

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.022

CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.022

于晓,任利东,贾小旭,等.半干旱区耕作模式对砂质土壤结构及玉米生长的影响[J].水土保持学报,2026,40(2):308-317.

YU Xiao, REN Lidong, JIA Xiaoxu, et al. Impact of tillage practices on sandy soil structure and maize growth in semi-arid regions[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2):308-317.

半干旱区耕作模式对砂质土壤结构及玉米生长的影响

于晓¹, 任利东^{2,3}, 贾小旭^{2,3}, 黄明斌⁴

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院地理科学与资源研究所黄河三角洲现代农业工程实验室,北京 100101; 3.中科山东东营地理研究院,山东 东营 257509; 4.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为研究不同耕作模式对半干旱区砂质土壤结构与旱作玉米生长的影响,明确不同耕作模式通过改变土壤结构、土壤持水能力和根系生长性状进而影响作物产量。[方法] 以陕西定边砂黄土为研究对象,设置翻耕(深度 30 cm)、旋耕(深度 15 cm)和免耕+秸秆覆盖 3 种耕作模式,研究其对土壤物理性质及玉米生长的影响。[结果] 1)不同耕作模式显著改变土体穿透阻力垂直构型,翻耕模式土壤穿透阻力通体较小,无明显犁底层,而旋耕与免耕条件下存在明显的亚表层压实;2)0~20 cm 土层土壤体积质量表现为翻耕和旋耕<免耕,而 20~40 cm 为旋耕、免耕>翻耕,40~60 cm 则表现为免耕<翻耕;3)土壤持水能力 0~20 cm 为免耕>旋耕>翻耕,20~40 cm 翻耕持水能力最大,而玉米生长季 0~40 cm 土壤储水量免耕条件下最大;4)翻耕降低耕层穿透阻力,改善土壤通气性,促进玉米根系生长,地上生物量、穗干重分别为旋耕的 1.33、2.10 倍,免耕的 1.94、3.39 倍。[结论] 翻耕通过优化耕层土壤结构和根系生长环境提高玉米产量,而免耕在深层土壤保水方面有优势,但短期而言存在表层土壤紧实度高的问题。

关键词: 耕作模式; 土壤结构; 土壤穿透阻力; 根系构型; 玉米产量

中图分类号:S152.4;S513

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)02-0308-10

Impact of Tillage Practices on Sandy Soil Structure and Maize Growth in Semi-Arid Regions

YU Xiao¹, REN Lidong^{2,3}, JIA Xiaoxu^{2,3}, HUANG Mingbin⁴

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Engineering Laboratory for Yellow River Delta Modern Agriculture, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.Zhongke Shandong Dongying Institute of Geography, Dongying, Shandong 257509, China; 4.College of Soil and Water Conservation (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of different tillage practices on soil structure and rainfed maize growth in sandy soil in semi-arid regions, and to clarify how different tillage practices affect crop yield by altering soil structure, soil water-holding capacity, and root growth characteristics. [Methods] Taking sandy loess in Dingbian County, Shaanxi Province as the research object, three tillage practices were set up: ploughing (depth 30 cm), rotary tillage (depth 15 cm), and no-tillage + straw mulching, to investigate their effects on soil physical properties and maize growth. [Results] 1) Different tillage practices significantly changed the vertical profile of soil penetration resistance. The soil penetration resistance under ploughing was generally low, with no obvious plow pan, while pronounced subsurface compaction was observed under both rotary tillage and no-tillage. 2) Soil bulk density in the 0–20 cm soil layer was lower under ploughing and rotary tillage than

收稿日期:2025-09-09

修回日期:2025-10-15

录用日期:2025-10-20

网络首发日期(www.cnki.net):2025-12-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1900300)

第一作者:于晓(2001—),女,硕士研究生,主要从事土壤物理研究。E-mail: joeyuxiao@163.com

通信作者:黄明斌(1968—),男,博士,研究员,主要从事生态水文和土壤物理研究。E-mail: hmbd@nwafu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

under no-tillage. In the 20–40 cm layer, rotary tillage and no-tillage had higher bulk density than ploughing. In the 40–60 cm layer, no-tillage showed lower bulk density than ploughing. 3) Soil water-holding capacity in the 0–20 cm layer followed the order: no-tillage > rotary tillage > ploughing. In the 20–40 cm layer, ploughing had the highest water-holding capacity. During the maize growing season, soil water storage in the 0–40 cm layer was highest under no-tillage. 4) Ploughing reduced penetration resistance in the ploughing layer, improved soil aeration, and promoted maize root growth. Aboveground biomass and ear dry weight were 1.33 and 2.10 times greater than those under rotary tillage, and 1.94 and 3.39 times greater than those under no-tillage, respectively. [Conclusion] Ploughing improves maize yield by optimizing the soil structure of the ploughing layer and root growth environment, while no-tillage has advantages in water conservation in deep soil but suffers from high surface soil compaction in the short term.

Keywords: tillage practices; soil structure; soil penetration resistance; root architecture; maize yield

Received: 2025-09-09

Revised: 2025-10-15

Accepted: 2025-10-20

Online(www.cnki.net): 2025-12-19

黄土高原是我国典型的生态脆弱区,且是中国水土流失最严峻的区域之一^[1]。该区域年平均降水量少,且年内降水分配极不均匀,超过60%集中于6—8月汛期,导致短时强降雨事件频发。有研究^[2]表明,降雨集中且主要以暴雨形式降落是造成水土流失严重的原因之一。传统农业对土地的不合理利用造成土壤翻动次数多,且休闲期地表裸露,导致土壤水蚀和风蚀加剧^[3]。在土壤理化特性方面,该区广泛分布的黄土母质发育土壤表现出质地偏粗、结构性差、团聚体稳定性低等特征^[4],严重制约土壤的持水与入渗能力。这种气候-土壤系统的互馈机制形成“降水偏少-土壤蓄持能力弱-径流流失加剧”的恶性循环^[1],不仅限制作物生产力的提升,也对区域粮食安全构成持续威胁。因此,通过改善土壤结构,增强土壤蓄水与保水能力,已成为突破该地区生态恢复与农业可持续发展双重困境的关键途径,具有重要的理论价值与实践意义。

耕作模式作为调控土壤质量与作物生产力的核心农艺措施^[5],可通过改变土壤物理性质(如土壤体积质量、孔隙分布、穿透阻力等)显著影响作物生长。现有研究^[6]表明,免耕模式因减少机械扰动,能促进土壤团聚体的形成与稳定,提升总孔隙度并优化通气透水性。免耕配合秸秆还田可显著提高0~20 cm耕层土壤有机碳含量,且效果优于传统耕作与单一免耕处理^[7]。此外,免耕还能减少土壤水分蒸发,提高耕层含水量以促进根系生长,并可降低对土壤结构的干扰,进而有抑制侵蚀、改善表层水热微环境的效果。但长期免耕易导致土壤紧实度升高,阻碍养分垂直迁移,抑制根系下扎与养分吸收^[8],且其适应性因区域环境条件差异而不同。相比之下,翻耕能有效打破犁底层,降低土壤压实度,短期内可显著促

进作物增产^[9]。研究^[10]证实,深翻处理通过降低土壤体积质量,较常规耕作和少耕免耕更利于根系生长扩散与分枝发育,农艺效益更优。翻耕处理较免耕贴茬播种能显著降低表层土壤过饱和含水量,缓解涝害胁迫,进而促进夏玉米中后期株高与叶面积增长;翻耕处理还可提高作物水分利用效率与光合速率,促进光合产物积累及向籽粒的定向分配,为持续增产提供支撑^[11]。但长期单一翻耕也存在明显弊端,如费用昂贵、土壤结构退化、水土流失风险增加等^[12]。

旋耕减小耕作深度,降低机械能耗与农户投入费用,同时其碎土效果好,播种质量高,近年来使用面积逐渐扩大,但极易在浅层形成紧实的“旋耕层”,阻碍下水下渗和根系下扎,导致作物中后期易旱、易倒伏^[13]。免耕秸秆覆盖近年来由于其低成本与环境友好特征受到广泛关注,但二者在黄土高原半干旱区砂质土壤下的效果缺少量化,使该技术在本区域推广缺少理论依据。本研究针对黄土高原半干旱区砂质土壤旱作农业区现有耕作模式效应不明的问题,重点探究现有不同耕作模式对土壤-作物系统的调控机制与产量效应。研究选取翻耕、旋耕和免耕3种耕作模式,揭示耕作模式对土壤垂直构型(包括土壤体积质量、穿透阻力、孔隙结构及水热特征)、玉米根系构型和产量形成的级联效应。通过在陕西定边设置定位试验,采用分层采样与动态监测相结合的方法,重点研究“耕作模式-土壤结构-水热动态-根系响应-产量形成”的传递效应,为构建适合砂黄土旱作区的高效耕作模式提供理论依据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2024年5—10月在陕西省定边县(37.59°N, 107.62°E)进行。定边地处毛乌素沙地南缘,属于典

型的大陆性气候,年平均气温 8.5℃,年平均降水量 323.6 mm,大部分集中在秋季。无霜期平均 141 d,年日照时间 2 743 h。该地区处于风砂土与黄绵土过渡地区,土质较粗,保水性弱,其机械组成砂粒质量分数 57.93%,粉粒质量分数 36.26%,黏粒质量分数 5.81%。种植类型以玉米、马铃薯和杂粮为主。

1.2 试验设计

试验共设 3 种耕作模式:翻耕(深度 30 cm)、旋耕(深度 15 cm)和免耕+秸秆覆盖(1 200 kg/hm²),每个耕作模式设置 3 个重复,共 9 个小区。每小区长

11 m,宽 6 m,小区面积 66 m²,小区之间设置 2 m 保护行道。供试材料为当地常规栽培玉米品种“五谷 168”。所有耕作模式均于 2024 年 5 月耕作作业完成后统一采用机械播种,并于当年 10 月进行收割测产。试验期间,各小区田间管理措施(包括施肥、病虫害防治等)均参照当地玉米高产栽培技术规程实施,并确保各小区田间管理措施完全一致,以排除其他农艺措施对试验结果的影响。

试验田土质为砂壤土,耕作层土壤平均体积质量为 1.63 g/cm³,耕作前土壤理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil at test site

土层深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤类型(USDA)	碳酸钙/(g·kg ⁻¹)	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	pH	电导率/(μS·cm ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
0~20	57.93	36.26	5.81	砂壤土	85.51	6.29	8.79	200.78	4.09	0.23	8.80	107.44
20~40	20.35	63.19	16.46	粉壤土	94.25	7.83	8.73	189.57	3.27	0.17	1.52	113.44

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤理化性质测定 土壤颗粒组成经预处理(去除有机质、碳酸钙)后用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定,获取砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)质量占比,依中国土壤质地标准判定质地类型。采用氯化铵-乙酸铵法测定阳离子交换量(CEC)。采用盐酸中和滴定法测定碳酸钙含量;按土水比 1:2.5(m/V)制悬液,振荡 30 min 静置后,用校准 pH 计测上清液 pH,并经校准电导率仪测定上清液电导率。采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机质;采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提,过滤后加钼锑抗显色剂,700 nm 处测吸光度依标准曲线计算得到有效磷。用 1 mol/L 乙酸铵振荡浸提,过滤后以火焰光度计测钾离子浓度,结合浸提液体积与样品质量计算速效钾。

土壤水分测定利用时域反射法(TDR)水分探针(5TE, Meter)测定,每个处理选择 1 个典型小区,分别在 10、20、40 cm 深度处安装水分探针,测量玉米生长期(7—9 月)土壤水分动态变化。土壤穿透阻力使用 SC900(SC-900, Spectrum Inc Co., Ltd., 美国)数显式土壤紧实度仪测量,测定深度为 0~45 cm,每 2.5 cm 记录 1 个数据,每个处理测定 10 次重复。在玉米灌浆期,采集 10、30、50 cm 深度原装土壤,每个处理采集 3 个重复样品,采用离心机法测定土壤水分特征曲线。由于旋耕深度浅,难以对深层土壤水分特征曲线产生影响,因此未对旋耕处理样本测定土壤水分特征曲线。依次测定在 10、20、40、60、80、100、200、400、600 kPa 吸力下的土壤水体积分数,并使用 Van-Genuchten 模型^[14]进行拟合。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤水体积分数,cm³/cm³;h为土壤基质势,cm; θ_s 为土壤饱和水体积分数,cm³/cm³; θ_r 为土壤残余水体积分数,cm³/cm³; α 为进气值的倒数; m 、 n 为曲线形状参数,且 $m=1-1/n$ 。

通气孔隙(AC)定义为在-100 cm 土壤基质势下土壤中空气孔隙体积,表示在给定条件下土壤中可被空气占据的土壤孔隙^[15]。

$$AC = \theta_s - \theta_{FC} \quad (2)$$

式中: θ_s 为土壤饱和水体积分数,cm³/cm³; θ_{FC} 为田间持水量,cm³/cm³, $\Psi=-100$ cm。

植物可利用水(PAWC)表示土壤储存和为植物提供水分的最大能力^[15]。

$$PAWC = \theta_{FC} - \theta_{PWP} \quad (3)$$

式中: θ_{FC} 为土壤田间持水量,cm³/cm³, $\Psi=-100$ cm; θ_{PWP} 为在 15 000 cm 基质吸力下的植物永久萎蔫点土壤水体积分数,cm³/cm³。

相对田间持水量(RFC)表示土壤相对于总孔隙体积(以 θ_s 表示)储存水分能力,可降低田间持水量因不同质地带来的影响^[15]。

$$RFC = \frac{\theta_{FC}}{\theta_s} \quad 0 \leq REC \leq 1 \quad (4)$$

S 指数表征土壤结构质量的一个综合性参数^[16]。S 指数基于土壤水势为纵坐标、重量含水量为横坐标的土壤特征曲线获取,其中特征曲线通过 van Genuchten 模型^[14]进行拟合:

$$\theta_g = (\theta_{gs} - \theta_{gr}) \times [1 + (\alpha \times \psi)^n]^{-m} + \theta_g \quad (5)$$

式中: α 、 n 和 m 为模型拟合参数; Ψ 为基质势,kPa; θ_g 为重力含水量,g/g; θ_{gs} 、 θ_{gr} 分别为饱和重力含水量和

残余重力含水量, g/g。

S 指数计算公式为:

$$S = -n \times (\theta_{gs} - \theta_{gr}) \times \left(\frac{2n-1}{n-1} \right)^{\left(\frac{1}{n} - 2 \right)} \quad (6)$$

1.3.2 玉米指标测定 在玉米灌浆期测定玉米根系形态特征。每个处理选取 3 株代表性玉米, 去除地上部分, 利用铁锹采集玉米根系, 将根系土壤清洗干净后, 获取根系图像。图像处理采用自动化高通量计算平台(DIRT, <http://dirt.iplantcollaborative.org/>)^[17] 获取根系构型参数, 主要包括根面积、根系密度、最大根系宽度、根系顶角和主根直径。在玉米成熟期测定玉米地上生物量和玉米穗重。每个处理随机选取 10 株玉米, 测定鲜重后置于 75 °C 烘箱干燥 48 h 至恒重并测定干重。

1.4 数据分析

原始数据经 Microsoft Excel 2007 软件整理后, 运用 Origin 2024 软件进行可视化作图。所有统计分析均在 SPSS Statistics 26 软件中完成。数据首先通过单因素方差分析(ANOVA, 一般线性模型)进行检验, 若结果显著, 则随后采用最小显著差法(LSD)进行事后多重比较。统计分析均以 $p < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 耕作模式对土体垂直构型影响

不同耕作模式显著改变砂黄土土壤穿透阻力垂直分布特征(图 1)。

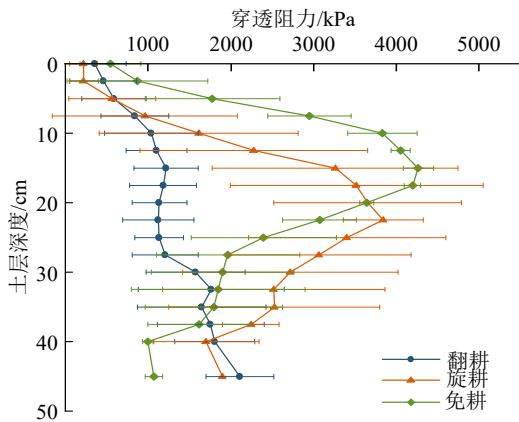


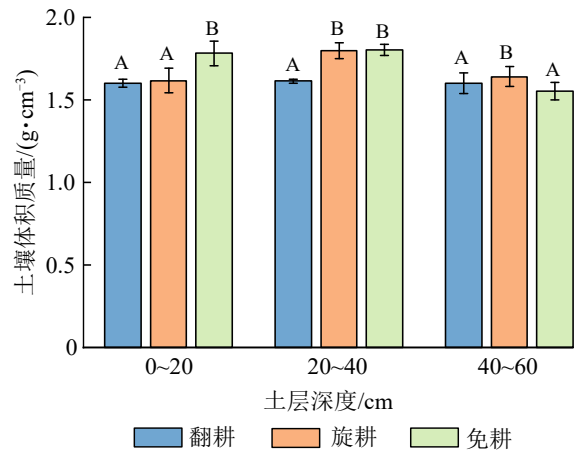
图 1 不同耕作模式下土壤剖面穿透阻力差异

Fig.1 Differences in soil penetration resistance under different tillage practices

翻耕模式下, 土壤穿透阻力随土层深度呈平稳线性增长, 45 cm 深度处达 2 111 kPa, 且剖面无明显犁底层, 为根系下扎提供无障碍环境; 旋耕模式表现出显著的分层差异, 22.5 cm 深度出现穿透阻力峰值(3 841 kPa), 约为表层(226 kPa)的 17 倍, 形成阻碍根系垂直扩展的物理屏障; 免耕模式则呈现表层高、

深层低的规律, 0~20 cm 土层穿透阻力普遍较高, 15 cm 深度达最大值 4 266 kPa, 为表层的 8 倍, 20 cm 以下穿透阻力骤降并低于翻耕与旋耕处理, 深层土壤通透性优势显著。

土壤体积质量的垂直分布趋势与穿透阻力一致(图 2), 进一步印证耕作模式对土壤紧实度的调控效应。在 0~20 cm 表层土壤中, 翻耕[(1.60±0.03)g/cm³]与旋耕[(1.62±0.08)g/cm³]的土壤体积质量无显著差异, 但均显著低于免耕[(1.78±0.08)g/cm³], 表明免耕表层土壤紧实度更高; 20~40 cm 土层中, 旋耕土壤体积质量持续升高至(1.80±0.05)g/cm³, 显著高于翻耕处理, 亚表层压实问题突出; 免耕则表现出表层紧实、深层疏松的特征, 40~60 cm 土层土壤体积质量降至(1.55±0.05)g/cm³, 为 3 种模式中最低, 略低于翻耕处理, 体现出深层土壤结构优势。



注: 图柱上方不同大写字母表示不同耕作模式同一土层深度下土壤体积质量显著性差异($p < 0.05$)。

图 2 耕作模式对土壤体积质量的影响

Fig.2 Effect of tillage practices on soil bulk density

2.2 耕作模式对土壤孔隙结构影响

不同耕作模式对土壤持水能力的调控效应存在显著的土层深度差异(图 3)。在 0~20 cm 表层土壤中, 无论是低吸力段(<100 hPa, 代表大孔隙持水), 还是高吸力段(>10 000 hPa, 代表毛管孔隙持水), 持水能力均呈现翻耕>旋耕>免耕, 表明翻耕对表层土壤持水性能的改善效果最优, 但翻耕在中吸力段(100~10 000 hPa)的持水能力明显低于旋耕与免耕; 20~40 cm 中层土壤中, 翻耕在低吸力段的持水能力显著高于旋耕和免耕, 但在中高吸力段(>100 hPa)的持水能力明显低于旋耕与免耕, 与翻耕导致该层土壤压实、土壤体积质量增大、孔隙连续性降低的结构退化密切相关(图 4); 40~60 cm 深层土壤中, 免耕的持水能力整体优于翻耕, 体现出免耕对

深层土壤保水的独特优势。值得注意的是,在高吸力段($>10\ 000\ \text{hPa}$),3种耕作模式的土壤持水能力

差异不显著,说明耕作对土壤毛管持水的影响主要集中于低吸力区间的大孔隙范围。

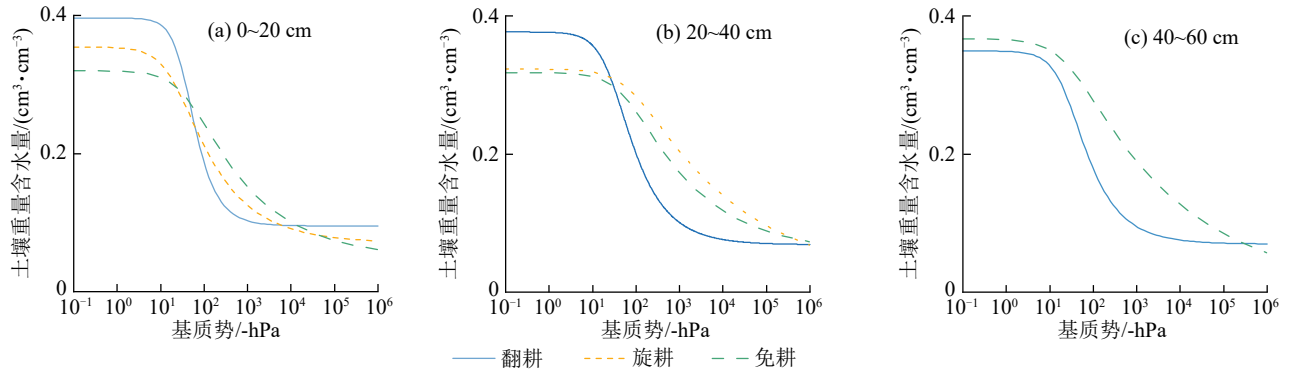


图3 耕作模式对土壤水分特征曲线的影响

Fig.3 Effect of tillage practices on soil water characteristic curves

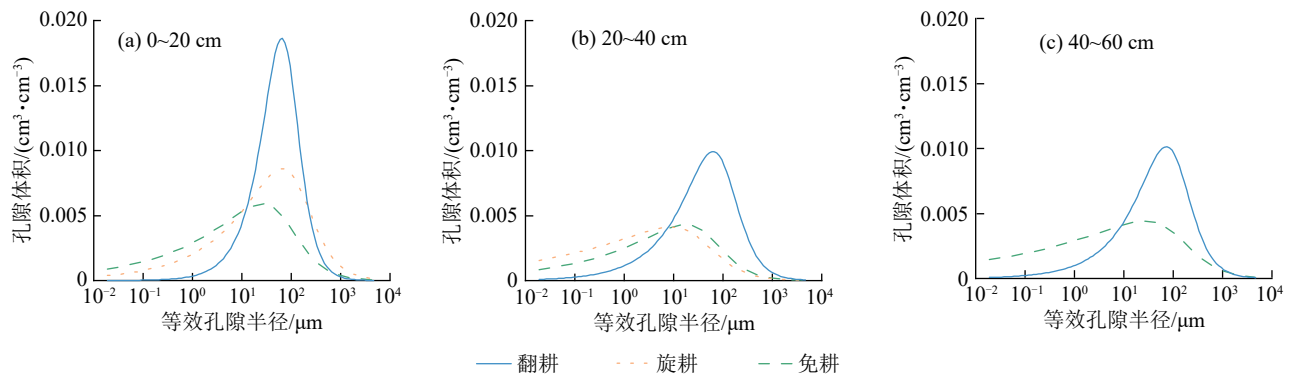


图4 不同耕作模式下土壤孔隙分布特征

Fig.4 Soil pore distribution characteristics under different tillage practices

土壤孔隙特征的变化与持水性能呈现高度协同性(表2)。在0~20 cm表层土壤中,翻耕和旋耕的总孔隙度显著高于免耕($p<0.05$),与土壤体积质量的分布规律完全相反;20~40 cm中层土壤中,翻耕的总孔隙度仍显著高于旋耕与免耕($p<0.05$),进一步解释其低吸力段持水能力更优的原因。在土壤通气性方面,翻耕在0~60 cm全剖面的通气孔隙(AC)均显著高于免耕和旋耕($p<0.05$),表明翻耕能有效提升土壤通气孔隙占比,优化土壤通气环境。

从水分有效性来看,植物可利用水含量(PAWC)的分布呈现明显分层:0~20 cm表层以旋耕和免耕较高(均 $>0.15\ \text{m}^3/\text{m}^3$),翻耕较低($<0.15\ \text{m}^3/\text{m}^3$);20~40 cm中层各处理间差异缩小;40~60 cm深层则以免耕的PAWC最高,显著优于翻耕。相对田间持水量(RFC)的分析显示,翻耕模式下各土层RFC均 <0.6 ,处于水分受限状态;免耕各土层RFC均 >0.7 ,表现为通气受限;旋耕则呈现表层水分受限、深层通气受限的过渡特征。van-Genuchten模型拟合结果表明,翻耕表层土壤的饱和含水量(θ_s)更高;翻耕的土壤结构质量S指数显著高于免耕和旋耕($p<0.05$),从综合物理质量角度证实翻耕对砂黄土结构的改善优势。

2.3 耕作模式对土壤水热影响

不同耕作模式显著改变土壤水分的垂直分布与动态响应特征(图5、图6)。翻耕模式下,土壤含水量随土层深度递增,0~40 cm土层水分体积分数整体低于旋耕与免耕,反映出翻耕表层土壤疏松、水分易蒸发流失的特点;旋耕模式表现出中层富集特征,20 cm土层含水量($9.82\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$)显著高于10、40 cm土层,与其中层土壤孔隙结构更利于水分滞留有关;免耕模式的土壤水分体积分数随土层深度显著增加,40 cm土层达17.10%,显著高于翻耕与旋耕,且10 cm表层土壤水分体积分数对降雨响应最敏感,与降雨强度呈显著正相关($p<0.05$),体现出秸秆覆盖对表层水分的调控作用。

从降雨响应机制来看,雨季来临前(7月24日前),10 cm表层土壤水分体积分数表现为翻耕 $>$ 旋耕 $>$ 免耕;进入雨季前期,翻耕土壤因通气孔隙发达,土壤水分体积分数率先响应降雨并达到峰值($23.91\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$);而雨季中后期,翻耕土壤水分体积分数显著低于旋耕与免耕,反映出其保水能力较弱的弊端。20 cm土层中,旋耕土壤水分体积分数始终保持稳定(约 $9.82\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$),抗降雨波动能力较强;40 cm深层中,免耕土壤水分体积分数平均值($17.10\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$)显著高于其他处理,充分验证其深层保水优势。

表 2 不同耕作模式下土壤物理参数
Table 2 Soil physical properties under different tillage practices

土层深度/cm	处理	总孔隙度/ (m ³ ·m ⁻³)	通气孔隙/ (m ³ ·m ⁻³)	田间持水量/ (m ³ ·m ⁻³)	永久萎蔫 点/%	植物可利用水/ (m ³ ·m ⁻³)	相对田间 持水量	S 值
0~20	翻耕	39.56±1.14b	21.01±8.64b	18.54±9.47a	7.62±7.65a	10.92±1.82a	0.44±0.14a	0.10±0.01b
	旋耕	38.97±3.52b	18.15±4.38ab	20.83±1.08a	8.77±1.03a	12.05±0.75a	0.59±0.10ab	0.06±0.01a
	免耕	32.75±3.52a	8.46±3.99a	24.30±0.78a	9.49±0.84a	14.80±0.22b	0.76±0.07b	0.10±0.01b
20~40	翻耕	39.06±0.55b	20.03±1.34b	19.02±1.90a	7.07±0.77a	11.95±1.30a	0.52±0.03a	0.09±0b
	旋耕	32.18±2.19a	3.69±0.96a	28.49±1.72b	13.13±0.61c	15.36±1.11b	0.88±0.06b	0.04±0a
	免耕	31.93±1.56a	5.56±1.84a	26.37±0.30b	11.17±0.51b	15.20±0.42b	0.83±0.06b	0.04±0.01a
40~60	翻耕	39.57±2.95a	21.99±3.91b	17.57±4.46a	7.40±4.96a	10.17±1.99a	0.50±0.06a	0.08±0b
	免耕	41.43±2.48a	13.31±2.84a	28.12±0.38b	12.41±0.49a	15.71±0.87b	0.76±0.07b	0.04±0.01a

注:表中数据为平均值±标准差;n=3;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(p<0.05)。下同。

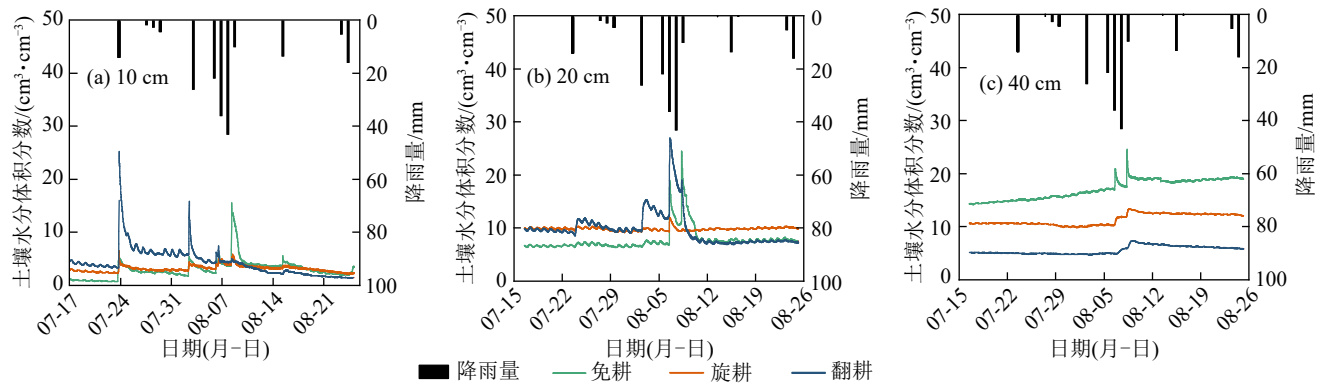


图 5 不同耕作模式下土壤水分动态变化

Fig.5 Dynamic changes of soil moisture under different tillage practices

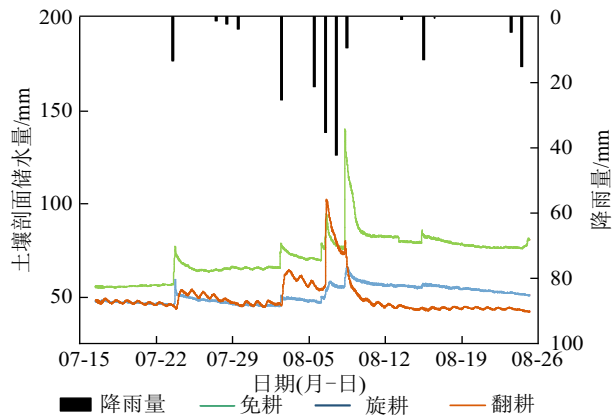


图 6 不同耕作模式下土壤 0~40 cm 剖面储水量随时间变化情况

Fig.6 Temporal variation of soil profile water storage in 0-40 cm layer under different tillage practices

土壤温度的垂直差异同样受耕作模式调控。0~10 cm 表层土壤中,各模式温度平均值相近,为 24.80~25.20 °C,但免耕的最高温度(40.79 °C)显著高于旋耕(36.90 °C)和翻耕(36.29 °C),与秸秆覆盖减少热量散失及提升表层温度有关;20 cm 土层温度呈现免耕>翻耕>旋耕的规律;40 cm 及以下深层土壤中,免耕温度平均值(21.10 °C)仍高于翻耕(20.90 °C)和旋耕(20.70 °C),且温度波动幅度随土层深度增加

而减小,免耕深层土壤的温度稳定性更优,可为根系生长提供更稳定的热环境。

2.4 耕作模式对作物根系构型和产量的影响

耕作模式通过改变土壤物理环境,显著改善玉米根系构型。在翻耕模式下,玉米的最大根系宽度(32.5 cm)、根系密度(18.2 mg/cm³)及主根直径(2.3 mm)均显著优于其他处理,形成更发达的立体根系网络,为水分和养分的吸收提供更大的空间;旋耕模式的根系表现出表层集中特征,根系顶角较大,但 20 cm 以下高穿透阻力限制根系下扎,导致深层根系分布稀少;免耕模式受表层土壤紧实影响,0~20 cm 表层根系生长受抑,而 20 cm 以下因土壤疏松,深层根系分布略优于旋耕,但整体根系发育仍弱于翻耕(表 3)。

产量及其构成因素的差异与根系构型高度匹配(图 7)。翻耕的玉米地上生物量、穗干重分别为旋耕的 1.33、2.10 倍,为免耕的 1.94、3.39 倍,产量优势显著;旋耕与免耕的产量表现均较差,且免耕的产量最低。综合来看,在本研究的砂黄土旱作条件下,翻耕通过优化根系生长环境与土壤水热条件,成为提升玉米产量的最优耕作模式。

表 3 不同耕作处理玉米根系构型指标
Table 3 Root architecture parameters of maize under different tillage practices

耕作模式	根面积/cm ²	根系密度/(mg·cm ⁻³)	最大根系宽度/cm	根系顶角/(°)	主根直径/mm
翻耕	349.55±83.26a	3.72±1.10a	31.84±9.14b	37.24±3.31a	0.76±0.080 0a
旋耕	308.79±67.79a	3.25±1.02a	28.60±5.74a	40.34±3.15a	0.60±0.031 9a
免耕	375.93±36.19a	3.51±0.50a	26.55±2.24a	37.74±2.03a	0.61±0.000 2a

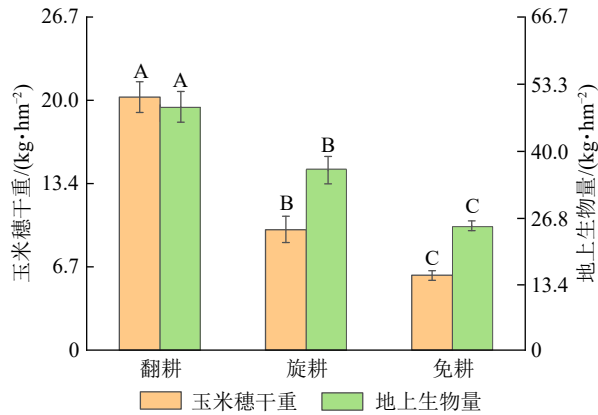


图 7 不同耕作模式下玉米生物量与产量差异

Fig.7 Differences in maize biomass and yield under different tillage practices

3 讨论

3.1 耕作模式对土壤孔隙结构与水分运移的影响

在半干旱区砂黄土农业系统中,土壤结构直接调控土壤水分运移与作物生长^[18]。本研究旨在揭示不同耕作模式对粗质砂黄土土壤孔隙结构及水分特性的影响,并为旱区农业节水增效提供理论数据支撑。不同耕作模式显著重塑砂黄土剖面土壤结构。

翻耕通过 30 cm 深度机械扰动,打破上层土壤紧实结构,使 0~60 cm 土层土壤体积质量均维持在 1.60 g/cm³。这种结构构建了高效水分传输通道,在低吸力段(<100 hPa)持水能力显著高于旋耕和免耕(图 3)。相比之下,免耕因表层缺乏疏松,砂黄土颗粒易胶结形成板结层(0~20 cm 土层土壤体积质量为 1.78 g/cm³),孔隙度低,限制初期水分入渗^[19],增加根系穿透阻力。旋耕虽能破碎表层,但耕作深度不足以降低耕层下的高体积质量状态,土壤通气透水性受限。值得注意的是,40~60 cm 深层砂黄土中,持水能力反超翻耕,体现出表层板结深层疏松的独特构型优势^[5],而翻耕可能对耕层以下进一步形成压实隔层。

不同耕作模式下土壤水分对降雨反馈的差异显著。翻耕对降雨初期响应迅速,但砂黄土质地疏松导致后期水分流失快;免耕则表现出深层储水的优势,40~60 cm 土层含水量峰值达 17%,且对降雨响应敏感,这源于免耕的“零扰动”策略,即表层板结层虽暂时阻碍初期入渗,但 40~60 cm 孔隙连通性增强,持水能力提升。与长期免耕促进砂黄土团聚体稳定性的结论

一致^[20]。秸秆覆盖能够减少土壤水分的蒸发,增强土壤蓄水和供给作物水分的能力^[21]。这种结构使免耕在降水稀少的旱区能维持较高的土壤水分,为作物后期生长提供保障,但其表层板结可能影响出苗与作物根系生长。翻耕使土壤耕层过于疏松,导致土壤表层蓄水保水能力变差,水分蒸发流失较快^[22]。综上所述,相比于翻耕,当下层压实隔层阻碍较小时,免耕秸秆覆盖更有利于旱区作物水分高效利用。

3.2 耕作模式对作物生长的影响

耕作模式通过调控土壤物理性状直接或间接影响根系生长发育,进而影响作物生长^[23]。穿透阻力是影响农作物生长的重要因素,而合理的耕作管理是调控土壤穿透阻力的有效手段。本研究中,翻耕通过降低全层土壤穿透阻力,为根系营造无障碍生长环境,其最大根系宽度(32.5 cm)、根系密度(18.2 mg/cm³)和主根直径(2.3 mm)均优于其他耕作模式(表 3)。与表 4 中穿透阻力整体和作物产量呈负相关的规律一致,主要是由于适宜的土壤紧实度能增加作物根系穿透力和土壤蓄水渗透能力,提高土壤水肥利用率^[24]。而根系构型优势直接转化为地上部生物量优势,即翻耕玉米穗干重(182.5 g/株)分别是旋耕、免耕的 2.1、3.4 倍,证实了在砂黄土区适宜的耕作深度可改善耕层结构,促进根系合理分布与活力提升,为地上部生长及光合特性提供物质保障^[25]。值得注意的是,翻耕土壤通气孔隙(0.28 m³/m³)较免耕提高 23.1%,此通气优势在旱作条件下可增强根系呼吸作用,进一步促进养分吸收^[26],表明深耕能显著增加根系长度和表面积,与本研究结果一致。砂黄土经翻耕后土壤体积质量适宜,孔隙连通性好,为根系渗透生长提供优越条件^[5],从而促进地上部生长与产量形成^[23]。

免耕因长期无机械扰动,砂黄土表层易板结,造成土壤体积质量变大,土壤通透性变差^[27-28],土壤体积质量和穿透阻力升高,不利于根系初期生长及水分养分吸收^[29],导致玉米地上生物量和穗干重最小。但免耕促进的连续孔隙系统(如生物孔)可增强根系垂直渗透^[5],且 40~60 cm 深层疏松土壤(土壤体积质量为 1.55 g/cm³)为根系提供延伸空间。免耕+秸秆覆盖根面积较高,可能因秸秆覆盖提升砂黄土有机质含量,改善团聚体结构并降低密度,从而促进根系

生长^[30]。然而,表层板结导致的出苗率降低和早期水分胁迫,仍是制约免耕产量的关键。在旱作砂黄土区,若能解决表层土壤问题,免耕因其深层保水优势,在干旱年份可展现出稳产潜力。

鉴于本研究持续时间短,为进一步全面了解半干旱区耕作模式对土壤结构和作物产量的影响,搜集了我国干旱区相关的其他研究(表 4)。文献分析显示,3种耕作模式因耕作持续年限不同而表现出显著差异,例如,持续 4 a 的耕作后,免耕和旋耕相比较翻耕处理,土壤穿透阻力和土壤体积质量都出现降低^[24]。表明翻耕虽然能有效降低土壤紧实度,但翻

耕存在扰动土壤结构、降低土壤抗压实性能及增加机械压实风险^[31]。作物产量整体上表现出免耕增产的趋势,但在东北黏壤土区,降雨相对较高的条件下免耕产量相对于翻耕出现降低现象^[5]。同样,本研究区虽然降雨仅有 323.6 mm,但是由于本试验田块存在明显的亚表层压实隔层,免耕和旋耕处理的玉米产量不及翻耕处理。

因此,在选择耕作处理时不仅需要考虑区域主要制约因素,同时需要考虑地块尺度可能存在的其他主导性制约因素,进而提出多种耕作措施搭配的轮耕等合理破障措施。

表 4 耕作类型对干旱半干旱区旱作农业土壤结构及作物生长影响

Table 4 Summary of literature on effects of tillage practices on soil structure and crop growth in rainfed agriculture of arid and semi-arid regions

研究区	土壤类型	降雨量/mm	耕作类型	土层深度/cm	穿透阻力	土壤体积质量	含水量	团聚体稳定性	作物类型	产量	参考文献
新疆图木舒克市	粉砂壤土	38	旋耕	—	—	↑	↓	—	棉花	↓	[23]
				0~10	↓	↑	—	—			
			免耕	10~20	↓	↑	—	—	玉米	↑	
				20~30	↓	↓	—	—			
甘肃省白银市	灰钙土	259	旋耕	30~40	↓	↓	—	—	玉米	↓	[24]
				0~10	↓	↓	—	—			
				10~20	↓	↓	—	—			
				20~30	↓	↑	—	—			
山西省晋中市	黏壤土	388	免耕	0~60	—	—	—	—	玉米	↑	[37]
				0~10	—	↑	↑	↑			
			免耕	10~20	—	↑	—	—	玉米	↑	
				20~40	—	↑	↑	—			
内蒙古呼伦贝尔市	黑土	458	旋耕	40~60	—	↑	↑	↓	玉米	—	[22,38]
				0~10	—	↑	↑	↑			
				10~20	—	↑	↑	—			
				20~40	—	↑	—	—			
黑龙江省哈尔滨市	粉壤土	500	免耕	0~10	↑	↑	↑	↑	大豆	↓	[5]
				10~20	↑	↑	↑	↑			
				20~30	↑	↑	↓	↑			
陕西省渭南市	黑垆土	520	免耕	0~10	—	—	—	↑	小麦	↑	[21]
				10~20	—	—	—	—			
				20~35	—	—	—	—			
				35~50	—	—	—	↑			

注:对照处理为翻耕。

4 结论

1)翻耕是研究区优化土壤结构、提升玉米产量的较好耕作模式。翻耕通过深度机械扰动,有效打破土体障碍层;0~60 cm全剖面通气孔隙占比最高,为根系生长营造疏松通气的环境。该条件下玉米根系构型最优,最大根系宽度、根系密度及主根直径均

显著优于其他处理,最终转化为显著产量优势。但其长期效应仍需进一步探究。

2)免耕+秸秆覆盖具有深层保水优势,但表层土壤紧实问题制约其生产力。免耕+秸秆覆盖对土壤结构的调控呈“表层劣化、深层优化”的显著分层特征,然而表层紧实导致其根系发育整体较弱,玉米

产量最低。在砂黄土半干旱区推广免耕+秸秆覆盖,需配套表层浅松等改良措施以破解板结制约。

3)旋耕因耕作深度不足,存在亚表层压实缺陷,综合效应介于二者之间。旋耕虽能降低0~20 cm表层土壤体积质量,与翻耕无显著差异,但15 cm的耕作深度无法改善深层土壤结构,亚表层土壤压实明显,形成阻碍根系下扎的物理屏障。该模式下玉米根系集中于表层,深层分布稀少。旋耕难以满足砂黄土对深层土壤通气性和透水性的需求。

参考文献:

- [1] 张俊丽, TANVEER S K, 薛菁, 等. 耕作方式对旱作农田土壤水热特性及夏玉米产量的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(10):1446-1452.
ZHANG J L, TANVEER S K, XUE J, et al. Effects of different tillage systems on soil temperature and moisture in dryland field and summer maize yield[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(10):1446-1452.
- [2] 王甜, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区紫色土坡地典型暴雨径流氮磷流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(3):367-374.
WANG T, XIAO W F, HUANG Z L, et al. Characteristics of typical rainstorm-runoff nitrogen and phosphorus loss on purple soil slope in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(3):367-374.
- [3] 彭正凯, 杨宏伟, 宋展树, 等. 耕作措施对陇东旱塬玉米产量的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250325.2124.004>.
PENG Z K, YANG H W, SONG Z S, et al. Effects of tillage practices on maize yield Longdong dryland [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250325.2124.004>.
- [4] 李曼, 何昊, 吴东丽, 等. 气候变化背景下黄土高原土壤侵蚀时空演变[J]. 生态学报, 2025, 45(16):7793-7807.
LI M, HE H, WU D L, et al. The spatial-temporal evolution of soil erosion in the Loess Plateau under the context of climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(16):7793-7807.
- [5] 杨宏泽, 付强, 李天霄, 等. 耕作模式对东北黑土地大豆土壤理化特性及根系生长发育的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3):288-302.
YANG H Z, FU Q, LI T X, et al. Effects of tillage practices on soil physicochemical properties and root growth of soybean in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3):288-302.
- [6] 刘敏, 赵财, 范虹, 等. 长期间作及免耕对土壤物理性状及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(2):28-35.
LIU M, ZHAO C, FAN H, et al. Effects of long-term intercropping and no-tillage on soil physical properties and crop yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2):28-35.
- [7] ZHANG W S, LI H, LIANG L Y, et al. An integrated straw-tillage management increases maize crop productivity, soil organic carbon, and net ecosystem carbon budget[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 340:e108175.
- [8] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2):439-444.
CHEN X W, ZHANG X P, LIANG A Z, et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2):439-444.
- [9] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田与化肥配施对汉中盆地稻麦轮作农田土壤固碳及经济效益的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(2):259-268.
WU Y H, HAO X S, TIAN X H, et al. Effect of straw returning combined with NPK fertilization on soil carbon sequestration and economic benefits under rice-wheat rotation in Hanzhong basin [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(2):259-268.
- [10] RAMADHAN M N. Yield and yield components of maize and soil physical properties as affected by tillage practices and organic mulching [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(12):7152-7159.
- [11] 陈金, 庞党伟, 韩明明, 等. 耕作模式对土壤生物活性与养分有效性及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(8):1245-1253.
CHEN J, PANG D W, HAN M M, et al. Effects of tillage patterns on soil biological activity, availability of soil nutrients and grain yield of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(8):1245-1253.
- [12] DONG L, WANG J, LI J R, et al. Assessing the impact of grazing management on wind erosion risk in grasslands: A case study on how grazing affects aboveground biomass and soil particle composition in Inner Mongolia [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 40:e02344.
- [13] 梁改梅, 吴文慧, 李紫莲, 等. 黄土保护性耕作对农田土壤结构、水分及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6):369-382.
LIANG G M, WU W H, LI Z L, et al. Effects of conservation tillage in loess soil on farmland soil structure, water content, and maize yield [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(6):369-382.
- [14] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5):892-898.
- [15] WHITE R E. Principles and Practice of Soil Science: The soil as a natural resource [M]. 4th Edition. England: Blackwell Pub., 2006.
- [16] REYNOLDS W D, DRURY C F, TAN C S, et al.

- Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality[J]. *Geoderma*, 2009, 152(3/4):252-263.
- [17] DAS A, SCHNEIDER H, BURRIDGE J, et al. Digital imaging of root traits (DIRT): A high-throughput computing and collaboration platform for field-based root phenomics[J]. *Plant Methods*, 2015, 11(1):e51.
- [18] 黄龙,包维楷,李芳兰,等.土壤结构和植被对土壤微生物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(6):1725-1731. HUANG L, BAO W K, LI F L, et al. Effects of soil structure and vegetation on microbial communities[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(6):1725-1731.
- [19] WANG Y X, CHEN S P, ZHANG D X, et al. Effects of subsoiling depth, period interval and combined tillage practice on soil properties and yield in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(6):1596-1608.
- [20] ÇELİK İ, GÜNAL H, ACAR M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185:17-28.
- [21] 张霞,张育林,刘丹,等.种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3):250-261. ZHANG X, ZHANG Y L, LIU D, et al. Effects of planting methods and tillage systems on soil structure and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3):250-261.
- [22] 张佳倩,李福,孙峰成,等.秸秆还田条件下不同耕作方式对玉米田土壤物理性状的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(3):759-772. ZHANG J Q, LI F, SUN F C, et al. Effects of different tillage methods on soil physical properties under the condition of straw returning[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(3):759-772.
- [23] 刘洪光,李智杰,李玲,等.粉垄深松深耕改善新疆重度盐碱土理化性质和棉花产量及其后效[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(13):45-57. LIU H G, LI Z J, LI L, et al. Effects of deep vertical rotary tillage depth on the improvement of soil physico-chemical properties and cotton yield in the current year and the following year in severe saline land in southern Xinjiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(13):45-57.
- [24] 王成宝,温美娟,杨思存,等.耕作方式对灌耕灰钙土层物理性质和玉米产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3):170-177. WANG C B, WEN M J, YANG S C, et al. Effects of different tillage practices on physical characteristics of irrigated sierozem soil and maize yield [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3):170-177.
- [25] 赵继浩,李颖,钱必长,等.秸秆还田与耕作方式对麦后复种花生田土壤性质和产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):272-280. ZHAO J H, LI Y, QIAN B C, et al. Effects of straw return and tillage on soil properties and yield of multi-cropping peanut after wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):272-280.
- [26] 王永慧,轩清霞,王丽丽,等.不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4):876-884. WANG Y H, XUAN Q X, WANG L L, et al. Soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities under different tillage methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4):876-884.
- [27] 李娜娜,李志强,黄学芳,等.不同耕作方式下秸秆还田对晋中玉米田水分时空分布及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5):312-319. LI N N, LI Z Q, HUANG X F, et al. Effects of straw returning on spatio-temporal distribution of water and maize yield under different tillage methods in Jinzhong [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):312-319.
- [28] 刘雅杰,白东星,张向前,等.耕作方式对大兴安岭南麓黑土农田土壤物理特性及有机碳储量的影响[J]. *土壤通报*, 2025, 56(2):409-419. LIU Y J, BAI D X, ZHANG X Q, et al. Effects of tillage methods on soil physical characteristics and organic carbon storage in soil farmland at the southern foot of the Daxing'an Mountains [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(2):409-419.
- [29] YANG H K, WU G, MO P, et al. The combined effects of maize straw mulch and no-tillage on grain yield and water and nitrogen use efficiency of dry-land winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197:e104485.
- [30] 王永亮,胥子航,李申,等.不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(5):1312-1324. WANG Y L, XU Z H, LI S, et al. Effects of different mulching measures on moisture and temperature of soil and yield and water use efficiency of spring maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5):1312-1324.
- [31] 蒋发辉,王玥凯,郭自春,等.“旋松一体”耕作对潮土和砂姜黑土物理性质及作物生长的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(4):801-810. JIANG F H, WANG Y K, GUO Z C, et al. Effect of "rotary-subsoiling" tillage on soil physical properties and crop growth in fluvo-aquic soil and Shajiang black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4):801-810.