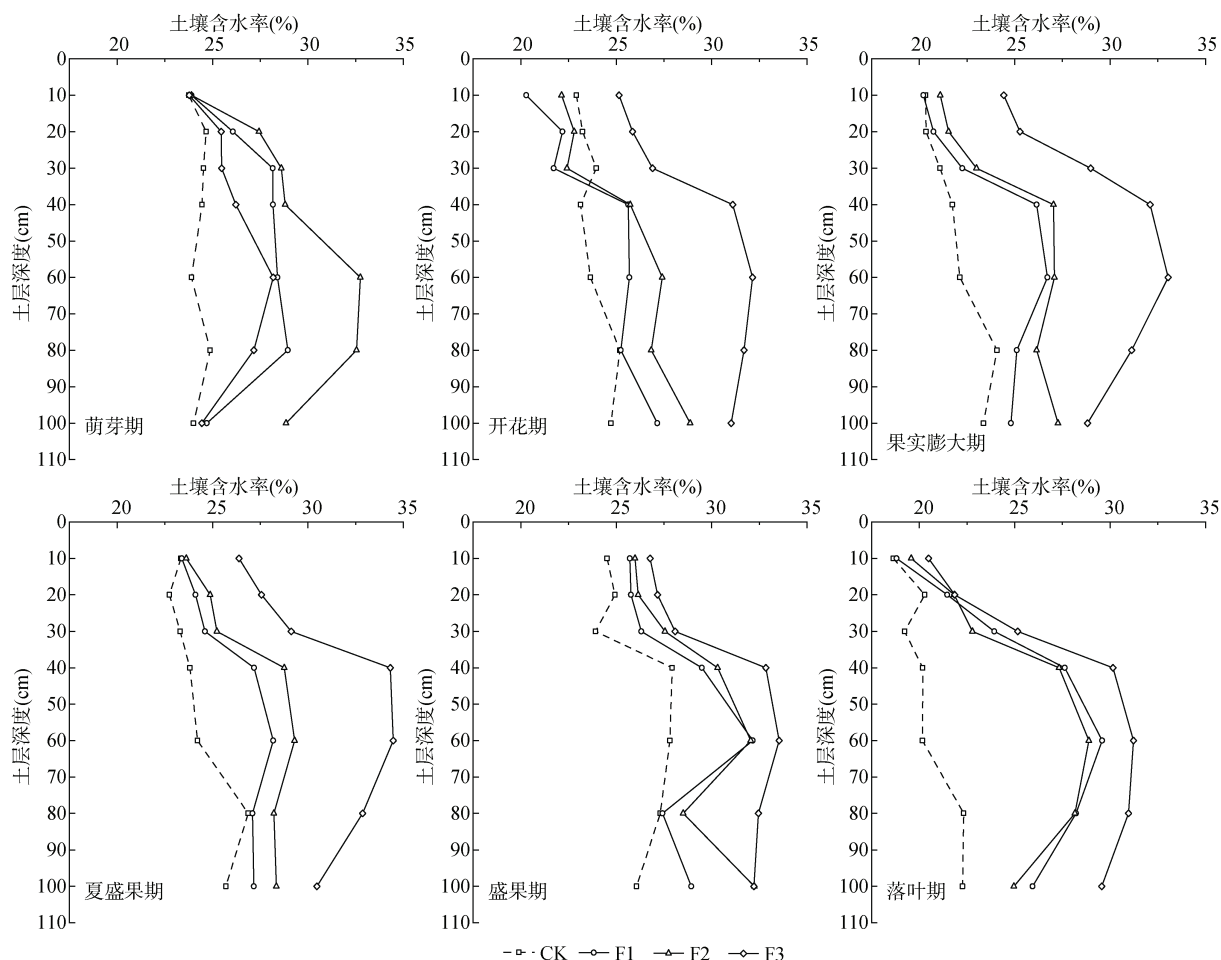
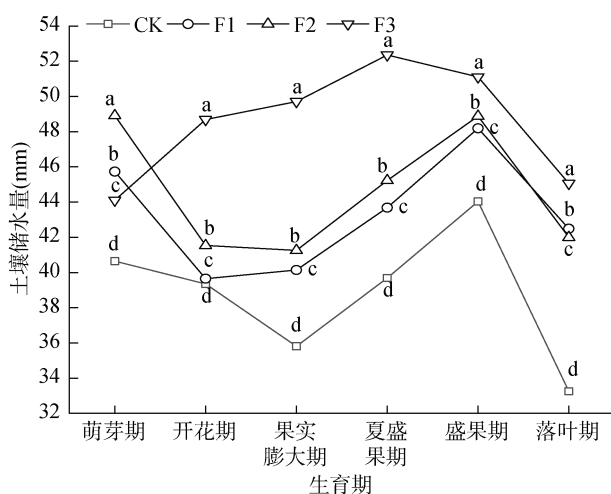


图 1 不同微生物菌肥施用量下土壤水分变化

Fig. 1 Soil moisture changes under different microbial fertilizer application rates

看,随着菌肥施用量增加,多数生育期土壤含水率呈升高趋势。夏盛果期,各施肥处理土壤含水率均高于CK,且以F3处理增幅最大。与CK相比,F3处理在主根区(0~40 cm)各土层含水率分别提高13.02%(0~10 cm)、21.20%(10~20 cm)、24.92%(20~30 cm)和44.10%(30~40 cm);中深层(40~100 cm)含水率的增幅也明显,达27.72%。在开花期,F1和F2处理在0~30 cm土层含水率明显低于CK,分别下降了8.45%和3.89%,而萌芽期、夏盛果期、盛果期和落叶期各施肥处理的土壤含水率均高于CK,但不同生育期处理间的分布规律存在差异,萌芽期表现为 $F2>F1>F3$,夏盛果期和盛果期表现为 $F3>F2>F1$,落叶期则表现为 $F3>F1>F2$ 。

微生物菌肥施用量对根层(0~60 cm)土壤储水量影响差异显著(图2)。F1、F2、F3处理的储水量均显著高于CK($P<0.05$),且随生育期推进呈现不同动态:F1和F2处理呈“缓降-回升-缓降”3阶段特征,F3处理则呈“上升-缓降”趋势。萌芽期,F1、F2、F3处理储水量分别较CK提高12.52%、20.34%和8.52%($P<0.05$);营养生长期(开花期、果实膨大期),F1、F2处理储水量为生育期最低,但较CK增加6.41%和10.37%;盛果期F3处理表现最优(储水量51.11 mm),显著高于F1(48.19 mm)和F2(48.88 mm),较CK提高16.08%($P<0.05$);落叶期,各处理组储水量逐渐下降,但F3仍维持最高水平(45.06 mm, $P<0.05$)。综合分析表明,提高微生物菌肥施用量有利于盐碱土壤的保水与改良。



(图中小写字母不同表示相同生育期下不同处理间差异显著 ($P<0.05$))

图2 不同微生物菌肥施用量下0~60 cm土壤储水量
Fig. 2 Soil water storages under different microbial fertilizer application rates

2.2 不同微生物菌肥施用量对土壤盐分时空分布特征的影响

由图3可知,各施肥处理在同一生育期的土壤全盐量均有不同程度降低,且大多数生育期,0~20 cm土层表现为 $F3<F2<F1<CK$,而20~100 cm土层为 $F2<F3<F1<CK$ 。以果实膨大期为例,F3处理在0~20 cm土层的全盐量较CK降低48.78%;而在20~100 cm土层,F2处理全盐量较CK平均降低45.26%。但在萌芽期,0~60 cm土层F3处理全盐量最低,较CK平均降低51.95%;而60~100 cm土层则F2处理较低,较CK平均降低37.77%。

各施肥处理在果实膨大期出现“盐分低谷”,夏盛果期及盛果期后期盐分有所回升,但依然明显低于CK;到落叶期时,各施肥处理的土壤盐分总体仍保持在较低水平。尤其F2、F3处理在各生育时期、各土层均表现出较好的降盐效果,表明中高施用量的微生物菌肥对土壤盐分具有更持久、更显著的改良作用。

由图4可知,不同施肥处理下土壤盐分分布具有明显的层次性和阶段性特征。表层(0~20 cm)在盐分削减阶段均表现为脱盐,而在盐分累积阶段则出现积盐现象,且处理间差异显著($P<0.05$);CK处理积盐率最高(0~10 cm达152.55%)。中层(20~40 cm)盐分呈阶段性变化,F2处理盐分削减阶段脱盐幅度较大,20~30 cm和30~40 cm土层脱盐率分别为34.70%和35.00%($P<0.05$);但盐分累积阶段,30~40 cm积盐率较高,达32.78%,F3处理在该层积盐率也较高,而F1处理盐分变化幅度最小。中下层(40~60 cm)中,CK在盐分累积阶段脱盐(23.56%);F1在两阶段均脱盐(5.58%和6.81%),呈现净流失。深层(60~100 cm)中,F3处理积盐最高,在盐分累积阶段60~80 cm和80~100 cm土层积盐分别达16.32%和17.66%;CK在该土层也表现出积盐,80~100 cm土层积盐率达到22.94%;F1和F2处理在该土层虽有积盐,但程度明显低于F3处理。

2.3 不同微生物菌肥施用量对枸杞产量(头茬)的影响

如表2所示,微生物菌肥施用量对枸杞果实纵径、果形指数和产量具有显著影响。随菌肥施用量增加,枸杞纵径呈先减后增趋势,F3处理最高,较CK显著增加30.05%($P<0.05$);枸杞果实横径变幅较小,在F3处理后达到峰值,较CK增加10.20%,但各处理间差异不显著。菌肥施用量显著影响枸杞果形指数,

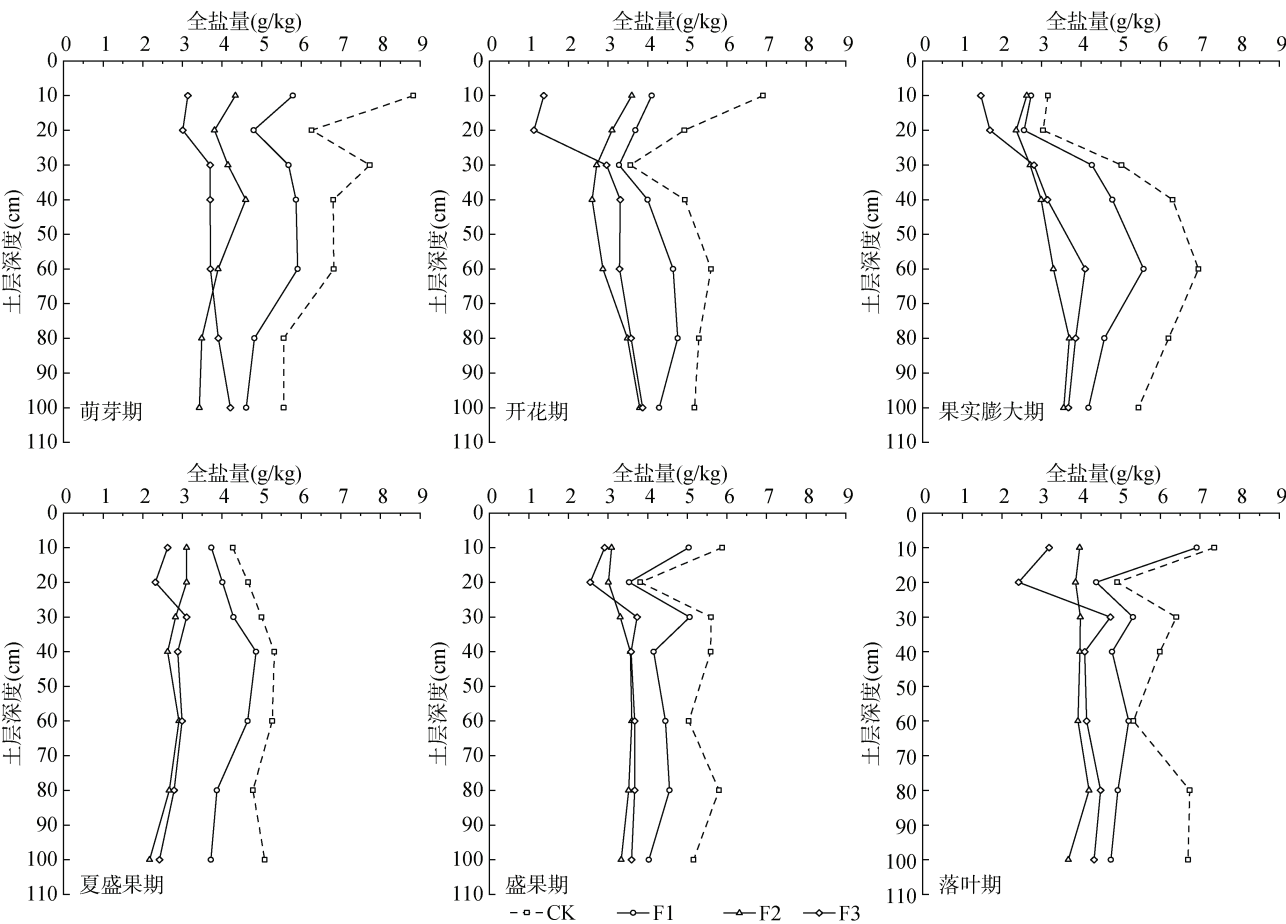
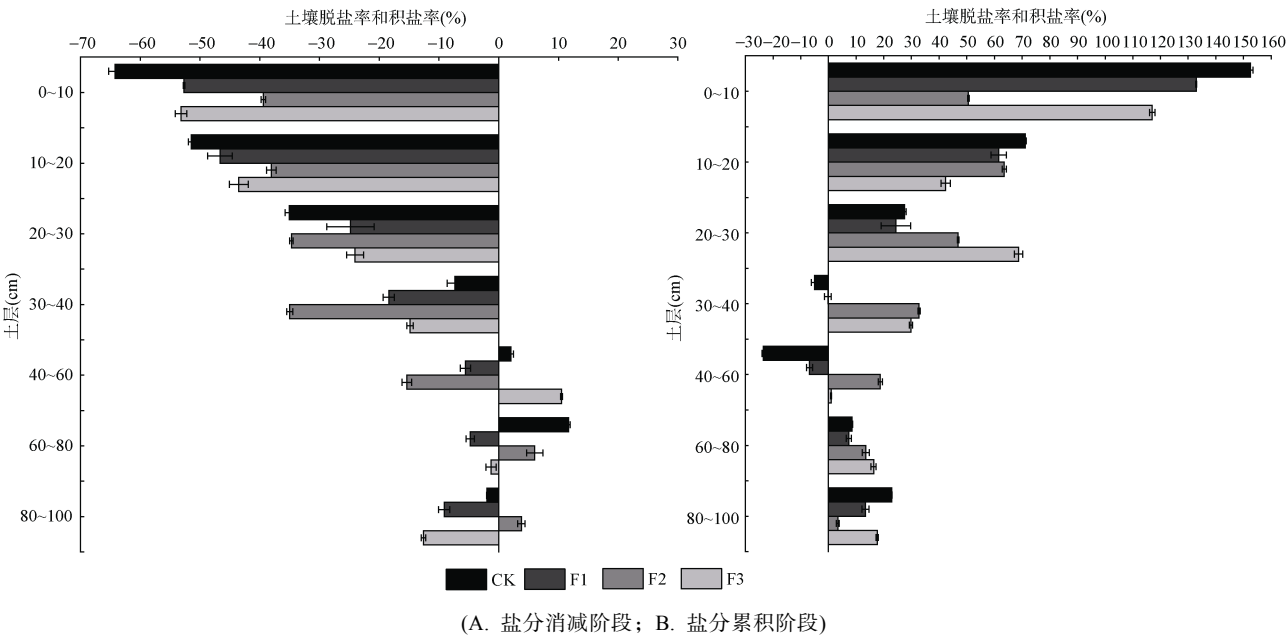


图 3 不同微生物菌肥施用量下土壤盐分变化
Fig. 3 Soil salinity changes under different microbial fertilizer application rates



(A. 盐分消减阶段; B. 盐分累积阶段)
图 4 不同微生物菌肥施用量下的土壤脱盐率和积盐率
Fig. 4 Soil desalination and salt accumulation rates under different microbial fertilizer application rates

F3 处理果形指数较 CK 显著提高 17.93%, 而 F1 处理则显著降低 5.98%。菌肥施用量的增加对枸杞产量的促进作用呈先增后减趋势, F2 处理产量最高, 较 CK 高 46.33%。

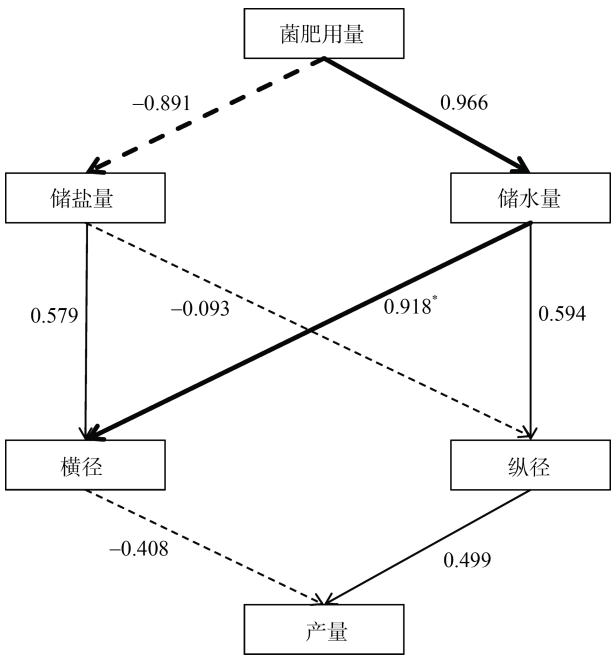
表 2 不同微生物菌肥施用量下枸杞果实外观及产量差异
Table 2 Differences in fruit appearances and yields of *Lycium barbarum* under different microbial fertilizer application rates

处理	纵径(mm)	横径(mm)	果形指数	产量(kg/hm ²)
CK	18.69±0.82b	10.16±0.54a	1.84±0.02b	3 143.16±21.53d
F1	17.93±1.21b	10.39±0.39a	1.73±0.03c	3 368.47±30.61c
F2	20.43±2.00ab	10.29±0.58a	1.99±0.05b	4 599.24±25.33a
F3	24.31±4.53a	11.20±1.53a	2.17±0.07a	3 709.65±33.83b

注：同列小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 微生物菌肥对土壤水盐-作物产量的综合调控效应

基于偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析表明(图 5), 菌肥用量通过双重竞争路径间接影响作物产量, 主路径(菌肥用量→储水量→纵径→产量)呈现正向效应(0.286); 次路径(菌肥用量→储水量→横径→产量)则产生负向抑制(-0.362)。果实发育过程中, 纵径与横径增长依赖不同细胞机制(前者主要受细胞伸长调控, 后者多由细胞分裂驱动)。由于细胞伸长对水分胁迫更为敏感^[25], 而菌肥通过提升土壤持水性缓解水分胁迫, 所以土壤储水量影响纵径发育。同时, 土壤储水量对横径增长具有显著影响($P<0.05$), 可能是水分通过维持膨压、促进细胞分裂素水平以及改善果实整体代谢状态等方式, 间接提升细胞分裂速率。



(箭头方向表明直接效应, 数值为标准化路径系数; 实线表示正效应, 虚线表示负效应; 线条粗细表明影响强度; *表示在 $P<0.05$ 水平上影响显著。模型解释度(GOF)为 0.605)

图 5 微生物菌肥施用量对枸杞产量的影响路径分析
Fig. 5 Path analysis of effect of microbial fertilizer application rate on *Lycium barbarum* yield

但横径过度发育对产量有抑制作用, 因为果实横径过度增长掠夺本应供给其他果实(尤其是新生幼果)和花芽的营养, 导致整体坐果率下降, 并且横径过度增长使果实膨压过高易导致裂果、早衰等生理问题, 两者共同作用导致总产量降低。综合路径效应后, 菌肥用量对产量仍保持正向影响(总效应为 0.176), 表明合理施用微生物菌肥可通过平衡正负路径实现增产。

从图 5 可看出, 微生物菌肥施用量需平衡多重效应, 其通过提高储水量和纵径对产量产生正向影响, 但横径增长对产量表现出负向作用。基于标准化处理的可视化分析进一步表明(图 6), 当微生物菌肥施用量为 69~76 kg/hm² 时, 产量处于最适区间, 同时可在一定程度上避免横径持续增大对产量的不利影响。

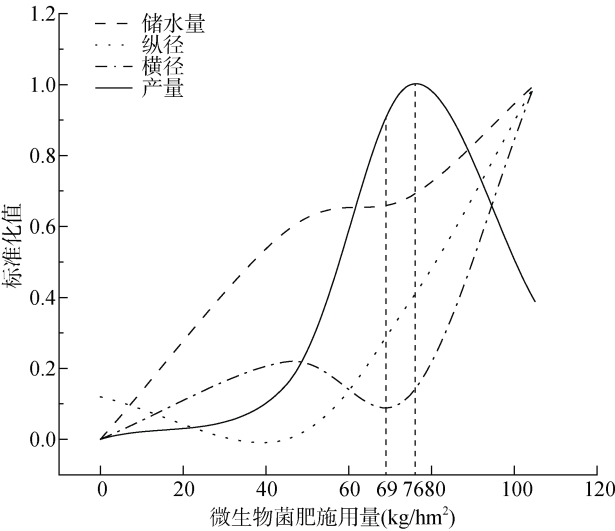


图 6 微生物菌肥施用量对枸杞产量形成指标的调控效应
Fig. 6 Regulatory effects of microbial fertilizer application rate on yield formation indicators of *Lycium barbarum*

3 讨论

3.1 微生物菌肥施用量对土壤水分的影响

本研究结果表明, 施用微生物菌肥能够提高土壤含水量, 与田露等^[26]的研究结果一致。这主要归因于: 一方面, 菌肥中活性微生物能够促进土壤团聚

的形成与稳定^[27], 改善土壤的理化性质^[28], 增强毛管孔隙的数量和连通性^[29], 从而提升土壤的持水能力; 另一方面, 菌肥载体本身作为有机质源, 能够吸附并锁定更多水分, 延缓水分流失^[30]。同时, 本研究表明多数生育期土壤含水率随微生物菌肥用量增加而提高, 这与秦健杰等^[31]的研究结果一致。但在萌芽期, 这一变化趋势有所不同, F2 处理在 0~100 cm 土层含水率较 F3 平均高 12.28%, 因为温度是影响微生物菌群活性的重要因素^[32]。低温环境中, 过量菌肥(F3 处理)可能导致土壤微生物群体间的资源竞争加剧, 削弱菌群功能(如胞外多糖分泌减少), 降低土壤结构改良效率; 中等用量菌肥(F2 处理)则更易在低温下维持功能菌群的适宜活性, 促进土壤团聚体形成及孔隙连通性改善, 从而增强根区水分运移效率, 推动水分向根系转移和利用。这也解释了 F1、F2 与 CK 处理根区储水量均在萌芽期至果实膨大期降低的现象(图 2)。同时, 菌肥处理通过改善土壤结构, 提升了水分传导和供给能力, 使根系能更高效地获取和利用水分, 表现出更强的生长势和水分消耗能力。这一时期的水分虽减少, 却推动了作物的快速生长和干物质积累。尤其 F2 处理, 水分消耗较大但产量最高(表 2), 进一步表明菌肥促进了水分的有效利用, 是提高水分利用效率与作物产量的关键因素。

微咸水灌溉通常使 0~10 cm 土层含水率高于 10~40 cm 土层^[33], 但本研究结果表明 0~40 cm 土层含水率呈上升趋势, 这是因为微咸水灌溉带入的 Na^+ 对土壤团聚体有分散作用^[34], 导致孔隙堵塞并抑制水分下渗; 而菌肥能使盐离子(Na^+)吸附固定或淋洗^[19, 35], 提升毛管孔隙度, 形成水分运移优先路径。本研究中施加微生物菌肥处理 40~60 cm 土层土壤水分含量均明显高于 0~40 cm。这是因为微生物菌肥可通过固氮、解磷等功能促进植物生长^[36], 使浅层(0~40 cm)根系发育, 增强枸杞主动吸水能力, 致使浅层含水率相对下降; 而中层(40~60 cm)成为水分补给与根系吸水的动态平衡区。未施用微生物菌肥处理土壤含水率峰值出现在 60~80 cm, 反映出微咸水灌溉引起的土壤结构退化及盐分下移导致水分向深层淋失^[37], 使植物对水分的获取减少。

3.2 微生物菌肥施用量对土壤盐分的影响

土壤盐分动态表现出显著的生育期响应特征, 呈现“消减-累积”的周期性变化规律。在消减阶段(萌芽期至果实膨大期), 盐分持续下降, 其中 F1 处理在果实膨大期的脱盐率较大, 较 CK 高 13.83%, 这主要是由于灌溉引发的淋洗作用主导了盐分迁移过程。

进入累积阶段(盛果期至落叶期)后, 蒸发作用增强导致盐分表聚效应显著, 但 F2 处理仍维持最低盐分水平(较 CK 低 48.97%)。微生物菌肥通过双重调控机制实现盐分控制: 在消减期通过提高生育期土壤含水率, 延长盐分淋洗时间; 在累积期抑制盐分表聚, 不同程度抑制或减缓盐分的回升幅度, 并使土壤盐分动态稳定在较低水平。根层(0~60 cm)土壤盐分脱盐率较大, 原因在于微生物菌肥施用多集中于耕作层附近, 通过微生物活动和改善土壤团聚体结构, 加快盐分向下迁移, 最终形成稳定的低盐根区环境。

微生物菌肥施用量的增加显著增强土壤盐分剖面调控效果, 但不同土层响应存在差异。本研究显示(以果实膨大期为例), 表层土壤(0~20 cm)盐分随菌肥增加呈梯度下降趋势, 其中 10~20 cm 土层全盐量降幅最大(较 CK 降低 44.08%), 而有研究发现微咸水灌溉盐分主要集中在 10~20 cm 土层^[33]。原因是, 相较于单纯微咸水灌溉, 菌肥处理通过提高非毛管孔隙度来增强水分下渗能力^[38], 可能加速 10~20 cm 土层盐分向下层(>20 cm)淋洗, 导致该层全盐量降低, 菌肥可通过改变水分运移路径实现盐分再分布。深层(30 cm 以下)土壤盐分变化受微生物菌肥调控呈非线性变化, F2 处理降盐效果最好(较 CK 降低 45.26%), 而高菌肥施用量(F3 处理)通过改变电导率等关键土壤指标^[39], 短期内显著改变土壤溶液渗透压, 影响微生物活性^[40], 削弱其对深层盐分的调控能力。

4 结论

1) 枸杞整个生育期, 微生物菌肥可提升土壤平均含水率 9.38%~22.77%。其中, F3 处理最优: 0~40 cm 土层含水率提升达 19.40%, 根层(0~60 cm)储水量全生育期平均提升 25.76%。

2) 微生物菌肥在不同土层均表现出良好的脱盐效果, F3 处理在表层(0~20 cm)全盐量降低 54.22%, 而 F2 处理在中深层(20~100 cm)全盐量平均降低达 40.18%。

3) 枸杞产量随微生物菌肥施用量增加呈先升后降趋势, 中等施肥量(F2 处理)产量最高, 达到 4 599.24 kg/hm²。F2 处理枸杞横径与纵径增幅相对协调(纵径 9.29%, 横径 1.29%), 果形指数提高 8.15%。

4) 基于偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析, 揭示了菌肥用量通过提升土壤储水量, 驱动枸杞果实纵径显著正向发育, 最终形成“储水量-纵径”主导的间接增产路径。综合水盐调控能力、果实性状及产量响应, 推荐微生物菌肥最适施用范围为 69~76 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 陶健宇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 河套灌区土壤盐分对化肥氮素转化过程的影响研究[J]. 土壤, 2020, 52(4): 802–810.
- [2] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1–17.
- [3] 李金刚, 屈忠义, 黄永平, 等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 217–223.
- [4] Yang G, Li F D, Tian L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104592.
- [5] 范德宝, 管瑶, 贺兴宏, 等. 咸淡水组合灌溉对土壤盐分和棉花生长的影响[J]. 节水灌溉, 2024(3): 17–23.
- [6] 夏丽华, 刘彤, 孙宏勇, 等. 长期增施有机肥对咸水灌溉农田土壤水盐分布及有效磷含量的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(S1): 150–158.
- [7] 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 等. 生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4625–4635.
- [8] 吴忠东, 王全九. 微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 36–43.
- [9] 刘祯媛, 张体彬, 梁青, 等. 不同浓度微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 378–386.
- [10] Panta S, Flowers T, Doyle R, et al. Temporal changes in soil properties and physiological characteristics of *Atriplex* species and *Medicago arborea* grown in different soil types under saline irrigation[J]. Plant and Soil, 2018, 432(1/2): 315–331.
- [11] 陈素英, 邵立威, 孙宏勇, 等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1049–1058.
- [12] Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 424–432.
- [13] Zhang T B, Zhan X Y, Kang Y H, et al. Improvements of soil salt characteristics and nutrient status in an impermeable saline-sodic soil reclaimed with an improved drip irrigation while ridge planting *Lycium barbarum* L[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(4): 1126–1139.
- [14] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27.
- [15] 李燕丽, 王昌昆, 卢碧林, 等. 基于微根管技术的盐胁迫下小麦根系生长原位监测方法[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 599–609.
- [16] 佟玲, 戴永辉, 陈阳, 等. 水盐胁迫下老化生物炭对温室气体与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 386–395.
- [17] 决超, 杨囡君, 王盛荣. 化肥配施微生物菌肥及改良基质对土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(19): 237–244.
- [18] 田露, 刘景辉, 赵宝平, 等. 保水剂和微生物菌肥配施对旱作土壤理化性质和燕麦产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 109–117.
- [19] 张蕾, 吴文强, 王维瑞, 等. 土壤调理剂及其配施微生物菌肥对设施菜田次生盐渍化土壤改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 264–271.
- [20] 方成, 岳明灿, 王东升, 等. 化肥减施配施微生物菌剂对鲜食玉米生长和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 743–749.
- [21] 卢洪美, 王晨宇, 巩梦梦, 等. 微生物菌肥配施生物炭对土壤肥力及黑麦草生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(12): 2266–2272.
- [22] 叶静, 陈影, 屈爽, 等. 不同微生物菌肥对滨海盐渍土土壤质量及玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4279–4292.
- [23] 内蒙古自治区质量技术监督局. 盐碱土壤枸杞咸淡水轮灌技术规程: DB15/T 1018—2016[S]. 呼和浩特: 内蒙古自治区质量技术监督局, 2016.
- [24] 国家林业局. 森林土壤水溶性盐分分析: LY/T 1251—1999[S]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [25] 杨再强, 侯梦媛, 张曼义. 水分胁迫对设施甜椒结果期叶面积扩展及果实发育的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 170–177.
- [26] 田露, 刘景辉, 赵宝平, 等. 保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 317–324.
- [27] 刘亚军, 胡启国, 王文静, 等. 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对甘薯连作田土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(1): 51–60.
- [28] 赖锬阳, 肖建才, 王红阳, 等. 微生物菌肥调控药用植物品质形成的作用机制及应用与展望[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(4): 912–923.
- [29] 张煜. 微生物菌肥对烟草品质及土壤细菌多样性影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [30] 王玮莹, 彭金榜, 朱婉雪, 等. 基于无人机遥感的盐渍化土壤有机质反演方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(3): 736–752.
- [31] 秦健杰, 杨威, 张如鑫, 等. 生物炭与菌肥联用改良盐碱地的减排增产效应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 274–283, 293.
- [32] 任海伟, 王宇杰, 李金平, 等. 温度对蔬菜垃圾与猪粪混合消化产沼气特性的影响[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2088–2095.
- [33] 高伟强, 张体彬, 童建康, 等. 不同钠钾比微咸水对土壤水盐特性和冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 372–380.
- [34] 吕轲彦, 陈志君, 李越, 等. 褐煤有机肥与脱硫石膏联合施用对盐碱土改良和向日葵产量的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 77–86.

- [35] 王晓丽, 安梦洁, 张春媛, 等. 改良剂调控盐碱胁迫对棉田土壤微生物多样性的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 180–187.
- [36] 舒惠琳, 胡文涛, 陈启洲, 等. 微生物菌肥对油茶生长、抗逆性和土壤环境的影响[J]. 世界林业研究, 2024, 37(3): 28–32.
- [37] 谭军利, 王西娜, 马小福, 等. 微咸水补灌年限对压砂地水盐分布及西瓜产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 1–8.
- [38] 王琛, 吴云飞, 李甜江, 等. 金沙江不同林分的土壤入渗特征研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48(3): 69–77.
- [39] 赵浩庚, 李立军, 尹春艳, 等. 施氮量和微生物菌肥对河套灌区盐碱地向日葵氮素吸收利用和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(11): 80–89.
- [40] 李会文. 施用脱硫石膏和风积沙对盐碱化棉田改良效果及 CO₂ 排放的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.

(责任编辑: 毛小芳)