

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.033

CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.033

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 Gaimei, WU Wenhui, LI Zilian, 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.

## 黄土保护性耕作对农田土壤结构、水分及玉米产量的影响

梁改梅<sup>1</sup>, 吴文慧<sup>1,2</sup>, 李紫莲<sup>1,2</sup>, 黄学芳<sup>1</sup>, 陈稳良<sup>2</sup>, 李娜娜<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 农业农村部有机旱作农业重点实验室(部省共建), 有机旱作农业山西省重点实验室, 太原 030031; 2. 山西农业大学农学院, 太原 030031)

**摘要:** [目的] 通过6 a田间定点定位试验, 探究不同保护性耕作处理对土壤结构、水分贮蓄、玉米产量、降水及水分利用效率的影响, 揭示不同处理下土壤结构、作物水分利用和产量间的内在关联。[方法] 试验共设置传统旋耕(TR)、旋耕+秸秆机械粉碎还田(TRS)、深松+秸秆机械粉碎还田(DLS)和免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖(NTC)4种处理。[结果] 与TR相比, DLS和TRS均减小表层至30 cm的土壤体积质量及紧实度, NTC提升表层0~20 cm土层土壤体积质量和紧实度。相比之下, DLS增加深层20~40 cm土层土壤毛管孔隙度, 更有利于降水的入渗和保持。3种保护性耕作处理均较传统旋耕提高土壤力稳性和水稳性团聚体的平均重量直径、几何平均直径和 $>0.25$  mm团聚体含量, 提高其稳定性, 降低团聚体破坏率。与传统旋耕相比, TRS、DLS和NTC处理的0~200 cm休闲期蓄水量分别增加7.7、12.8、12.0 mm, 蓄水效率分别提高9.3%、17.5%和17.2%。尽管受不同年份休闲期降雨量的影响, 土壤含水量波动变化, 3种保护性耕作下播前土壤含水量均得到有效提升, 0~20 cm土层表现为 $NTC > DLS > TRS > TR$ , 20~40 cm土层表现为 $DLS > TRS > NTC > TR$ 。DLS处理提高深层土壤含水量, 更优于其他2种保护性耕作, 6 a平均较传统旋耕显著增产9.3%, PUE提高10.2%, WUE提高11.2%, 尤其在2019年极度干旱年份增强抗旱早性, 增产增效幅度更大。相关性分析表明, 产量与播前土壤含水量及降水利用效率呈显著正相关, 而与体积质量、孔隙度及土壤团粒结构无显著相关。休闲期土壤蓄水和 $>0.25$  mm的水稳性团聚体及播前0~20 cm土层土壤含水量呈显著正相关, 而播前0~20 cm土层土壤含水量又与土壤团粒稳定性指标MWD、GMD和 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量均呈显著正相关, 而与团聚体破坏率则呈显著负相关。[结论] 保护性耕作能有效改善耕层土壤结构特性, 提高休闲期蓄水效率, 增加播前土壤含水量, 提高玉米产量、降水和水分利用效率, 尤其深松+秸秆机械粉碎还田能最大化实现土壤结构优化与作物产量增长的协同效应, 是一种最为有效的耕作措施, 研究结果可为黄土高原半干旱区推广实施保护性耕作提供理论依据。

**关键词:** 保护性耕作; 玉米; 土壤结构; 产量; 水分利用

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0369-14

### Effects of Conservation Tillage in Loess Soil on Farmland Soil Structure, Water Content, and Maize Yield

LIANG Gaimei<sup>1</sup>, WU Wenhui<sup>1,2</sup>, LI Zilian<sup>1,2</sup>, HUANG Xuefang<sup>1</sup>, CHEN Wenliang<sup>2</sup>, LI Nana<sup>1</sup>

(1. Shanxi Institute of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University, Key Laboratory of Organic Dryland Agriculture (Co-construction by Ministry of Agriculture and Rural Affairs and Shanxi Province), Shanxi Key Laboratory of Organic Dryland Farming, Taiyuan 030031, China; 2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** [Objective] Through a 6-year fixed-site field experiment, this study investigates the effects of different conservation tillage treatments on soil structure, water storage, maize yield, precipitation, and water use efficiency, thereby revealing the intrinsic relationships between soil structure, crop water use, and yield under

收稿日期: 2025-06-02

修回日期: 2025-07-12

录用日期: 2025-07-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-26

资助项目: 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202101140601026); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901101-1); 山西省回国留学人员科研项目(2022-110); 山西省基础研究计划项目(202103021224162, 202403021222102); 中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目(YDZJSX2025D047)

第一作者: 梁改梅(1979—), 女, 博士, 研究员, 主要从事旱作栽培与耕作研究。E-mail: lgaimai@sxau.edu.cn

通信作者: 李娜娜(1981—), 女, 博士, 研究员, 主要从事旱作栽培与耕作研究。E-mail: linana2002@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

different treatments. [**Methods**] Four tillage treatments were set up: traditional rotary tillage (TR), rotary tillage+ mechanically crushed straw incorporation (TRS), deep loosening+ mechanically crushed straw incorporation (DLS), and no tillage+ mechanically crushed straw stubble mulching (NTC). [**Results**] Compared with TR, both DLS and TRS reduced soil bulk density and compaction in the 0~30 cm surface layer, while NTC increased soil bulk density and compaction in the 0~20 cm surface layer. DLS increased soil capillary porosity in the 20~40 cm subsoil layer, which was more conducive to rainfall infiltration and retention. Compared to TR, three conservation tillage treatments all improved mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and the content of >0.25 mm aggregates, thereby enhancing their stability and reducing aggregate breakdown rate. Compared with TR, TRS, DLS, and NTC treatments increased soil water storage in the 0~200 cm layer during the fallow period by 7.7, 12.8, and 12.0 mm, respectively, while improving water storage efficiency by 9.3%, 17.5%, and 17.2%, respectively. Despite fluctuations in soil water content due to varying precipitation during the fallow period in different years, the soil water content before sowing under the three conservation tillage treatments was effectively enhanced. In the 0~20 cm soil layer, the ranking was NTC > DLS > TRS > TR, and in the 20~40 cm soil layer, the ranking was DLS > TRS > NTC > TR. The DLS treatment increased the subsoil-layer water content, outperforming the other two conservation tillage practices. Over six years, it significantly increased average yield by 9.3%, precipitation use efficiency by 10.2%, and water use efficiency by 11.2% compared with TR. Especially in the extremely dry year of 2019, DLS enhanced drought resistance resilience, resulting in greater yield gain and efficiency improvement. Correlation analysis showed that maize yield was significantly positively correlated with soil water content before sowing and precipitation use efficiency, but not significantly correlated with bulk density, porosity, or soil aggregate structure. Soil water storage during the fallow period and the content of >0.25 mm water-stable aggregates were significantly positively correlated with soil water content before sowing in the 0~20 cm soil layer. Furthermore, soil water content before sowing in the 0~20 cm layer showed significant positive correlations with the soil aggregate stability indicators, including MWD, GMD, and the content of >0.25 mm, water-stable aggregates while showing a significant negative correlation with the aggregate breakdown rate. [**Conclusion**] Conservation tillage can effectively improve the structural properties of topsoil, enhance water storage efficiency during the fallow period, and increase soil water content before sowing, thereby improving maize yield, precipitation use efficiency, and water use efficiency. In particular, DLS can maximize the synergistic effects of soil structure optimization and crop yield increase, proving to be the most effective tillage practice. These findings provide a theoretical basis for promoting and implementing conservation tillage in the semi-arid regions of the Loess Plateau.

**Keywords:** conservation tillage; maize; soil structure; yield; water use

**Received:** 2025-06-02

**Revised:** 2025-07-12

**Accepted:** 2025-07-25

**Online**(www.cnki.net): 2025-09-26

山西地处黄土高原东部,全省总耕地面积 40 586 km<sup>2</sup>,其中中产田占比为 27.54%;低产田占比为 47.10%,旱地面积占全省总耕地面积的 79.4%<sup>[1]</sup>,土壤瘠薄和水资源匮乏是制约黄土高原山西农业可持续发展的两大因素。然而,山西传统的一年一熟春玉米耕作制度中常盛行传统的旋耕耕作方式,致使土壤耕层变浅、结构破坏、通透性变差,土壤保墒蓄水下降<sup>[2-3]</sup>,且休闲期常常地表裸露,加速土壤水分流失,加剧土壤质量及生态环境恶化,严重限制作物产量的形成。因此,改良土壤质量,合理高效地利

用黄土地水土资源,最大限度地提升耕地生产力,是黄土高原山西半干旱区农田生态可持续发展亟待解决的难题。

已有研究<sup>[4]</sup>表明,合理耕作可改良土壤耕层质量,增加降水入渗,提高土壤水分保蓄率;不合理耕作及频繁扰动土壤致使结构破坏、水土流失,土壤生产力不断下降<sup>[5-6]</sup>。近年来,保护性耕作作为一种可持续的土壤耕作方式,通过秸秆还田于土壤并减少扰动为核心,在保水固土、培肥地力、改善土壤孔隙和结构特性等方面发挥着重要作用。团聚体作为土壤结构的核心组成,

其数量与质量的优劣直接决定土壤质量及肥力水平,影响土壤的孔隙性、持水性和抗蚀性。已有研究<sup>[7-9]</sup>表明,保护性耕作通过降低机械作业扰动,优化表层土壤结构,增强土壤团聚体稳定性,而水稳定团聚体增加也进一步提高土壤的储水能力。还有研究<sup>[10]</sup>表明,保护性耕作通过改善土壤孔隙特征及结构特性,为作物生长创造良好的土壤环境。刘萌等<sup>[11]</sup>研究表明,秸秆覆盖免耕保护性耕作可降低黄土塬区玉米田耕层土壤体积质量,增加总孔隙度,增强土壤的蓄水保墒能力,但长期免耕会导致土壤体积质量增加,孔隙度降低<sup>[12]</sup>。此外,保护性耕作对作物产量的影响也并不总是一致的。VIZIOLI等<sup>[13]</sup>研究指出,相较于传统耕作,保护性耕作在土壤特性改善、水资源节约及作物产量提升方面表现出显著优势。但王峻等<sup>[14]</sup>研究指出,随着保护性耕作年限的增加,表层土壤体积质量增加,一定程度上抑制了作物出苗及生长发育,最终导致产量降低。可见,尽管前人对保护性耕作做了大量的探索研究,但由于受土壤、气候、环境及对土壤扰动程度的不同,不同区域保护性耕作的影响也存在差异。

因此,本研究通过连续 6 a 的田间耕作定点定位试验,对比分析不同保护性耕作对土壤结构、产量与水分的综合影响,研究 3 种保护性耕作如何影响土壤结构和水分运移,揭示不同耕作下土壤结构-水分利用-作物产量间的相互关系,以为黄土高原半干旱区耕层土壤特性优化与作物高效增产提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

本研究自 2016 年 10 月至 2022 年 9 月,在山西农业大学榆次东阳试验示范基地(37°55'08"N, 112°67'44"E)内实施。研究区域海拔 791 m,属于典型的温带大陆性季风气候,年平均气温为 9.7℃,年

平均降水量 440 mm,年平均日照时间 2 639 h, >10℃有效积温约 3 700℃,全年无霜期 158 d。试验区土壤母质为黄土,供试的玉米品种为中晚熟品种“大丰 30”。试验期间降水量见图 1,年际间差异较大,年内季节分布不均匀。2016 年 10 月至 2022 年 9 月试验期间玉米休闲期降水量分别为 105.6、174.4、83.7、90.0、118.4、108.6 mm,玉米生育期降水量分别为 339.8、309.3、209.8、392.0、420.2、358.5 mm。

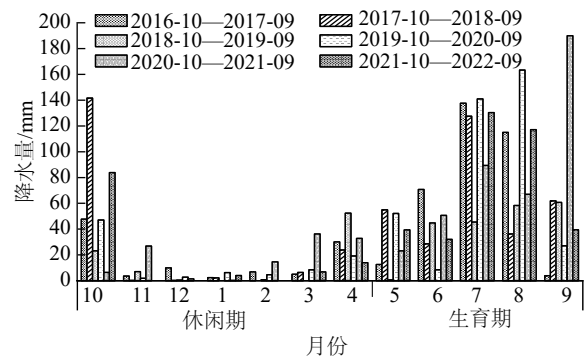


图 1 试验期间降水量

Fig. 1 Precipitation during experimental period

### 1.2 试验设计

试验开始于 2016 年 10 月,持续进行 6 a,采用单因素随机区组设计,设置 4 种耕作处理:1)传统旋耕(TR); 2)旋耕+秸秆机械粉碎还田(TRS); 3)深松+秸秆机械粉碎还田(DLS); 4)免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖(NTC)。所有耕作处理均在秋季玉米收获后进行,田间秸秆粉碎或覆盖还田,采用传统旋耕作为对照,各处理设置 3 次重复,各小区面积为 30 m×5 m=150 m<sup>2</sup>。播种前基施 N 为 225 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 105 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 为 45 kg/hm<sup>2</sup>,所施肥料在翌年播种时随免耕施肥精量播种机一次性混合施入,喷施除草剂。试验设定等行距 60 cm 种植,株距为 26.7 cm。生育期间统一按当地大田生产管理,具体耕作设计见表 1。

表 1 不同田间耕作设计

Table 1 Different field tillage designs

处理	耕作方式
传统旋耕(TR)	玉米收获后将秸秆全部移出田间进行旋耕,旋耕深度 15~20 cm,随后浅旋耕镇压
旋耕+秸秆机械粉碎还田(TRS)	玉米收获后秸秆机械粉碎约 10 cm 长,进行旋耕作业,秸秆随旋耕机翻压入土,旋耕深度 15~20 cm,随后浅旋耕镇压
深松+秸秆机械粉碎还田(DLS)	玉米收获后秸秆机械粉碎约 10 cm 长,进行深松作业,深松深度 35~40 cm,深松间隔为 60 cm,随后浅旋耕镇压
免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖(NTC)	玉米收获后秸秆粉碎留茬覆盖于地表,进行免耕作业,不扰动土壤,翌年春季采用免耕施肥精量播种机播种

### 1.3 测定方法

1.3.1 土壤体积质量及孔隙度 土样采集于 2022 年秋季玉米收获后进行。采用环刀(容积 100 cm<sup>3</sup>)分土层取 0~5、5~10、10~20、20~30 cm 的土样用于测定土壤体积质量、总孔隙度和毛管孔隙度。计算公式为:

$$DV = (W_1 - W_2) / V \quad (1)$$

式中:DV 为土壤体积质量, g/cm<sup>3</sup>; W<sub>1</sub> 为环刀+烘干土样重, g; W<sub>2</sub> 为环刀重, g; V 为环刀容积, 100 cm<sup>3</sup>。

$$SCP = (W_3 - W_1) / (W_1 - W_2) \times 100\% \times DV \quad (2)$$

式中:SCP 为土壤毛管孔隙度, %; W<sub>3</sub> 为环刀+饱和湿土重, g。

$$STP = (1 - DV/\rho) \times 100\% \quad (3)$$

式中:STP为土壤总孔隙度,%; $\rho$ 为土壤比重(取 $2.65 \text{ g/cm}^3$ )。

1.3.2 土壤紧实度 采用便携式紧实度仪在田间布置多个测点,匀速推入土壤,仪器自动记录深度变化时的读数,每 $2.5 \text{ cm}$ 进行计数1次,采集测定深度至 $45 \text{ cm}$ ,重复操作10次后取平均值。

1.3.3 土壤团聚体 2022年秋季玉米收获后,按“S”形5点取土法分层( $0\sim 5$ 、 $5\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30 \text{ cm}$ )采集混合原状土样装入盒中,避免挤压,保持土壤原有的结构。自然风干后去除杂质,将大土块按自然裂痕剥离为 $1 \text{ cm}^3$ 左右备用。土壤机械稳定性团聚体粒级分布采用干筛法,水稳性团聚体粒级分布采用湿筛法。

干筛法:取 $200 \text{ g}$ 风干土样置于套筛顶部(孔径依次为 $5$ 、 $2$ 、 $1$ 、 $0.5$ 、 $0.25 \text{ mm}$ ),底部安放底盒,以收取 $<0.25 \text{ mm}$ 的土壤团聚体,套筛顶部有筛盖。采用振荡式机械筛分仪,以 $30 \text{ 次/min}$ 上下振荡 $5 \text{ min}$ ,分别得到 $>5$ 、 $2\sim 5$ 、 $1\sim 2$ 、 $0.5\sim 1$ 、 $0.25\sim 0.5$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 的土团,收集测定各级孔径筛子上土样重量( $W_{di}$ ),并计算各级别团聚体百分含量。

湿筛法:根据土壤不同孔径大小,从原土中采集混合样品 $100 \text{ g}$ 置于恒温式团粒分析仪的套筛顶部,该套筛由大到小配置孔径尺寸为 $5$ 、 $2$ 、 $1$ 、 $0.5$ 、 $0.25 \text{ mm}$ ,随后调整桶内水面至最佳水平位置,确保上层筛网的筛分效果。当团聚体完全浸泡 $10 \text{ min}$ 时,启动仪器以 $30 \text{ 次/min}$ 的频率上下筛 $5 \text{ min}$ 后,将每层筛网上的团聚体逐一洗入预先编号的铝盒内,烘干并称重,计为 $W_{wi}$ ,计算各占总土样的重量百分比。 $W_{pi}$ 为 $i$ 粒级团聚体重量所占的比例,干筛和湿筛分别按公式(4)和公式(5)计算。

$$W_{pi} = \frac{w_{di}}{200} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{或 } W_{pi} = \frac{w_{wi}}{100} \times 100\% \quad (5)$$

利用各粒级团聚体数据,分别计算 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体含量 $R_{0.25}$ 、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)。

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (6)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (7)$$

$$GMD = \text{EXP} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (8)$$

式中: $M_{r>0.25}$ 为粒径 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体的重量之和, $\text{g}$ ; $M_T$ 为土壤各粒径团聚体总重量, $\text{g}$ ; $X_i$ 为各层团聚体的平均直径, $\text{mm}$ ; $W_i$ 为对应 $X_i$ 的团聚体占比,%。

$$PAD = (W_d - W_w)/W_d \times 100\% \quad (9)$$

式中:PAD为团聚体破坏率,%; $W_d$ 为干筛后粒径 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体所占比例,%; $W_w$ 为湿筛后粒径 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体所占比例,%。

1.3.4 休闲期蓄水效率

$$FPWE = \Delta SWS/P \times 100\% \quad (10)$$

式中:FPWE为休闲期蓄水效率,%; $\Delta SWS$ 为休闲期前后 $0\sim 200 \text{ cm}$ 土层贮水量的变化, $\text{mm}$ ; $P$ 为休闲期降水量, $\text{mm}$ 。

1.3.5 土壤含水量 每年玉米播前、收获后用土钻采集耕层 $0\sim 20$ 、 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层的土壤,放于铝盒称重,随后将其置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥箱中烘烤 $8 \text{ h}$ ,待冷却至室温后称重,并计算各土层的土壤含水量,%。

1.3.6 产量、降水利用效率及水分利用效率 玉米成熟后统计各小区实收的穗数,并称量鲜穗重,根据大小穗比例及平均鲜穗重取 $10$ 穗用于考种,并测其籽粒含水量,依据 $14\%$ 的籽粒含水量折算产量。

$$PUE = Y/P_g \quad (11)$$

式中:PUE为降水利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; $Y$ 为产量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; $P_g$ 为生育期降水量, $\text{mm}$ 。

$$WUE = Y/ET \quad (12)$$

式中:WUE为水分利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; $Y$ 为产量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; $ET$ 为生育期耗水量, $\text{mm}$ 。其中, $ET$ 为播前土壤贮水量-收获后土壤贮水量+ $P_g$ 。

## 1.4 数据分析

采用WPS Office 2023软件进行数据处理,DPS 19.05软件进行方差分析和多重比较,Origin 2021软件绘图并做相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同保护性耕作下耕层土壤体积质量及孔隙度的变化

不同处理对耕层 $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层的土壤体积质量的影响见图2a。与TR相比,DLS和TRS处理均降低 $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层土壤体积质量,而NTC处理增加 $\leq 20 \text{ cm}$ 土层土壤体积质量。 $0\sim 5$ 、 $5\sim 10$ 、 $10\sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤体积质量的大小顺序为 $\text{NTC} > \text{TR} > \text{TRS}$  DLS, $>20\sim 30 \text{ cm}$ 土层土壤体积质量的大小顺序为 $\text{TR} > \text{NTC} > \text{TRS} > \text{DLS}$ 。 $0\sim 5 \text{ cm}$ 土层,与TR处理

比较,TRS、DLS处理的体积质量分别下降4.10%和4.66%,但与TR处理差异不显著,NTC的体积质量显著增加6.89%。5~10 cm土层,与TR处理比较,TRS处理后的体积质量降低1.89%,二者差异未达显著水平,DLS处理的体积质量显著降低7.27%,NTC的体积质量则显著上升18.22%。10~20 cm土层中,TR、TRS和NTC3种处理对体积质量的影响不显著,DLS处理相较TR、TRS与NTC处理体积质量分别显著减小11.48%、11.12%、16.05%。20~30 cm土层,与TR相比较,DLS、TRS与NTC的体积质量均出现下降趋势,降幅分别为12.51%、10.31%、9.67%。因此,TRS较TR能有效减少土壤体积质量,其中DLS处理的体积质量最小,NTC处理在表层0~20 cm体积质量增大,而且随土层深度的增加,各处理体积质量均呈逐渐增加趋势。

不同处理对耕层0~30 cm土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度的影响见图2b和图2c。与TR相比,DLS处理0~30 cm各土层均使土壤总孔隙度降低,但毛管孔隙度却提升。0~5 cm土层内,与TR、TRS和NTC处理相比,DLS的土壤总孔隙度分别降低11.57%、14.43%、6.29%,其中TR与TRS处理间无显著差异。

5~10 cm的土层,与TR和TRS的处理相比,DLS的总孔隙度分别下降10.78%、12.36%,TR与TRS处理间无显著差异,而NTC处理土壤总孔隙度则显著提升7.99%。10~20 cm土层中,与TR、TRS和NTC处理相比,DLS的土壤总孔隙度减少0.86%~7.70%,各处理间没有显著差异。20~30 cm土层中,与TR、TRS和NTC处理相比,DLS处理的总孔隙度分别降低7.76%、21.23%、20.51%。在0~30 cm土层,TRS处理的总孔隙度最大,可见秸秆还田后较其不还田处理增加土壤的总孔隙度。0~5 cm土层中,相较于TR、TRS及NTC处理,DLS的毛管孔隙度分别提升7.03%、3.97%、13.59%,然而与TRS处理之间没有显著差异。5~10 cm土层中,DLS处理的毛管孔隙度较TR、TRS和NTC处理也分别提升3.96%、13.11%、13.87%,然而各处理间无显著差异。10~20 cm土层DLS处理的毛管孔隙度相比TR、TRS和NTC处理分别提升4.39%、0.20%、8.84%,但与TRS处理间无显著差异。20~30 cm土层中,DLS和NTC处理的毛管孔隙度分别比TR处理提升11.62%、12.67%,相较于TRS处理也分别提升6.78%、7.78%,然而DLS和NTC处理间无显著差异。

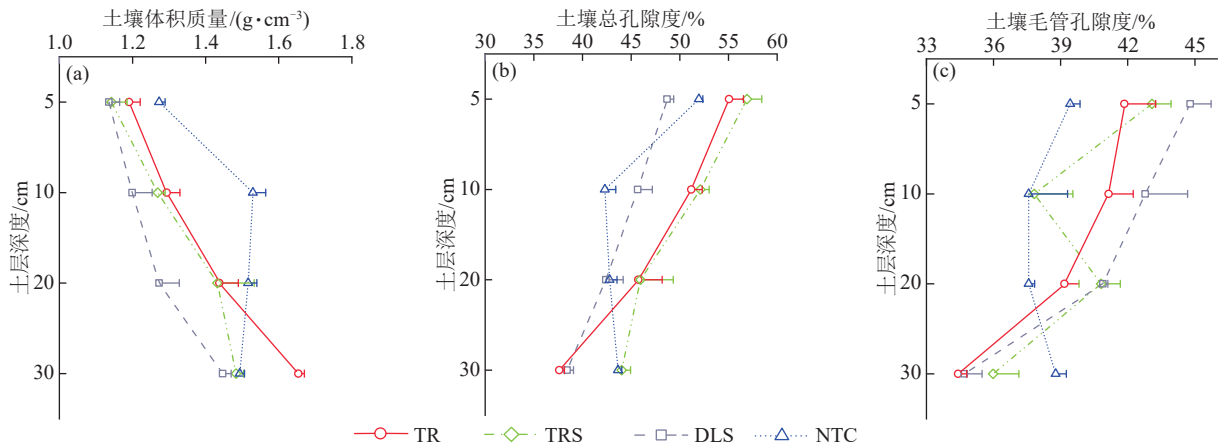


图2 不同耕作对0~30 cm土层土壤总孔隙度及毛管孔隙度的影响

Fig. 2 Effects of different tillage practices on soil bulk density and porosity in 0-30 cm soil layer

2.2 不同保护性耕作下土壤紧实度的动态响应

各耕作处理对0~45 cm土层的土壤紧实度的响应见图3。由图3可知,在土层深度<22.5 cm时,NTC的紧实度较其他耕作处理显著增加;而土层深度大于25.0 cm时,TR处理均较其他处理显著增加了土壤的紧实度,TR处理下土壤紧实度在32.5 cm处达到最大,且最大值为1.313 6 kPa。与TR处理相比,DLS处理0~45 cm各土层中土壤紧实度降低,降幅为8.21%~73.89%。与不还田TR处理相比,TRS处理的土壤紧实度降低2.22%~24.80%,在25~45 cm土层处表现尤为明显。

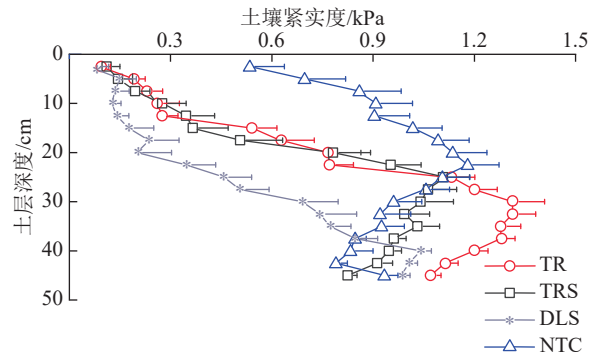


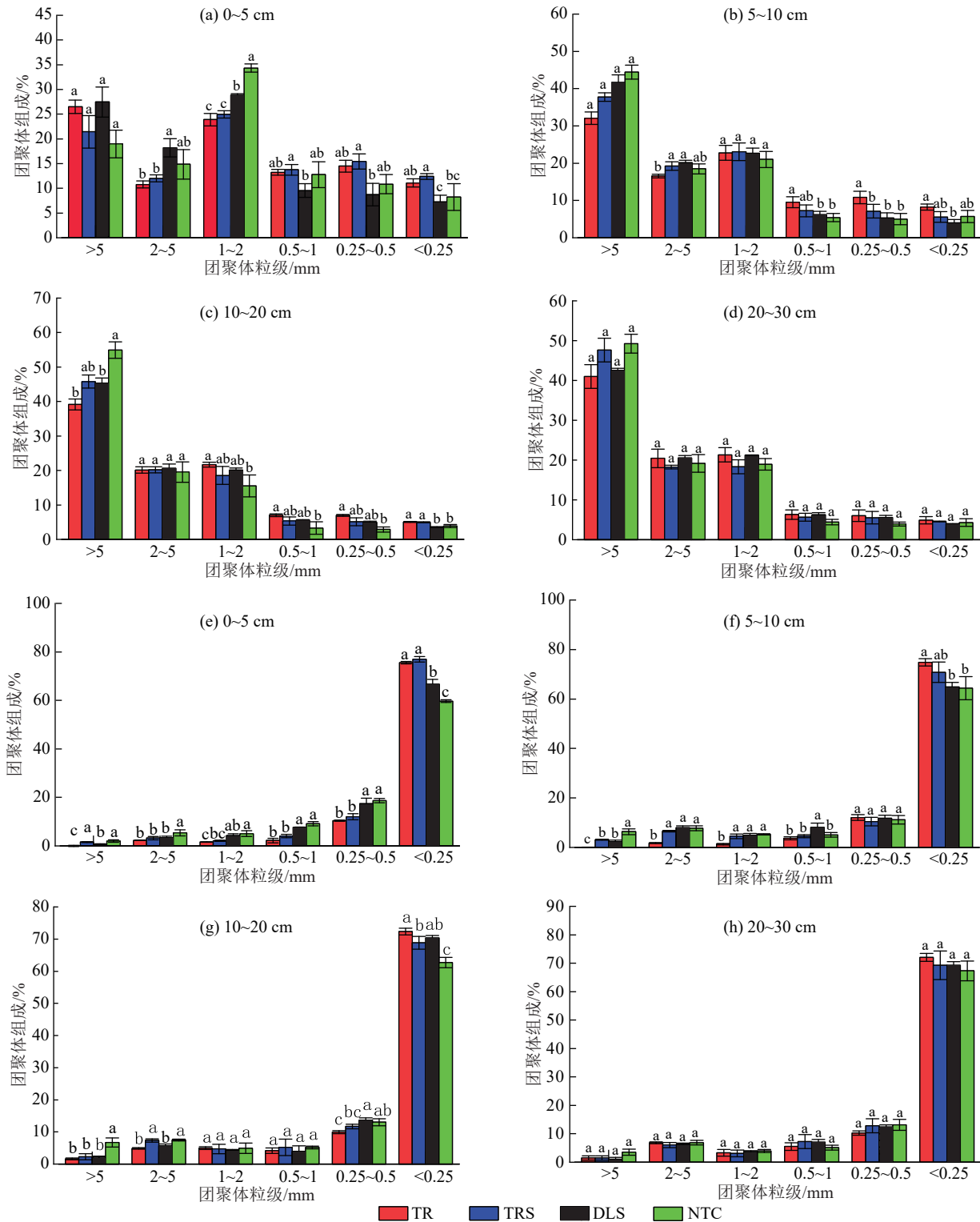
图3 不同耕作对0~45 cm土层土壤紧实度的影响

Fig. 3 Effects of different tillage practices on soil compaction in 0-45 cm soil layer

### 2.3 不同保护性耕作下不同粒级团聚体的分布特征

不同处理在 0~5、5~10、10~20、20~30 cm 土层中干筛与湿筛处理后各粒级团聚体的分布情况见图 4。其中,不同土层力稳性团聚体(干筛法)均在 >5、2~5、1~2 mm 粒径团粒含量所占比例较大,为 10.8%~54.9%, <0.25 mm 粒径团粒含量所占比例

较低;而不同土层水稳性团聚体(湿筛法)各粒径团粒含量所占比例与力稳性团聚体趋势正好相反, <0.25 mm 粒径团粒含量所占比例较高(59.7%~76.9%),其次为 0.25~0.5 mm 粒径。在 0~5、5~10、10~20 cm 土层,各处理间差异显著,20~30 cm 土层差异不显著。



注:图 a~d 为干筛法,图 e~h 为湿筛法;图柱上方不同小写字母表示不同耕作方式见差异显著( $p < 0.05$ )。

图 4 不同耕作对不同粒级土壤团聚体空间分布的影响

Fig. 4 Effects of different tillage practices on spatial distribution of soil aggregates of different particle sizes

0~5 cm 土层,与 TR 相比,TRS、DLS 和 NTC 处理 2~5 mm 粒径的力稳性团聚体含量分别显著提高 11.53%、68.90%、38.10% ( $p<0.05$ ),1~2 mm 粒径的力稳性团聚体含量分别显著提高 4.51%、20.71%、43.70% ( $p<0.05$ );5~10 cm 土层,与 TR 相比,TRS、DLS 和 NTC 处理 2~5 mm 粒径的力稳性团聚体含量分别显著提高 16.12%、21.49%、11.47% ( $p<0.05$ ),但三者差异不显著;10~20 cm 土层,与 TR 相比,TRS 和 NTC 处理 >5 mm 粒径的力稳性团聚体含量分别显著提高 16.98%、40.26% ( $p<0.05$ ),与 DLS 差异不显著。

0~5 cm 土层,与 TR 相比,DLS 和 NTC 处理均显著提高 1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 不同粒径的水稳性团聚体;在 5~10 cm 土层,与 TR 相比,TRS、DLS 和 NTC 处理虽分别显著提高 2~5、1~2 mm 粒径下水稳性团聚体的含量,但三者的差异并不显著,DLS 较其他处理显著提高 0.5~1 mm 粒径的水稳性团聚体含量 59.92%~119.41%;10~20 cm 土层,与 TR 相比,NTC 处理显著提高 >5、2~5、0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量,分别提高 31.42%~54.02% ( $p<0.05$ )。与 TR 相比,DLS 和 NTC 处理在 0~5、

5~10 cm 土层均显著降低 <0.25 mm 的粒级水稳性团聚体的含量,大团聚体比例明显提升,而 20~30 cm 土层各处理间差异并不显著。

在 3 种保护性耕作处理下,土壤的力稳性及水稳性团聚体的平均重量直径、几何平均直径和 >0.25 mm 团聚体含量均受到显著影响。由表 2 可知,经过 6 a 耕作处理后,0~5 cm 土层,DLS 处理的  $MWD_D$ 、 $GMD_D$  和  $R_{0.25D}$  较对照 TR 处理分别显著提高 14.29%、30.22%、4.31% ( $p<0.05$ );在 5~10 cm 土层,3 种保护性耕作均比对照 TR 显著提高土壤  $MWD_D$ 、 $GMD_D$  和  $R_{0.25D}$  含量,与 TR 处理相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的  $MWD_D$  分别提高 12.78%、20.30%、22.56%, $GMD_D$  分别提高 23.60%、37.64%、37.08%, $R_{0.25D}$  分别提高 2.90%、4.60%、2.79%;10~20 cm 土层,与 TR 处理相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的土壤  $MWD_D$  分别提高 8.77%、9.09%、20.45%, $GMD_D$  分别提高 12.83%、15.04%、33.19%, $R_{0.25D}$  分别提高 0.11%、1.60%、1.27%;20~30 cm 土层,与 TR 处理相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的土壤  $MWD_D$  分别提高 6.31%、2.21%、9.78%, $GMD_D$  分别提高 8.40%、3.36%、15.97%, $R_{0.25D}$  分别提高 0.34%、0.94%、0.61%。

表 2 不同耕作对 0~30 cm 土层土壤团聚体稳定性参数的影响

Table 2 Effects of different tillage practices on soil aggregate stability parameters in 0-30 cm soil layer

处理	土层深度/cm	筛分法						团聚体破坏率 (PAD)/%
		干筛			湿筛			
		>0.25 mm 团聚体含量( $R_{0.25D}$ )/%	平均重量直径( $MWD_D$ )/mm	几何平均直径( $GMD_D$ )/mm	>0.25 mm 团聚体含量( $R_{0.25W}$ )/%	平均重量直径( $MWD_W$ )/mm	几何平均直径( $GMD_W$ )/mm	
TR	0~5	88.92±0.82bc	2.24±0.08b	1.39±0.06b	16.57±2.05d	0.35±0.02c	0.33±0.03c	81.37±2.39a
TRS		87.60±0.57c	2.06±0.16ab	1.28±0.06b	23.06±0.63c	0.49±0.02b	0.33±0.08c	74.04±0.73b
DLS		92.75±1.39a	2.56±0.20a	1.81±0.19a	33.34±2.56b	0.51±0.01b	0.35±0.04b	64.15±2.06c
NTC		91.75±2.72ab	2.14±0.40ab	1.48±0.38ab	40.31±0.32a	0.65±0.04a	0.40±0.02a	56.01±1.08d
TR	5~10	91.76±0.82b	2.66±0.24b	1.78±0.22b	18.83±0.55b	0.34±0.01c	0.32±0.01c	79.45±0.96a
TRS		94.42±1.45ab	3.00±0.29ab	2.20±0.30ab	29.21±3.94a	0.70±0.07b	0.39±0.02b	70.99±2.16b
DLS		95.98±0.88a	3.20±0.20ab	2.45±0.22a	35.16±1.60a	0.73±0.06b	0.42±0.03ab	63.40±1.57c
NTC		94.32±1.63ab	3.26±0.25a	2.44±0.31a	35.63±4.86a	0.91±0.09a	0.45±0.04a	62.24±3.95c
TR	10~20	94.95±0.14b	3.08±0.05a	2.26±0.05b	25.49±0.46c	0.57±0.01c	0.37±0.01b	73.16±0.10a
TRS		95.05±0.14b	3.35±0.19ab	2.55±0.22b	31.19±2.19b	0.69±0.05b	0.39±0.02b	65.98±1.66c
DLS		96.47±0.18a	3.36±0.03ab	2.60±0.04ab	29.69±0.59b	0.63±0.02bc	0.37±0.01b	69.22±0.46b
NTC		96.16±0.44a	3.71±0.25a	3.01±0.31a	37.29±1.33a	0.91±0.06a	0.45±0.01a	61.21±1.23d
TR	20~30	95.12±0.92a	3.17±0.19a	2.38±0.25a	27.46±1.14a	0.63±0.03b	0.37±0.01a	71.12±1.90a
TRS		95.44±0.08a	3.37±0.32a	2.58±0.37a	30.75±5.32a	0.61±0.04b	0.37±0.02a	66.19±4.37b
DLS		96.01±0.05a	3.24±0.14a	2.46±0.05a	30.78±0.91a	0.61±0.03b	0.37±0.01a	67.94±1.37ab
NTC		95.70±0.95a	3.48±0.47a	2.76±0.57a	32.69±3.45a	0.73±0.07a	0.40±0.02a	67.85±1.10ab

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耕作间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

0~5 cm 土层,与 TR 处理相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的  $MWD_w$  分别提高 40.00%、45.71%、85.71%, $R_{0.25W}$  分别提高 39.17%、101.21%、143.27%,DLS 和 NTC 处理的  $GMD_w$  分别提高 6.06%、21.21%;5~10 cm 土层,与 TR 处理比较,TRS、DLS 和 NTC 的  $MWD_w$  分别提高 105.88%、114.71%、167.65%, $GMD_w$  分别提高 21.88%、31.25%、40.63%, $R_{0.25W}$  分别提高 55.12%、86.72%、89.22%;10~20 cm 土层,与 TR 处理相比,TRS、DLS 和 NTC 的  $MWD_w$  分别提高 21.05%、10.53%、59.65%, $R_{0.25W}$  分别提高 22.36%、16.48%、46.29%。TRS、NTC 处理的  $GMD_w$  分别提高 5.41%、21.62%;20~30 cm 土层,与 TR 处理相比,NTC 处理的  $MWD_w$ 、 $GMD_w$  分别提高 15.87%、8.11%,TRS、DLS 和 NTC 处理的  $R_{0.25W}$  分别提高 11.98%、12.09%、19.05%。

在 0~5 cm 土层,与 TR 处理相比,保护性耕作 TRS、DLS 和 NTC 处理的 PAD 呈现下降趋势,分别减少 9.01%、21.16%、31.17%;在 5~10 cm 土层,与 TR 处理相比,3 种保护性耕作 TRS、DLS 和 NTC 处理的 PAD 分别显著降低 10.65%、20.20%、21.66%;在 10~20 cm 土层,相比于 TR 处理,TRS、DLS 及 NTC 处理分别使 PAD 降低 9.81%、5.39%、16.33%;而在 20~30 cm 土层,与 TR 处理比较,TRS 处理的 PAD 下降幅度达 6.93%,但和 DLS、NTC 处理相比没有显著差异。

#### 2.4 不同保护性耕作下冬春休闲期土壤蓄水及蓄水效率

由表 3 可知,2016—2017 年(休闲 1 a)3 种保护性耕作较 TR 处理均不同程度地提高休闲期 0~200 cm 蓄水量及蓄水效率。与 TR 相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的休闲期蓄水量分别增加 10.0、0.9、16.3 mm,蓄水效率相应地提高 23.0%、2.1%、37.5%,除 NTC 处理外,其他处理差异不显著;2017—2018 年,与 TR 相比,DLS 和 NTC 处理的休闲期蓄水量分别显著下降 10.8、13.6 mm,蓄水效率显著降低 9.6%、12.1%,但与 TRS 处理差异不显著;2018—2019 年,与 TR 相比,DLS 和 NTC 处理均增加休闲期蓄水量,蓄水效率分别提高 6.3%、13.9%,与 TRS 处理差异不显著;2019—2020 年,与 TR 相比,DLS、NTC 分别使休闲期蓄水量显著增长 34.4、36.1 mm,对应的蓄水效率分别提升 98.3%、103.1%,而 TRS 处理的休闲期蓄水量增长幅度仅为 7.2 mm,蓄水效率则提升 20.6%,但其和 TR 处理无显著差异;2020—2021 年,与 TR 相比,TRS、DLS 和 NTC 各处理的休闲期蓄水量分

别显著提升 7.7、27.5、7.8 mm,蓄水效率也相应地提升 7.0%、25.1%、7.1%,TRS 和 NTC 处理间没有显著差异;2021—2022 年,与 TR 相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的休闲期蓄水量也分别显著增加 24.3、18.2、11.5 mm,蓄水效率分别显著提高 20.3%、15.2%、9.6%。综合 6 a 的平均试验结果显示,3 种保护性耕作均提高休闲期 0~200 cm 的蓄水量和蓄水效率,DLS、NTC 处理下的休闲期蓄水量相比 TR 处理分别提升 12.8、12.0 mm,蓄水效率也显著提升 17.5%、17.2%,而 TRS 处理下休闲期蓄水量增长 7.7 mm,蓄水效率相应提升 9.3%,然而和 TR 处理差异并不显著。

#### 2.5 不同保护性耕作下播前耕层土壤含水量的变化

由图 5 可知,受不同年份休闲期降雨的影响,不同耕作处理对播前 0~20、20~40 cm 土壤含水量影响较大,且随土层深度的增加,土壤含水量呈增加的趋势。0~20 cm 土层,与 TR 处理相比,除 2019 年外,不同年份 DLS 处理下土壤水分含量提升 3.3%~37.9%,NTC 增加 4.0%~45.1%。在 20~40 cm 土层,除了 2017 年外,不同试验年份 DLS 处理下土壤水分含量和 TR 处理相比较提升 3.7%~18.5%,而在干旱年(2019 年和 2020 年),TRS 和 NTC 处理使土壤含水量较 TR 均出现不同程度的下降,但其余年份则表现出显著的水分增加趋势,TRS 的土壤含水量增加 1.3%~18.8%,NTC 处理后土壤含水量提升 2.4%~12.8%。0~20 cm 土层,不同处理土壤含水量表现为  $NTC > DLS > TRS > TR$ ,而 20~40 cm 土层,不同处理土壤含水量表现为  $DLS > TRS > NTC > TR$ ,由 6 a 平均值可知,与 TR 处理相比,3 种保护性耕作 TRS、DLS 和 NTC 处理显著提升土壤水分含量,其中 0~20 cm 土层的含水量分别增加 7.1%、10.6%、16.0%,而 20~40 cm 层则分别提高 4.5%、7.1%、2.4%。

#### 2.6 不同保护性耕作下玉米产量、PUE 及 WUE 的变化

试验从 2016 年秋季收获后开始耕作,分析 2017—2022 年的产量、PUE 及 WUE。由表 4 可知,不同处理间产量差异显著,不同年份间产量差异也显著,且不同处理和年份间交互作用也显著( $p < 0.05$ )。2017 年,NTC 处理的产量显著高于其他 3 种处理,较对照 TR 处理显著提高 21.0%;2018 年,与 TR 相比,DLS、NTC 处理的产量分别提高 14.3%、12.3%,但与 TRS 处理之间差异不显著;2019 年,DLS 处理产量优于其他处理,较对照 TR 显著提高 18.7%,NTC 处理下产量较低,较 TR 下降 15.2%;2020 年,与 TR 相比,

TRS 和 DLS 处理产量分别提高 12.9%、5.2%, NTC 产量下降幅度为 0.8%, 各处理间差异未达到显著水平; 而 2021 年, 和 TR 相比, TRS 和 DLS 处理产量分别提高 2.2%、4.9%, NTC 处理产量下降 8.2%, 各处理间产量差异均不显著; 2022 年, 与 TR 相比, TRS

和 DLS 处理产量分别提高 10.7%、12.1%, 而 NTC 处理产量下降 8.7%, 显著低于其他 3 种处理。由 6 a 平均值可知, 3 种保护性耕作均较 TR 处理提高产量, DLS 处理较对照 TR 显著提高 9.3%, TRS、NTC 处理下产量与 TR 处理无显著差异。

表 3 不同耕作对 0~200 cm 的休闲期土壤蓄水量与蓄水效率的影响

Table 3 Effects of different tillage practices on soil water storage and water storage efficiency in the 0–200 cm layer during fallow period

年份	处理	休闲期 降雨量/mm	休闲初期 贮水量/mm	休闲末期 贮水量/mm	休闲期 蓄水量/mm	蓄水效率/%
2016—2017	TR	105.6	395.8±3.2c	457.9±2.5ab	43.5±3.9b	41.2±3.7b
	TRS	105.6	398.0±3.8bc	450.1±5.7b	53.5±8.7ab	50.7±8.3ab
	DLS	105.6	404.2±4.4b	465.4±3.0a	44.4±5.9b	42.0±5.7b
	NTC	105.6	416.5±2.6a	462.3±4.8a	59.8±6.7a	56.6±6.4a
2017—2018	TR	174.4	394.8±1.1c	456.7±3.3b	112.5±2.6a	64.5±1.5a
	TRS	174.4	398.7±0.6b	461.7±1.6b	111.4±2.1a	63.9±1.2a
	DLS	174.4	411.1±0.8a	483.8±5.3a	101.7±4.6b	58.3±2.6b
	NTC	174.4	411.7±0.9a	487.2±4.6a	98.9±5.4b	56.7±3.1b
2018—2019	TR	83.7	430.1±0.4b	413.8±1.0bc	100.0±0.6c	119.5±0.8c
	TRS	83.7	431.8±1.0b	417.4±0.2b	98.1±0.9c	117.2±1.1c
	DLS	83.7	435.6±4.1b	413.0±2.3c	106.3±2.0b	127.0±2.4b
	NTC	83.7	463.0±4.0a	432.8±2.5a	113.9±2.1a	136.1±2.5a
2019—2020	TR	90	488.3±1.5b	543.3±4.0a	35.0±2.7b	38.9±3.0b
	TRS	90	480.8±2.0c	528.6±3.5b	42.2±5.4b	46.9±6.0b
	DLS	90	509.2±4.2a	529.8±3.5b	69.4±4.1a	77.1±4.5a
	NTC	90	481.5±3.7bc	500.4±7.1c	71.1±6.3a	79.0±7.0a
2020—2021	TR	118.4	539.1±4.8b	547.7±1.2a	109.8±3.7c	92.7±3.1c
	TRS	118.4	546.8±1.6a	547.7±1.8a	117.5±3.3b	99.2±2.8b
	DLS	118.4	550.7±1.0a	531.8±1.7b	137.3±0.9a	116.0±0.7a
	NTC	118.4	544.6±2.5ab	545.4±1.2a	117.6±1.5b	99.3±1.2b
2021—2022	TR	108.6	643.3±0.5c	632.4±0.7b	119.5±0.6d	110.0±0.5d
	TRS	108.6	648.7±1.7b	613.5±0.3c	143.8±1.8a	132.4±1.7a
	DLS	108.6	639.1±1.1d	610.0±0.3d	137.7±0.8b	126.8±0.7b
	NTC	108.6	656.2±1.7a	633.8±0.2a	131.0±1.9c	120.6±1.7c
6 a 平均值	TR	113.5	481.9±3.3b	508.6±11.8a	86.7±8.8b	77.8±8.4b
	TRS	113.5	484.1±4.8b	503.2±6.6a	94.4±8.4ab	85.0±8.5ab
	DLS	113.5	491.7±9.6ab	505.6±10.0a	99.5±9.5a	91.2±8.9a
	NTC	113.5	495.6±10.9a	510.3±14.9a	98.7±9.3a	91.4±9.2a

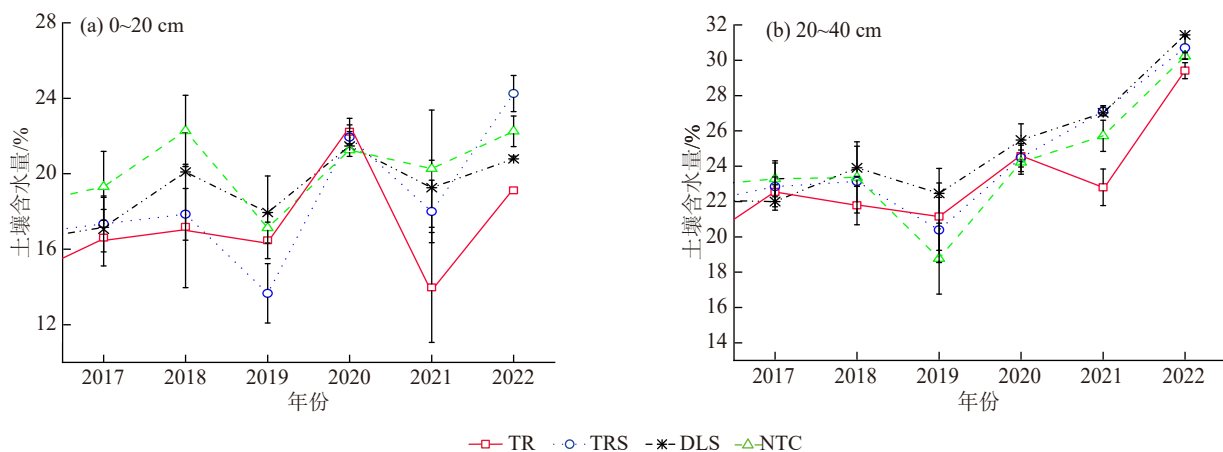


图 5 不同耕作对播前耕层土壤含水量的影响

Fig. 5 Effects of different tillage practices on soil water content of topsoil layer before sowing

表 4 不同耕作下玉米的产量、降水利用效率及水分利用效率的变化

Table 4 Changes in maize yield, precipitation use efficiency, and water use efficiency under different tillage practices

指标	处理	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	6 a平均值
产量	TR	9 426.8±344.6b	12 426.4±373.8b	6 432.9±580.6ab	11 137.9±1 197.4a	10 648.9±826.4a	11 507.1±367.7ab	10 263.3±2 136.8B
	TRS	8 786.6±120.1c	12 546.2±731.3b	6 114.9±1 245.0ab	12 572.2±462.3a	10 879.0±38.7a	12 739.7±1041.1a	10 606.4±2 568.8AB
	DLS	9 691.6±93.6b	14 204.7±638.8a	7 634.5±359.5a	11 716.4±846.9a	11 174.0±1294.9a	12 903.2±681.3a	11 220.7±2 326.4A
	NTC	11 407.4±318.2a	13 952.4±945.8ab	5 454.9±593.1b	11 052±1 538.0a	9 771.4±454.8a	10 502.9±406.8b	10 356.8±2 775.5B
	平均值	9 828.1±1 267.8D	13 282.4±1 032.2A	6 409.3±1 152.5E	11 619.6±1 164.0BC	10 618.3±884.2CD	11 913.2±1 275.0B	—
	处理	3.95*	年份	79.66*	处理×年份	2.80*		
降水利用效率 PUE	TR	27.74±1.01b	40.18±1.21b	30.66±2.78ab	28.41±3.06a	25.34±1.97a	32.10±1.03ab	30.74±5.48B
	TRS	25.86±0.35c	40.56±2.36ab	29.15±5.94ab	32.07±1.18a	25.89±0.09a	35.54±2.90a	31.51±5.73AB
	DLS	28.52±0.28b	45.93±2.06a	36.39±1.72a	29.89±2.16a	26.59±3.08a	35.99±1.90a	33.88±7.11A
	NTC	33.57±0.94a	45.11±3.06ab	26.00±2.83b	28.19±3.92a	23.25±1.08a	29.30±1.13b	30.90±7.87B
	平均值	28.92±3.74C	42.94±3.35A	30.55±5.49BC	29.64±2.97C	25.27±2.11D	33.23±3.56B	—
	处理	4.43**	年份	51.49**	处理×年份	2.90*		
水分利用效率 WUE	TR	23.40±0.82b	21.65±0.63a	29.78±2.81ab	22.53±2.49a	21.10±1.64a	25.65±0.83b	24.02±3.77B
	TRS	23.20±0.22b	21.80±1.24a	31.99±6.02a	25.77±0.92a	21.79±0.08a	29.54±2.36a	25.68±4.34AB
	DLS	23.84±0.18b	23.49±1.06a	36.76±1.94a	23.55±1.76a	22.66±2.63a	29.89±1.59a	26.70±5.65A
	NTC	29.21±0.79a	22.41±1.55a	23.29±2.50b	23.99±3.32a	20.69±0.97a	22.21±0.83b	23.63±3.67B
	平均值	24.91±3.24BC	22.34±1.26CD	30.45±6.28A	23.96±2.4CD	21.56±1.62D	26.82±3.70B	—
	处理	5.80	年份	19.84*	处理×年份	4.06*		

注:同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著( $p<0.05$ );同列不同大写字母表示 6 a 平均值不同处理间差异显著( $p<0.05$ );同行不同大写字母表示各处理不同年份间差异显著( $p<0.05$ );\*表示在 0.05 水平上差异显著。

同产量表现一致,不同处理之间 PUE 差异显著,不同年份间 PUE 差异也显著,且不同处理和年份间交互作用也显著( $p<0.05$ )。2017 年,NTC 较其他处理的 PUE 显著提高 21.0%;2018 年,与 TR 相比,DLS 和 NTC 处理的 PUE 分别显著提高 14.3%,12.3%;2019 年,DLS 较 TR 处理 PUE 显著提高 18.7%,TR、TRS 之间差异不显著,NTC 处理的 PUE 较 TR 显著下降 15.2%;2020 年和 2021 年,与 TR 相比,TRS 和 DLS 处理下 PUE 均增加,而 NTC 呈明显下降趋势,4 种处理间 PUE 差异均不显著;2022 年,TRS 和 DLS 处理较对照 TR 处理 PUE 分别提高 1.1%、12.1%,而 NTC 较 TR 处理 PUE 下降 8.7%。由 6 a 平均值可知,3 种保护性耕作均较 TR 处理提高 PUE,DLS 处理较对照 TR 显著提高 10.2%,TRS 和 NTC 处理与 TR 之间差异不显著。

不同处理之间 WUE 差异显著,不同年份之间 WUE 差异显著,且不同处理和年份间交互作用也显著( $p<0.05$ )。2017 年,NTC 处理的 WUE 较 TR 显著提高 24.9%;2018 年,与 TR 处理相比,TRS、DLS 和 NTC 处理的 WUE 分别提高 0.7%、8.5%、3.5%,但 4 种处理之间无显著差异;2019 年,TRS、DLS 较 TR 处理分别提高 7.4%、23.5%,但 NTC 处理的 WUE 下

降 21.8%;2020 年和 2021 年,4 种处理间 WUE 差异均不显著;2022 年,TRS、DLS 处理较对照 TR 处理 WUE 显著提高 15.2%、16.6%,而 NTC 较 TR 处理 WUE 显著下降 13.4%。由 6 a 平均值可知,DLS 处理较其他 3 种耕作处理 WUE 显著提升 4.0%~13.0%。

## 2.7 玉米产量、水分利用及土壤结构特性的相关分析

由表 5 可知,产量与播前 0~20、20~40 cm 土壤含水量及 PUE 均呈极显著正相关( $p<0.01$ ),而与体积质量、孔隙度及土壤团粒特性无显著相关。土壤体积质量与 WUE 呈显著负相关( $p<0.05$ ),土壤体积质量增加,WUE 呈逐渐下降的趋势。毛管孔隙度与 PUE 则呈显著正相关( $p<0.05$ ),毛管孔隙度增大,PUE 显著提高。休闲期土壤蓄水量与播前 0~20 cm 土壤含水量及  $R_{0.25W}$  均呈显著正相关,而与团聚体破坏率 PAD 则呈显著负相关( $p<0.05$ )。而播前 0~20 cm 土壤含水量又与土壤团粒稳定性指标  $MWD_w$ 、 $GMD_w$  均呈显著正相关( $p<0.05$ ),与  $R_{0.25W}$  呈极显著正相关( $p<0.01$ ),而与 PAD 则呈极显著负相关( $p<0.01$ ),且不同团粒稳定性指标之间也存在显著的相关性, $MWD_w$  与  $GMD_w$ 、 $R_{0.25W}$  均呈显著正相关,与 PAD 呈显著负相关( $p<0.05$ ), $R_{0.25W}$  与 PAD 之间也呈显著负相关( $p<0.05$ )。

表5 玉米产量和水分利用与土壤结构相关系数  
Table 5 Correlation coefficients between maize yield, water use efficiency, and soil structure

指标	体积质量	毛管孔隙度	总孔隙度	MWD <sub>w</sub>	GMD <sub>w</sub>	R <sub>0.25w</sub>	PAD	播前 0~20 cm 含水量	播前 20~40 cm 含水量	休闲期 蓄水量	PUE	WUE	产量
体积质量	1.000	-0.937	0.229	0.356	0.453	0.107	-0.105	0.155	-0.811	-0.08	-0.878	-0.980**	-0.894
毛管孔隙度		1.000	-0.541	-0.280	-0.322	0.017	-0.005	-0.035	0.794	0.240	0.962**	0.905	0.945
总孔隙度			1.000	-0.301	-0.390	-0.532	0.498	-0.502	-0.425	-0.673	-0.644	-0.237	-0.577
MWD <sub>w</sub>				1.000	0.982**	0.953**	-0.958**	0.967**	0.259	0.857	-0.008	-0.174	0.032
GMD <sub>w</sub>					1.000	0.935	-0.934	0.951**	0.148	0.840	-0.059	-0.291	-0.038
R <sub>0.25w</sub>						1.000	-0.999**	0.999*	0.487	0.973**	0.286	0.065	0.314
PAD							1.000	-0.999*	-0.493	-0.967**	-0.276	-0.072	-0.309
播前0~20 cm 含水量								1.000	0.446	0.960**	0.270	-0.073	0.605*
播前20~40 cm 含水量									1.000	0.628	0.037	0.001	0.538*
休闲期 蓄水量										1.000	0.185	0.118	0.092
PUE											1.000	0.195	0.582*
WUE												1.000	-0.321
产量													1.000

注:\*表示在0.05水平上差异显著;\*\*表示在0.01水平上差异显著。

### 3 讨论

#### 3.1 不同保护性耕作对农田土壤结构特性的影响

土壤结构是评价土壤质量的重要指标,保护性耕作减少对土壤的扰动,再加上地表秸秆的覆盖,可以有效改善土壤结构<sup>[15]</sup>。土壤体积质量与紧实度是用来衡量土壤的松紧程度,也是土壤结构的核心参数,土壤孔隙的分布与数量直接决定土壤的通透性、持水性、保水性及土壤根系的空间延展性,对作物增产和土壤环境调控起着重要的作用<sup>[10]</sup>。王玥凯等<sup>[16]</sup>研究表明,长期实行保护性耕作能够有效减小土壤体积质量,降低紧实度。本研究表明,免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖由于减少土壤扰动,增加表层0~20 cm体积质量及紧实度,尤其在5~10 cm处最大,22.5 cm土层下较传统旋耕处理紧实度呈下降趋势。旋耕+秸秆机械粉碎还田与传统旋耕相比,土壤体积质量显著下降4.10%~11.48%,紧实度下降2.22%~24.80%,10~20 cm体积质量下降较大。而深松+秸秆机械粉碎还田显著降低土壤深层的体积质量及紧实度,较传统旋耕处理0~30 cm体积质量降低4.66%~12.51%,20~30 cm的体积质量下降较大,与王春雷等<sup>[17]</sup>研究结果一致。李永贤等<sup>[18]</sup>研究也表明,深松显著降低表层体积质量,改善土壤紧实度,有利于提高土壤总孔隙度,然而本研究发现,深松+秸秆机械粉碎还田下土壤总孔隙度较传统旋耕降低而土壤毛管孔隙度增加,可能是由于一方面深松虽能打破犁底层,但若耕作时机械压力过大或土壤含

水量较高,可能导致部分大孔隙被压缩,从而降低总孔隙度;另一方面,粉碎的秸秆短期内可能填充土壤大孔隙,导致总孔隙度暂时下降,但随着秸秆分解,这一效应会逐渐减弱,且深松+秸秆机械粉碎还田使土壤的毛管孔隙度增大,有效促进深层水分入渗及储留。

土壤团聚体的稳定性潜在影响土壤的通气、透水性及抗侵蚀能力,是评价结构稳定性的重要指标。SONG等<sup>[19]</sup>的研究显示,土壤扰动强度是影响团聚体形成的关键因素,免耕与秸秆还田等保护性耕作可显著增加土壤中水稳性大团聚体的数量;吴林甲等<sup>[20]</sup>也进一步指出,深松作业能够有效提升土壤中大团聚体的占比,并增强其稳定性。本研究指出,3种保护性耕作处理均提升不同土层的力稳和水稳性的大团聚体含量,并不同程度地提高土壤力稳与水稳性团聚体平均重量直径和几何平均直径,显著降低土壤团聚体的破坏程度。本研究显示,相较于传统旋耕,0~30 cm土层NTC、DLS及TRS处理的团聚体破坏率平均分别减少18.44%、12.81%、9.10%,充分证明免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖对土壤扰动较小,团聚体破坏率最小,其次为深松+秸秆机械粉碎还田。频繁旋耕会破坏土壤结构,对土壤扰动程度大,减弱了土壤团聚体的聚合度,降低团聚体的稳定性,本研究中3种保护性耕作均改善土壤团聚体稳定性,一方面可能因为外源秸秆有机物料的添加,促使土壤微生物活动加强,微生物分泌物如多糖、菌丝等可通过提升土壤中大团

聚体及微团聚体的形成,从而增强团聚体结构的稳定性。

### 3.2 不同保护性耕作对农田降水及水分利用的影响

耕作可通过改变土壤结构,进而影响农田土壤水分的迁移、分布及有效利用<sup>[21]</sup>。采用免耕与深松等保护性耕作技术能够高效利用自然降雨,提高土壤水分利用效率<sup>[22-23]</sup>。本研究表明,与传统耕作相比,深松+秸秆机械粉碎还田和免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖处理的休闲期蓄水量分别增加 12.8、12.0 mm,蓄水效率分别显著提高 17.5%、17.2%,且深松+秸秆机械粉碎还田处理降雨利用效率增加 9.3%,水分利用效率也提高 11.2%,与 ZHANG 等<sup>[22]</sup>研究结果一致。PAGE 等<sup>[24]</sup>研究显示,实施保护性耕作通过改善土壤结构稳定性,有效提升有机质含量,并进一步增加土壤水分的蓄存能力。本研究中 3 种保护性耕作均较传统旋耕提高播前土壤含水量,0~20 cm 土层,不同处理土壤含水量表现为 NTC>DLS>TRS>TR,而 20~40 cm 土层,不同处理土壤含水量表现为 DLS>TRS>NTC>TR,尤其在休闲期降雨较少的 2019 年(83.7 mm)和 2020 年(90.0 mm)深松+秸秆机械粉碎还田提高 20~40 cm 土壤含水量,而免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖和旋耕+秸秆机械粉碎还田均降低土壤含水量。这可能源于不同保护性耕作对耕层土壤结构的改变而影响土壤水分的运移,免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖更有利于表层土壤水分蓄积,但由于多年免耕使得在土壤表层形成特定的结构,尽管免耕下土壤团聚体稳定,但体积质量较大、紧实度增加,水分入渗可能受阻,导致土壤水分滞留在表层或蒸发,尤其在干旱年份田间土壤水分主要依赖之前的储存和可能的少量降水,深层(20~40 cm)可能因为水分无法下渗而致使土壤含水量下降。旋耕+秸秆机械粉碎还田虽翻动土壤,但深度较浅,可能形成细碎的土壤结构,虽较传统旋耕增加表层土壤孔隙度,但同样由于耕作层较浅,水分在表层蒸发较快,且耕作后的土壤结构在干旱条件下形成硬壳,阻碍水分下渗,因而导致土壤深层含水量减少。而深松+秸秆机械粉碎还田改善深层土壤的结构,增加土壤深层毛管孔隙度,促进水分的入渗和保持,因而提高深层土壤含水量,形成“深层蓄水库”,抵御干旱胁迫。本研究显示,土壤的毛管孔隙度和 PUE 存在显著正相关,主要归因于随着毛管孔隙度增加,土壤的水分保持及蓄积能力也随之增强,减少降雨后的雨水深层渗漏损失,大幅提高降雨利用效

率;另一方面,也可增强干旱时的水分持续供应能力。本研究也显示,土壤体积质量与 WUE 呈显著负相关,免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖下体积质量增加导致 WUE 下降,可能是由于本研究区域土壤类型为壤土,体积质量增加会导致孔隙度减小,从而影响水分渗透能力。玉米吸收水分的有效范围缩小,从而导致 WUE 下降。

### 3.3 不同保护性耕作对玉米产量变化的响应

耕作通过影响土壤结构及水分保蓄和利用,进而影响玉米产量。SUN 等<sup>[25]</sup>研究发现,保护性耕作能改善土壤质量,提高土壤的有效储水能力,有利于作物生长及产量提高,而传统耕作使田间地表裸露,导致土壤失墒率上升,影响田间土壤的水分保蓄,相较于传统耕作方式,采用深松技术能有效提升作物产量 14.4%。本研究表明,由 6 a 平均产量可知,3 种保护性耕作均较对照提高产量,且深松+秸秆机械粉碎还田处理的产量显著提高 9.3%,优于其他 2 种保护性耕作,尤其在干旱年份(2019 年)增产幅度较大,相比传统旋耕,玉米产量显著提升 18.7%。在 2020 年和 2021 年降雨偏多的年份,采用深松+秸秆机械粉碎还田与旋耕+秸秆机械粉碎还田方式,产量虽有小幅提高,但与传统旋耕之间产量未呈现显著性差异,与 YANG 等<sup>[26]</sup>研究结果相吻合,一致认定尽管保护性耕作较传统的耕作处理休闲期土壤蓄水量较高,但是增加的水分并不总能显著提升玉米的产量。另有学者<sup>[27]</sup>指出,实施保护性耕作并不总能提升作物产量,长期免耕下前 3 a 小麦的产量没有显著变化,但后期产量会逐渐下降。本研究也表明,免耕+秸秆机械粉碎留茬覆盖连续实施前 2 a 较传统旋耕玉米产量显著增长,增幅为 12.3%~21.0%,然而从第 3 a 开始产量较其他耕作处理呈下降趋势,可能是由于连续免耕 3 a 使得土壤体积质量增大,紧实度增加,阻碍降雨入渗,更严重影响了玉米根系吸收水分和养分,最终使作物减产,这种现象在干旱年的时候表现严重,使产量降低 15.2%,降幅较大。

## 4 结论

3 种保护性耕作处理较传统旋耕能优化土壤结构,提升大团聚体的含量并增强其结构稳定性。尽管由于降水的年际差异,年际间土壤含水量波动变化,但均不同程度地提高了休闲期 0~200 cm 土壤蓄水量和播前 0~40 cm 土壤含水量。尽管土壤的体积质量、孔隙度及团粒特性和产量间没有显著相关性,然而却通过显著影响休闲期蓄水或播前土壤含水量

间接影响着产量。深松+秸秆机械粉碎还田处理能有效减小体积质量及紧实度,增加土壤毛管孔隙度,促进深层水分的入渗和保持,尤其在休闲期降雨较少的年份,增强抗旱韧性,优于其他2种保护性耕作处理,较传统旋耕显著增产9.3%,水资源利用率也显著提升,使降水利用效率增加10.2%,水分利用效率也提高11.2%,尤其在干旱年份增产效果更好,较传统旋耕产量增加18.7%。可见,深松+秸秆机械粉碎还田是黄土高原半干旱地区一种最为有效的耕作方式,研究为黄土高原的旱作农业可持续发展提供了“以结构蓄水”的解决办法,对类似的水资源不足的干旱半干旱区,同样具有重要的参考价值。后续研究需深入探讨不同保护性耕作的综合效益及其在不同环境条件下的适应性。

#### 参考文献:

- [1] 贾晓红. 刍议山西省中低产田改造利用现状及对策[J]. 中国农技推广, 2018, 34(11):12-15.  
JIA X H. Discussion on the present situation and counter-measures of transformation and utilization of middle and low yield fields in Shanxi Province[J]. China Agricultural Technology Extension, 2018, 34(11):12-15.
- [2] 胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2):95-103.  
HU J M, CHEN S N, WEI X H, et al. Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(2):95-103.
- [3] 李荣, 鄢慧芳, 张龙, 等. 不同耕作措施对宁南地区土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(18):3543-3555.  
LI R, YAN H F, ZHANG L, et al. Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in the region of southern Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(18):3543-3555.
- [4] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5):214-221.  
PENG Z K, LI L L, XIE J H, et al. Effects of different tillage practices on water consumption structure and water use efficiency during crop growth period in arid farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5):214-221.
- [5] 隋鹏祥, 罗洋, 李瑞平, 等. 不同耕作措施土壤结构特征及其影响因素的研究进展[J]. 玉米科学, 2022, 30(4):83-89.  
SUI P X, LUO Y, LI R P, et al. Research progress on the effects of tillage on soil structure in dry farming regions[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(4):83-89.
- [6] 鄂继芳, 杨树青, 张万锋, 等. 耕作模式对苏打盐碱土结构稳定性与玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6):98-106.  
E J F, YANG S Q, ZHANG W F, et al. Effects of tillage mode on structural stability and maize yield in soda saline alkali soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(6):98-106.
- [7] SEKARAN U, SAGAR K L, KUMAR S. Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 208: e104885.
- [8] WANG J L, PAN Z H, PAN F F, et al. The regional water-conserving and yield-increasing characteristics and suitability of soil tillage practices in northern China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: e105883.
- [9] 李泽坤, 谢军红, 杨通, 等. 耕作方法与施氮量对旱作农田土壤团聚体稳定性及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):313-323.  
LI Z K, XIE J H, YANG T, et al. Effects of tillage methods and nitrogen application rate on soil aggregate stability and maize yield in dry farmland [J]. China Industrial Economics, 2025, 39(4):313-323.
- [10] 张维俊, 李双异, 徐英德, 等. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4):1-9.  
ZHANG W J, LI S Y, XU Y D, et al. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4):1-9.
- [11] 刘萌, 付威, 樊军, 等. 耕作与覆盖措施对黄土塬区春玉米田土壤水气传输的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5):814-825.  
LIU M, FU W, FAN J, et al. Effects of tillage and mulching methods on soil water and gas transport in spring maize field on the Loess Plateau [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5):814-825.
- [12] WANG S L, WANG H, HAFEEZ M B, et al. No-tillage and subsoiling increased maize yields and soil water storage under varied rainfall distribution: A 9-year site-specific study in a semi-arid environment [J]. Field Crops Research, 2020, 255: e107867.
- [13] VIZIOLI B, CAVALIERI-POLIZELI K M V, TORMENA C A, et al. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: e104935.
- [14] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体

- 有机碳及其作物产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):121-127.
- WANG J, XUE Y, PAN J J, et al. Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic carbon and crop yields[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(5):121-127.
- [15] LI J, WANG Y K, GUO Z, et al. Effects of conservation tillage on soil physicochemical properties and crop yield in an arid Loess Plateau, China [J]. Scientific Reports,2020,10(1):e4716.
- [16] 王玥凯,郭自春,张中彬,等.不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J].土壤学报,2019,56(6):1370-1380.
- WANG Y K, GUO Z C, ZHANG Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil (vertisol) [J].Acta Pedologica Sinica,2019,56(6):1370-1380.
- [17] 王春雷,李雅剑,周宝元,等.秸秆全量还田配合深松提升土壤水分储量及玉米水分利用效率[J].植物营养与肥料学报,2025,31(5):904-914.
- WANG C L, LI Y J, ZHOU B Y, et al. Full straw return combined with subsoiling improves water storage in soil and water use efficiency of maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2025,31(5):904-914.
- [18] 李永贤,张晓云,吴开贤,等.深松耕对石灰岩红壤物理性状和玉米生长发育的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(2):189-196.
- LI Y X, ZHANG X Y, WU K X, et al. Effect of subsoiling on the physical properties of limestone red soil and maize growth[J].Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science),2021,36(2):189-196.
- [19] SONG K, ZHENG X Q, LV W G, et al. Effects of tillage and straw return on water-stable aggregates, carbon stabilization and crop yield in an estuarine alluvial soil[J]. Scientific Reports,2019,9(1):e4586.
- [20] 吴林甲,祁琛,闫秋艳,等.耕作方式对旱地麦田土壤团聚体及其碳氮组分分布的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(2):193-200.
- WU L J, QI C, YAN Q Y, et al. Effects of tillage methods on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen fractions in dryland wheat fields [J].Agricultural Research in the Arid Areas,2023,41(2):193-200.
- [21] 白东星,陈宣伊,张向前,等.不同耕作方式对土壤水分动态变化规律及玉米产量的影响[J].华北农学报,2025,40(2):67-80.
- BAI D X, CHEN X Y, ZHANG X Q, et al. Effects of different tillage methods on soil moisture dynamic changes and maize yield [J].Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2025,40(2):67-80.
- [22] ZHANG Q, WANG S L, SUN Y G, et al. Conservation tillage improves soil water storage, spring maize (*Zea mays* L.) yield and WUE in two types of seasonal rainfall distributions[J].Soil and Tillage Research,2022,215:e105237.
- [23] 郑洪兵,刘武仁,罗洋,等.耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):264-270.
- ZHENG H B, LIU W R, LUO Y, et al. Effect of different tillage methods on soil water content and water use efficiency in cropland[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(3):264-270.
- [24] PAGE K L, DANG Y P, DALAL R C, et al. Changes in soil water storage with no-tillage and crop residue retention on a Vertisol: Impact on productivity and profitability over a 50 year period [J]. Soil and Tillage Research,2019,194:e104319.
- [25] SUN L, WANG S L, ZHANG Y J, et al. Conservation agriculture based on crop rotation and tillage in the semi-arid Loess Plateau, China: Effects on crop yield and soil water use[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,251:67-77.
- [26] YANG X, ZHENG L N, YANG Q, et al. Modelling the effects of conservation tillage on crop water productivity, soil water dynamics and evapotranspiration of a maize-winter wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau of China using APSIM [J]. Agricultural Systems,2018,166:111-123.
- [27] ZHANG Y J, WANG R, WANG S L, et al. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system [J].Field Crops Research,2017,209:151-158.