

DOI: 10.11686/cyxb2025121

http://cyxb.magtech.com.cn

李磊, 马勇宽, 蒋鹏, 等. “六位一体”模式对宁夏盐碱地土壤水盐动态、质量等级及青贮玉米产能的影响. 草业学报, 2026, 35(3): 68—82.

LI Lei, MA Yong-kuan, JIANG Peng, *et al.* Effects of a ‘six-aspect integrated’ pattern on dynamic changes in soil water and salt contents, quality of cultivated land, and silage maize productivity in saline-alkali land in the Ningxia irrigation area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(3): 68—82.

“六位一体”模式对宁夏盐碱地土壤水盐动态、质量等级及青贮玉米产能的影响

李磊^{1,2**}, 马勇宽^{1**}, 蒋鹏³, 朱志明⁴, 纪立东², 李龙⁵, 许兴^{1*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏银川 750002; 3. 宁夏农林科学院农作物研究所, 宁夏银川 750002; 4. 宁夏回族自治区农业技术推广总站, 宁夏银川 750001; 5. 宁夏回族自治区农业农村厅农村经营管理站, 宁夏银川 750000)

摘要: 针对单项技术对宁夏引黄灌区盐碱地治理效果不显著、饲草产能不高的问题, 本研究采用“改土适种”与“以种适地”相结合的方针, 从“改良剂、施肥、种子、耕作、灌水、排水/盐”战略技术要点出发, 构建“六位一体”盐碱地综合治理新模式, 以常规模式为对照, 研究该模式对盐碱地土壤水盐动态变化、质量等级及青贮玉米产能的影响。结果表明, 相比常规模式, “六位一体”模式连续实施2年后0~15 cm土层体积含水率可减少3.05%, 15~30 cm土层体积含水率提高3.01%, 0~30 cm土层全盐含量降低30.42%, 但地下水矿化度增加12.36%。同时, 2024年, “六位一体”模式相比常规模式土壤容重显著降低了6.34%, 土壤有机质与有效磷含量分别显著增加12.41%和70.33%, 耕地质量也提高0.56个等级。此外, 相比常规模式, “六位一体”模式下青贮玉米株高、干物质质量及淀粉含量分别显著提高了5.67%、21.93%、3.46%, 中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维的降幅分别为5.73%、11.03%, 2023与2024年产量增幅分别为12.52%、25.28%, 2024年净收益增加2279.4元·hm⁻², 产投比也提高了13.04%。由此可见, “六位一体”模式在土壤盐分抑制、质量等级增加及作物产能提升方面效果显著, 可在实际生产中逐步开展示范推广。

关键词: 盐碱地; “六位一体”模式; 水盐动态; 耕地质量等级; 青贮玉米; 产能

Effects of a ‘six-aspect integrated’ pattern on dynamic changes in soil water and salt contents, quality of cultivated land, and silage maize productivity in saline-alkali land in the Ningxia irrigation area

LI Lei^{1,2**}, MA Yong-kuan^{1**}, JIANG Peng³, ZHU Zhi-ming⁴, JI Li-dong², LI Long⁵, XU Xing^{1*}

1. School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Institute Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 3. Institute of Crop, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 4. Ningxia Agricultural Technology Extension Station, Yinchuan 750001, China; 5. Rural Operation and Management Station, Department of Agriculture and Rural Affairs, Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750000, China

Abstract: Single technologies have limited effectiveness in remediating saline-alkali soil and improving the low forage productivity in the Ningxia Yellow River Irrigation District. To address this issue, we explored the effectiveness of a

收稿日期: 2025-04-08; 改回日期: 2025-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目“黄河上游河套平原节水控盐产能提升技术模式与应用(2021YFD19006)”专题“宁夏平罗插花盐渍地改稻种旱节水控盐产能提升模式示范(2021YFD1900605-02)”和宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-11-07)资助。

作者简介: 李磊(1991—), 男, 宁夏彭阳人, 在读博士。E-mail: lilei867@163.com; 马勇宽(2001—), 男, 山西阳曲人, 在读硕士。E-mail: 2770301175@qq.com。 ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xuxingscience@126.com

combined strategy of ‘soil improvement for crop adaptation’ and ‘crop adaptation to soil conditions’. Focusing on six strategic technical aspects (i. e., soil amendments, fertilization, seed selection, tillage practices, irrigation, and drainage/salt management), we established a novel ‘six-aspect integrated’ comprehensive saline-alkali soil remediation pattern. This pattern was compared with conventional practices to evaluate its effects on soil water-salt dynamics, the soil quality grade, and silage maize (*Zea mays*) productivity. The results show that, after 2 consecutive years of implementation, the ‘six-aspect integrated’ pattern achieved the following advantages compared with conventional practices. The volumetric water content in the 0–15 cm soil layer was decreased by 3.05% while that in the 15–30 cm layer was increased by 3.01%. The total salt content in the 0–30 cm soil layer was decreased by 30.42%, although there was a 12.36% increase in groundwater mineralization. The soil bulk density was significantly decreased by 6.34%, soil organic matter was increased by 12.41%, and available phosphorus was increased by 70.33%, elevating soil quality by 0.56 grades in 2024. The combined treatment also enhanced silage maize performance: plant height was increased by 5.67%, dry matter yield was increased by 21.93%, and starch content was increased by 3.46%, alongside reductions in neutral detergent fiber by 5.73% and acid detergent fiber by 11.03%. The annual yields were increased by 12.52% in 2023 and 25.28% in 2024, with a net profit increase of 2279.4 Yuan·ha⁻¹ and improvement in the cost-benefit ratio by 13.04% in 2024. These findings demonstrate that the ‘six-aspect integrated’ pattern significantly suppresses soil salinity, improves soil quality, and enhances crop productivity, making it a promising approach for practical use on a large scale in agricultural production.

Key words: saline-alkali land; ‘six-aspect integrated’ pattern; water-salt dynamics; cultivated land quality grades; silage maize; production capacity

盐碱地作为我国后备耕地资源,合理开发利用对粮食安全和优势特色产业发展具有重要意义^[1-2]。近年来,宁夏引黄灌区土壤盐碱化问题备受关注,据统计,现有盐碱退化型耕地面积 1.77×10^5 hm²,占全区耕地总面积的13.7%^[3],盐碱退化型耕地最基本的特点就是土壤盐碱并重、肥力退化、作物产能不高^[4]。常用的改良措施主要有水利工程排盐、耐盐品种筛选以及调理剂施用等^[5],然而,在实际生产中,改良措施比较单一,未形成系统的治理观念,导致盐碱反复、农作物减产,严重威胁粮食安全与农民生计。

近年来,众多学者针对不同区域的盐碱地也提出了相应的治理模式。杨劲松等^[6]集成暗管洗盐、深松排盐、节灌控盐等关键技术形成可持续的粮经生态产业发展模式,卢闯等^[7]集成秸秆夹层技术与地膜覆盖技术,提出了上膜下秆模式,应用两种模式在内蒙古河套地区开展了大面积示范,有效地增加了玉米(*Zea mays*)与苜蓿(*Medicago sativa*)的产量;孙盛楠等^[8]、田长彦等^[9]提出的生态种养循环模式与节水灌溉农田盐分管控模式在新疆多地区开展大面积应用,有效地将盐分推至耕层以下,促进了饲草产能提升,提高了盐碱地综合利用效率,构建了种养健康循环体系;王飞^[10]在陕西地区提出的旱区盐碱地双分离治理模式通过集约化水土资源管理,可以提高水盐分离效率,达到“一次洗盐,多年利用”的效果;全淑萍等^[11]在东北松嫩平原地区提出羊草(*Leymus chinensis*)移栽技术模式能够在提高系统生物多样性的同时,实现生产经济效益的倍增;李宏伟等^[12-13]在滨海地区提出的长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*)“滨海草带”模式不仅可弥补我国优质饲草缺口,还可提供生态屏障,保护生态环境;张英俊等^[14]、董珊等^[15]提出的饲草间混套作模式与调亏灌溉模式在甘肃地区不仅合理开发利用盐碱地资源,有效提高水资源利用效率,同时提高饲草品质和产量,促进种养结合。

以上盐碱地模式在水资源节约、盐碱抑制、土壤结构改善、种植制度优化及优良品种种植方面均具有良好的效果,然而宁夏地区因气候、土壤属性、地形、水资源及产业发展等元素限制,未能全部引进推广应用。鉴于此,本研究团队整合前人研究基础,并结合自研技术逐步形成“钙基置钠、碳基培肥、深耕消障、种芯抗盐、精准灌溉、排灌协同”思路,提出了宁夏地区盐碱地治理“六位一体”模式。为进一步验证该模式的适用性,本研究选取中重度类型盐碱地,以青贮玉米为指示作物,连续2年分析该模式对土壤水盐动态变化、耕地质量等级及青贮玉米产能的影响,以期为大面积推广提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

2023—2024年在宁夏平罗县宝丰镇宝丰村建立模式验证区(39.0676°N,106.7259°E),该区域海拔1097 m,成土母质为灌溉淤积物,耕层的土壤质地为粉砂质黏壤土^[16],容重较大,为1.44 g·cm⁻³(表1)。玉米生育期内平均气温18.5℃,年日照时数2956 h。通过常规化学检测方法得出该区域土壤pH平均为8.87,全盐含量为5.29 g·kg⁻¹,属强碱性盐渍土,依据全国第二次土壤普查分类标准^[17],土壤有机质及速效氮含量处于5级偏低水平,有效磷含量处于3级以上丰富水平,而速效钾含量处于1级极丰富水平(表2)。

表1 土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties

| 土壤深度 Soil depth (cm) | 土壤机械组成 Soil mechanical composition (%) | | | 土壤质地 Soil texture | 容重 Bulk density (g·cm ⁻³) | 田间持水量 Field capacity (%) |
|----------------------------|--|-----------------------------|------------------------|----------------------------------|---|--------------------------------|
| | 砂粒 Sand (2.00~0.02 mm) | 粉粒 Silt (0.020~0.002 mm) | 黏粒 Clay (<0.002 mm) | | | |
| 0~30 | 21.97 | 45.54 | 32.51 | 粉(砂)质黏壤土 Silty (sandy) clay loam | 1.44 | 28.54 |

表2 土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties

| 土壤深度 Soil depth (cm) | 全盐 Total salt (g·kg ⁻¹) | pH | 有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹) | 速效氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹) | 有效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹) | 速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹) | 碱化度 Exchangeable sodium percentage (%) |
|----------------------------|---|------|--|---|---|--|--|
| 0~30 | 5.29 | 8.87 | 8.17 | 59.53 | 14.75 | 207.68 | 18.34 |

1.2 试验设计

试验以常规模式为对照(CK),开展“六位一体”模式(T)比较研究,试验周期为2年,管理措施一致。“六位一体”模式主要从“剂、肥、种、耕、灌、排”技术要点出发,具体见表3。播种密度约为82500株·hm⁻²,采用种肥同播—卫星导航精量播种技术。每种模式重复10次,共计20个大区,每个大区面积0.33 hm²,共计6.6 hm²。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤基本理化性质测定 在每年施肥前(4月10日)与收获后(9月15日)开展土壤基础值测定,采用环刀法和烘干法(105℃)测定土壤容重与田间持水量,同时,采集耕层(0~30 cm)土壤样品,每个大区选取3个点,混合成1个样品,共计60个点,20个样品。去除枯枝落叶等杂物后自然风干,研磨后,一部分过2 mm筛用比重计法测定土壤机械组成^[18];另一部分分别过1.00与0.25 mm筛用于测定土壤化学性质。其中,土壤pH在水土比2.5:1时,混匀静置后直接用pH计(pHS-3C,中国上海)测定;采用电导率仪(DDS-11,中国上海)测定电导率,结合线性方程 $[y=3.0023x+0.1456]$;其中,y表示土壤全盐(g·kg⁻¹),x表示25℃下土壤电导率]计算全盐含量^[18];土壤有机质用重铬酸钾容量法测定^[19];速效氮用碱解扩散法测定^[19];有效磷用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定^[19];速效钾用醋酸铵溶液浸提—火焰光度计法测定^[19];交换性钠用乙酸铵—氢氧化钠交换—火焰光度法测定^[19],阳离子交换量用中性乙酸铵法测定^[19],碱化度=(交换性钠/阳离子交换量)×100%^[20];有效土层厚度采用土钻机械钻孔法测定^[19]。

1.3.2 土壤含水率、全盐含量测定 2024年为掌握土壤水盐运移动态变化,玉米出苗后安装10套水盐连续监测系统(RH-S11,中国邯郸),间隔两个大区安装1套,共计安装10套,安装土层分别为15、30、45、60、75、90 cm,采集不同土层土壤体积含水率与全盐含量数据。

1.3.3 地下水埋深、矿化度测定 2024年为解答“盐去哪儿了”问题,在玉米苗后间隔10 d采用钢尺水位计(JK50,中国北京)测定地下水埋深并采用绳吊取水法采集地下水样品^[21],采用电导率仪(DDS-11,中国上海)测定

表 3 模式管理措施及成本核算

Table 3 Mode management measures and cost accounting

| 技术类型 Technical type | 技术要点 Technical essential | 管理措施 Management measure | | 成本核算 Cost accounting (Yuan·hm ⁻²) | |
|--|---|--|---|--|---|
| | | 常规模式 Conventional pattern | “六位一体”模式 “Six-aspect integrated” pattern | 常规模式 Conventional pattern | “六位一体”模式 “Six-aspect integrated” pattern |
| 个性技术 Personalized technology | “剂”:改良剂消减障碍 ‘Agent’: Improver to reduce obstacles | / | A: 4500 kg·hm ⁻² (基施) A: 4500 kg·ha ⁻¹ (basal application) | 0 | 750 |
| “肥”:固碳培肥和营养施肥 ‘Fertilizer’: Carbon fixation, fertilization and nutrition application | 掺混肥: 15000 kg·hm ⁻² (基追比 1:1)+ 尿素: 375 kg·hm ⁻² (追肥) Mixed fertilizer: 15000 kg·ha ⁻¹ (base to topdressing ratio 1:1)+ urea: 375 kg·ha ⁻¹ (topdressing) | B: 11250 kg·hm ⁻² (基施)+ 尿素: 375 kg·hm ⁻² (追肥)+ 叶面肥: 氨基酸水溶肥 3.75 kg·hm ⁻² + 磷酸二氢钾 1.5 kg·hm ⁻² (500 倍稀释喷施) B: 11250 kg·ha ⁻¹ (basal)+ urea: 375 kg·ha ⁻¹ (basal)+ C: 600 kg·ha ⁻¹ (topdressing)+ foliar fertilizer: amino acid water-soluble fertilizer 3.75 kg·ha ⁻¹ + potassium dihydrogen phosphate 1.5 kg·ha ⁻¹ (500 times diluted spraying) | C: 600 kg·hm ⁻² (追肥)+ 叶面肥: 氨基酸水溶肥 3.75 kg·hm ⁻² + 磷酸二氢钾 1.5 kg·hm ⁻² (500 倍稀释喷施) C: 600 kg·ha ⁻¹ (topdressing)+ foliar fertilizer: amino acid water-soluble fertilizer 3.75 kg·ha ⁻¹ + potassium dihydrogen phosphate 1.5 kg·ha ⁻¹ (500 times diluted spraying) | 7500 | 7500 |
| “种”:耐盐品种和高光效种植 ‘Species’: Salt-tolerant varieties and high light efficiency planting | 强盛 30; 等行距 60 cm | 先玉 1225; 宽窄行(宽行 70 cm, 窄行 40 cm) | Qiangsheng 30; equal row spacing was 60 cm | 1500 | 1500 |
| “耕”:深翻破板及中耕蹲苗 ‘Tillage’: Deep plowing broken board and intertillage squat seedlings | 旋耕: 20 cm | 深翻: 30 cm+ 旋耕: 20 cm+ 中耕: 10 cm | Rotary tillage: 20 cm | 1500 | 1800 |
| “灌”:春灌后播种和精量灌溉 ‘Irrigation’: Sowing after spring irrigation and precision irrigation | 畦灌: 6300 m ³ ·hm ⁻² | 春耕播种畦灌: 5040 m ³ ·hm ⁻² | Border irrigation: 6300 m ³ ·ha ⁻¹ | 750 | 600 |
| “排”:暗管排水/盐和明沟强排 ‘Drainage’: Subsurface pipe drainage/salt and open ditch forced drainage | 暗管 Subsurface pipe drainage | 暗管+明沟 Subsurface pipe drainage+ open ditch | | 0 | 150 |
| 共性技术 Generic technology | 病虫害防治 Pest control | 播前封闭药、苗后除草、统筹统防 | Sealing medicine before sowing, weeding after seedling, and overall prevention | 750 | 750 |
| | 机械减损收获 Mechanical damage reduction harvest | 适时收获 Timely harvest | | 750 | 750 |
| 单季总成本 Total cost per season (Yuan·hm ⁻²) | | | | 12750 | 14175 |

注: 掺混肥料 N-P₂O₅-K₂O=26-12-12, SiO₂≥12%; 钙基改良剂(主要成分有重过磷酸钙、硅藻土、活化腐植酸、硫酸亚铁), 宁夏大学科研团队自主研发, 用 A 表示; 高碳基功能生物有机肥(主要成分生物质炭、腐熟牛羊堆肥、微生物菌剂)由中国科学院南京土壤研究所、宁夏大学、宁夏农林科学院科研团队联合研制, 用 B 表示; 缓释促生配方肥由宁夏大学科研团队自主研发, 用 C 表示。

Note: The compound fertilizer has an N-P₂O₅-K₂O ratio of 26-12-12 and SiO₂ contains ≥12%. The calcium-based soil conditioner, developed by Ningxia University, comprises mainly of reactive phosphate rock, diatomaceous earth, activated humic acid, and ferrous sulfate, expressed by A; The high-carbon functional bio-organic fertilizer, jointly developed by the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Ningxia University, and Institute Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences is primarily composed of biochar, composted livestock manure, and microbial inoculants, expressed by B; The controlled-release and growth-promoting formula fertilizer was independently developed by the research team of Ningxia University, expressed by C.

电导率, 结合方程 [y=0.7692x; 其中, y 表示地下水矿化度 (g·L⁻¹), x 表示 25 °C 下土壤电导率, 0.7692 为线性常数] 计算矿化度^[18]。

1.3.4 玉米生长指标测定 2024 年采用彩色标牌在每个大区标记 6 株玉米, 分别在苗后 30 d 后, 间隔 10 d 测定玉米自然株高、茎直径、叶绿素相对含量、干物质质量; 叶片叶绿素测定选用倒 3 叶中部, 采用叶绿素测定仪

(TSY-B, 中国杭州)测定;干物质质量采用烘干法称量^[22]。

1.3.5 玉米青贮产量及品质测定 每年当青贮玉米淀粉与干物质含量超过30%时开始收获(苗后100 d),大区采取66.7 m²样方实收,最后通过公式 $y=150x$;其中 y 为每hm²产量(t·hm⁻²), x 为66.7 m²样方产量(t·hm⁻²),150为换算系数]计算每hm²产量。同时,每大区随机采集3株玉米装入尼龙袋,带回实验室,置于105℃烘箱杀青30 min后于60℃烘干至恒重,粉碎过0.5 mm的筛。采用自动凯氏定氮仪(沛欧SKD-100,中国上海)测定粗蛋白含量^[23];采用纤维分析仪(XF2860,中国上海)测定中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量^[23];采用索氏抽提法测定各样本中粗脂肪含量^[23];采用蒽酮-硫酸比色法测定可溶性碳水化合物与淀粉含量^[24]。

1.3.6 土壤质量等级计算 土壤质量等级依据《耕地质量等级》^[25],从立地条件、剖面性状、肥力水平、清洁状况、基础设施方面对概念型与数值型计算组合权重及隶属度,其中,数值型指标通过隶属函数 $y=1/[1+a(u-c)^2]$ 计算隶属度,式中: y 为隶属度; a 为系数; u 为实测值; c 为标准指标。最后利用累计加法得出每个评价单元的综合指数^[26],公式如下:

$$IQI = \sum(Q_i \times C_i)$$

式中: IQI (integrated quality index)表示土壤耕地质量综合指数; Q_i 表示第 i 个评价因素的得分; C_i 表示第 i 个因素的组合权重。将参与评价的各影响因子的隶属值实行加权组合计算每一个评价单元的综合指数分值(表4)。

1.3.7 经济效益计算 青贮玉米产量与单价(2023与2024年平均价格540元·t⁻¹)的乘积为经济产值(yuan·hm⁻²);种子、改良剂、肥料、耕作及灌溉的单季费用总和为投入(yuan·hm⁻²),经济产值与投入的差值为经济效益(yuan·hm⁻²)。

1.4 数据分析与处理

采用Excel 2003软件整理试验数据,利用SPSS Statistics 17.0单因素和双因素方差分析(ANOVA)比较不同处理下的数据均值是否存在差异;最小显著性检验(least significant difference, LSD)、Duncan新复极差法(simple sequential ranks, SSR)进行差异显著性检验($P < 0.05$);采用Sufer软件绘制土壤含水率与全盐动态等值线图;采用Origin 21绘制分组条形图。

2 结果与分析

2.1 “六位一体”模式对盐碱地土壤体积含水率的影响

2024年,“六位一体”模式会影响土壤整个剖面的体积含水率,在青贮玉米拔节期一大喇叭口期(出苗后25~40 d),“六位一体”模式下0~15 cm土层体积含水率相比常规模式有所降低,平均减少2.48%,但增加了15~90 cm剖面层土壤体积含水率,平均增幅1.49%(图1a);青贮玉米大喇叭口期一抽雄期(出苗后41~55 d),“六位一体”模式下0~15 cm土层土壤体积含水率相比常规模式降低5.94%,15~30 cm土层土壤体积含水率增加8.42%,30~90 cm土层土壤体积含水率也平均增加0.69%(图1b);青贮玉米抽雄期一吐丝期(出苗后56~70 d)0~15 cm土层土壤体积含水率相比常规模式增加了2.00%(图1c),而吐丝期一乳熟期(出苗后71~90 d)及乳熟期一成熟期(出苗后91~110 d)0~15 cm土层土壤体积含水率相比常规模式分别降低了2.46%和2.07%,而对15~90 cm处土壤体积含水率影响不大,二种模式下无明显差异(图1d和e)。综合所得,“六位一体”模式相比常规模式可使0~15 cm土层土壤体积含水率含量平均降低3.05%,但仍处于田间持水量(28.54%)的75%左右,作物表现为不缺水状态。

2.2 “六位一体”模式对盐碱地土壤全盐含量的影响

2024年通过对青贮玉米整个生育期土壤全盐含量实时监测,发现“六位一体”模式能够有效地降低整个土壤剖面的全盐含量。其中,在拔节期一大喇叭口期,0~30 cm土层全盐含量平均降低16.50%,而整个剖面土壤全

表4 土壤耕地质量等级划分

Table 4 Soil cultivated land grades quality classification

| 耕地质量等级 Cultivated land quality grades | 耕地质量 综合指数 IQI | 耕地质量等级 Cultivated land quality grades | 耕地质量 综合指数 IQI |
|---|---------------------|---|---------------------|
| 1 | ≥0.8401 | 6 | 0.7221~0.7461 |
| 2 | 0.8181~0.8401 | 7 | 0.6981~0.7221 |
| 3 | 0.7941~0.8181 | 8 | 0.6741~0.6981 |
| 4 | 0.7701~0.7941 | 9 | 0.6500~0.6741 |
| 5 | 0.7461~0.7701 | 10 | <0.6500 |

IQI: Cultivated land integrated quality index.

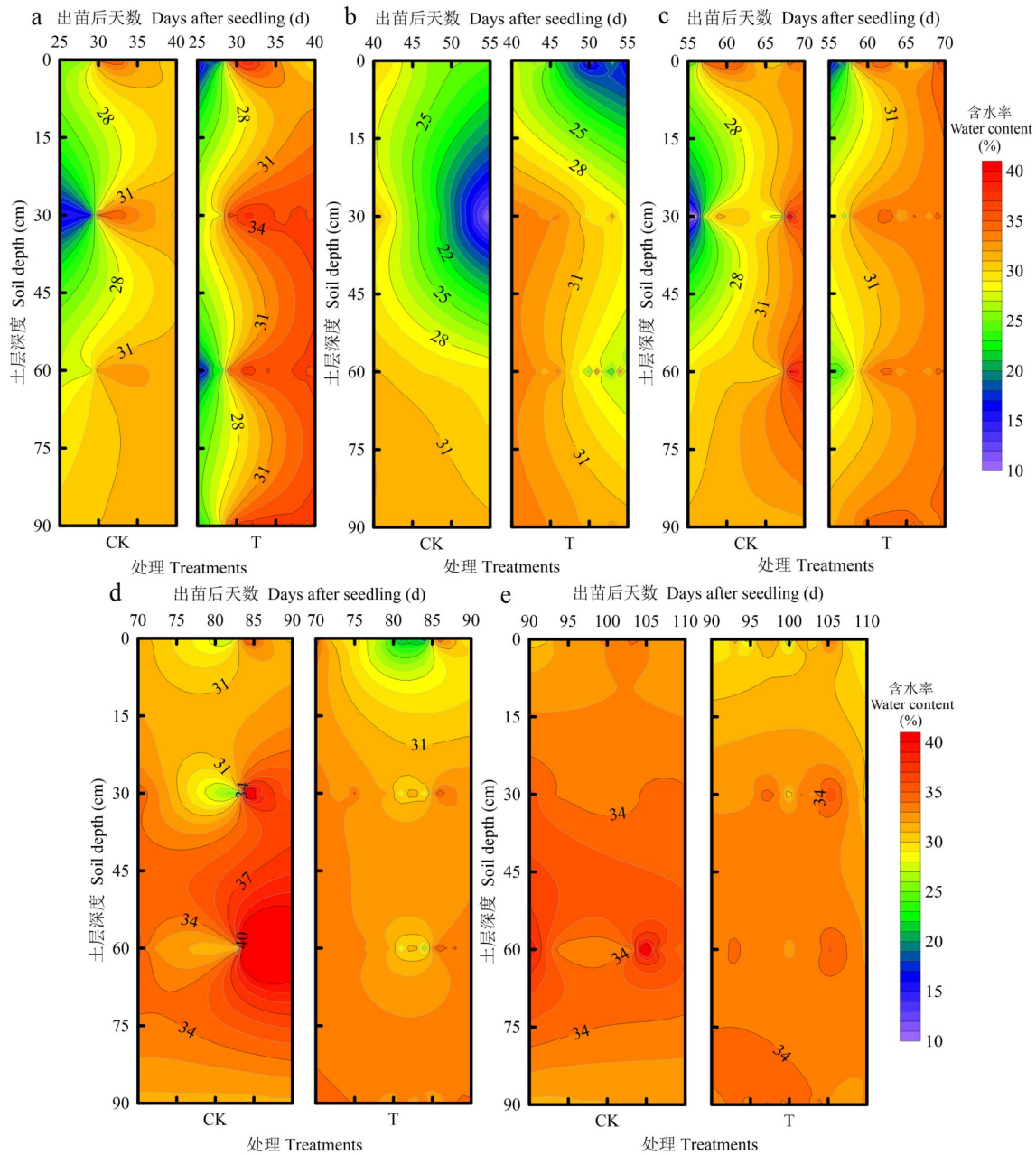


图 1 “六位一体”模式对盐碱地土壤体积含水率的影响

Fig. 1 Effect of ‘six-aspect integrated’ pattern on the dynamic changes of soil volumetric moisture content in saline-alkali land

a~e 分别代表拔节期—大喇叭口期(出苗后 25~40 d)、大喇叭口期—抽雄期(出苗后 41~55 d)、抽雄期—吐丝期(出苗后 56~70 d)、吐丝期—乳熟期(出苗后 71~90 d)、乳熟期—成熟期(出苗后 91~110 d), 下同。a~e represent jointing stage-big flare stage (25~40 days after seedling), big flare stage-tasseling stage (41~55 days after seedling), tasseling stage-silking stage (56~70 days after seedling), silking stage-milk ripening stage (71~90 days after seedling), milk ripening stage-maturity stage (91~110 days after seedling), respectively. The same below.

盐含量平均降低了 13.53%(图 2a);大喇叭口期—抽雄期(出苗后 41~55 d)，“六位一体”模式 0~30 cm 土层全盐含量相比常规模式降低 36.28%，30~60 cm 处土壤全盐含量增加 11.88%，整个剖面土壤全盐含量平均降低了 13.50%(图 2b);抽雄期—吐丝期(出苗后 56~70 d)“六位一体”模式下 0~30 cm 土层全盐含量相比常规模式降低 31.24%(图 2c);在青贮玉米吐丝期—乳熟期(出苗后 71~90 d)、乳熟期—成熟期(出苗后 91~110 d)土壤剖面的全盐含量均有所降低，而“六位一体”模式下土壤全盐含量降幅更大,0~30 cm 土层全盐含量相比常规模式分别降低了 27.66%、30.33%(图 2d 和 e)。综合所得，“六位一体”模式相比常规模式可使 0~30 cm 土层全盐含量平均降低 30.42%，这在很大程度上有助于减轻土壤全盐对植株根系的胁迫，促进作物健康生长。

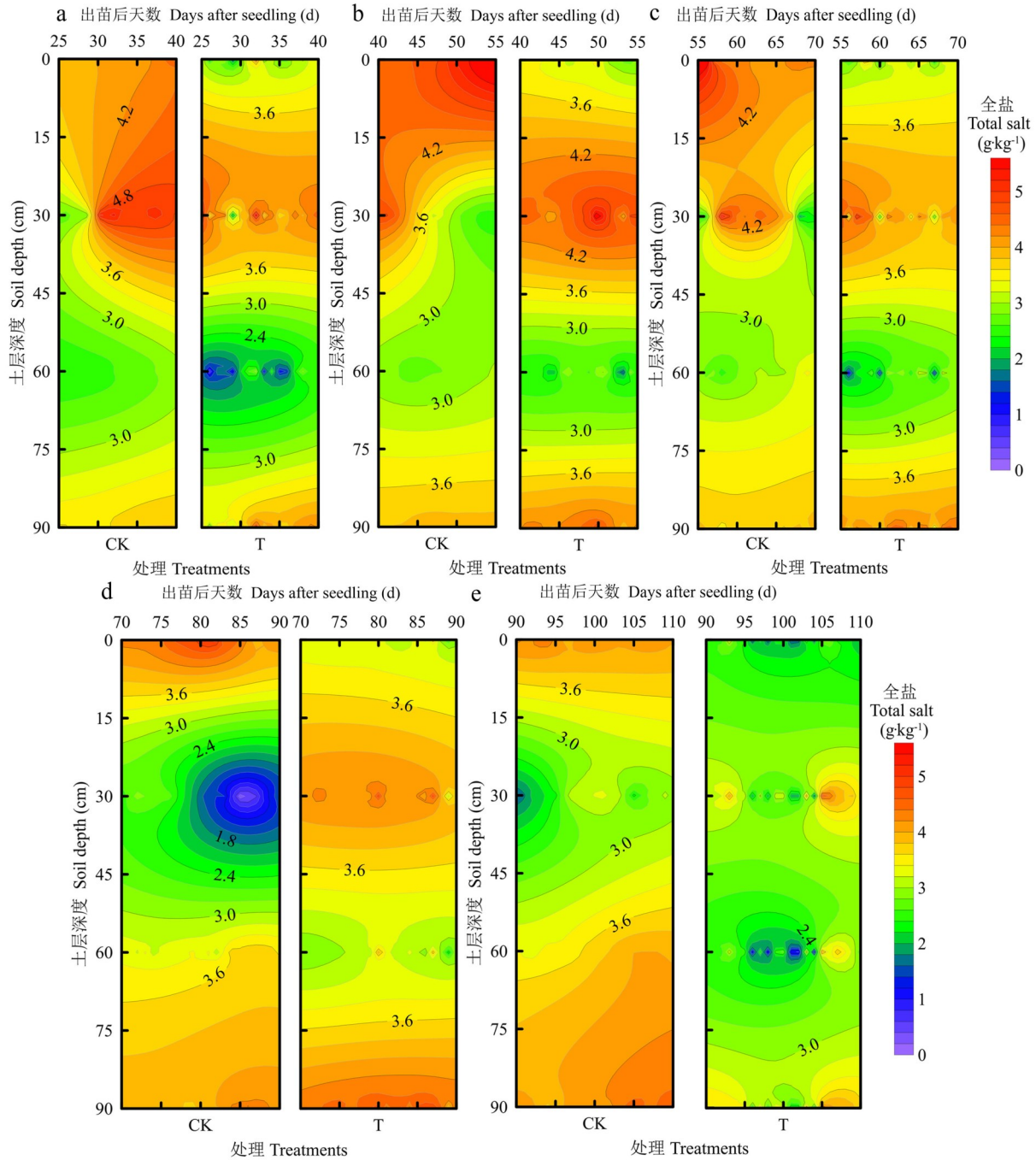


图2 “六位一体”模式对盐碱地土壤全盐含量的影响

Fig. 2 Effect of ‘six-aspect integrated’ pattern on the dynamic changes of soil total salt content in saline-alkali land

2.3 “六位一体”模式对地下水埋深及矿化度的影响

2024年通过地下水观测井间隔10 d监测发现,在播种后地下水埋深在“六位一体”与常规模式下相差不大,且埋深较浅,平均为117 cm,这主要由于春灌抬升了地下水位。在播种后30 d内地下水埋深逐渐增大,但模式间无显著性差异($P>0.05$),平均为158.24 cm。播种后40 d埋深降低,主要由于苗期中耕灌溉导致,其中,“六位一体”模式相比常规模式地下水埋深有所增加,原因可能为减量灌溉(该时期“六位一体”模式灌溉减量20%);播种后50~110 d地下水埋深总体变化较大,平均埋深为183.76 cm,且“六位一体”模式与常规模式间无显著性差异($P>0.05$,图3a)。通过采集观测井地下水,分析其矿化度得出,在播种后0 d地下水矿化度在常规模式下为2173 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而“六位一体”模式达到2975 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,增幅为36.91%;在播种后0~30 d内地下水矿化度呈稳定增加趋势,最高达到4589 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在播种后40 d地下水矿化度急剧减少,分析原因可能为该时期灌溉稀释,随后地下水

矿化度逐渐升高,在播种后 80 d 表现为降低趋势,该时期灌溉导致地下水矿化度有所降低,整个生育期“六位一体”模式相比常规模式可使地下水矿化度增加 12.36%(图 3b)。

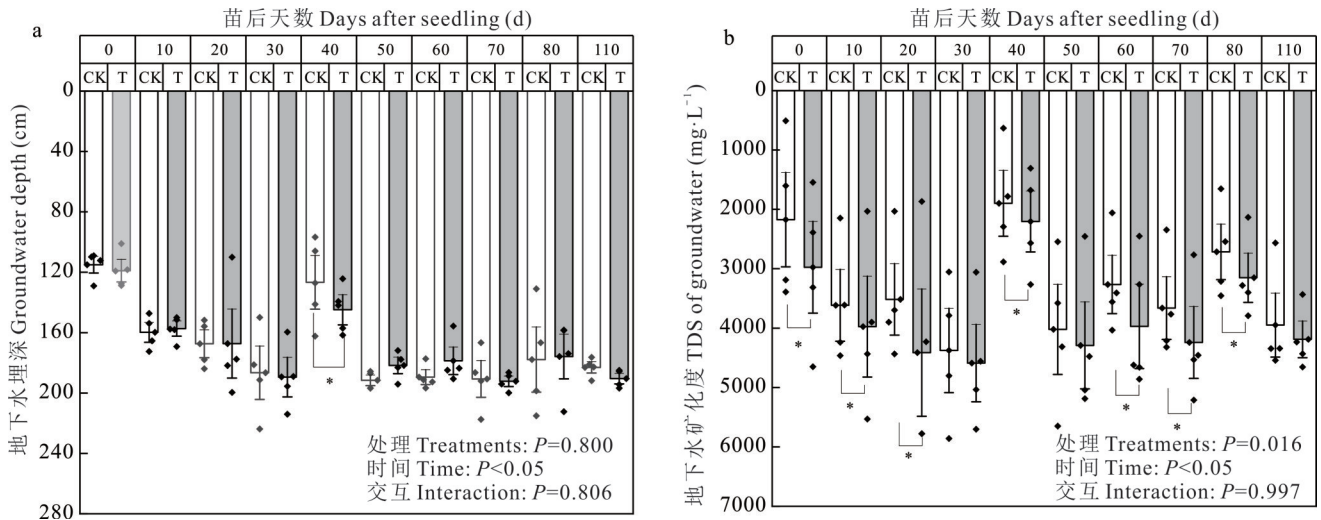


图 3 “六位一体”模式对地下水埋深及矿化度的影响

Fig. 3 Effect of ‘six-aspect integrated’ pattern on groundwater depth and total dissolved solids

*表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。TDS: 矿化度 Total dissolved solids. * represent significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

2.4 “六位一体”模式对盐碱地土壤地力等级的影响

由表 5 可得,“六位一体”模式相比常规模式显著降低了土壤容重,2023 与 2024 年降幅分别为 5.63%、6.34% ($P<0.05$),同时,在 2023 与 2024 年有机质含量分别增加 1.99%、12.41%,但差异性不显著($P>0.05$)。土壤有效磷含量在两种模式下差异性显著($P<0.05$),“六位一体”模式相比常规模式在 2023 与 2024 年分别增加 23.43%、70.33%,速效钾含量、地下水埋深及有效土层厚度变化不显著($P>0.05$)。

根据特尔斐法、系统聚类 and 专家组意见^[25],从聚类结果的每一组中分别选出有代表性的参评因素,最终确定地形部位、农田林网化率、障碍因素、有机质等 14 个指标作为示范区耕地地力评价指标及权重。其中,概念型指标共计 8 个,两种模式下地形部位为平原低阶,农田林网化率低,质地构型为夹层型,耕层质地为重壤,障碍因素

表 5 “六位一体”模式对土壤理化性质及地下水埋深的影响

Table 5 Effect of ‘six-aspect integrated’ pattern on soil physico-chemical properties and groundwater depth

| 年份 Year | 处理 Treatments | 容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 有机质 Organic matter ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 有效磷 Available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 速效钾 Available potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 地下水埋深 GWD (m) | 有效土层厚度 EST (cm) |
|----------------|---------------|---|---|---|--|---------------|-----------------|
| 2023 | CK | 1.42±0.02 | 8.55±0.44 | 20.49±2.83 | 188.78±6.25 | 1.76±0.06 | 80.66±20.33 |
| | T | 1.34±0.01 | 8.72±0.40 | 25.29±2.76 | 200.08±5.78 | 1.85±0.09 | 80.66±20.33 |
| 2024 | CK | 1.42±0.02 | 8.30±0.54 | 19.72±2.26 | 197.82±6.24 | 1.83±0.10 | 80.66±20.33 |
| | T | 1.33±0.03 | 9.33±1.01 | 33.59±4.26 | 217.44±9.02 | 1.80±0.07 | 80.66±20.33 |
| 处理 Treatments | | * | ns | * | ns | ns | ns |
| 年限 Year | | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 交互 Interaction | | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

注: *表示差异显著($P<0.05$),ns表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: GWD: Groundwater depth; EST: Effective soil thickness. * represent significant differences ($P<0.05$), ns indicated that the difference was not significant ($P>0.05$). The same below.

为盐碱,盐碱程度为中等,灌、排能力均为满足。参考《耕地质量等级》中隶属度及权重计算概念型指标耕地质量指数,数值型隶属度将各评价因子的值代入既定隶属函数公式^[25],计算所得隶属度。利用累计加法得出在2023年,“六位一体”模式与常规模式的耕地质量综合指数分别为0.7189、0.7086,2024年,常规模式的耕地质量综合指数为0.7082,几乎没变化,而“六位一体”模式下耕地质量综合指数为0.7216,相比常规模式显著提高,按照表4等级划分,“六位一体”模式相比常规模式耕地质量提高了0.56个等级(图4)。

2.5 “六位一体”模式对青贮玉米生产性能的影响

2.5.1 饲用性状

从图5可见,在播种后30~40 d内,玉米株高在“六位一体”模式与常规模式间无显著性差异($P>0.05$),播后40~60 d和80~100 d内两种模式间存在显著性差异($P<0.05$),“六位一体”模式相比常规模式株高平均显著增加5.67%(图5a);“六位一体”模式下玉米茎直径相比常规模式在苗后70~80 d平均显著增加14.26%(图5b);在播种后60~70 d,“六位一体”模式相比常规模式玉米叶片叶绿素相对含量显著增加3.45%(图5c);通过干物质质量分析,结果发现,播种后30~50 d内,干物质质量在“六位一体”模式与常规模式间无显著性差异($P>0.05$),但在播种后60~100 d内,“六位一体”模式与常规模式间存在显著性差异($P<0.05$),“六位一体”模式相比常规模式干物质质量平均显著增加21.93%(图5d)。

2.5.2 饲用品质

通过对收获期青贮玉米品质分析发现,“六位一体”模式下显著增加了整株青贮玉米可溶性碳水化合物与粗脂肪含量,其中,可溶性碳水化合物在2023与2024年度分别比常规模式下提高了9.11%、11.62%(图6a);2023年“六位一体”模式下青贮玉米粗蛋白含量相比常规模式增幅显著,为6.27%(图6b),2024年“六位一体”模式下青贮玉米淀粉含量增幅为3.46%,中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量的降幅分别为5.73%、11.03%(图6d和f)。

2.5.3 产量及经济效益分析

“六位一体”模式相比常规模式显著增加了青贮玉米产量,2023、2024年产量增幅分别为12.52%、25.28%(图7)。青贮玉米价格按照2023与2024年当地平均价格540元·t⁻¹核算,2023年常规模式下经济产值为13179.6元·hm⁻²,而“六位一体”模式下获得经济产值为14830.2元·hm⁻²,去除投入所得后净收益表现为“六位一体”模式下相比常规模式提高了225.6元·hm⁻²,当年产投比在两种模式下变化不大;2024年“六位一体”模式下获得经济产值相比常规模式明显提高,去除投入所得后净收益增加2279.4元·hm⁻²,产投比也提高了13.04%(表6)。

3 讨论

3.1 “六位一体”模式对盐碱地土壤水、盐动态的影响

水分对盐碱地改良治理具有重要意义,本研究地块属于低洼地,地下水埋深较浅,灌溉期平均为120 cm(图3a),加之土壤结构不良,黏粒含量高,田间持水量较高,在水分过多的情况下,会促使土壤孔隙被水填满,空气难以进入,土壤含氧量迅速降低,造成植物根系呼吸作用受到抑制,对生长发育产生一系列影响^[26]。而“六位一体”模式有针对性减少了20%灌溉定额,不仅节约了水资源,同时,减轻了土壤的破坏程度,此外,“六位一体”模式下深翻耕作措施有助于打破犁底层,疏松土壤,实现了通气孔隙与持水孔隙并存。本研究下,“六位一体”模式相比常规模式0~15 cm土层体积含水率平均降低了3.05%,且仍处于田间持水量(28.54%)的75%左右,作物表现为不缺水状态(一般认为,当容重 ≥ 1.3 g·cm⁻³,土壤体积含水率比土壤质量含水量高6%,而土壤质量含水量超

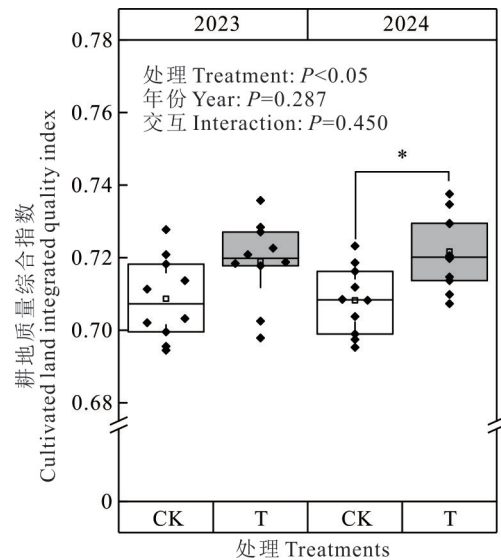


图4 “六位一体”模式对耕地质量综合指数的影响

Fig. 4 Effect of ‘six-aspect integrated’ pattern on cultivated land integrated quality index

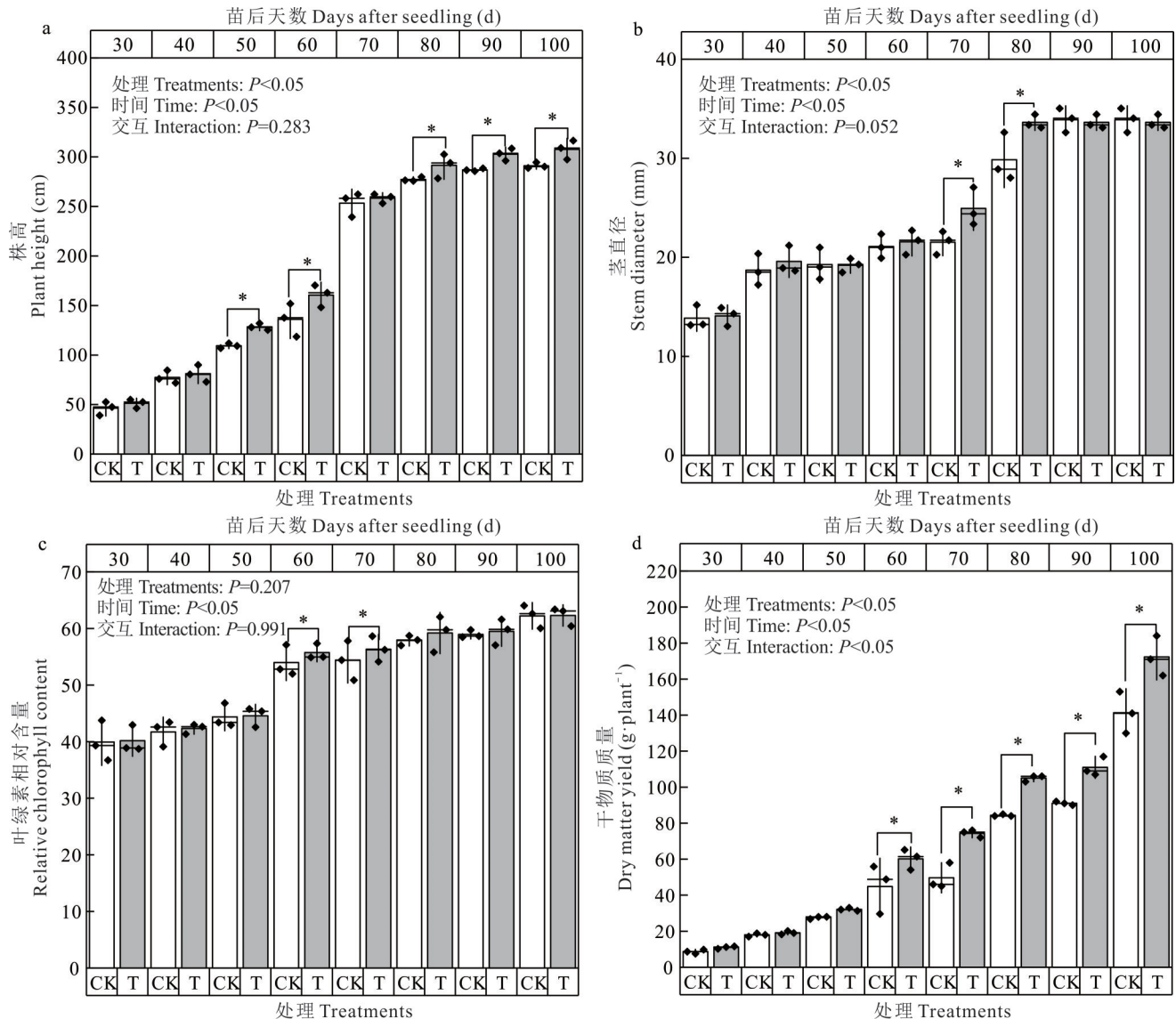


图5 “六位一体”模式对2024年青贮玉米饲用性状的影响

Fig. 5 Effect of 'six-aspect integrated' pattern on forage trait of silage maize in 2024

过田间持水量的60%表示作物不缺水^[27]),这与Chen等^[28]、Li等^[29]、王茂鉴等^[30]的研究结果基本一致,主要原因可能为深翻耕作措施有利于水分下渗,加之灌溉量减少,从而0~15 cm土壤水分有所减少,而该层次土壤不缺水在于土壤本身黏重,持水性良好,另外,深耕切段了毛管孔隙,减少了深层土壤水分通过毛管作用上升到地表而蒸发的损失。

盐碱地盐分移动与分布与水分运动密切相关,在宁夏河套灌区水盐运动中也存在着“盐随水来,盐随水去”的规律^[31]。本研究中,“六位一体”模式下水分降低,同时,相比常规模式0~30 cm土层全盐含量也显著降低了30.42%,显著的降幅效果来源于“六位一体”模式中钙基改良剂中钙离子凭借更高的电荷密度,能置换出土壤胶体上吸附的钠离子,被置换下来的钠离子与改良剂中的阴离子结合,形成可溶性钠盐,后续可通过灌溉淋溶排出土壤,从而削减了土壤中的盐分总量^[32-33]。另外,“六位一体”模式中深翻耕作措施促进盐分随水淋洗,远离植物根系活动范围,间接达成降低土壤耕层全盐的效果^[34]。

3.2 “六位一体”模式对盐碱地土壤质量等级的影响

作物生长发育需要耕地提供养分等物质,改善耕地土壤质量有利于为作物生长发育提供更好的物质基础,从而提高作物产量,保障粮食安全^[35-36]。国内学者对于钙基改良剂消减盐碱障碍、培肥提高土壤养分库容、耕作促

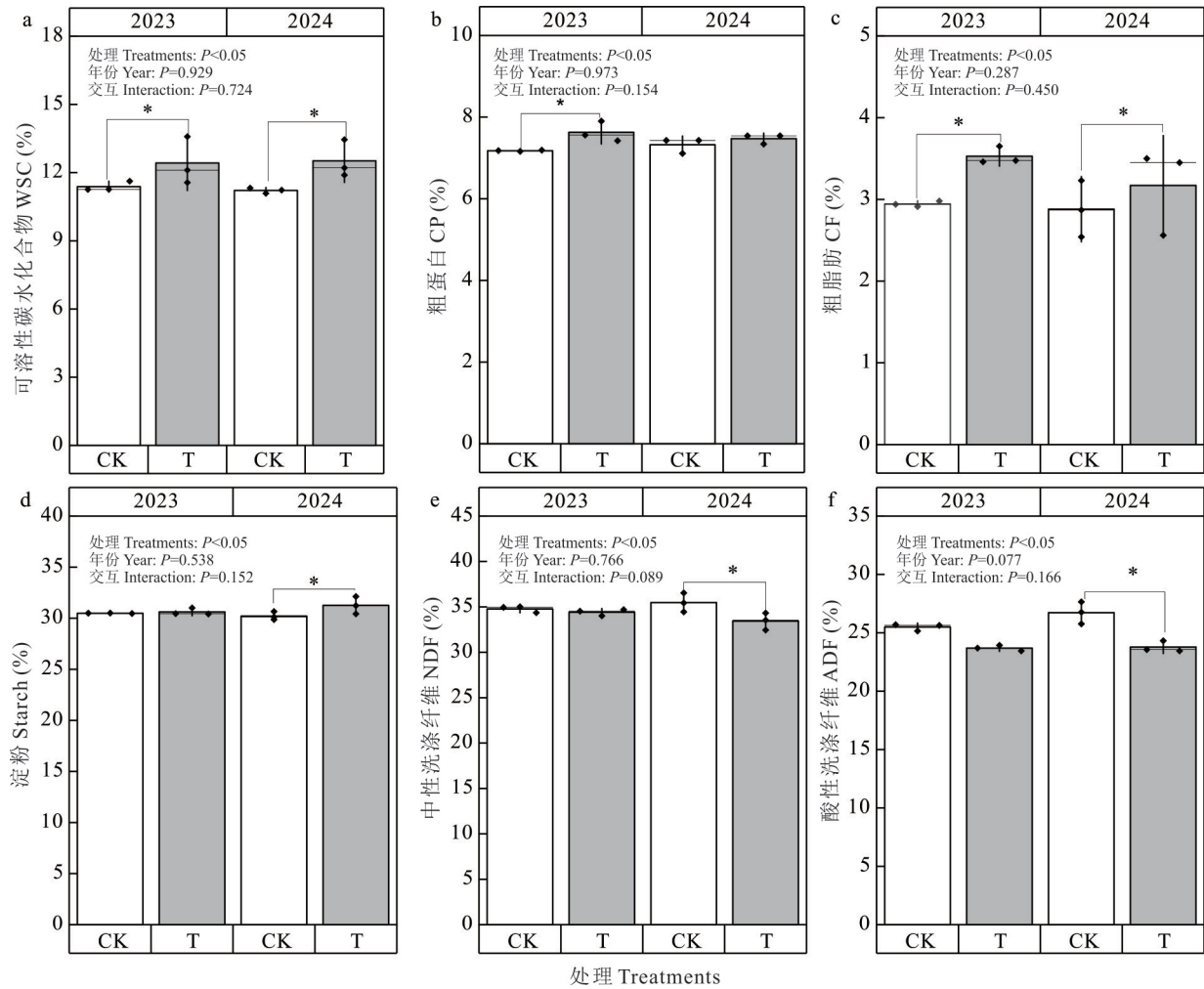


图6 “六位一体”模式对青贮玉米品质的影响

Fig. 6 Effect of 'six-aspect integrated' pattern on quality of silage maize

WSC: Water soluble carbohydrate; CP: Crude protein; CF: Crude fat; NDF: Neutral detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber.

进土壤结构重塑及合理灌排协同促进盐分淋洗等方法研究为我国耕地质量的提升提供了丰富的理论与实践指导^[37-38]。本研究表明,“六位一体”模式在2023与2024年均对土壤结构、养分有改善效果,尤其2024年该模式相比常规模式土壤容重显著降低了6.34%,土壤有机质含量和有效磷含量分别显著增加了12.41%和70.33%,耕地质量也提高了0.56个等级,这与Wu等^[39]在黄土、Liu等^[40]在黑土上的研究结果相一致。分析原因为“六位一体”模式中耕作技术对土壤结构有较好的改善效果,而高碳功能有机肥不仅能够通过直接补充的方法增加土壤速效磷、有效钾含量,更重要的是通过促进微生物活动间接对土壤有机质含量产生显著的提升作用(表5),因此,合理的耕作措施与有机培肥措施对耕地质量提升具有重要意义。

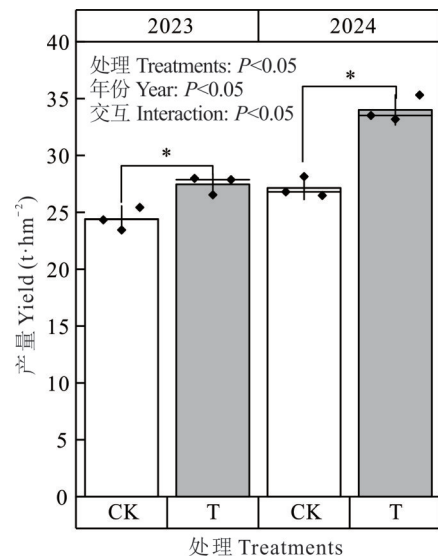


图7 “六位一体”模式对青贮玉米产量的影响

Fig. 7 Effect of 'six-aspect integrated' pattern on yield of silage maize

表 6 “六位一体”模式对经济效益的影响

Table 6 Effect of ‘six-aspect integrated’ pattern on economic benefit

| 年份 Year | 处理 Treatments | 经济产值 Economic output (yuan·hm ⁻²) | 投入 Inputs (yuan·hm ⁻²) | 净收益 Net profit (yuan·hm ⁻²) | 产投比 Output-inputs ratio |
|----------------|------------------|--|---------------------------------------|--|----------------------------|
| 2023 | CK | 13179.6±309.18 | 12750 | 429.6±309.18 | 1.03±0.02 |
| | T | 14830.2±249.89 | 14175 | 655.2±249.89 | 1.05±0.02 |
| 2024 | CK | 14655.6±274.86 | 12750 | 1905.6±274.86 | 1.15±0.02 |
| | T | 18360.0±357.42 | 14175 | 4185.0±357.42 | 1.30±0.03 |
| 处理 Treatments | | * | ns | * | * |
| 年限 Year | | * | ns | * | * |
| 交互 Interaction | | * | ns | * | * |

3.3 “六位一体”模式对青贮玉米产能的影响

产能是饲草饲用性状、产量、品质及经济效益的总称,饲用性状与产量能直接反馈模式优越性,品质更进一步验证了模式对饲草营养价值的提升效果,而经济效益能最终评价模式的适宜性^[41-44]。本研究表明,在饲用性状方面,“六位一体”模式相比常规模式青贮玉米株高与干物质质量显著增加 5.67%、21.93%,这为产量增加创造了良好的基础。通过青贮玉米专家测产,研究结果表明 2023 与 2024 年产量增幅分别为 12.52%、25.28%,从而直接证明了该模式对盐碱地的治理效果。而作为青贮玉米收获判定的最佳指标淀粉含量在“六位一体”模式下提高了 3.46%,这对青贮玉米提前收获有一定的指导意义。另外,可溶性碳水化合物与粗脂肪含量也有所增加,分析得出青贮玉米品质提升在于“六位一体”模式中除了高碳功能堆肥外,专用肥富含营养元素,同时叶面喷施肥料以氨基酸水溶肥为主,这对于品质提升有明显的促进作用,这与 Wang 等^[43]、Moustafa 等^[45]研究结果相一致。然而,以上研究结果可能受到品种的影响,常规模式为“强盛青贮 30”玉米品种,而“六位一体”模式考虑本地青贮收获期存在雨季影响风险,故选用耐盐且粮饲可兼用的“先玉 1225”玉米品种。二者可能存在品质差异,给试验结果带来干扰,本研究将在后期补充两种模式下不同玉米品种品质的比较,对该研究结果进行验证与补充。此外,通过经济效益计算,2023 与 2024 年度“六位一体”模式下相比常规模式经济效益均有所增加,其中,2024 年结果表明“六位一体”模式下相比常规模式提高了 2279.4 元·hm⁻²,这在一定程度上说明了该模式在宁夏中重度盐碱地青贮玉米种植的适宜性。然而,本模式钙基改良剂、高碳生物有机肥及盐碱地缓释促生配方肥均为自研产品,为控制成本,省略工厂化流程诸如造粒、筛分等环节,商品率较低,若投入商品化运行,该成本可能会有所提高;另外,验证周期为 2 年,加之该模式易受盐碱程度、作物种类、灌排系统影响,因此,在未来的研究工作中仍需开展多年限及不同程度、不同作物验证,进一步为模式推广提供更多的科学依据。

4 结论

相比常规模式,连续 2 年开展“六位一体”模式并不会降低 0~30 cm 土壤体积含水率,但降低耕层土壤全盐含量及容重,提高土壤有效磷、有机质含量,进而增加 0.56 个土壤质量等级。此外,“六位一体”模式 2024 年青贮玉米产量可增加 25.28%,淀粉含量也增加了 3.46%,净收益提高 2279.4 元·hm⁻²。因此,该模式可逐步在中度及以上盐碱地开展示范推广。

参考文献 References:

- [1] Yu G R, Hao T X, Yang M. Ecosystem principles and main issues in regional ecological restoration and environmental governance in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 289–304.
于贵瑞, 郝天象, 杨萌. 中国区域生态恢复和环境治理的生态系统原理及若干学术问题. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 289–304.
- [2] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):

837—845.

杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837—845.

- [3] Li L, Li X H, Fan L Q, *et al.* Effects of nitrogen regulation under straw returning on bacterial community diversity in maize rhizosphere soil in saline-alkali land. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(2): 221—227.
李磊, 李晓慧, 樊丽琴, 等. 秸秆还田下氮素调控对盐碱地玉米根际土壤细菌群落多样性的影响. 江苏农业科学, 2024, 52(2): 221—227.
- [4] Huang H Y, Ding Q D, Zhang J H, *et al.* Ground-based hyperspectral inversion of salinization and alkalization of different soil layers in farmland in Yinbei area, Ningxia, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(11): 3073—3084.
黄华雨, 丁启东, 张俊华, 等. 基于地面高光谱的宁夏银北地区农田不同土层盐碱化信息反演. 应用生态学报, 2024, 35(11): 3073—3084.
- [5] Liu X J, Guo K, Feng X H, *et al.* Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(3): 345—353.
刘小京, 郭凯, 封晓辉, 等. 农业高效利用盐碱地资源探讨. 中国生态农业学报, 2023, 31(3): 345—353.
- [6] Yang J S, Yao R J, Wang X P, *et al.* Research on ecological management and ecological industry development model of saline alkali land in the Hetao Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7059—7063.
杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式. 生态学报, 2016, 36(22): 7059—7063.
- [7] Lu C, Zhang H Y, Liu N, *et al.* Increasing soil organic carbon in aggregates and microflora diversity in moderate salt-affected soils through no till combined with plastic film mulching. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 116—124.
卢闯, 张宏媛, 刘娜, 等. 免耕覆膜增加中度盐碱土团聚体有机碳和微生物多样性. 农业工程学报, 2019, 35(21): 116—124.
- [8] Sun S N, Yan X B, Yin F H. Current situation and prospect of improvement and comprehensive utilization for saline-alkali land of coastal tidal flats in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 1—13.
孙盛楠, 严学兵, 尹飞虎. 我国沿海滩涂盐碱地改良与综合利用现状与展望. 中国草地学报, 2024, 46(2): 1—13.
- [9] Tian C Y, Mai W X, Zhao Z Y. Study on key technologies of ecological management of saline alkali land in arid area of Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7064—7068.
田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7064—7068.
- [10] Wang F. A strategy of soil and water resource management based on double desalinization approach in saline-alkali land of arid areas. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 317—321.
王飞. 基于土盐—水盐双分离的旱区盐碱地水土资源管理模式. 水土保持通报, 2019, 39(1): 317—321.
- [11] Tong S P, Liang Z W, Guan F C, *et al.* Biodiversity characteristics and biomass of artificial transplanting *Leymus chinensis* grassland in soda saline-alkali land of Songnen Plain. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 22—27.
全淑萍, 梁正伟, 关法春, 等. 松嫩平原苏打盐碱地羊草人工移栽草地生物多样性特征和生物量. 草地学报, 2019, 27(1): 22—27.
- [12] Li H W, Zheng Q, Wang J L, *et al.* Industrialization of tall wheatgrass for construction of “Coastal Grass Belt”. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(4): 622—631.
李宏伟, 郑琪, 王建林, 等. 发展长穗偃麦草, 建设“滨海草带”. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 622—631.
- [13] Li H W, Zheng Q, Li B, *et al.* Progress in research on tall wheatgrass as a salt-alkali tolerant forage grass. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(5): 190—199.
李宏伟, 郑琪, 李滨, 等. 一种耐盐碱牧草—长穗偃麦草研究进展. 草业学报, 2022, 31(5): 190—199.
- [14] Zhang Y J, Liang J Y, He J S, *et al.* Formation and regulation mechanisms of grassland productivity: A review. *Chinese Science Bulletin*, 2025, 70(11): 1477—1485.
张英俊, 梁俊毅, 贺金生, 等. 草原生产力形成与调控机制研究展望. 科学通报, 2025, 70(11): 1477—1485.
- [15] Dong S, Wang H, Jia Q M, *et al.* Effects of irrigation modes and planting patterns on the growth, yield and economic benefits of silage maize in Hexi Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(4): 1111—1120.
董姗, 王皓, 贾倩民, 等. 灌溉模式与种植方式对河西地区青贮玉米生长、产量和经济效益的影响. 草地学报, 2020, 28(4): 1111—1120.
- [16] Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227—241.
吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨. 土壤学报, 2019, 56(1): 227—241.

- [17] National Soil Survey Office. The second national soil survey tentative specifications. Beijing: China Agriculture Press, 1979.
全国土壤普查办公室. 第二次全国土壤普查暂行技术规程. 北京: 中国农业出版社, 1979.
- [18] Fan L Q, Li L, Wu X. Relationship between soil salinity and groundwater characteristics in saline—alkali land with high groundwater level of Yinbei Irrigation Area. *Water Saving Irrigation*, 2019(6): 55—59, 66.
樊丽琴, 李磊, 吴霞. 银北高水位盐碱地土壤盐分与地下水特征关系分析. *节水灌溉*, 2019(6): 55—59, 66.
- [19] Bao S D. Pedagogical analysis of soils (Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Wang X, Fan L Q, Li L, *et al.* Effects of planting patterns and irrigation quotas on alkalinized solonchak and growth of amorpha. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 88—95.
王旭, 樊丽琴, 李磊, 等. 种植方式和灌溉定额对碱化盐土及紫穗槐生长的影响. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 88—95.
- [21] Fan L Q, Wu X, Li L, *et al.* Portable simple water level measuring device: CN208606853. 2019—. Beijing: Intellectual Property Press of China, 2019.
樊丽琴, 吴霞, 李磊, 等. 一种携带轻便的简易水位测定装置: CN208606853. 2019—. 北京: 知识产权出版社, 2019.
- [22] Zhao M Y, Feng Y P, Shi Y, *et al.* Yield and quality properties of silage maize and their influencing factors in China. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(8): 1655—1666.
- [23] Zhou R H, Yang X L, Wang G Y, *et al.* Determination of conventional nutritional components of experimental animal and compound feed: GB/T 14924.9—2001. Beijing: Standards Press of China, 2001.
周瑞华, 杨晓莉, 王光亚, 等. 实验动物、配合饲料常规营养成分的测定: GB/T 14924.9—2001. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [24] Wang C Z, Ni X Y, Zhu W, *et al.* Seasonal changes of carbon, nitrogen, phosphorus and soluble sugar concentrations in plant of ‘Fengdan’ (*Paeonia ostii*) chronosequence. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(12): 50—60.
汪成忠, 倪雪艳, 朱玮, 等. ‘凤丹’牡丹不同器官 C、N、P 和可溶性糖的季节性变化特征. *林业科学*, 2019, 55(12): 50—60.
- [25] Ren Y, Zeng Y D, He C W, *et al.* Cultivated land quality grade, GB/T 33469—2016. Beijing: Standards Press of China, 2016.
任意, 曾衍德, 何才文, 等. 耕地质量等级, GB/T 33469—2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [26] Chen Z F, Gong A M, Zhang L D, *et al.* Construction of the quality regulation system for provincial scale slope farmland based on quality evaluation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 136—145.
陈正发, 龚爱民, 张刘东, 等. 基于质量评价的省域尺度坡耕地质量调控体系构建. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 136—145.
- [27] Amine B E, Mosseddaq F, Houssa A A, *et al.* Physiological and agronomic effects of regulated-deficit irrigation on soybean grown under arid climatic conditions. *The Crop Journal*, 2025, 13(1): 281—291.
- [28] Chen T Y, Zhang Y F, Fu J, *et al.* Effects of tillage methods on soil physical properties and maize growth in a saline-alkali soil. *Crop Science*, 2021, 61(5): 3702—3718.
- [29] Li W X, Yang J S, Tang C T, *et al.* The temporal-spatial dynamic distributions of soil water and salt under deep vertical rotary tillage on coastal saline soil. *Water*, 2022, 14(21): 3370.
- [30] Wang M J, Shi W, Chang S H, *et al.* Effects of irrigation modes on forage yield, quality and water use of corn-legume intercropping systems in the Hexi irrigation area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 13—29.
王茂鉴, 石薇, 常生华, 等. 灌溉模式对河西灌区禾—豆间作系统饲草产量、品质和水分利用的影响. *草业学报*, 2023, 32(3): 13—29.
- [31] Wang M H, Chen W F, Song X L, *et al.* Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1395—1403.
王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1395—1403.
- [32] Du R Q, Chen J Y, Xiang Y Z, *et al.* Timely monitoring of soil water—salt dynamics within cropland by hybrid spectral unmixing and machine learning models. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(3): 726—740.
- [33] He J M, Zhang Y Q, Liang P, *et al.* Growth, physiological characteristics, and yield of quinoa after application of desulfurized gypsum in saline-alkali land. *Pratacultural Science*, 2025, 42(1): 152—161.
合佳敏, 张永清, 梁萍, 等. 盐碱地施用脱硫石膏后藜麦生长生理特性及产量分析. *草业科学*, 2025, 42(1): 152—161.
- [34] Wei B H, Shen Z Y, Zhou J, *et al.* Study on effect and mechanism of improving saline-alkali soil by fenlong tillage. *Soil*, 2020,

52(4): 699–703.

韦本辉, 申章佑, 周佳, 等. 粉垄耕作改良盐碱地效果及机理. 土壤, 2020, 52(4): 699–703.

- [35] Alghamdi S A, Alharby H F, Abdelfattah M A, *et al.* Spirulina platensis-inoculated humified compost boosts rhizosphere soil hydro-physico-chemical properties and *Atriplex nummularia* forage yield and quality in an arid saline calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 2215–2236.
- [36] Zhang T T, Duan Y, Liang J M, *et al.* Effects of long-term fertilization on farmland fertilities and crop yields in farming-pastoral ecotone. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(9): 1643–1653.
张婷婷, 段玉, 梁俊梅, 等. 长期施肥对农牧交错区农田肥力因子及作物产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(9): 1643–1653.
- [37] Zhu W, Gu S G, Jiang R, *et al.* Saline-alkali soil reclamation contributes to soil health improvement in China. *Agriculture*, 2024, 14(8): 1210.
- [38] Ji L D, Li L, Wang R, *et al.* Effects of organic fertilizers on organic carbon accumulation in alkalized saline soil and silage maize yield. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2024, 17(2): 159–168.
- [39] Wu C X, Yan B S, Jing H, *et al.* Application of organic and chemical fertilizers promoted the accumulation of soil organic carbon in farmland on the Loess Plateau. *Plant and Soil*, 2023, 483(1): 285–299.
- [40] Liu Z X, Gu H D, Liang A Z, *et al.* Conservation tillage regulates the assembly, network structure and ecological function of the soil bacterial community in black soils. *Plant and Soil*, 2022, 472(1): 207–223.
- [41] Hassan H H M, El-Sobky E S E A, Mansour E, *et al.* Influence of preceding crop and tillage system on forage yield and quality of selected summer grass and legume forage crops under arid conditions. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(11): 3329–3344.
- [42] Zhao J D, Song Y T, Xu X L, *et al.* Effects of nitrogen application and mowing on yield and quality of forage in degraded grassland in northwest Liaoning Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 36–48.
赵京东, 宋彦涛, 徐鑫磊, 等. 施氮和刈割对辽西北退化草地牧草产量和品质的影响. 草业学报, 2021, 30(8): 36–48.
- [43] Wang X, Zhang Y, Xu W, *et al.* Amino acid fertilizer strengthens its effect on crop yield and quality by recruiting beneficial rhizosphere microbes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(12): 5970–5980.
- [44] Zhou D L, Shi W, Jiang Z W, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application on leaf enzyme activity and water-nitrogen utilization of silage maize under ridge furrow rainwater harvesting in Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(8): 126–143.
周大梁, 石薇, 蒋紫薇, 等. 沟垄集雨下密度和施氮对黄土高原青贮玉米叶片酶活性及水氮利用的影响. 草业学报, 2022, 31(8): 126–143.
- [45] Moustafa Z R, Moustafa S N, Beshay M G, *et al.* Influence of nitrogen fertilizer on some quality, technological aspects, productivity and amino acids accumulation of sugar beet. *Journal of Plant Production*, 2000, 25(8): 4795–4806.