

崔文芳,于晓芳,王志刚,等. 秸秆还田与耕作方式对内蒙古平原灌区玉米田土壤质量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(2):217-224.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.02.032

# 秸秆还田与耕作方式对内蒙古平原灌区玉米田土壤质量的影响

崔文芳,于晓芳,王志刚,高聚林,张 石,胡树平,许 鹏,雷娟玮

(内蒙古农业大学,内蒙古呼和浩特 010019)

**摘要:**内蒙古平原灌区长期采用旋耕作业方式,导致耕层逐年变浅、犁底层加厚等问题,本试验以宜机收玉米品种先玉 696 为材料,设置深翻秸秆粉碎还田、深松秸秆混拌还田、推茬清垄条深旋秸秆还田、免耕秸秆粉碎覆盖还田、农户浅旋等 5 个处理,研究不同耕作模式配套秸秆还田技术对该区域玉米农田土壤肥力及物理性状的年际间影响,探讨适宜本地区的耕作与秸秆还田技术模式。结果表明,(1)深松秸秆混拌还田能有效促进土壤有机质、速效磷的积累,提高蓄水能力,降低紧实度。4 年间,有机质、速效磷含量年均以 11.25%、119.05% 的比率增长,土壤含水量年均增长 1.32 百分点,紧实度年均以 15.36% 的比率降低,到 2020 年,有机质含量、速效磷含量、土壤含水量比 CK 提高 2.89%、225.59%、2.09%,紧实度比 CK 降低 43.69%。(2)免耕秸秆粉碎覆盖还田能有效促进土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾积累。4 年间,有机质含量年均以 29.09%、42.16%、145.24%、27.20% 的比率增长,到 2020 年,比 CK 提高 41.19%、145.69%、232.66%、17.68%。且以上 2 种秸秆还田与耕作方式随着实施年限的延长使土壤质量逐步提升。因此,深松秸秆混拌还田和免耕秸秆粉碎覆盖还田是内蒙古平原灌区持续提升土壤质量的有效措施。

**关键词:**土壤肥力;耕作方式;秸秆还田;土壤理化特性;土壤质量;内蒙古平原灌区

**中图分类号:**S513.04;S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)02-0217-08

内蒙古平原灌区土地辽阔、农田土壤地力分布不均<sup>[1]</sup>,农业生产中存在耕层浅、犁底层坚硬等土壤结构问题,同时,当地玉米生产中以连年浅旋耕作方式为主,导致土壤结构问题逐年加剧<sup>[2]</sup>,制约

了玉米产量的持续提升<sup>[3]</sup>。在农业生产过程中,秸秆还田和机械耕作措施这 2 种模式是目前改善土壤环境最为有效的关键性措施<sup>[4]</sup>。土壤进行合理耕作能够促使土壤中的气体、温度、湿度、酸碱度、水分含量等多个因素达到最佳状态<sup>[5]</sup>,而秸秆还田可有效改良土壤内部结构,显著提升地力<sup>[6]</sup>。李嵩等通过连续 3 年玉米田旋耕、翻耕、深松试验,认为深松对改善耕层厚度和降低犁底层厚度具有显著效果<sup>[7]</sup>。在中下层土壤,深松可降低土壤紧实度和容重,改善土壤的孔隙状况。吴建富等认为,连续 2 年

收稿日期:2022-01-05

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0300800)。

联系方式:崔文芳(1977—),女,河北故城人,博士,教授,主要从事玉米高产高效研究。E-mail: cui.wenfang@163.com。

通信作者:高聚林,博士,教授,主要从事玉米生理生态及决策系统研究。E-mail: nmgaojulin@163.com。

[19] Hu R, Wen S P, Zeng Z G, et al. A short-term power load forecasting model based on the generalized regression neural network with decreasing step fruit fly optimization algorithm [J]. Neurocomputing, 2017, 221: 24-31.

[20] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.

[21] 张晓凤,王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3): 30-38.

[22] 刘志强,何 丽,袁 亮,等. 采用改进灰狼算法的移动机器人路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 1-11.

[23] 徐 明,龙 文. 基于多策略融合灰狼优化算法的特征选择方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8544-8551.

[24] 杨永康,缪书唯. 基于 DE-GWO 算法的光伏系统 MPPT 仿真

研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(7): 75-81.

[25] 张孟健,龙道银,杨小柳,等. 基于非线性控制参数组合策略的灰狼优化算法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(5): 250-255, 322.

[26] 谢习华,徐 雷,谭 耀,等. 基于 PSO-GRNN 的直升机旋翼不平衡故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(2): 175-179.

[27] Yip H L, Fan H Q, Chiang Y H. Predicting the maintenance cost of construction equipment: comparison between general regression neural network and Box-Jenkins time series models [J]. Automation in Construction, 2014, 38: 30-38.

[28] Huang Y W, Chen M Q, Li Y, et al. Modeling of chemical exergy of agricultural biomass using improved general regression neural network [J]. Energy, 2016, 114: 1164-1175.

免耕对土壤结构、容重、孔隙状况等有改善作用,还可提高土壤肥力<sup>[8]</sup>。但是,于博等认为,深松可以改善长期不合理耕作造成的耕层物理结构变差状况,但却不可能通过 1 年或几年的单一的深松耕作,使土壤结构恢复到原来的状态<sup>[9]</sup>。吴建富等认为,免耕 1 年对改善土壤物理性质有一定作用,能促进养分向表土层富集,免耕年限延长,物理性质将下降。可见,单一的耕作措施随着施用年限的延长,不能保证土壤质量的持续提升<sup>[8]</sup>。于博等对连续多年深翻秸秆还田的土壤研究后认为,2 年深翻秸秆还田利于改善犁底层结构,3 年和 4 年深翻秸秆还田利于改善耕层结构<sup>[9]</sup>。以往的研究多侧重于单一耕作措施,关于连年实施不同耕作措施秸秆还田技术模式间的差异性及年际间的变化研究较少。因此,本研究将耕作方式和秸秆还田方式耦合形成不同的秸秆还田模式,通过对不同耕作及秸秆还田模式下土壤质量相关指标的测定及分析,研究连续 4 年不同耕作及秸秆还田措施提升土壤质量的机制,明确不同耕作及秸秆还田模式对土壤质量的改善效果,以期为内蒙古平原灌区建立以土壤质量提升、秸秆高效利用为核心的秸秆还田技术模式提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2017 年和 2018 年在内蒙古农业大学科技园区(内蒙古自治区包头市土默特右旗沟门镇)进行,试验基地属土默川平原灌区,地势平坦,定点试验田的耕层为 15 ~ 17 cm,犁底层为 17 ~ 40 cm,质地为壤土,前茬是玉米,2017 年播种前 0 ~ 20 cm 耕层土壤养分:有机质含量为 22.30 g/kg,碱解氮含量为 44.89 mg/kg,速效磷含量为 7.97 mg/kg,速效钾含量为 82.24 mg/kg。2018 年土壤养分:有机质含量为 20.72 g/kg,碱解氮含量为 51.64 mg/kg,速效磷含量为 4.21 mg/kg,速效钾含量为 63.24 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计,主区为秸秆还田与耕作方式,分别以农户浅旋(CK)的土壤肥力为对照,设置推茬清垄条深旋秸秆还田(SCR)、深松秸秆混拌还田(SSR)、深翻秸秆粉碎还田(DPR)、免耕秸秆粉碎覆盖还田(NTR),共 5 个处理,重复 4 次。

农户浅旋指在秋季机械收获后秸秆离田,春季浅旋(15 cm),整地播种;推茬清垄条深旋秸秆还田

指在秋季机械收获后秸秆全量粉碎覆盖还田,春季条深旋耕 30 cm,推茬清垄播种机播种小双行;深松秸秆混拌还田:指在秋季机械收获后秸秆全量粉碎覆盖还田;秋季深松(35 cm 以上),春季浅旋混拌使秸秆进入土中,整地播种;深翻秸秆粉碎还田指秋季机械收获后秸秆全量 2 次粉碎秋深翻(35 cm 以上)使秸秆翻入土中,春季整地播种;免耕秸秆粉碎覆盖还田指秋季机械收获后秸秆全量覆盖,春季粉碎还田、免耕播种。副区为品种,选择品种为先玉 696,种植密度为 82 500 株/hm<sup>2</sup>,小区面积为 390 m<sup>2</sup>,长 65 m,宽 6 m,行距 60 cm,株距 20 cm,每个处理重复 4 次。2 年连续定位试验,各处理田间排列和位置固定不变,2017 年 4 月 26 日播种,10 月 26 日机械收获籽粒;2018 年 4 月 23 日播种,10 月 28 日机械收获籽粒。施肥量:纯氮为 465 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 210 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 为 202.5 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥按 3 : 7 比例分别于拔节、大穗期追施,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 作基肥一次性施入,其他管理同大田生产。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 测定指标及方法 (1)土壤含水量和容重:采用环刀法(容积 100 cm<sup>3</sup>)测定,于玉米成熟期选择具有代表性的地块,用环刀取 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 45 cm 土层土样,称质量后,装入密封袋中带回实验室,在 80 ℃烘箱内烘干,再称质量,计算土壤容重和土壤含水量。

土壤容重(g/cm<sup>3</sup>) = (烘干后带土环刀质量 - 环刀质量)/环刀容积;

土壤含水量 = (原土质量 - 烘干土质量)/烘干土质量 × 100% = 水质量/烘干土质量 × 100%。

(2)土壤孔隙度:成熟期用土壤孔隙度测定仪(型号 UGT)测定,测定土壤层次:0 ~ 45 cm,每 15 cm 为 1 层。

(3)土壤养分:在玉米成熟期取 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 45 cm 土层的土样,分别测定土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,碱解氮含量用扩散吸收法测定,速效磷含量采用碳酸氢钠提取、钼锑蓝比色法测定,速效钾含量用盐酸浸提火焰光度法测定。

(4)人工测产及考种:在收获期测产,去除边行效应,每个处理随机选取 3 点,每点验收 2 行,量取 5 m,准确量取测产区面积,并调查该面积内总株数、穗数、双穗数、空秆数、倒伏数、实际收获株数、收获总穗数。随后将每个处理所取果穗自然风干,

留作室内考种。测定项目包括穗粒质量、粒质量、千粒质量、行粒数、穗行数、产量等。

1.3.2 土壤质量评价 土壤质量指数能够综合有效地反映土壤质量的变异信息,采用加权求和模型对深松条件下土壤含水量、土壤容重、土壤全氮含量、土壤速效钾含量等指标,进行土壤质量指数的计算。

土壤质量评价指数(SQI)计算公式<sup>[10]</sup>如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i。$$

(1)

式中: $W_i$  为指标权重; $N_i$  为指标隶属度; $n$  为指标个数。其中,指标权重表示某指标与其他指标之间相关系数的平均值占所有评价指标相关系数平均值总和的比。隶属度由评价指标所属的隶属度函数确定。隶属度函数一般分为升型和降型。

升型隶属度函数公式为

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2; \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases}$$

(2)

降型隶属度函数公式为

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \geq x_2 \\ 0.9(x_2 - x)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2。 \\ 1.0 & x \leq x_1 \end{cases}$$

(3)

研究根据最小数据集中各指标对土壤质量的正负效应选择函数和确定其隶属度。各指标的最小值和最大值作为函数的转折点  $x_1$ 、 $x_2$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 记录与整理数据,利用 Excel、DPS 7.5 软件进行方差分析和显著性检验,对各指标进行年际间和处理间差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作还田模式对土壤养分积累的影响

2.1.1 不同耕作还田模式对土壤有机质的影响

由表 1 可知,在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,年际间比较,各土层有机质积累量均有增加趋势,且达到显著差异。从 4 年的整体结果看,处理间比较,各土层的各处理间,0 ~ 15 cm 土层的除 SSR、NTR 处理与 CK 间差异不显著,其余处理间均达到显著差异;15 ~ 30 cm,SSR 处理显著高于 CK;30 ~ 45 cm,DPR 处理显著高于 CK。以 2020 年为例,0 ~

15 cm,SSR、SCR、NTR 处理较 CK 分别提高 13.76%、11.38%、51.07%;15 ~ 30 cm,SSR、NTR 处理分别比 CK 高 12.18%、33.67%;30 ~ 45 cm,NTR 处理比 CK 高 39.17%。

从各处理的均值看,2017—2020 年,SSR、SCR、NTR、CK 的有机质积累量均有明显增加,年平均增长率分别为 11.25%、11.72%、29.09%、13.42%,到 2020 年,SSR、SCR、NTR 处理分别比 CK 提高 2.89%、5.23%、41.19%。以上分析表明,SSR、NTR、DPR 分别对 0 ~ 30、0 ~ 15、30 ~ 45 cm 土壤有机质积累有促进作用。

表 1 不同耕作还田方式下土壤有机质养分年际间变化

土层深度 (cm)	处理	有机质含量(g/kg)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0 ~ 15	CK	17.86c	22.39a	27.57a	21.44b	22.32a
	DPR	27.66a	10.47c	23.36a	18.30b	19.95c
	SSR	17.01c	18.20b	31.43a	24.39b	22.76a
	SCR	20.07b	9.71c	26.72a	23.88b	20.10b
	NTR	16.37c	12.55c	24.72b	32.39a	21.51a
	平均值	19.79c	14.66c	26.76a	24.08b	
15 ~ 30	CK	15.76b	22.14a	19.51a	22.50b	19.98bc
	DPR	16.29b	24.98a	23.29a	18.50b	20.77b
	SSR	16.69b	23.30a	31.97a	25.24a	24.30a
	SCR	18.11a	8.69c	25.31a	22.35b	19.62d
	NTR	14.72b	14.73b	16.51b	30.08a	19.01c
	平均值	16.31c	18.77b	23.32a	23.73a	
30 ~ 45	CK	11.19b	22.25a	23.37a	21.47a	19.57b
	DPR	17.03a	25.76a	24.65a	20.12b	21.89a
	SSR	15.18a	21.62b	28.95a	17.66c	20.85b
	SCR	11.18b	8.73b	21.32a	22.59a	15.96d
	NTR	11.83b	15.91b	15.27b	29.88a	18.22c
	平均值	13.28b	18.85b	22.71a	22.34a	
均值	CK	14.94	22.26	23.48	21.80	20.62
	DPR	20.33	20.40	23.77	18.97	20.87
	SSR	16.29	21.04	30.78	22.43	22.64
	SCR	16.45	9.04	24.45	22.94	18.22
	NTR	14.31	14.40	18.83	30.78	19.58

注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.1.2 不同耕作还田模式对土壤碱解氮的影响

由表 2 可知,在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,年际间比较,各土层碱解氮积累量表现增加趋势,且达到显著差异。从 4 年的整体结果看,处理间比较,各土层的各处理间均达到显著差异,0 ~ 15 cm,SSR、SCR、NTR 处理显著高于 CK;15 ~ 30 cm,DPR、SSR、SCR、NTR 处理显著高于 CK;30 ~

45 cm, NTR 处理显著高于 CK。以 2020 年为例, 0 ~ 15 cm, 处理间差异显著, SSR、SCR、NTR 处理显著高于 CK, 3 个处理分别比 CK 高 19.23%、21.06%、153.54%; 15 ~ 30 cm, 处理间差异显著, SSR、NTR 处理均显著高于 CK, 分别比 CK 高 7.08%、98.62%; 30 ~ 45 cm, NTR 处理与 CK 差异显著, 比 CK 高 192.14%。

从各处理的均值看, 从 2017 年到 2020 年 DPR、SCR、NTR 处理和 CK 的碱解氮积累量均有明显增加, 年均增长率为 1.15%、5.54%、42.16%、5.99%, 到 2020 年, DPR、SSR、SCR、NTR 处理分别比 CK 高 10.88%、3.32%、20.58%、145.69%。以上分析表明, SCR、NTR 处理更利于土壤碱解氮的积累。

表 2 不同耕作还田方式下土壤碱解氮年际间变化

土层深度 (cm)	处理	碱解氮含量 (mg/kg)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0 ~ 15	CK	49.27b	41.47b	56.13b	50.86b	49.43c
	DPR	102.86a	94.60a	54.89b	53.38b	76.43bc
	SSR	62.78b	91.90a	85.29a	60.64a	75.15b
	SCR	64.41b	106.84a	72.40a	61.57a	76.31b
	NTR	41.55b	107.60a	72.99a	128.95a	87.77a
	平均值	64.17b	88.48a	68.34b	71.08b	
15 ~ 30	CK	50.31b	36.17b	45.77b	58.06b	47.58c
	DPR	63.21a	99.54a	60.96b	58.70b	70.60b
	SSR	49.06b	86.08a	77.07a	62.17a	68.60b
	SCR	56.92b	90.78a	65.93b	54.88b	67.13b
	NTR	49.22b	121.33a	53.86b	115.32a	84.93a
	平均值	53.74c	86.78a	60.72c	69.83b	
30 ~ 45	CK	34.11b	84.19b	53.85b	50.23b	55.60b
	DPR	32.41b	83.37b	58.24b	64.37b	59.60b
	SSR	47.04a	95.12a	72.67a	41.64b	64.12b
	SCR	41.91b	75.83b	49.25b	75.45b	60.61b
	NTR	45.34b	99.71a	67.89a	146.74a	89.92a
	平均值	40.16c	87.64a	60.38b	75.69ab	
均值	CK	44.56	53.94	51.92	53.05	50.87
	DPR	66.16	92.50	58.03	58.82	68.88
	SSR	52.96	91.03	78.34	54.81	69.29
	SCR	54.41	91.15	62.53	63.97	68.02
	NTR	45.37	109.55	64.92	130.34	87.55

2.1.3 不同耕作还田模式对土壤速效磷的影响  
由表 3 可知, 在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下, 年际间比较, 各土层土壤速效磷积累量表现为增加趋势, 且达到显著差异。从 4 年的整体结果看, 处理间比较, 各土层的各处理间均达到显著差异,

0 ~ 15 cm, SCR、NTR 处理显著高于 CK, 15 ~ 30、30 ~ 45 cm 土层没有显著高于 CK 的处理。以 2020 年为例, 0 ~ 15 cm, SSR、NTR 处理速效磷含量较高, 与 CK 差异显著; 15 ~ 30 cm, NTR 处理显著高于 CK; 30 ~ 45 cm, NTR 处理显著高于 CK。

从各处理的均值看, 从 2017 年到 2020 年 SSR、SCR、NTR 处理和 CK 的速效磷积累量均有明显增加, 年均增长率分别为 119.05%、42.28%、145.24%、28.80%, 到 2020 年, SSR、SCR、NTR 处理分别比 CK 高 225.59%、92.93%、232.66%。SSR、SCR、NTR 处理更有利于土壤速效磷的积累。

表 3 不同耕作还田方式下土壤速效磷养分年际间变化

土层深度 (cm)	处理	速效磷含量 (mg/kg)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0 ~ 15	CK	3.21b	20.63b	4.30b	3.58b	7.93c
	DPR	6.98a	23.88b	3.85b	2.11b	9.21bc
	SSR	1.98b	4.24c	2.41c	23.38a	8.00bc
	SCR	5.15a	27.07b	5.33a	8.73b	11.57b
	NTR	1.19c	68.83a	5.73a	15.35a	22.78a
	平均值	3.70c	28.93a	4.32c	10.63b	
15 ~ 30	CK	0.84a	68.71a	1.92b	3.93b	18.85a
	DPR	0.50a	18.95b	3.42a	1.63b	6.13bc
	SSR	0.20b	4.40b	3.10a	2.31b	2.50c
	SCR	0.57a	39.36a	3.97a	4.27b	12.04abc
	NTR	0.34b	49.19a	3.28a	5.01a	14.46ab
	平均值	0.49c	36.12a	3.14b	3.43b	
30 ~ 45	CK	0.12c	61.06a	1.53b	1.41b	16.03a
	DPR	0.21c	9.97c	3.72a	1.99b	3.97c
	SSR	0.55a	6.05c	4.10a	3.31b	3.50c
	SCR	0.26b	66.18a	2.51b	4.20a	18.29a
	NTR	0.49a	27.12b	3.63a	9.30a	10.14b
	平均值	0.33c	34.08a	3.10b	4.04b	
均值	CK	1.39	50.13	2.58	2.97	14.27
	DPR	2.56	17.60	3.66	1.91	6.43
	SSR	0.92	4.90	3.20	9.67	4.67
	SCR	1.99	44.20	3.94	5.73	13.97
	NTR	0.67	48.38	4.21	9.88	15.79

2.1.4 不同耕作还田模式对土壤速效钾的影响  
由表 4 可知, 在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下, 年际间比较, 各土层速效钾积累量表现增加趋势, 且达到显著差异。从 4 年的整体结果看, 处理间比较, 各土层的各处理间均达到显著差异, 0 ~ 15、30 ~ 45 cm 均为 SSR 处理显著高于 CK。以 2020 年为例, 0 ~ 15 cm, 处理间差异显著, SSR、SCR、NTR 处

理显著高于 CK,3 个处理分别比 CK 高 52.66%、16.64%、42.83%;15~30 cm,以 2019 年为例,SSR 显著比 CK 提高 74.82%;30~45 cm,SSR 显著比 CK 提高 41.54%。

从各处理的均值看,从 2017 年到 2020 年 SCR、NTR 的速效钾积累量均有明显增加,年均增长率分别为 11.83%、27.20%。到 2020 年,SSR、NTR 分别比 CK 高 15.29%、17.68%。SSR、NTR 更有利于土壤速效钾的积累。

表 4 不同耕作还田方式下土壤速效钾养分年际间变化

土层深度 (cm)	处理	速效钾含量(mg/kg)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0~15	CK	271.26b	108.86c	117.64b	145.31b	160.77d
	DPR	166.43b	141.92b	72.96c	122.16b	125.87e
	SSR	414.03a	178.24a	115.81c	221.83a	232.48a
	SCR	141.88b	122.82b	124.67a	169.49a	139.72c
	NTR	85.61c	119.26b	110.42c	207.55a	130.71b
	平均值	215.84a	134.22b	108.30c	173.27a	
15~30	CK	121.80a	135.01a	68.83c	147.72a	118.34b
	DPR	118.31a	125.62a	73.81c	105.39b	105.78c
	SSR	58.38c	142.58a	120.33a	150.74a	118.01a
	SCR	107.99b	146.70a	86.01b	128.66b	117.34b
	NTR	80.81c	116.39b	69.53c	147.37a	103.53bc
	平均值	97.46b	133.26a	83.70b	135.98a	
30~45	CK	68.23b	127.37a	71.31b	147.30a	103.55b
	DPR	105.96a	114.84a	71.59b	107.69b	100.02c
	SSR	211.30a	184.84a	100.93a	135.08a	158.04a
	SCR	59.89b	144.10a	70.62b	135.04a	102.41b
	NTR	85.33b	98.82b	57.82c	163.25a	101.31bc
	平均值	106.14b	133.99a	74.45b	137.67a	
均值	CK	153.76	123.75	85.93	146.77	127.55
	DPR	130.23	127.46	72.79	111.74	110.56
	SSR	227.90	168.55	112.36	169.21	169.51
	SCR	103.25	137.87	93.77	144.39	119.82
	NTR	83.92	111.49	79.26	172.72	111.85

2.2 不同耕作还田模式对土壤物理性质的影响

2.2.1 不同耕作还田模式对土壤紧实度的影响

由表 5 可知,在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,处理间比较,各土层的各处理间均达到显著差异,0~15、15~30、30~45 cm,均为 DPR、SSR 处理显著低于 CK。以 2020 年为例,0~15 cm,DPR、SSR、NTR 处理较 CK 分别降低 40.55%、54.15%、25.03%;15~30 cm,DPR、SSR、SCR、NTR 较 CK 分别降低 50.91%、51.18%、38.07%、8.77%;30~45 cm,SCR、NTR 分别比 CK 高 12.69%、9.17%。

从各处理的均值看,从 2018 年到 2020 年 DPR、SSR、SCR、NTR 的紧实度有降低趋势,年均以 10.75%、19.36%、4.17%、4.76% 的比率降低,到 2020 年,DPR、SSR、SCR、NTR 处理分别比 CK 低 44.66%、43.69%、12.06%、4.76%。DPR、SSR、SCR、NTR 均有利于降低土壤紧实度效果,但 DPR、SSR 的效果更显著。

表 5 不同耕作还田方式下土壤紧实度年际间变化

土层深度 (cm)	处理	土壤紧实度(kPa)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0~15	CK	1 217b	1 819a	1 940a	1 830a	1 702ab
	DPR	1 578a	1 342a	1 648a	1 088a	1 414bc
	SSR	1 864a	1 381a	1 558a	839b	1 411c
	SCR	1 576a	2 163a	2 079a	1 802a	1 905a
	NTR	1 244b	2 842a	2 695a	1 372a	2 308a
	平均值	1 496b	1 909a	1 984a	1 386b	
15~30	CK	1 832a	3 850a	3 423a	4 494a	3 400a
	DPR	1 127b	2 634a	2 315a	2 206a	2 071b
	SSR	897b	3 444a	1 697b	2 194a	2 058b
	SCR	1 726a	3 266a	3 618a	2 783a	2 848ab
	NTR	842b	3 864a	3 626a	4 100a	3 108a
	平均值	1 285b	3 412a	2 936a	3 155a	
30~45	CK	1 872b	4 488a	2 305b	3 948a	3 153bc
	DPR	1 436b	3 162a	3 408a	2 391b	2 599d
	SSR	1 054c	4 070a	2 851b	2 752b	2 682cd
	SCR	1 782b	4 408a	4 482a	4 449a	3 780a
	NTR	2 002a	4 078a	3 690a	4 310a	3 520ab
	平均值	1 629b	4 041a	3 347b	3 570ab	
均值	CK	1 640	3 386	2 556	3 424	2 752
	DPR	1 380	2 379	2 457	1 895	2 028
	SSR	1 272	2 965	2 035	1 928	2 050
	SCR	1 695	3 279	3 393	3 011	2 845
	NTR	1 363	3 595	3 337	3 261	2 889

2.2.2 不同耕作还田模式对土壤孔隙度的影响

孔隙度反映土壤孔隙状况和松紧程度。分析不同耕作秸秆还田模式下不同处理各土层土壤孔隙度年际间变化(表 6)可知,在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,年际间比较,孔隙度表现降低趋势,而处理间未达到显著差异。

从各处理的均值看,从 2017 年到 2020 年 DPR、SSR、SCR、NTR、CK 的孔隙度有降低趋势,年均以 4.70%、3.56%、6.62%、5.17%、5.73% 比例降低,但是到 2020 年,DPR、SSR、NTR 仍分别比 CK 高 2.55%、5.22%、4.83%。DPR、SSR、NTR 具有减缓降低土壤孔隙度的作用,但效果不显著。

表 6 不同耕作还田方式下土壤孔隙度年际间变化

土层深度 (cm)	处理	土壤孔隙度(%)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0 ~ 15	CK	42.36a	41.67a	42.07a	36.97a	40.77a
	DPR	40.36a	32.55b	41.28a	36.61ab	37.70a
	SSR	41.48a	43.63a	39.77b	38.59a	40.87a
	SCR	49.38a	39.22b	40.51a	34.99b	41.03a
	NTR	47.45a	33.18b	39.40b	36.19b	39.06a
	平均值	44.21a	38.05b	40.61b	36.67b	
15 ~ 30	CK	44.52a	39.89ab	38.83b	35.15b	39.60a
	DPR	46.78a	32.86c	43.12a	38.89a	40.41a
	SSR	44.38a	41.24a	40.41a	38.36a	41.10a
	SCR	41.12a	40.71b	39.9ab	34.77b	39.13a
	NTR	44.62a	34.52b	39.3ab	38.88a	39.33a
	平均值	44.28a	37.84b	40.31b	37.21b	
30 ~ 45	CK	43.54a	38.47b	38.73a	37.12b	39.47a
	DPR	42.31a	37.45b	37.91a	36.54b	38.55a
	SSR	42.31a	35.81b	37.52a	38.02ab	38.42a
	SCR	41.98a	42.48a	36.38b	38.11a	39.74a
	NTR	42.24a	37.93b	35.97b	39.48a	38.91a
	平均值	42.48a	38.43b	37.30b	37.85b	
均值	CK	43.47	40.01	39.88	36.42	39.95
	DPR	43.15	34.29	40.77	37.35	38.89
	SSR	42.72	40.23	39.23	38.32	40.13
	SCR	44.16	40.80	38.93	35.96	39.96
	NTR	44.77	35.21	38.22	38.18	39.10

2.2.3 不同耕作还田模式对土壤含水量的影响 分析不同耕作秸秆还田模式下不同处理各土层土壤含水量年际间变化(表 7),在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,年际间含水量表现升高趋势,且年际间差异显著。从 4 年的整体结果看,处理间比较,各土层的各处理间均达到显著差异,0 ~ 15 cm,SSR、SCR 处理显著高于 CK;15 ~ 30 cm,DPR、SCR 处理显著高于 CK;30 ~ 45 cm,DPR 处理显著高于 CK。以 2020 年为例,0 ~ 15 cm,DPR、SSR、NTR 处理分别较 CK 升高 2.82、2.93、4.42 百分点;15 ~ 30 cm,DPR、SSR、SCR、NTR 处理分别较 CK 升高 4.33、3.59、0.98、5.28 百分点;30 ~ 45 cm,DPR、SCR、NTR 处理分别较 CK 升高 2.25、1.13、5.26 百分点。

从各处理的均值看,从 2017 年到 2020 年,DPR、SSR、NTR、CK 土壤含水量有升高趋势,年均以 0.96、1.32、2.13、0.44 百分点的比率升高,到 2020 年,DPR、SSR、NTR 处理分别比 CK 提高 3.13、2.09、4.99 百分点。DPR、SSR、NTR 处理均有利于提高土壤含水量。

2.3 不同耕作还田模式对土壤质量指数和产量的影响

2.3.1 不同耕作还田模式对土壤质量指数的影响

表 7 不同耕作还田方式下土壤含水量年际间变化

土层深度 (cm)	处理	土壤含水量(%)				
		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值
0 ~ 15	CK	9.75c	13.90bc	15.69ab	13.85b	13.30b
	DPR	11.11b	12.48c	17.04a	16.67a	14.33ab
	SSR	11.51b	16.49a	16.57a	16.78a	15.34a
	SCR	17.93a	14.21b	16.58a	13.34b	15.52a
	NTR	10.78b	14.60ab	14.32ab	18.27a	14.49ab
	平均值	12.22c	14.34b	16.04a	15.78a	
15 ~ 30	CK	12.46b	14.04b	17.25a	13.53b	14.32c
	DPR	13.66b	14.42b	18.53a	17.86a	16.12ab
	SSR	6.92c	15.79a	18.42a	17.12a	14.56c
	SCR	17.55a	17.22a	17.04a	14.51ab	16.58a
	NTR	10.82b	15.65a	15.40a	18.81a	15.17bc
	平均值	12.28c	15.42b	17.33a	16.37ab	
30 ~ 45	CK	14.19a	13.79bc	17.79a	14.33b	15.03b
	DPR	14.76a	14.91ab	19.71a	16.58b	16.49a
	SSR	13.75b	13.51c	20.38a	14.07b	15.43ab
	SCR	12.98c	14.28b	18.87a	15.46b	15.40ab
	NTR	9.58c	17.74a	16.31b	19.59a	15.81ab
	平均值	13.05d	14.85c	18.61a	16.01b	
均值	CK	12.13	13.91	16.91	13.90	
	DPR	13.18	13.94	18.43	17.03	
	SSR	10.73	15.26	18.46	15.99	
	SCR	16.15	15.23	17.50	14.44	
	NTR	10.39	16.00	15.35	18.89	

分析不同耕作秸秆还田模式下不同处理年际间播前土壤质量指数变化,结果(表 8)表明,在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,2017 年,DPR、SSR、SCR 处理高于 CK;2018 年 NTR 处理播前土壤质量指数为 0.67,但仍低于 CK(0.71);2019 年,SSR 处理最高,其次是 DPR,分别比 CK 高 137.84%、45.95%;2020 年,NTR 处理最高,其次是 SSR 处理,分别比 CK 高 320.00%、188.00%。2017—2020 年土壤质量指数的均值表现为 SSR、NTR、DPR、SCR 处理均高于 CK,分别比 CK 提高 57.31%、31.58%、28.07%、24.56%,而 2017—2020 年 CK 的土壤质量指数表现较低且有降低趋势。因此,农户浅旋不利于土壤质量的提升,而 SSR、NTR 处理土壤质量指数逐年提升。

表 8 不同耕作还田方式下土壤质量指数年际间变化

处理	土壤质量指数					较 CK 变化幅度(%)
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	均值	
CK	0.38	0.71	0.37	0.25	0.43	
DPR	0.85	0.51	0.54	0.29	0.55	28.07
SSR	0.53	0.56	0.88	0.72	0.67	57.31
SCR	0.53	0.63	0.52	0.45	0.53	24.56
NTR	0.16	0.67	0.37	1.05	0.56	31.58

2.3.2 不同耕作还田模式对玉米产量的影响 分析不同耕作秸秆还田模式下不同处理产量年际间变化,结果(表 9)表明,在实施不同耕作方式与秸秆还田措施下,2017—2020 年,DPR、SSR、NTR 处理与 CK 间的产量差异显著,分别较 CK 提高 16.41%、17.66%、17.46%,年际间差异不显著。

表 9 不同处理玉米产量年际间变化

处理	玉米产量(kg/667 m <sup>2</sup> )					较 CK 变化幅度(%)
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	均值	
CK	792a	826b	713b	801b	783b	
DPR	971a	928a	930a	817b	912a	16.41
SSR	934a	944a	904a	903a	921a	17.66
SCR	615b	870a	898b	897a	820b	4.73
NTR	1 039a	846b	964a	830b	920a	17.46
年际间平均值	870a	883a	882a	850a		

3 讨论与结论

我国农田土壤耕作层浅、实、少,犁底层加厚,蓄水保墒能力差,土壤肥力不均等问题是制约产量持续提升的主要原因之一<sup>[11]</sup>。深松和深翻均可降低土壤紧实度,改善土壤结构和孔隙度,提升蓄水能力,提高土壤肥力。深松的效果又优于翻耕<sup>[12]</sup>,本研究也得到相同结果。何鑫在黑土上的研究表明,深松更利于改善土壤结构,提高土壤速效养分<sup>[13]</sup>。闫洪奎等通过 5 年定位试验研究表明,深松秸秆还田导致土壤表层碱解氮、速效钾积累量降低,增强田间持水能力、表层有机质和速效磷积累量<sup>[14]</sup>。本研究表明,深松秸秆混拌还田较农户浅旋能增加 0~30 cm 土层土壤有机质及碱解氮含量、0~45 cm 速效钾含量,降低 0~45 cm 土层土壤紧实度,免耕秸秆粉碎覆盖还田能增加 0~15 cm 有机质含量、0~45 cm 碱解氮含量、0~15 cm 速效钾积累量。究其原因可能是深松秸秆混拌还田因部分粉碎秸秆入土较深,秸秆腐解后将提高深层土壤养

分含量,而免耕秸秆粉碎覆盖还田秸秆覆盖于表层,农户浅旋秸秆入土较浅(15 cm 左右),因此,深松秸秆混拌还田对于提高表层土壤有机质含量效果较显著,而碱解氮分布则有所不同,因秸秆分解过程中要消耗碱解氮中的部分无机氮,致使深松秸秆混拌还田 0~35 cm 范围内无机氮均有消耗,积累量显著低于免耕秸秆粉碎覆盖还田,免耕秸秆粉碎覆盖还田处理 3 个土层碱解氮含量均较高,经过 4 年积累,到 2020 年碱解氮积累到 130.34 g/kg,明显高于其他处理,农户浅旋处理浅层土壤消耗无机氮用于秸秆分解,因此,实测结果中农户浅旋浅层(0~15 cm)土壤碱解氮含量较高,而深松秸秆混拌还田在 0~45 cm 含量分布均低于免耕秸秆粉碎覆盖还田,这与江泽普等的研究结果<sup>[15-16]</sup>一致。本研究设置深翻秸秆粉碎还田、深松秸秆混拌还田、推茬清垄条深旋秸秆还田、免耕秸秆粉碎覆盖还田、农户浅旋等 5 个处理,探索不同耕作模式配套秸秆还田技术对内蒙古平原灌区玉米农田土壤肥力及物理性状的年际间影响,并对各技术模式的土壤质

量进行评价,结果表明,深松秸秆混拌还田和免耕秸秆粉碎覆盖还田耕作措施利于持续提升土壤质量和肥力,是内蒙古平原灌区持续提升土壤质量的有效措施。

我国持续多年的旋耕耕作方式,导致耕作层变浅、犁底层加厚紧实且表现上移,根系难以深扎,同时也严重破坏了土壤的物理性状。为此,诸多学者利用农家肥、有机肥、秸秆还田等途径提高地力,通过深松等耕作方式提高保水能力。实践证明,既加深耕层又提高地力,才能保证耕地综合生产能力的持续提升,单纯的秸秆还田或深松耕作方式无法彻底解决土壤质量下降的问题。为此本研究从 2016 年秋季开始,进行了深松结合秸秆还田的长期定位试验。长期秸秆还田,可使 0~20 cm 土层有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量显著增加<sup>[17]</sup>。本研究也证明,深松秸秆混拌还田能有效促进土壤有机质、速效磷的积累,提高土壤含水量,4 年间,有机质含量、速效磷含量年均以 11.25%、119.05% 的比率增长,土壤含水量年均增长 1.32 百分点,到 2020 年,有机质含量、速效磷含量、土壤含水量比 CK 提高 2.89、225.59、2.09 百分点;免耕秸秆粉碎覆盖还田能有效促进土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾积累,4 年间,有机质年均以 29.09%、42.16%、145.24%、27.20% 的比率增长,到 2020 年,比 CK 提高 41.19、145.69、232.66、17.68 百分点。且以上 2 种秸秆还田与耕作方式随着实施年限的延长使土壤质量逐步提升。

保障粮食安全,关键在于落实藏粮于地、藏粮于技战略,要真正实现“藏粮于地”,首先要有高质量的耕地,与 20 世纪 80 年代相比,目前,我国耕地的基础地力下降了至少 10%。因此,持续提升土壤质量势在必行。而持续秸秆还田是提高有机质含量提升土壤质量最有力的措施,深松秸秆混拌还田能形成虚实并存的土壤结构,有利于降低土壤紧实度,不翻土层,使粉碎秸秆覆盖地表,利于更大程度地蓄水保水,加之深松后土壤表面粗糙度增加,可阻碍雨水径流,延长雨水入渗时间,提高土壤水分的有效利用率,疏松 0~35 cm 土层,能增强土壤通透性,促进微生物的活化和矿物质的分解,促进有机质、速效养分的积累,提升土壤肥力。免耕秸秆粉碎覆盖还田能够促进土壤有机质及碱解氮、速效

磷、速效钾速效养分的积累,但蓄水保墒能力不足。且以上 2 种秸秆还田与耕作方式随着实施年限的延长使土壤质量逐步提升。因此,这 2 项措施是内蒙古平原灌区持续提升土壤质量的有效措施。

#### 参考文献:

- [1] 郝远远,徐旭,任东阳,等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J]. 农业工程学报,2015,31(11):110-116,315.
- [2] 宫亮,孙文涛,包红静,等. 不同耕作方式对土壤水分及玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学,2011,19(3):118-120,125.
- [3] 郝远远,徐旭,黄权中,等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报,2014,30(20):128-136.
- [4] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2292-2296.
- [5] Lampurlanés J, Cantero-Martínez C. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth[J]. Agronomy Journal,2003,95(3):526.
- [6] Hamido S A, Kpombrekou A K. Cover crop and tillage effects on soil enzyme activities following tomato[J]. Soil and Tillage Research, 2009,105(2):269-274.
- [7] 李嵩,韩巍,张凯,等. 不同耕作方式对辽西褐土物理性状及玉米根系分布的影响[J]. 玉米科学,2020,28(6):101-106.
- [8] 吴建富,潘晓华,石庆华,等. 水稻连续免耕抛栽对土壤理化和生物学性状的影响[J]. 土壤学报,2009,46(6):1132-1139.
- [9] 于博,于晓芳,高聚林,等. 玉米秸秆全量深翻还田对高产田土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(4):584-592.
- [10] 贡璐,张雪妮,冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报,2015,52(3):682-689.
- [11] 中华人民共和国农业部. 全国农业可持续发展规划(2015—2030年)[R]. 北京:中华人民共和国农业部,2015.
- [12] 于晓芳,赵晓宇,胡树平,等. 内蒙古河套平原灌区玉米适宜耕作方式研究[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(3):392-401.
- [13] 何鑫. 不同耕作方式对农田黑土理化性质及玉米叶片 PS II 功能的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [14] 闫洪奎,王欣然. 长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 华北农学报,2017,32(增刊1):250-255.
- [15] 江泽普,黄绍民,韦广波,等. 不同连作免耕稻田土壤肥力变化与综合评价[J]. 西南农业学报,2007,20(6):1250-1254.
- [16] 刘怀珍,黄庆,李康活,等. 水稻连续免耕抛秧对土壤理化性状的影响初报[J]. 广东农业科学,2000,27(5):8-11.
- [17] 李玮,乔玉强,陈欢,等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 生态学报,2014,34(17):5052-5061.