

秸秆还田对东北黑土水分特征 及物理性质的影响

郑洪兵, 罗洋, 隋鹏祥, 李瑞平, 王浩, 任英,
袁野, 周思琪, 田圣陶, 刘武仁, 郑金玉

(吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部东北作物生理生态与耕作重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为明确秸秆还田对东北黑土水分特征及物理性质的影响,设置秸秆覆盖还田(FG)、秸秆翻埋还田(FM)和秸秆不还田翻耕(FD)3个处理,测定土壤含水量、水分特征曲线、容重、硬度、土壤三相比及结构稳定性等参数。结果表明:(1)秸秆覆盖还田可显著提高春季耕层(0~30 cm)土壤含水量,较秸秆不还田翻耕处理增幅为 11.17%~150.84%;不同处理耕层土壤在水吸力中吸力段土壤含水量变化曲线平滑,秸秆覆盖还田处理具有较高的土壤持水性。(2)秸秆还田能显著提高土壤水分有效性,与秸秆不还田翻耕处理相比,秸秆覆盖还田处理 0~10 cm 土层土壤田间持水量提高 4.85%~11.03%,土壤凋萎系数提高 10.85%~18.00%;秸秆翻埋还田处理 0~10 cm 土层土壤重力水增加 9.65%~80.73%。秸秆翻埋还田提升了土壤供水能力,土壤比水容量较秸秆不还田翻耕处理增加 4.8%~10.0%。(3)与秸秆不还田翻耕处理相比,秸秆还田降低了收获后土壤紧实度,降低幅度为 0.18~0.31 MPa;秸秆覆盖还田增加表层土壤容重,降低土壤孔隙度,促进三相结构趋于合理,显著增加土壤结构稳定性。(4)皮尔森相关分析表明,三相比 R 值与结构距离($r=0.73^*$)、土壤容重($r=0.70^*$)相关性显著,在一定范围内三相比 R 值的增加有利于改善并促进土壤结构稳定。综上可知,东北黑土农田实施秸秆还田是提高春季土壤含水量、增强土壤持水性、提升土壤供水能力、调节土壤紧实性、调控土壤三相比、改善土壤结构和提高土壤宜耕性的有效措施。

关键词:秸秆还田;黑土;水分特征;土壤结构;三相比 R 值

中图分类号:S153;S157 **文献标志码:**A

Effects of straw returning on soil water characteristics and physical properties of black soil in Northeast China

ZHENG Hongbing, LUO Yang, SUI Pengxiang, LI Ruiping, WANG Hao, REN Ying,
YUAN Ye, ZHOU Siqi, TIAN Shengtao, LIU Wuren, ZHENG Jinyu

(Research Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Science, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Northeast China, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: To determine the effects of straw returning on water characteristics and physical properties of black soil in Northeast China, three treatments were set up: straw mulching and returning (FG), straw overturning and returning (FM) and straw non-returning (FD). Soil water content, water characteristic curve, bulk density, hardness, soil three-phase ratio and structural stability were measured. The results showed as follows: (1) Straw mulching and returning treatment significantly increased the soil moisture content of 0~30 cm in spring by 11.17%~150.84% compared with straw non-returning treatment. The change curve of soil water content in the middle suction section was smooth, and the straw mulching and returning treatment had higher soil water retention. (2) Straw returning to field can significantly improve soil water availability. Compared with straw non-returning treatment, the

收稿日期:2023-07-14

修回日期:2023-09-25

基金项目:国家重点研发计划子课题“根层土壤结构性障碍形成及削减调控途径”(2022YFD1500104-03);国家自然科学基金“苗带紧行间松合理耕层土壤结构特征及其调控机制”(31501248);吉林省农业科技创新工程国际科技合作项目“东北保护性耕作黑土结构特征及可视化研究”(CXGC202101GH);吉林省留学人员科技创新创业项目“东北保护性耕作黑土结构可视化技术及应用”(吉人社发[2022]2)

作者简介:郑洪兵(1980-),男,吉林白城人,博士,副研究员,主要从事土壤耕作制度与保护性耕作研究。E-mail:hongbingzheng@126.com

通信作者:郑金玉(1974-),男,吉林东丰人,硕士,研究员,主要从事土壤耕作制度与保护性耕作研究。E-mail:15844052867@163.com

field water capacity of 0~10 cm soil layer in straw mulching and returning treatment increased by 4.85%~11.03%, and the soil wilting coefficient increased by 10.85%~18.00%. Gravity water in 0~10 cm soil layer of straw overturning and returning treatment increased by 9.65% to 80.73%. The soil water supply capacity of straw overturning and returning treatment was increased, and specific water capacity was increased by 4.8%~10.0% compared with the straw non-returning treatment. (3) Compared with straw non-returning treatment, straw returning reduced soil compaction after harvest by 0.18~0.31 MPa. Straw mulching and returning treatment increased surface soil bulk density and decreased soil porosity. It promotes the rationality of three-phase structure and significantly increases the stability of soil structure. (4) Pearson correlation analysis showed that the R value of the three ratios was significantly correlated with structural distance ($r=0.73^*$), and soil bulk density ($r=0.70^*$). Within a certain range, the increase of R value of the three ratios was conducive to improving and promoting the stability of soil structure. In conclusion, the implementation of straw returning in the northeastern black soil farmland was an effective measure to improve soil water content in spring, enhance soil water retention, enhance soil water supply capacity, adjust soil compaction, regulate soil, and improve soil structure and productivity ability.

Keywords: straw returning to field; black soil; soil water characteristic; soil structure; three phase R value

东北黑土区是中国最大的粮食生产与商品粮输出基地,也是保障国家粮食安全的“压舱石”和“稳压品”^[1]。然而,长期小四轮条带旋耕作业使该地区土壤耕层变薄,犁底层增厚,土壤容重增加,土壤结构变差,贮水能力和抗逆性减弱^[2]。

前人研究表明^[3-4],秸秆覆盖、免耕、少耕、深松等保护性耕作能减少土壤扰动,增加地表覆盖,从而蓄水保墒,降低土壤侵蚀。长期连续保护性耕作尤其是秸秆覆盖免耕,在改善土壤结构功能和显著增加表层土壤有机碳积累的同时,维持土地生产力,有效克服了短期保护性耕作的不良效应,提升黑土质量的作用明显^[5]。保护性耕作具有增加土壤毛管孔隙度、提高水分含量的作用,对土壤有机质和速效养分的变化有一定的影响^[6]。与秸秆还田相结合的少耕既可改善土壤物理性质,减少土壤压实度,又能提高土壤导水和保水能力^[7]。有研究表明,免耕和秸秆覆盖措施下土壤初始入渗率和稳定入渗率均高于翻耕^[8]。免耕结合秸秆覆盖可降低黄土塬区玉米田耕层土壤容重,增加总孔隙度,同时显著提高耕层土壤相对气体扩散率和饱和导水率,增加下层土壤导气率,是免耕处理最优组合^[9]。不同保护性耕作措施结合覆盖可改善宁南旱区耕层土壤团粒结构,有效增强休闲期和生育期土壤蓄水保墒能力,从而显著提高马铃薯产量和水分利用效率^[10]。深松作为改良旱地壤质黏土物理性质的重要耕作措施,其连续实施不但可以促进土壤水稳性团聚体的形成,还有助于增强团聚体的稳定性,改善土壤紧实度^[11]。深松结合秸秆还田对于稳定与提高黑土有机碳含量、固持土壤碳库和增加玉米产量具有重要作用^[12]。还有研究表明,免耕结合

秸秆还田的保护性耕作措施下土壤容重较传统翻耕有所减小,5 a 保护性耕作处理较 2~3 a 保护性耕作处理的土壤团聚体明显增加,土壤性状得到显著改善^[13]。

目前,关于秸秆还田对东北黑土水分供蓄能力、容重、三相及结构稳定性影响的研究尚未见报道。基于此,本研究通过分析不同秸秆还田模式对土壤水分供蓄能力及物理性质的影响,以期对秸秆的大面积机械化还田和黑土保育及地力提升提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2016—2018 年在吉林省公主岭市吉林省农业科学院院内试验区(43°45'N, 125°01'E)进行,该区属于中温带大陆性季风气候,年均气温 4.5℃,年均太阳有效辐射 4 800 MJ·m⁻²,日照时数为 2 800 h,≥10℃有效积温为 2 860℃,无霜期 140 d,年降雨量 567 mm,主要集中在 6—8 月。采用 TRM-ZS2 自动气象站进行监测,2018 年降水量为 607.3 mm,年平均温度为 6.91℃(图 1)。土壤类型为典型中层黑土、壤质粘土,其中砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 36.0%、24.5%和 39.5%,土壤基础肥力见表 1。

1.2 试验设计

试验采取随机区组设计,设秸秆翻埋还田(FM)、秸秆覆盖还田(FG)和秸秆不还田翻耕(FD)3 个处理,各处理 3 次重复。小区面积为 12 m²(4 m×3 m)。其中秸秆翻埋还田(FM)为玉米收获后将秸秆切成小段,翻埋到 20~25 cm 土层深度,每个小区秸秆用量 10 kg,折算还田量约为 8 500 kg·

hm⁻²; 秸秆覆盖还田(FG)为玉米收获后直接将秸秆粉碎覆盖于地表,用丝网罩在上面防止吹散,还田量约 8 500 kg · hm⁻²; 秸秆不还田翻耕(FD)为玉米收获后直接将秸秆移出田外,人工进行翻耕,深度为 20~25 cm,翌年不整地直接人工播种。具体操作如图 2(见 234 页)所示。

供试玉米品种为‘翔玉 998’,于 5 月 10 日播种,10 月 10 日收获,种植行距为 60 cm,密度为 6 万株 · hm⁻²,各小区均全部收获果穗计产。供试肥料为吉新牌掺混肥(N、P₂O₅和 K₂O 含量分别为 26%、12%和 12%),施用量为 1 000 kg · hm⁻²,均在前茬玉米收获后施入土壤,各小区 N、P₂O₅、K₂O 纯施用量分别为 0.30、0.15、0.15 kg。

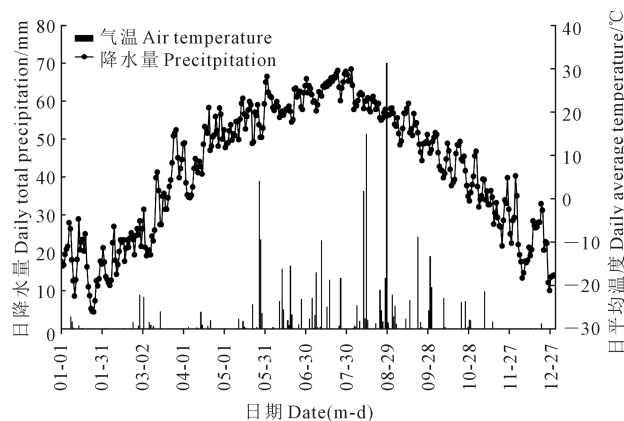


图 1 2018 年日平均气温和日降水量
Fig.1 Daily average air temperature and daily total precipitation in 2018

表 1 0~40 cm 土层土壤理化性质

Table 1 Soil physical properties in 0~40 cm soil depth in study site

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density /(g · cm ⁻³)	全氮 Total nitrogen /(g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg · kg ⁻¹)	有效钾 Available potassium /(mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	pH
0~20	1.2	1.16	1.16	0.41	102.49	11.00	179.32	21.73	6.02
20~40	1.3	0.93	0.93	0.39	88.12	9.00	165.00	21.90	6.18

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 土壤样品采集 2018 年玉米收获后,各处理以“S”型取五点混合一个土样的方式采集 0~25 cm 土层土样,分别混合后,带回实验室进行土壤养分等基础肥力指标的测定。

1.3.2 土壤含水量测定 分别于 2018 年播种前(4 月 24 日)和收获后(10 月 17 日),采用称重法测定土壤含水量,取样深度分别为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm,共取 5 层,3 次重复。

1.3.3 土壤水分特征曲线测定 2018 年收获后(10 月 17 日)采用环刀法采集 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤样品,测定容重、饱和含水量、田间持水量等指标,每个指标 3 次重复。利用 1500F1 型压力膜仪(云生科技(北京)有限公司)测定土壤水分特征曲线。

1.3.4 土壤水分特征曲线方程模型 土壤水吸力可采用 Gardner 模型计算,公式如下:

$$Y = aX^{-b} \quad (1)$$

式中, Y 为土壤水吸力(kPa); X 为土壤含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); a 和 b 为无量纲拟合参数。

土壤比水容量又称容水度,是指单位基质势变化引起的土壤含水率的变化,反映了不同吸力下土壤水分的有效性,是分析土壤水分保持能力的重要指标和评价土壤持水强弱的关键参数,其表达式可

以通过 Gardner 求导得到,具体公式如下:

$$C(\theta) = ABh^{-(B+1)} \quad (2)$$

式中, $C(\theta)$ 为比水容量($\mu\text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$); A 和 B 为拟合参数; h 为土壤水吸力(kPa)。

1.3.5 土壤水分常数测算 水吸力为 0 Pa 时的土壤含水量称为饱和含水量,水吸力为 33 kPa 时的土壤含水量称为田间持水率,水吸力为 600 kPa 时的土壤含水量称为最大分子持水量,水吸力为 1 500 kPa 时的土壤含水量称为土壤凋萎系数($SWWC$)。土壤有效水($SAWC$) = 田间持水量 - 凋萎系数; 田间持水量(SFC) = 田间持水率/100 × (饱和含水量 - 田间持水率); 土壤毛管水($SCWC$) = 田间持水量 - 最大分子持水量; 土壤重力水($SGWC$) = 饱和含水量 - 毛管持水量。

1.3.6 土壤物理性质测算 分别于 2018 年播种前(4 月 24 日)和收获后(10 月 17 日),使用 SC-900 土壤硬度仪(Spectrum Technologies, Inc., USA)测定 0~45 cm 土层土壤紧实度(MPa); 采用环刀法测定 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土层土壤容重(SBD)和土壤孔隙度(STP),并利用 DIK1150 三相仪(北京海富达科技有限公司)测定土壤三相,其中,土壤三相比 = 土壤固体容积 : 土壤液体容积 : 土壤气体容积 = (100% - 土壤总孔隙度) : (土壤质量含水量 × 容重) : [土壤总孔隙度 -

(土壤质量含水量×容重)]; 土壤总孔隙度 = (1-容重/比重) × 100, 土壤比重取值为 2.65。采用 Ji 等^[14]的方法土壤三相比偏离值 R 分析土壤三相比, 其公式如下:

$$R = \sqrt{0.4 \times (X - 50)^2 + (Y - 25)^2 + 0.6 \times (Z - 25)^2} \quad (3)$$

$$X = 100 \times (1 - \text{土壤孔隙度}) \quad (4)$$

$$Y = 100 \times \text{土壤含水量} \quad (5)$$

$$Z = 100 \times (\text{土壤孔隙度} - \text{土壤含水量}) \quad (6)$$

式中, R 为所测土壤样品三相比与适宜状态下土壤三相比在空间距离上的差值, R 值越小, 土壤结构越接近理想状态; X 为所测土壤样品固相的数值; Y 为所测土壤样品液相的数值; Z 为所测土壤样品气相的数值; 0.4 为土壤固相数据所占有的权重; 0.6 为土壤气相数据所占有的权重。

广义土壤结构指数 (Generalized soil structure index, $GSSI$) 能够有效地综合反映土壤结构的变化, 土壤结构越接近理想状态, $GSSI$ 值越接近 100, $GSSI$ 计算公式如下:

$$GSSI = [(X_s - 25) X_L X_c]^{0.4769} \quad (7)$$

式中, X_s 为固相体积百分比 (>25%); X_L 为液相体积百分比 (>0); X_c 为气相体积百分比 (>0)。

土壤三相结构距离 (Soil three-phase structure distance, $STPSD$) 可定量表达土壤三相向理想结构点逼近或远离的趋势, 以作为描述土壤结构的综合指标, 为量化研究土壤结构、功能与质量提供依据, $STPSD$ 计算公式如下:

$$STPSD = \sqrt{(X_s - 50)^2 + (X_s - 50)(X_L - 50) + (X_L - 50)^2} \quad (8)$$

式中, $STPSD$ 代表土壤三相结构距离, 土壤三相结构越接近理想状态, $STPSD$ 越接近 0; X_s 和 X_L 分别为固相和液相体积所占百分比 (%)。

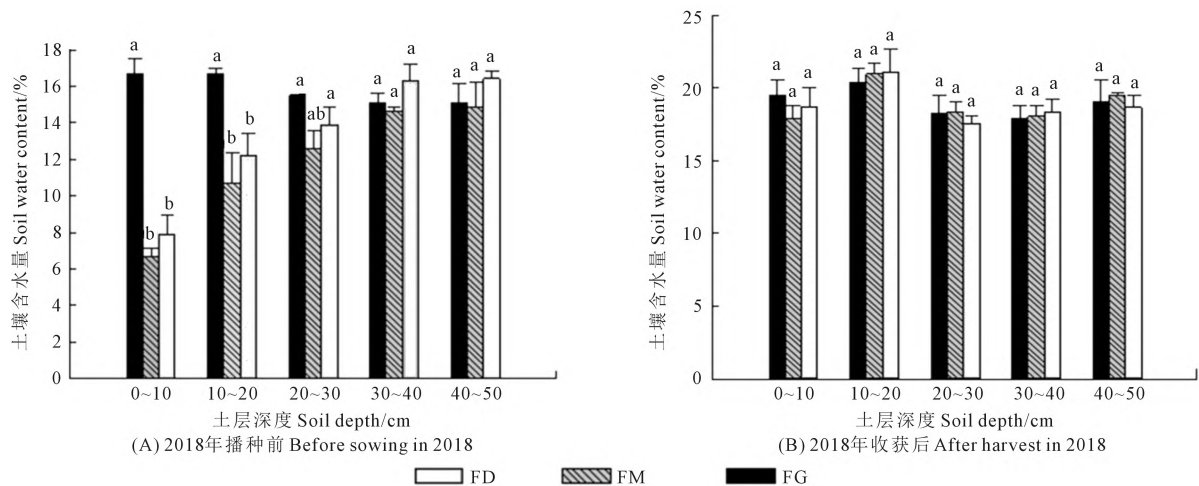
1.4 数理统计方法

采用 Excel 2003 处理数据和 SPSS 25.0 统计软件中最小显著性差异检验法 (LSD) 进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$), 使用 Sigmaplot 14.0 进行绘图, 其中土壤水分特征曲线模型采用 Origin 2021 进行拟合。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤含水量的影响

从播种前 (图 3A) 和收获后 (图 3B) 秸秆还田对 0~50 cm 土层土壤含水量的影响可以看出, 播种前土壤含水量受土层深度影响, 其中 FG 处理随土层深度的增加而减少, 而 FM 和 FD 处理随土层深度增加而增加; 收获后土壤含水量随土层深度变化不明显, 处理间差异也不显著。播种前, 0~30 cm 土层土壤含水量均表现为 $FG > FD > FM$, FG 处理 0~20 cm 土层土壤含水量显著高于 FM 和 FD 处理, 其中 0~10 cm 土层含水量分别增加 150.84% 和 111.24%, 10~20 cm 土层含水量分别增加 55.28% 和 36.20%。收获后, 处理间所有土层土壤含水量差异不显著, 说明秸秆覆盖还田显著提高春播前土壤含水量, 而秸秆翻理和翻耕处理均会导致春季耕层土壤水分散失, 但是收获后土壤含量受秸秆还田方式影响较小。



注: 不同小写字母表示同一土层不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 相同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异不显著, 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments in the same soil depth ($P < 0.05$) and the same lowercase letters are not significant difference among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 3 不同处理对 0~50 cm 土层土壤含水量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil water content in 0~50 cm soil depth

2.2 不同处理对土壤水分特征曲线的影响

2.2.1 土壤水分特征曲线 如图 4 所示,随着土壤水吸力的不断增大,各处理土壤含水量逐渐减小,土壤含水量在低吸力段均较高,且变化较快;在中吸力段变化不大,曲线趋于平滑,这是因为在低吸力段主要是土壤的大孔隙在排水。不同处理 0~10 cm 土层土壤水分特征曲线在 10~60 kPa 低吸力阶段快速下降,而在 6~1 500 kPa 中吸力段趋于平缓,中吸力段 FG 处理的土壤含水量均高于 FM 和 FD 处理(图 4A)。各处理 10~20 cm 土层土壤水分特征曲线的变化趋势与 0~10 cm 土层基本一致,中吸力段 FG 和 FM 处理均高于 FD 处理(图 4B)。曲线高度越高,土壤的持水性越好,说明 FG 和 FM 在低、中吸力段均较 FD 处理有较高的土壤持水性,由此可知秸秆还田可以有效蓄存土壤中的水分,提高土壤的持水性。

表 2 为各秸秆还田处理在相同水吸力下 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤含水量。各处理土壤含水量均随水吸力的增加而降低,不同土层表现有所不同,0~10 cm 土层在 80、100 kPa 水吸力下 FG 处理土壤含水量显著大于 FD,1 500 kPa 水吸力下 FG

显著大于 FM ($P<0.05$),其他水吸力下处理间差异不显著;10~20 cm 土层在所有水吸力下,处理间土壤含水量差异均不显著。

2.2.2 土壤蓄水能力 土壤饱和含水量和最大分子持水量常用来衡量土壤蓄水能力的高低。从图 5A 可以看出,FD 和 FM 处理 0~10 cm 土层土壤饱和含水量显著高于 FG 处理,分别增加 37.51% 和 46.26%;10~20 cm 土层各处理间差异不显著。从图 5B 看出,不同处理间 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤最大分子持水量无显著差异。

2.2.3 土壤水分有效性 土壤田间持水量(SFC)是长期保持在土壤中被植物有效吸收利用的水分。不同处理对田间持水量的影响如表 3 所示,0~10 cm 土层土壤田间持水量表现为 $FG>FD>FM$,其中 FG 处理较 FD 和 FM 处理分别显著增加 4.85% 和 11.03%;各处理 10~20 cm 土层田间持水量间差异不显著。

土壤毛管水(SCWC)移动速率较快,是土壤中可以很好地被植物吸收利用的水分。从表 3 可以看出,FG 处理 0~10 cm 土层土壤毛管水含量略高于 FD 和 FM 处理,FM 处理 10~20 cm 土层毛管水含量略高于 FD 和 FG 处理,但处理间差异均不显著。

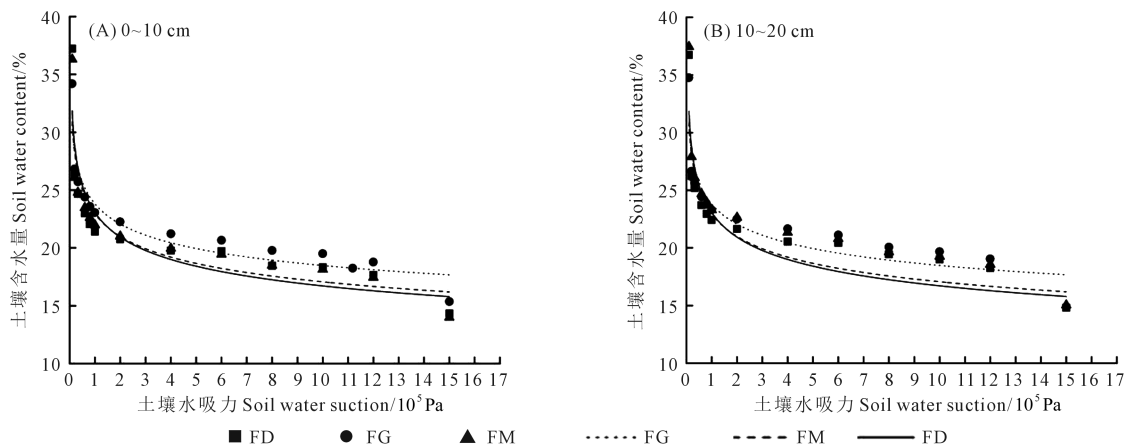


图 4 不同秸秆还田方式下土壤水分特征曲线

Fig.4 Change of soil moisture characteristic curve under different straw returning treatments

表 2 不同水吸力下土壤含水量变化/%

Table 2 The change of soil water content under different soil water suction

土层深度 Soil depth /cm	处理 Treatment	土壤水吸力 Soil water suction/kPa												
		10	20	33	60	80	100	200	400	600	800	1000	1200	1500
0~10	FD	37.22a	26.36a	24.67a	22.98a	22.05b	21.41b	20.74a	19.78a	19.72a	18.46a	18.32a	17.66a	14.33ab
	FG	34.20a	26.83a	25.73a	24.40a	23.58a	23.05a	22.25a	21.23a	20.66a	19.77a	19.51a	18.77a	15.35a
	FM	36.31a	26.09a	24.80a	23.47a	22.62ab	21.97ab	21.01a	19.96a	19.45a	18.49a	18.14a	17.44a	13.99b
10~20	FD	36.73a	26.23a	25.19a	23.72a	22.96a	22.43a	21.64a	20.55a	20.44a	19.45a	19.00a	18.25a	14.82a
	FG	34.76a	26.65a	25.62a	24.42a	23.78a	23.29a	22.49a	21.67a	21.11a	20.06a	19.67a	19.04a	14.89a
	FM	37.45a	27.90a	26.09a	24.67a	23.96a	23.31a	22.64a	21.34a	20.80a	19.66a	19.26a	18.56a	15.04a

注:同列不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$). The same below.

土壤重力水(SGWC)是土壤中运动性最强的水分,可以被作物吸收利用。由表 3 可知,FM 处理 0~10 cm 土层土壤重力水含量高于 FG 和 FD 处理,且与 FG 差异达显著水平;FD 和 FM 处理 10~20 cm 土层重力水含量略高于 FG 处理,但处理间差异不显著。

土壤凋萎系数(SWWC)是植物达到萎蔫时的含水量,为土壤有效水的下限。如表 3 所示,FG 处理 0~10 cm 土层土壤凋萎系数显著高于 FD 和 FM 处理,分别增加 10.85%和 18.00%;FG 处理 10~20 cm 土层凋萎系数略高于 FM 和 FD 处理,但处理间差异不显著。

土壤有效水(SAWC)是田间持水量与凋萎系数的差值。从表 3 可以看出,各处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤有效水含量基本接近,处理间差异不显著。

2.2.4 土壤供水能力 如表 4 所示,各处理的比水容量值均随着水吸力的增加而减小。当土壤处于 10~60 kPa 低吸力范围时,土壤比水容量变化较快,排水量也较大,比水容量大。这是因为此时土壤蓄水孔隙孔径大、体积大,当吸力增加时,蓄水孔隙孔径的小幅减小就能引起其体积的大幅降低,此时土壤水迅速释出。随土壤水吸力增大,比水容量变化幅度减小,这是由于此时土壤转为中小孔隙排水,储水孔隙体积减小,土壤颗粒的吸附能力和孔隙的

毛管作用较强,排水量减少。一般认为土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量值可以很好地表征土壤供水能力,100 kPa 时的比水容量值越大,表明土壤的供水能力越强。FM 处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层比水容量值均高于 FG 和 FD 处理,增加幅度为 4.8%~10.0%,说明秸秆翻理可改善土壤结构,增加比水容量,增强土壤供水能力。

2.3 不同处理对土壤物理性质的影响

2.3.1 土壤紧实度 播种前(图 6A)和收获后(图 6B)土壤紧实度均随土层深度的增加而增加,其中 0~15 cm 土层土壤紧实度基本呈垂直变化,15 cm 土层以下增加幅度较为明显。播种前 FG 处理 0~45 cm 土层土壤实紧度变幅为 0~2.14 MPa,均值为 1.12 MPa;FM 处理 0~45 cm 土层变幅为 0~2.34 MPa,均值为 1.26 MPa;FD 处理 0~45 cm 土层变幅为 0~2.04 MPa,均值为 1.04 MPa。收获后 FG 处理 0~45 cm 土层土壤实紧度变幅为 0.03~2.30 MPa,均值为 0.97 MPa;FM 处理 0~45 cm 土层土壤紧实度变幅为 0.15~2.46 MPa,均值为 1.28 MPa;FD 处理 0~45 cm 土层土壤紧实度变幅为 0.05~2.61 MPa,均值为 1.15 MPa。方差分析表明,秸秆还田处理、土层深度均显著影响播种前和收获后土壤紧实度,尤其是 15 cm 以下土层,而且播种前处理和深度交互对土壤紧实度的影响显著,而收获后两者交互影响不显著。

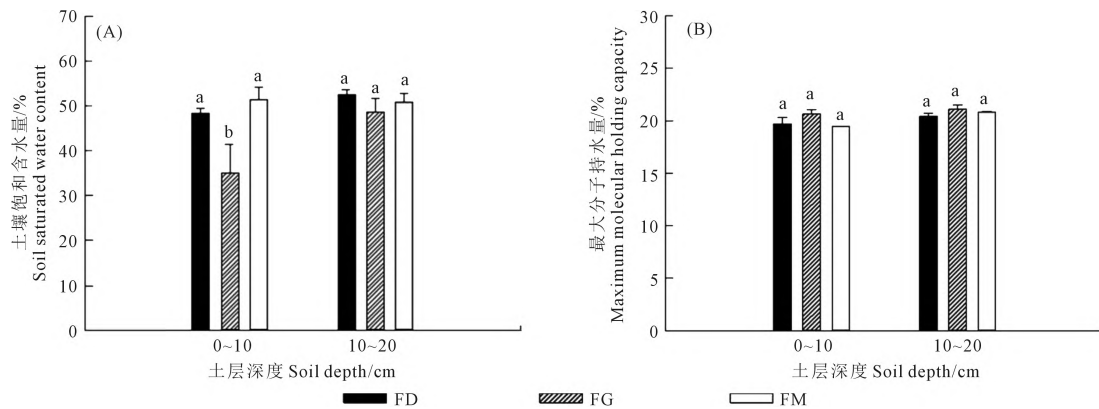


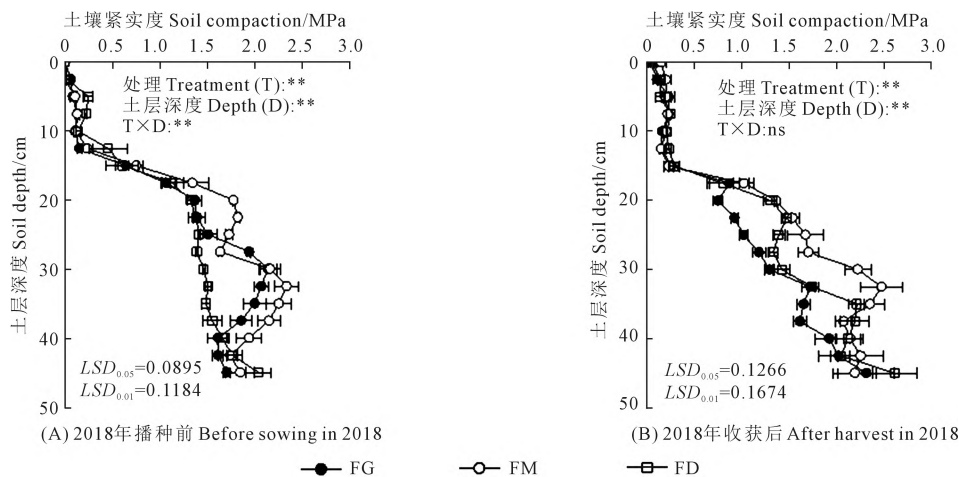
图 5 不同处理对土壤蓄水能力的影响
Fig.5 Effects of different treatments on soil water storage capacity

表 3 不同处理对土壤水分有效性的影响/%
Table 3 Effects of different treatments on soil water availability

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	土壤田间持水量 SFC	土壤毛管水 SCWC	土壤重力水 SGWC	土壤凋萎系数 SWWC	土壤有效水 SAWC
0~10	FD	30.54±0.48b	10.82±0.80a	37.54±1.90ab	17.74±0.35b	12.80±0.52a
	FG	33.16±1.10a	12.50±0.70a	22.83±0.29b	19.79±0.25a	13.37±0.90a
	FM	29.72±0.76b	10.26±0.76a	41.18±3.39a	16.77±0.62b	12.95±0.24a
10~20	FD	30.25±0.22a	9.81±0.06a	42.70±1.17a	17.79±0.44a	12.46±0.26a
	FG	31.11±0.74a	9.99±0.56a	38.57±3.56a	18.08±0.36a	13.03±0.39a
	FM	30.88±1.53a	10.08±1.47a	40.84±3.23a	17.81±0.76a	13.07±0.77a

表 4 不同处理对土壤比水容量的影响/ $(\mu\text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$
Table 4 Effects of different treatments on specific water capacity

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	土壤水吸力 Soil water suction/kPa													
		10	20	33	60	80	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	
0~10	FD	0.3475	0.1600	0.0914	0.0468	0.0339	0.0264	0.0122	0.0056	0.0036	0.0026	0.0020	0.0016	0.0013	
	FG	0.3376	0.1564	0.0897	0.0462	0.0336	0.0262	0.0121	0.0056	0.0036	0.0026	0.0020	0.0017	0.0013	
	FM	0.4057	0.1855	0.1054	0.0537	0.0388	0.0302	0.0138	0.0063	0.0040	0.0029	0.0022	0.0018	0.0014	
10~20	FD	0.3435	0.1592	0.0914	0.0471	0.0342	0.0267	0.0124	0.0057	0.0037	0.0027	0.0021	0.0017	0.0013	
	FG	0.3406	0.1576	0.0904	0.0465	0.0338	0.0264	0.0122	0.0056	0.0036	0.0026	0.0020	0.0017	0.0013	
	FM	0.3971	0.1820	0.1036	0.0529	0.0382	0.0297	0.0136	0.0062	0.0040	0.0029	0.0022	0.0018	0.0014	



注: *、*、* 分别表示差异显著性达到 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 水平, ns 表示差异不显著。下同。

Note: *, *, * indicate that the difference is significant up $P < 0.05$, $P < 0.01$, respectively. ns indicates no significant difference. The same below.

图 6 不同处理对土壤紧实度的影响

Fig.6 Effects of different treatments on soil compaction

2.3.2 土壤容重和孔隙度 如图 7A 所示, 秸秆还田和土层深度及其互作均显著影响土壤容重。FG 处理 0~10 cm 土层土壤容重显著高于 FM 和 FD 处理, 分别增加 4.29% 和 3.71%; FD 处理 10~20 cm 土层土壤容重显著高于 FM。20~60 cm 土层各处理间土壤容重差异不显著。土壤总孔隙度随土层深度的增加而逐渐降低, FM 处理 0~10 cm 土层土壤总孔隙度较 FG 和 FD 处理分别提高 3.32% 和 7.88%, 与 FG 处理差异显著; FM 处理 10~20 cm 土层土壤总孔隙度较 FG 和 FD 处理分别提高 0.42% 和 9.67%, 与 FD 处理差异显著; 30~60 cm 各土层深度处理间差异不显著(图 7B)。

2.3.3 土壤三相结构稳定性 合理的三相比是评价土壤质量的重要指标之一, 土壤三相比理想状态是 50 : 25 : 25。由表 5 可知, FG 处理表层土壤液相明显高于 FM 和 FD 处理, 但随土层深度的增加, 这种趋势逐渐消失。各处理气相均随土层深度增加而降低, 上层气相明显高于下层。各处理 0~60

cm 土层的三相比偏离值 (R) 均随土层深度增加而增加, 其中 0~10、10~20、20~30 cm 均低于 30~40、40~50、50~60 cm 土层, 处理间差异不显著。

广义土壤结构指数 ($GSSI$) 和结构距离 ($STPSD$) 是反映土壤结构的重要指标。各处理 $GSSI$ 均随土层深度增加而降低, FG 处理 0~10 cm 土层 $GSSI$ 显著高于 FM 和 FD 处理, 其他深度处理间差异不显著。各处理 $STPSD$ 随土层深度增加而增加, FM 和 FD 处理 0~10 cm 土层 $STPSD$ 显著高于 FG, 其他土层深度处理间差异不显著(表 5)。

2.4 土壤三相比 R 值与其他物理指标的相关性分析

皮尔森相关分析表明(图 8), 三相比 R 值与结构距离 ($STPSD$)、土壤容重 (SBD) 呈显著正相关关系, 与土壤结构指数 ($GSSI$)、土壤总孔隙度 (STP) 呈显著负相关关系, 与土壤含水量 (SWC) 相关性不显著。其他指标之间存在不同程度的相关性。

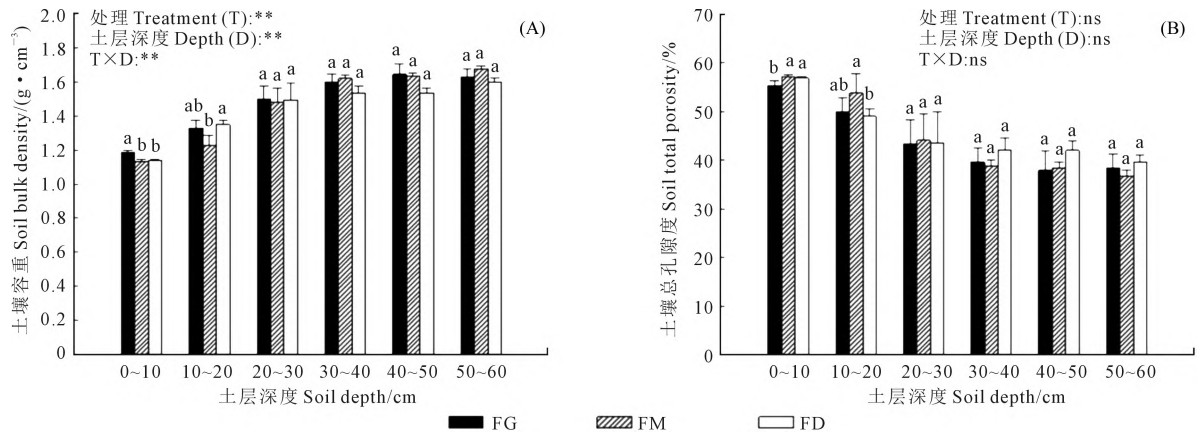


图 7 不同处理对土壤容重和总孔隙度的影响

Fig.7 Effects of different treatments on soil bulk density and soil total porosity

表 5 不同处理对土壤三相比及结构稳定性的影响

Table 5 Effects of different treatments on soil three phrase ratio and structure stability

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	固相 Solid/%	液相 Liquid/%	气相 Gas/%	固:液:气 Solid:Liquid:Gas	R	广义土壤结构指数 GSSI	结构距离 STPSD
0~10	FG	44.50	27.79	27.71	1.00:0.62:0.62	7.92±0.88a	97.98±0.61a	4.87±0.69b
	FM	41.98	23.67	34.35	1.00:0.56:0.82	7.78±1.49a	94.23±0.67b	8.77±0.56a
	FD	42.95	22.38	34.66	1.00:0.52:0.81	7.43±1.82a	94.64±0.64b	8.66±0.54a
10~20	FG	50.56	28.81	20.63	1.00:0.57:0.42	7.15±2.29a	96.80±2.09a	5.46±1.88a
	FM	47.11	25.50	27.39	1.00:0.54:0.59	8.83±5.87a	98.04±1.56a	4.43±2.09a
	FD	57.32	28.81	13.86	1.00:0.51:0.26	6.62±1.41a	82.97±14.46a	10.30±5.02a
20~30	FG	58.09	29.83	12.08	1.00:0.51:0.22	10.34±1.31a	79.18±16.58a	11.33±6.55a
	FM	55.55	28.04	16.41	1.00:0.50:0.30	7.86±2.06a	92.24±3.86a	7.76±4.86a
	FD	54.58	27.71	17.71	1.00:0.51:0.33	9.59±6.06a	95.88±2.04a	6.52±1.07a
30~40	FG	62.91	31.04	6.05	1.00:0.50:0.10	19.27±1.48a	67.00±7.38a	16.89±1.42a
	FM	63.20	29.51	7.29	1.00:0.47:0.12	15.69±1.49a	72.80±4.74a	15.95±1.07a
	FD	58.04	35.56	6.40	1.00:0.62:0.11	18.65±2.14a	65.53±12.71a	16.46±2.35a
40~50	FG	62.64	31.72	5.64	1.00:0.51:0.09	18.64±2.32a	64.15±9.22a	17.07±1.93a
	FM	63.19	30.77	6.04	1.00:0.49:0.10	18.60±1.30a	66.95±7.18a	16.84±1.43a
	FD	59.49	33.73	6.78	1.00:0.57:0.12	16.60±2.05a	67.18±13.88a	15.78±2.25a
50~60	FG	62.64	29.68	7.68	1.00:0.47:0.13	19.49±4.29a	71.80±9.40a	15.53±2.61a
	FM	62.09	35.45	2.46	1.00:0.58:0.04	19.19±1.43a	46.32±4.34a	19.94±0.47a
	FD	61.41	32.73	5.86	1.00:0.53:0.10	18.09±1.39a	62.92±14.34a	16.70±2.01a

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤含水量的影响

土壤水分是限制雨养农业区农业生产的主要因素^[15]。农田覆盖是旱地农业直接有效的蓄水保墒措施之一^[16]。秸秆还田无论是以覆盖的方式还是以深埋的方式,均能减少土壤水分蒸发量,进而提高土壤含水量^[17]。丁昆仑等^[18]研究表明,秸秆覆盖是提高土壤含水量及水分利用效率的有效途径,可使表层土壤含水量提高 2%~11%。周彦莉等^[19]研究发现,秸秆还田能提高 0~60 cm 土层土壤平均含水量,降低土壤水分累积蒸发量。高日平等^[20]研究表明,垄膜沟播结合秸秆还田措施综合优势明显高于其他处理,可作为内蒙古黄土高原旱作区玉米节水增产增效栽培技术模式。李玉梅等^[21]研究发现,同一耕作措施下秸秆还田处理土壤水分含量高于秸秆不还田,降水量越少差异越明显;与

免耕和免耕覆盖相比,翻耕与翻耕还田均增加了作物生长期间土壤含水量,提高了作物抗旱能力,产量有增加趋势。本研究表明,秸秆覆盖还田能减少地面水分蒸发,使 0~30 cm 土层土壤含水量提高 11.17%~150.84%,与前人结论基本一致。春季秸秆覆盖地表,减少地表裸露,保蓄了土壤中的水分;而秸秆翻埋与翻耕处理地表裸露,加之降雨少且多风,导致耕层土壤水分快速蒸腾散失。收获后由于秸秆翻埋和翻耕处理前期接纳了大量降水及土壤“回实”减少了土壤水分的蒸发,致使处理间土壤含水量差异不显著。战秀梅等^[22]研究认为,秸秆连年还田结合隔年深松能接纳更多的雨水,使深层土壤水分得以保存,进而有效改善土壤蓄水能力。王克鹏等^[23]研究表明,保护性耕作措施能不同程度地提高 0~30 cm 土层土壤含水量,增幅为 3.2%~28.6%,其中免耕+秸秆覆盖处理的土壤含水量在整个生育期内均最高,原因是土壤表面留有作物残茬,减少了

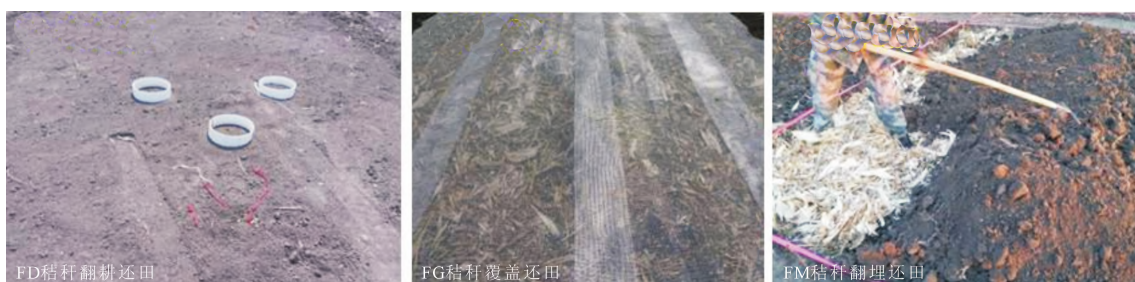
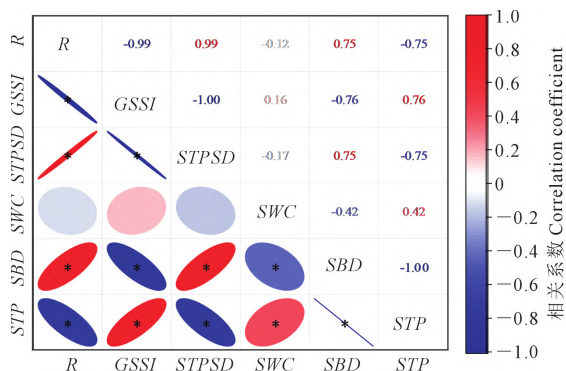


图 2 不同处理田间操作示意图

Fig.2 The field operation of different treatments



注: *、* * 分别表示相关性达到 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平。

Note: *, ** indicate that the correlation is significant up to $P < 0.05$, $P < 0.01$, respectively.

图 8 土壤三相比 R 值与物理指标相关性分析Fig.8 Correlation analysis of R value and related soil physical indicators

土壤蒸发,发挥良好的蓄水保墒作用。也有研究表明,整秆深还田方式是提高土壤水分和增加玉米产量的有效技术途径^[24]。尽管秸秆还田能有效提高土壤含水量,然而在低温冷凉区秸秆还田特别是覆盖还田容易导致地温较低而影响种子出苗,因此在生产上要因地制宜进行秸秆还田。

3.2 秸秆还田对土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线反映了土壤水分数量与能量之间的关系,可表征土壤保持水分的状况及能力^[25],对于研究土壤水分的贮存、保持、运动、供应及土壤-植物-大气连续体中水流等机理和状况都有重要意义^[26]。此外,土壤含水量、田间持水量、毛管水、有效水、萎蔫系数、导水率和渗透率等是研究土壤持水保水能力的重要指标,可在一定程度上反映秸秆还田对土壤水分的影响^[25]。本研究表明,不同秸秆还田处理耕层土壤在中吸力段土壤含水量变化曲线趋于平滑,秸秆覆盖处理(FG)土壤含水量显著高于秸秆翻埋(FM)和翻耕处理(FD),土壤持水性提高。秸秆覆盖还田能显著提高土壤田间持水量、毛管水、土壤凋萎系数和土壤有效水含量,分

别较翻耕处理增加 2.84%~8.57%、1.83%~15.52%、1.63%~11.55% 和 4.45%~4.57%。王秋菊等^[27]通过 Garden 模型计算土壤比水容量发现,不同水吸力下,褐土比水容量最高,其次是黑土、草甸土、白浆土和碱土,说明褐土和黑土释水能力强。本研究也表明秸秆翻埋后土壤结构得到改善,土壤比水容量增加 4.8%~10.0%,土壤供水能力有所提升。李玉梅等^[21]通过田间定位试验研究不同耕作与秸秆还田方式对土壤水分季节动态的影响,结果表明秸秆还田条件下 0~20 cm 耕层浅翻还田与深翻还田处理田间持水量增加 5.08%~16.24%;秸秆翻埋后土壤结构得到改善,促进比水容量的增加,增强了土壤供水能力。刘世杰等^[25]研究也认为秸秆翻埋措施下土壤持水性较为突出,土壤供水能力较强。

3.3 秸秆还田对土壤物理性质的影响

玉米秸秆直接还田使土壤结构发生变化^[28],对耕层土壤温度、含水量、容重、孔隙度及土壤相关酶活性具有十分重要的影响^[29]。陈昭旭等^[30]发现深翻配合秸秆还田模式更有利于改善内蒙古旱田土壤耕层状态及土壤结构,从而增加作物产量。邹文秀等^[31]基于 6 a 的田间试验研究发现,翻耕和秸秆还田是改善土壤物理性质的重要农艺措施,而免耕增加了 0~20 cm 土层土壤容重,减小了土壤孔隙度、持水量、饱和导水率和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量,不利于黏重黑土良好物理性质的形成。长期秸秆还田可以改善白浆土物理性状,降低白浆层的容重、硬度,增加土壤总孔隙度和有效孔隙的比例,提高水稻产量,还田年限越长效果越显著^[32]。本研究表明,秸秆还田和土层深度均显著影响玉米播种和收获时土壤紧实度,但两者交互作用仅对播种前土壤紧实度影响显著;秸秆还田和土层深度及其交互均显著影响土壤容重,秸秆覆盖还田表层土壤容重增加,土壤孔隙度降低;秸秆还田显著增加了土壤结构稳定性,促进土壤三相趋于合理。皮尔森相关分析表明,结构距离、土壤容重与三相比 R 值呈

显著正相关关系,在一定范围内有利于三相比 R 值的增加,促进土壤稳定结构的形成。也有研究表明,秸秆覆盖结合保护性耕作有利于改善风沙区农田土壤物理性质,增加土壤结构稳定性^[33]。在免耕的基础上进行秸秆覆盖有助于形成良好的土壤结构,提高土壤入渗水平,减少侵蚀,进而提高土壤物理质量^[34]。秸秆还田可改善土壤结构,在一定程度上降低了土壤容重和硬度,具有调控土壤三相结构的作用。然而秸秆还田量影响整地质量,因此需要农机、农艺结合,提升秸秆还田质量,促进秸秆还田技术的推广。

4 结 论

1) 秸秆覆盖还田可显著提高播前 0~30 cm 土层土壤含水量,较秸秆不还田翻耕处理提高 11.17%~150.84%。不同处理耕层土壤在水吸力的中吸力段(60~1 500 kPa)土壤含水量变化曲线平滑,秸秆覆盖处理显著高于秸秆翻埋和翻耕处理。

2) 秸秆还田(覆盖还田和翻埋还田)能显著提高土壤水分有效性,使比水容量较秸秆不还田翻耕处理提升 4.8%~10.0%,增强土壤供水能力。秸秆覆盖还田虽然使表层土壤容重增加,土壤孔隙度降低,但显著增加了土壤结构稳定性。

3) 三相比 R 值分别与结构距离、土壤容重呈显著正相关关系,采取合理的耕作方式结合秸秆还田措施可以改善土壤结构,增强贮水能力,提高土壤缓冲性,降低土壤硬度,促进三相结构合理,提高土壤宜耕性。

致谢:感谢中国科学院沈阳应用生态研究所谷健老师和吉林农业大学刘淑霞老师在土壤水分特征曲线分析方面提供的帮助。

参 考 文 献:

- [1] 梁爱珍,张延,陈学文,等.东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J].地理科学,2022,42(8):1325-1335.
LIANG A Z, ZHANG Y, CHEN X W, et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1325-1335.
- [2] 郑洪兵,齐华,刘武仁,等.玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨[J].耕作与栽培,2014,34(5):39-42.
ZHENG H B, QI H, LIU W R, et al. Present and problem of tillage layer of maize cropland and discussion of optimum tillage layer [J]. *Tillage and Cultivation*, 2014, 34(5): 39-42.
- [3] ADEKALU K O, OKUNADE D A, OSUNBITAN J A. Compaction and mulching effects on soil loss and runoff from two southwestern Nigeria agricultural soils [J]. *Geoderma*, 2006, 137(1/2): 226-230.
- [4] 秦猛,董全中,薛红,等.我国保护性耕作的研究进展[J].河南农业科学,2023,52(7):1-11.

- QIN M, DONG Q Z, XUE H, et al. Research progress of conservation tillage in China [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(7): 1-11.
- [5] 郭孟洁,李建业,李健宇,等.实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J].农业工程学报,2021,37(22):108-118.
GUO M J, LI J Y, LI J Y, et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 108-118.
- [6] 张雯,侯立白,张斌,等.辽西旱区不同耕作方式对土壤物理性能的影响[J].干旱区资源与环境,2006,20(3):149-153.
ZHANG W, HOU L B, ZHANG B, et al. Effects of different cultivation ways on soil physical capability in western semi arid area of Liaoning province [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 149-153.
- [7] 舒馨,朱安宁,张佳宝,等.保护性耕作对潮土物理性质的影响[J].中国农学通报,2014,30(6):175-181.
SHU X, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Effects of conservation tillage on physical properties of fluvo-aquic soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(6): 175-181.
- [8] 雷金银,吴发启,王健,等.保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):40-45.
LEI J Y, WU F Q, WANG J, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 40-45.
- [9] 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.
- [10] 苗芳芳,勉有明,普雪可,等.耕作覆盖对宁南旱区土壤团粒结构及马铃薯水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2021,54(11):2366-2376.
MIAO F F, MIAN Y M, PU X K, et al. Effects of tillage with mulching on soil aggregate structure and water use efficiency of potato in dry-farming area of southern Ningxia [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(11): 2366-2376.
- [11] 邓子正,黄明镜,张吴平,等.旱作条件下保护性耕作对土壤结构和容重影响试验研究[J].土壤通报,2023,54(1):46-55.
DENG Z Z, HUANG M J, ZHANG W P, et al. Effects of conservation tillage on soil structure and bulk density under dryland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(1): 46-55.
- [12] 李宇航,谷思玉,何婉莹,等.保护性耕作对黑土有机碳组分和玉米产量的影响[J].土壤通报,2023,54(2):336-345.
LI Y H, GU S Y, HE W Y, et al. Effects of conservation tillage practices on organic carbon components and maize yield in black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 336-345.
- [13] 严洁,邓良基,黄剑.保护性耕作对土壤理化性质和作物产量的影响[J].中国农机化,2005,(2):31-34.
YAN J, DENG L J, HUANG J. Effect of conservation tillage on soil physicochemical properties and crop yields [J]. *Chinese Agriculture Mechanization*, 2005, (2): 31-34.
- [14] 贾 B,赵 Y,穆 X,等.不同耕作方式对黄淮海平原旱地土壤物理性质及玉米根生长的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(7):295-302.
JI B, ZHAO Y, MU X, et al. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(7): 295-302.
- [15] 赵聚宝,梅旭荣,薛军红,等.秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J].中国农业科学,1996,(2):59-66.
ZHAO J B, MEI X R, XUE J H, et al. The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,

- 1996, (2): 59-66.
- [16] 朱自玺, 赵国强, 方文松, 等. 不同土壤水分和不同覆盖条件下麦田水分动态和增产机理研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(增刊 1): 137-144.
ZHU Z X, ZHAO G Q, FANG W S, et al. A study of water dynamics and yield-increasing mechanism of winter wheat fields in different soil-water and mulching conditions [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2000, 11(S1): 137-144.
- [17] 闫洪亮, 李盖. 干旱半干旱地区秸秆还田研究进展[J]. 现代农业, 2015, (6): 31-32.
YAN H L, LI G. Research progress on straw returning in arid and semi-arid areas [J]. Modern Agriculture, 2015, (6): 31-32.
- [18] 丁昆仑, HANN M J. 耕作措施对土壤特性及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 28-31.
DING K L, HANN M J. Effects of soil management on soil properties and crop yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(3): 28-31.
- [19] 周彦莉, 吴海梅, 周彦栋, 等. 短期秸秆不同还田方式对土壤结构和水分影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 502-509.
ZHOU Y L, WU H M, ZHOU Y D, et al. Effects of different short-term straw returning methods on soil structure and water content [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 502-509.
- [20] 高日平, 刘小月, 杜二小, 等. 垄膜沟播与秸秆还田对内蒙古黄土高原玉米农田土壤水分、酶活性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 181-190.
GAO R P, LIU X Y, DU E X, et al. Influences of ridge film and furrow sowing and straw returning on soil moisture, enzyme activity and yield of maize in loess plateau of Inner Mongolia [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 181-190.
- [21] 李玉梅, 王晓轶, 王根林, 等. 不同耕法及秸秆还田对土壤水分运移变化的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 40-45, 53.
LI Y M, WANG X Y, WANG G L, et al. Effects of straw returning method partnered with different tillage methods on migration of soil water [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 40-45, 53.
- [22] 战秀梅, 宋涛, 冯小杰, 等. 耕作及秸秆还田对辽南地区土壤水分及春玉米水分利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6): 666-672.
ZHAN X M, SONG T, FENG X J, et al. Effect of tillage and straw application on soil water and water use efficiency of spring maize in southern area of Liaoning province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(6): 666-672.
- [23] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3752-3761.
WANG K P, ZHANG R Z, DONG B, et al. Effect of long-term conservation tillage on soil water regimes and leaf water potential of crops in rainfed areas of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3752-3761.
- [24] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1164-1171.
WANG J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(6): 1164-1171.
- [25] 刘世杰, 冯秋苹, 王呈玉, 等. 不同秸秆还田方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报; 1-11. (2022-09-15) [2023-06-17]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2022.1886>. DOI: 10.13327/j.jjlau.2022.1886.
- LIU S J, FENG Q P, WANG C Y, et al. Effects of different straw returning methods on soil moisture characteristics [J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University; 1-11. (2022-09-15) [2023-06-17]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2022.1886>. DOI: 10.13327/j.jjlau.2022.1886.
- [26] 刘岳燕, 姚槐应, 黄昌勇. 水分条件对水稻土微生物群落多样性及活性的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 828-834.
LIU Y Y, YAO H Y, HUANG C Y. Influence of soil moisture regime on microbial community diversity and activity in a paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 828-834.
- [27] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 深耕对黑土水分特征及动态变化影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 942-948.
WANG Q J, LIU F, JIAO F, et al. Effect of deep tillage on water characteristics in black soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 942-948.
- [28] 李阳明, 涂安国, 谢颂华, 等. 保水剂对红砂岩土壤持水特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 714-720.
LI Y M, TU A G, XIE S H, et al. Effect of super absorbent polymers on water holding characteristics of red sandstone soil [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(7): 714-720.
- [29] 葛选良, 钱春荣, 张锋, 等. 不同秸秆还田模式玉米产量和耕层土壤物理特性的研究[J]. 东北农业科学, 2022, 47(3): 88-93.
GE X L, QIAN C R, ZHANG F, et al. Studies on yield of maize and physical properties of surface soil under the different straw returning patterns [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(3): 88-93.
- [30] 陈昭旭, 高聚林, 于晓芳, 等. 不同耕作及秸秆还田方式对土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 21-27.
CHEN Z X, GAO J L, YU X F, et al. Effects of different tillage and straw returning methods on soil physical properties and crop yield [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 43(6): 21-27.
- [31] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4134-4146.
ZOU W X, HAN X Z, LU X C, et al. Effects of the construction of fertile and cultivated upland soil layer on soil fertility and maize yield in black soil region in Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4134-4146.
- [32] 王秋菊, 高中超, 张劲松, 等. 黑土稻田连续深耕改善土壤理化性质提高水稻产量大田试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 126-132.
WANG Q J, GAO Z C, ZHANG J S, et al. Black-soil paddy field experiment on improving soil physical and chemical properties and increasing rice yield by continuous deep ploughing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 126-132.
- [33] 雷金银, 吴发启, 马璠, 等. 毛乌素沙地南缘保护性耕作措施对土壤物理性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 161-166.
LEI J Y, WU F Q, MA F, et al. The effects of conservation tillage on soil physical properties in the southern part of the MuUs desert [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(3): 161-166.
- [34] 张仁陟, 罗珠珠, 蔡立群, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10.
ZHANG R Z, LUO Z Z, CAI L Q, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil physical quality of rainfed areas of the Loess Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(4): 1-10.