中国生态农业学报 2018 年 4 月 第 26 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2018, 26(4): 584−592

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170677

于博, 于晓芳, 高聚林, 胡树平, 孙继颖, 王志刚, 高鑫, 朱文新. 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
YU B, YU X F, GAO J L, HU S P, SUN J Y, WANG Z G, GAO X, ZHU W X. Effects of deep tillage and straw return on soil structure of high-yield spring maize field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(4): 584−592

玉米秸秆全量深翻还田对高产田土壤结构的影响*

于 博†, 于晓芳†, 高聚林**, 胡树平, 孙继颖, 王志刚, 高 鑫, 朱文新

(内蒙古农业大学 呼和浩特 010019)

摘 要: 为达到玉米生产耕层最适深度(22 cm)和耕层最适土壤容重(1.1~1.3 g·cm^{-3}), 解决内蒙古平原灌区耕层浅、犁底层坚硬且厚的农田土壤结构问题, 分别选用连续 1、2、3、4 年秸秆深翻还田定位试验地, 秋收后玉米秸秆全量粉碎深翻还田, 秸秆年均还田量为 20 034.97 kg·hm^{-2}, 形成秸秆深翻还田 1~4 年的 4 个试验处理(SF1-SF4), 以不深翻秸秆还田的处理为对照(CK), 研究土壤容重、土壤坚实度、土壤团聚体及其稳定性、土壤肥力及 pH 随不同年限秸秆深翻还田的变化规律。结果表明: 1) SF1-SF4 处理 0~40 cm 土层, 土壤容重和土壤坚实度比 CK 显著减小。2)0~20 cm 土层, SF4 处理>0.25 mm 团聚体比例($R_{0.25}$)、几何平均直径(GWD)和平均重量直径(MWD)均比 CK 显著减小; SF1 处理土壤团聚体破坏率(PAD)比 CK 显著降低 9.56%, 不稳定指数(SWA)随深翻年限增加而显著降低; 团聚体分形维数 SF4 比 CK 显著增大 7.30%。3)20~40 cm 土层, SF1 和 SF2 处理 $R_{0.25}$ 比 CK 分别显著增加 13.69%和 17.83%; SF2 处理的 MWD 和 GWD 分别比 CK 显著增加 23.92%和 53.38%; SF1-SF4 处理的 PAD 比 CK 显著降低, 且 SF2 显著高于 SF1 和 SF3; 而 SF1-SF4 的 SWA 比 CK 显著增加, 且随秸秆深翻年限的增加呈逐渐升高趋势; 团聚体分形维数 SF2 比 CK 显著降低 7.39%。4)土壤有机质含量 SF1-SF4 比 CK 显著增加, 且 SF2-SF4 处理显著大于 SF1; 速效氮、速效磷和速效钾 SF1-SF4 比 CK 显著增加, 土壤 pH SF3、SF4 比 CK 显著降低。总之, 深翻秸秆还田 1~4 年对 0~40 cm 土层土壤影响显著; 深翻秸秆还田 2 年适合土壤犁底层结构的改良, 深翻秸秆还田 3 年和 4 年适合土壤耕层结构的改良。玉米秸秆全量深翻还田既能达到耕作土壤的目的, 同时也增加了土壤有机质, 降低土壤团聚体破坏率和土壤水稳性团聚体的不稳定系数, 利于培肥耕层土壤。

关键词: 春玉米; 深翻; 秸秆还田; 土壤容重; 土壤坚实度; 土壤团聚体; 分形维数; 土壤养分
中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)04-0584-09

Effects of deep tillage and straw return on soil structure of high-yield spring maize field*

YU Bo†, YU Xiaofang†, GAO Julin**, HU Shuping, SUN Jiying, WANG Zhigang, GAO Xin, ZHU Wenxin

(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

* 国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-63)、国家科技支撑计划项目(2013BAD07B04)、华北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站基金(25204120)和国家重点研发计划项目(2017YFD0300804)资助

** 通信作者: 高聚林, 主要从事玉米生理生态研究。E-mail: nmgaojulin@163.com

† 同等贡献者: 于博, 主要从事玉米生理生态和土壤肥力调控研究, E-mail: yubotougao@163.com; 于晓芳, 主要从事玉米生理生态研究, E-mail: yuxiaofang75@163.com

收稿日期: 2017-07-24 接受日期: 2017-10-26

* This study was supported by the Maize Industrial Technology System Construction of Modem Agriculture of China (CARS-02-63), the National Key Technologies R&D Program of China (2013BAD07B04), the Fund of Crop Cultivation Scientific Observation Experimental Station in North China Loess Plateau (25204120) and the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0300804).

** Corresponding author, E-mail: nmgaojulin@163.com

† Equal contributors

Received Jul. 24, 2017; accepted Oct. 26, 2017

Abstract: There are some structural issues of farmland soils in the irrigated Inner Mongolia Plain, such as hard (bulk density of 1.55–1.62 g·cm^{-3}), shallow plough layer (0–16 cm) and thick plow pan (45 cm). To solve these problems and achieve optimum tillage depth of 22 cm and soil bulk density of 1.1–1.3 g·cm^{-3} of the topsoil layer, a test with 1, 2, 3 and 4 years of continuous straw return plus deep tillage was conducted in a high-yield spring maize field in the Science-Technology Demonstration Garden of Inner Mongolia Agricultural University. The full maize straw (20 034. 97 kg·hm^{-2}) was crushed after autumn harvest and returned to soil combined with 40 cm deep tillage. Four treatments for 1–4 years of straw return plus deep tillage (SF1-SF4) were set and no deep tillage with maize straw return was the control (CK). The soil bulk density, hardness, aggregates and their stability, fertility and pH value were studied. The results showed that: 1) in 0–40 cm layer, soil bulk density and hardness significantly decreased under SF1-SF4 treatments compared with CK. 2) In 0–20 cm soil layer, the proportion of aggregates > 0.25 mm ($R_{0.25}$), mean weight diameter and geometric mean diameter of SF4 significantly dropped compared with CK. The percentage of aggregate disruption under SF1 significantly decreased by 9.56% compared with CK, the sabotage water-stable aggregates decreased significantly with years of the experiment. The fractal dimension of aggregates of SF4 significantly increased by 7.30% compared to CK. 3) In 20–40 cm layer soil, the $R_{0.25}$ of SF1 and SF2 were significantly increased by 13.69% and 17.83%, respectively, compared with CK; the mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregates of SF2 were significantly increased by 23.92% and 53.38%. Then percentage of aggregate disruption of soil aggregates significantly decreased by 9.20% (SF1), 3.02% (SF2), 8.38% (SF3) and 3.16% (SF4) compared with CK. Sabotage water-stable aggregates significantly increased by 13.58% (SF1), 16.49% (SF2), 22.67% (SF3) and 25.42% (SF4) compared with CK. Fractal dimension of aggregates of SF2 significantly decreased by 7.39% compared with CK. 4) Soil organic matter content significantly increased by 16.32% (SF1), 24.78% (SF2), 25.07% (SF3) and 25.56% (SF4) compared with CK. Also, available nitrogen, phosphorus and potassium significantly increased compared with CK. Soil pH of SF3 and SF4 significantly decreased respectively by 1.95% and 1.73% compared with CK. In conclusion, the 2-year deep tillage with maize straw return was most suitable for improving the structure of soil plow pan. The 3-year and 4-year deep tillage with maize straw return were suitable for improving the structure of topsoil layer. The application of deep tillage with maize straw return not only improved soil structure of plough layer, but also increased soil organic matter, decreased the percentage of aggregate disruption of soil aggregates and the sabotage water-stable aggregates, and enhanced tillage layer fertility.

Keywords: Spring maize; Deep tillage; Straw return; Soil bulk density; Soil hardness; Soil aggregate; Fractal dimension; Soil nutrient

土壤团聚体的形成、分布变化及其稳定性是土壤结构研究的主要内容[1]。土壤团聚体含量和粒径大小直接影响作物生长发育[2-3]。土壤团聚体通过对土壤水、气、温度和机械性质间接影响作物产量[4-5]。不同耕作方式通过各种机具直接改变了耕作层土壤土粒空间形态分布[6], 从而改变耕作层土壤容重、孔隙、坚实度和团粒结构等土壤物理结构[7]。深翻秸秆还田通过影响微生物活性, 促进腐殖质的形成, 进而增强土壤结构的稳定性。国内学者针对秸秆还田的改土培肥做了大量研究, 认为施用秸秆可使土壤机械强度的破裂系数降低[8], 土壤结构系数增加, 特征团聚体组成比例明显下降, 具有明显的改土作用[9]。秸秆还田对土壤物理结构的改善具有积极作用, 特别是土壤容重变轻, 破碎系数变小, 使土壤疏松, 通透性改善; 秸秆还田后土壤大团聚体(>0.25 mm)数量增加, 小团聚体(<0.25 mm)数量减少, 土壤有机质增加, 其胶结和团聚的作用增大, 使土壤中的细小颗粒缔结成较大的团聚体, 进而使土壤结构得到改善。刘巽浩等[10]研究指出: 秸秆还田腐解过程中, 促进了土壤颗粒的团聚作用, 改良土壤结构, 改善了通气与水分的渗透性和保水能力。高明等[11]研究也表明: 不同稻草还田量可使土壤中 1~0.25 mm 团聚体含量增加, 而团聚体(<0.01 mm)含量减少, 证实稻草还田能促进土壤团聚体的团聚和提高土壤结构的稳定性。国外学者就玉米秸秆还田对土壤结构的影响亦做了较多研究, 认为秸秆还田可促进土壤微团聚体(<0.25 mm)的团聚作用, 显著改善土壤结构状况, 增加土壤孔隙度, 降低土壤容重[12-14]。

内蒙古平原灌区玉米生产中存在耕层浅(16 cm)、犁底层坚硬(坚实度为 2 808 kPa、容重 1.55~1.68 g·cm^{-3})的土壤结构问题。前人研究[15-17]明确了土壤团聚体对土壤结构改良和培肥的贡献作用, 土壤结构优劣决定土壤肥力的高低, 而土壤结构又与土壤团粒结构的大小和性质相关[18]。为此, 针对内蒙古平原灌区土壤结构问题, 本研究设计了连续 1、2、3、4 年深翻秸秆还田定位试验, 采用深翻 40 cm 结合秸秆全量还田, 分层研究土壤物理性质、结构性和基础土壤肥力及 pH 等的响应, 探讨解决耕层浅、犁底层坚硬的解决方法, 为研究区及类似地区的作物高产栽培提供技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于内蒙古农业大学科技示范园区(内蒙古

包头市土默特右旗沟门镇)试验基地(属土默川平原灌区)进行。地势平坦, 定点试验田的耕层为 15~17 cm, 犁底层为 17~40 cm, 土壤类型为沙壤土, 土壤有机质含量 8.15 g·kg^{-1}, 速效氮 68.35 mg·kg^{-1}, 速效磷 36.26 mg·kg^{-1}, 速效钾 165.05 mg·kg^{-1}, pH 8.05。春玉米生育期降水 314 mm, 生育期积温(5 月 1 日—9 月 23 日)2 580 ℃。土壤样品采集定点试验田 0~40 cm 土层土壤。

1.2 试验设计

定位试验于 2010 年 10 月至 2013 年 10 月进行, 深翻深度 40 cm, 玉米秸秆在联合收割机收获后全量粉碎还田。自 2010 年起逐年形成深翻秸秆还田 1~4 年 4 个试验处理(SF1-SF4), 秸秆年均还田量分别为 19 392.48 kg·hm^{-2}、19 718.64 kg·hm^{-2}、20 994.48 kg·hm^{-2}、22 338.18 kg·hm^{-2}, 以不深翻秸秆还田作为对照(CK), 秸秆年均还田量为 17 730.18 kg·hm^{-2}。共计 5 个处理试验地, 每个处理试验地块长 116.5 m, 宽 4.5 m, 秸秆还田量按照 1.0∶1.2 的籽粒∶秸秆比计算。玉米品种为‘郑单 958’, 密度 82 500 株·hm^{-2}, 施肥量纯 N 465 kg·hm^{-2}、P_2O_5 210 kg·hm^{-2}、K_2O 202.5 kg·hm^{-2}, 施肥方式: 磷、钾肥全部作基肥, 氮肥以 3∶6∶1 分别用作基肥、拔节期追肥和灌浆前追肥, 灌水 4 次, 拔节期 1 次、大喇叭口期 1 次和灌浆期 2 次, 详见表 1。深翻秸秆还田后各处理产量构成如表 2 所示, 以含水量 14%折算各处理产量。

表 1 深翻秸秆全量还田试验设计方案

Table 1 Test design scheme of deep tillage and straw returning

处理 Treatment	耕翻深度 Ploughing depth	秋深翻处理年份 Autumn subsoiling year
CK	旋耕 15 cm Rotary tillage 15 cm	—
SF1	深翻 40 cm Subsoiling 40 cm	2013
SF2	深翻 40 cm Subsoiling 40 cm	2012, 2013
SF3	深翻 40 cm Subsoiling 40 cm	2011, 2012, 2013
SF4	深翻 40 cm Subsoiling 40 cm	2010, 2011, 2012, 2013

所有处理均进行前茬作物秸秆全量粉碎还田。For all treatment, all straws of preceding crop are smashed and incorporated into soil.

表 2 不同年限深翻秸秆还田下春玉米产量及构成

Table 2 Yield and its components of spring maize under different treatments of deep tillage and straw return for different years

处理 Treatment	穗数 Spike number [ear·(666.7m^{-2})]	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})
CK	5 187.33±41.03b	709.33±14.11a	314.90±3.44c	14 776.50±420.30c
SF1	5 084.33±26.56b	723.33±72.73a	344.20±2.68b	16 160.40±610.70c
SF2	5 229.67±90.80b	693.33±60.58a	346.57±1.14b	16 432.20±564.75c
SF3	5 241.00±70.06a	720.67±17.01a	354.77±1.84a	17 495.40±304.20b
SF4	5 428.00±28.88a	707.20±15.65a	363.43±4.06a	18 615.15±386.55a

同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

1.3 试验方法

1.3.1 土壤理化性状测定

土壤容重(soil bulk density, SBD)采用环刀法测定。于 2011 年、2012 年、2013 年和 2014 年春玉米播种前、灌浆期和籽粒收获期, 分别测定 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤容重, 每个点重复 3 次。

土壤坚实度(soil hardness)采用坚实度仪测定。于 2011 年、2012 年、2013 年和 2014 年春玉米播种前、灌浆期和籽粒收获期, 按“△”形 3 点法取样, 测定深度为 0~40 cm, 每 2.5 cm 一层, 测定土壤坚实度, 每个点重复 3 次。

于每年的春播前和秋季玉米籽粒收获后, 按“△”形 3 点法取样, 采集 0~40 cm 土层土壤测定养分含量。土壤速效氮测定采用碱解扩散法, 速效磷测定采用碳酸氢钠浸提分光光度计比色法, 速效钾测定采用火焰光度计法, 有机质测定采用重铬酸钾容量法[18]。

1.3.2 土壤团聚体测定

于 2010 年 10 月 18 日收获期, 2011 年 4 月 27 日春播前、8 月 16 日灌浆期、10 月 19 日收获期, 2012 年 4 月 24 日春播前、8 月 16 日灌浆期和 10 月 18 日收获期, 2013 年 4 月 26 日春播前、8 月 19 日灌浆期和 10 月 25 日收获期, 2014 年 4 月 18 日春播前、8 月 16 日灌浆期, 按“△”形 3 点取土法在 0~20 cm 和 20~40 cm 2 个土层采集原状土样, 采用 PVC 管(内径 160 mm)采集原状土, 将原状土壤放于阴凉处风干后除去秸秆及小石块等杂物, 将大土块按照自然裂痕剥离 1 cm^3, 取 500 g, 采用萨维诺夫法[15]筛分土壤样本, 室内分析待用。

机械稳定性团聚体和水稳性团聚体采用萨维诺

夫法[15], 分别使用振荡式机械筛分仪和团粒分析仪进行测定, 3 次重复。

利用各粒级团聚体数据, 计算>0.25 mm 团聚体比例($R_{0.25}$)、团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、团聚体几何平均直径(geometric mean diameter, GWD)、土壤团聚体破坏率(percentage of aggregate disruption, PAD)、不稳定团粒指数(sabotage water-stable aggregates, SWA)和团聚体分形维数(D)[16]。

$$R_{0.25}=\frac{M_{r>0.25}}{M_{\mathrm{t}}}=1-\frac{M_{r<0.25}}{M_{\mathrm{t}}} \tag{1}$$

式中: $R_{0.25}$为直径大于 0.25 mm 团聚体比例, M_{t}为团聚体的总质量, $M_{r>0.25}$为粒径>0.25 mm 团聚体的质量(g), $M_{r<0.25}$为粒径<0.25 mm 团聚体的质量(g)。

$$\mathrm{MWD}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i w_i)}{\sum_{i=1}^{n}(w_i)} \tag{2}$$

式中: MWD 为团粒平均重量直径(mm), x_i为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm), w_i为对应于 x_i的团聚体百分含量(%)。

$$\mathrm{GMD}=\mathrm{Exp}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \ln \overline{x_i}}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right] \tag{3}$$

式中: GMD 为团聚体几何平均直径(mm), x_i为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm), w_i为对应于 x_i的团聚体百分含量(%)。

$$\mathrm{PAD}=\frac{R_{\mathrm{D}0.25}-R_{\mathrm{S}0.25}}{R_{\mathrm{D}0.25}}\times 100\% \tag{4}$$

式中: PAD 为团聚体破坏率(%), $R_{\mathrm{D}0.25}$为>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%), $R_{\mathrm{S}0.25}$为>0.25 mm 水稳性团聚体含量(%)。

$$\mathrm{SWA}=\frac{M_{\mathrm{sr}>0.25}}{M_{\mathrm{st}}}\times 100\% \tag{5}$$

式中: SWA 为不稳定团粒指数(%), M_{st}为供试土壤总重量, $M_{\mathrm{sr}>0.25}$为水稳性团聚体重量。

$$\frac{M_{r<x_i}}{M_{\mathrm{t}}}=\left[\frac{x_i}{x_{\max}}\right]^{3-\mathrm{D}} \tag{6}$$

式(6)为杨培岭等[19]推导团聚体分形维数(D)公式。式中, x_i为某级团聚体平均直径, $M_{r<x_i}$为粒径小于 x_i的团聚体的重量, M_{t}为团聚体总重量, $x_{\max}$为团聚体的最大粒径。

1.3.3　数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理、绘制图表, SPSS 13.0 统计分析软件进行单因素方差(One-way ANOVA)分析和相关性分析, 不同处理之间多重比较采用 Tukey's 法, 然后经过 t 检验(P=0.05)。

2　结果与分析

2.1　深翻秸秆还田对土壤容重的影响

如图 1A 所示, 0~20 cm 土层, 春播前土壤容重 SF1-SF4 比 CK 显著降低 7.63%、9.72%、15.27%和 14.58%; 灌浆期 SF1-SF4 比 CK 显著降低 14.56%、16.56%、16.56%和 18.54%, 且 SF1-SF4 间差异不显著; 收获期 SF1-SF4 比 CK 显著降低 11.97%、10.56%、14.08%和 13.38%。20~40 cm 土层土壤容重如图 1B 所示, 春播前 SF1-SF4 比 CK 显著降低 8.86%、15.19%、12.65%和 14.56%, 灌浆期 SF1-SF4 比 CK 显著降低 12.82%、12.86%、12.17%和 12.18%且 SF1-F4 间差异不显著, 收获期 SF1-SF4 比 CK 显著降低 12.19%、12.21%、14.74%和 12.17%且 SF1-SF4 间差异不显著。结果表明, 深翻秸秆还田措施能够显著降低 0~40 cm 土层土壤容重, 但深翻秸秆还田年限对土壤容重影响不显著。

2.2　深翻秸秆还田对土壤坚实度的影响

如图 2 所示, 玉米春播前、灌浆期和收获后, 土壤坚实度 SF1-SF4 显著小于 CK, CK 在 10 cm 土层处存在坚硬的犁底层, 春播前土壤坚实度 2 375 kPa, 深翻秸秆还田 1~4 年后降低到 163 kPa、93 kPa、93 kPa 和 70 kPa。灌浆期与籽粒收获后土壤坚实度变化规律与春播前变化规律一致, 结果说明: 深翻耕作措施改变土壤结构, 疏松耕层和犁底层土壤, 显著降低土壤坚实度。

2.3　深翻秸秆还田对土壤团聚体的影响

2.3.1　深翻秸秆还田对土壤团聚体特征的影响

如表 3 所示, 0~20 cm 土层>0.25 mm 的机械团聚体的相对含量($R_{0.25}$)变化表现为: SF1-SF4 比 CK 显著降低 2.83%、0.62%、0.49%和 13.79%(P<0.05); SF1-SF3 显著大于 SF4, SF1-SF3 之间变化差异不显著。20~40 cm 土层, SF1 和 SF2 比 CK 显著增加 13.69%和 17.83%, SF3 和 SF4 分别比 CK 增加 4.26%和 5.68%。

0~20 cm 土层土壤团聚体平均重量直径(MWD)变化表现为: SF1 和 SF2 比 CK 分别增加 4.47%和 2.06%, SF3 和 SF4 比 CK 显著减小 8.59%和 18.90%; 各处理间, SF4 显著小于 SF3, SF3 显著小于 SF2 和

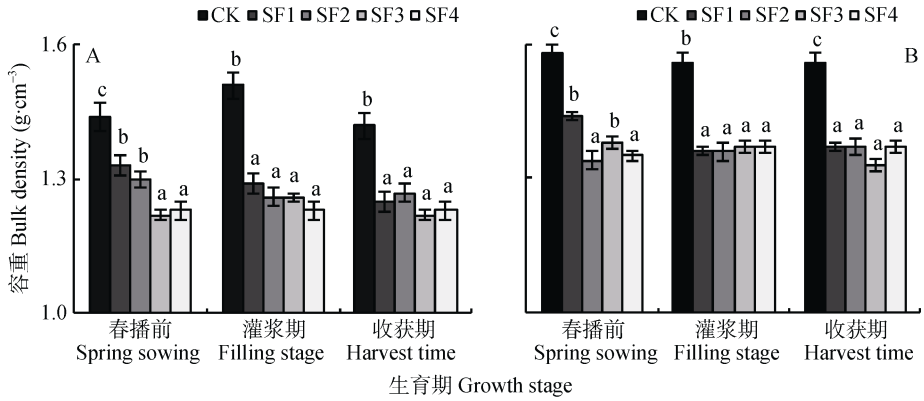

图 1 不同年限深翻秸秆还田对春玉米不同生育期 **0~20 cm (A)**和 **20~40 cm (B)**土层容重的影响

Fig. 1 Effects of deep tillage and straw return for different years on bulk density in 0–20 cm (A) and 20–40 cm (B) soil layers at different growth stages of spring maize

不同小写字母表示同一时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same growth stage mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

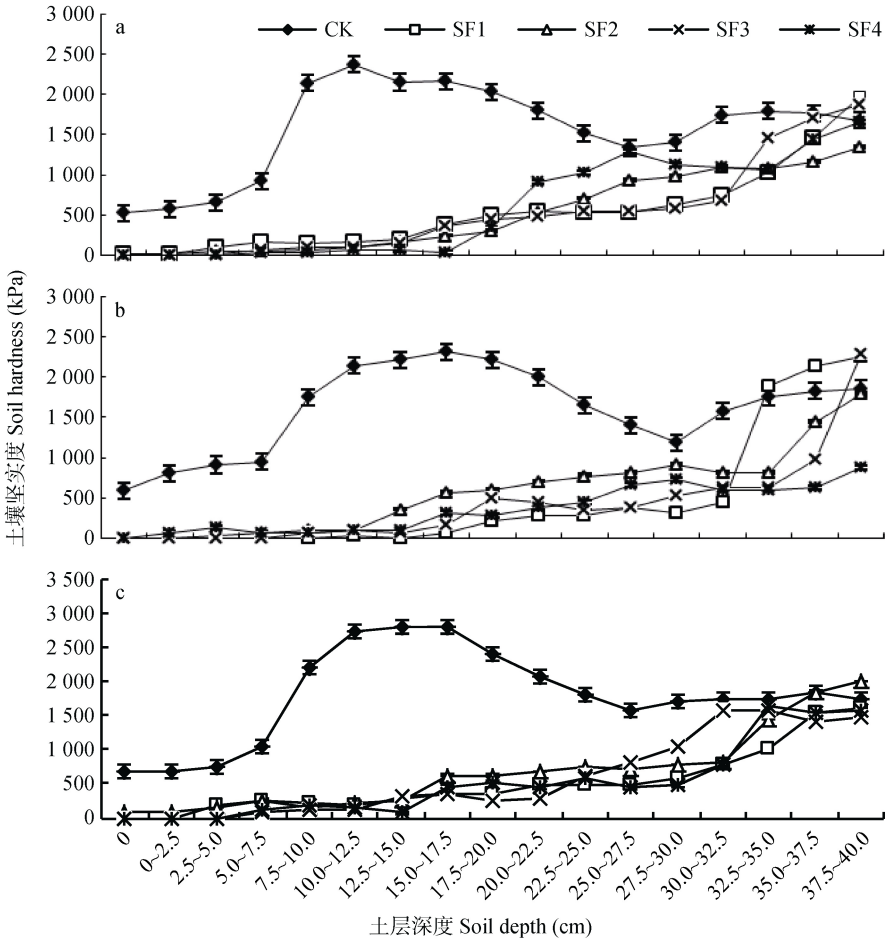

图 2 不同年限深翻秸秆还田对春玉米田春播前**(a)**、灌浆期**(b)**及籽粒收获后**(c)**土壤坚实度的影响

Fig. 2 Effects of deep tillage and straw return for different years on soil hardness in 0–40 cm layers before spring sowing (a), at filling stage (b) and after harvest (c) of spring maize

SF1, SF1 与 SF2 无显著差异。团聚体几何平均直径(GMD)变化表现为: SF4 比 CK 显著降低 27.21%, 其他处理间变化差异不显著。20~40 cm 土层团聚体 MWD 与 GMD 呈正相关。SF2 处理 MWD 比 CK 显著增大 23.92%, SF1、SF3 和 SF4 与 CK 差异不显著; 各处理间, SF2 显著大于 SF1、SF3 和 SF4, SF1、SF3 和 SF4 之间差异不显著。SF2 处理 GMD 比 CK 显著增大 53.38%, SF1、SF3 和 SF4 与 CK 差异不显著; 各处理间, SF2 显著大于 SF1, SF1 显著大于 SF3 和 SF4, SF3 和 SF4 间无显著性差异(表 3)。

表 3　深翻秸秆还田对 0~40 cm 土层土壤团聚体特征的影响

Table 3　Effects of deep tillage and straw return for different years on characteristics of soil aggregates in 0–40 cm soil layer

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	>0.25 mm 团聚体比例 Proportion of aggregates > 0.25 mm	平均重量直径 Mean weight diameter	几何平均直径 Geometric mean diameter
0~20	CK	0.812±0.01a	2.91±0.05a	1.47±0.04a
	SF1	0.789±0.02a	3.04±0.04a	1.50±0.03a
	SF2	0.807±0.03a	2.97±0.09a	1.49±0.09a
	SF3	0.808±0.02a	2.67±0.08b	1.34±0.06a
	SF4	0.700±0.02b	2.34±0.05c	1.07±0.03b
20~40	CK	0.774±0.02c	3.01±0.16b	1.48±0.10b
	SF1	0.880±0.03b	3.20±0.15b	1.80±0.16ab
	SF2	0.912±0.03a	3.73±0.10a	2.27±0.14a
	SF3	0.807±0.01bc	2.91±0.03b	1.45±0.02b
	SF4	0.818±0.01bc	2.75±0.01b	1.41±0.01b

同列同一土层深度不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column and the same soil depth mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

以上结果说明团聚体特征参数的变化是由于深翻秸秆还田后秸秆腐解增加土壤有机质, 进而增加土壤有机碳, 促进了土壤的吸附作用, 增加土壤团聚体的团聚。但是秸秆当季腐解的速率较慢, 导致深翻 1~2 年的土壤团聚体的团聚速度小于深翻破坏的土壤团聚体, 深翻秸秆还田 1~2 年土壤团聚体的破坏率显著增大, 秸秆还田 3~4 年后, 土壤有机质逐渐积累, 土壤团聚体团聚速率大于深翻破坏的土壤团聚体, 促进了土壤团聚体的团聚。

2.3.2　深翻秸秆还田对土壤团聚体稳定性的影响

表 4 表明, 0~20 cm 土层, 团聚体破坏率(PAD), SF1 比 CK 显著减小 8.45%, SF2-SF4 比 CK 分别降低 3.83%、0.98%和 4.77%; 各处理间, SF1 显著低于 SF2-SF4, SF2 和 SF4 间无差异, SF3 显著大于其他各处理。20~40 cm 土层, SF1-SF4 比 CK 显著降低 9.20%、3.02%、8.38%和 3.16%; 各处理间, SF1 和 SF3 显著低于 SF2, SF1、和 SF3 间无差异。

表 4　深翻秸秆还田对 0~40 cm 土层土壤团聚体破坏率(PAD)的影响

Table 4　Effects of deep tillage and straw return on percentage of aggregate disruption (PAD) in 0–40 cm soil layer

处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm
CK	80.85±0.26a	78.47±0.96a
SF1	74.02±0.74b	71.25±0.86c
SF2	77.75±0.51ab	76.10±0.29b
SF3	80.06±0.40a	71.89±0.22c
SF4	76.99±2.47ab	75.99±0.34bc

同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

表 5 表明, 0~20 cm 土层土壤水稳性团聚体不稳定系数(SWA)表现为: SF1-SF4 比 CK 显著降低 5.05%、2.89%、13.44%和 16.38%; SF1、SF2、SF3、SF4 各处理间呈逐渐降低趋势。20~40 cm 土层 SF1-SF4 比 CK 显著增加 12.34%、18.84%、19.38%和 16.60%; SF1、SF2、SF3、SF4 各处理间呈先逐渐升高再降低的趋势。深翻秸秆还田措施还显著增加了 20~40 cm 土层土壤水稳性团聚体不稳定系数。

表 5　深翻秸秆还田对 0~40 cm 土层土壤水稳性团聚体不稳定系数(SWA)的影响

Table 5　Effects of deep tillage and straw return on soil sabotage of water-stable aggregates (SWA) in 0–40 cm soil layer

处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm
CK	17.64±0.32a	18.31±0.14c
SF1	16.75±0.09c	20.57±0.12b
SF2	17.13±0.21b	21.76±0.56a
SF3	15.27±0.08d	21.86±0.37a
SF4	14.75±0.11e	21.35±0.22a

同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

2.3.3　深翻秸秆还田对土壤团聚体分维特征的影响

表 6 表明, 0~20 cm 土层土壤团聚体的分形维数(*D*)表现为: SF3 和 SF4 比 CK 显著增大 3.00%和 7.30%, SF1 和 SF2 与 CK 之间差异不显著; SF1-SF4 各处理间, SF4 显著大于其他 3 个处理, 说明逐年深翻秸秆还田措施使土壤团聚变得不规则。20~40 cm 土层, SF2 比 CK 显著降低 3.54%, 且 SF2 处理显著小于 SF1、SF3 和 SF4 处理。

表 6 深翻秸秆还田对 0~40 cm 土层土壤团聚体分形维数(*D*)的影响

Table 6 Effects of deep tillage and straw return on fractal dimension of aggregates (*D*) in 0–40 cm soil layer

处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm
CK	2.33±0.03c	2.26±0.01ab
SF1	2.28±0.02bc	2.24±0.03ab
SF2	2.30±0.04bc	2.18±0.01b
SF3	2.40±0.02b	2.31±0.01a
SF4	2.50±0.02a	2.36±0.01a

同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

2.4 深翻秸秆还田对土壤基础肥力和 pH 的影响

如表 7 所示, 深翻秸秆还田对土壤有机质的影响表现为, SF1-SF4 比 CK 显著增加 16.32%、24.78%、25.07%和 25.56%, 并且 SF2、SF3、SF4 处理显著大于 SF1 处理。SF1-SF4 处理的土壤速效氮比 CK 分别显著增加 20.28%、14.46%、17.20%和 21.95%, 各处理间差异不显著。SF1-SF4 处理速效磷比 CK 显著增加 6.80%、12.07%、17.85%和 23.30%, SF4 处理显著大于 SF1、SF2、SF3 处理。速效钾 SF1-SF4 处理比 CK 显著增加 17.59%、16.34%、20.49%和 29.85%, 各处理间表现为 SF4 处理显著大于 SF1、SF2、SF3 处理, SF1、SF2、SF3 处理间差异不显著。pH 值表现为: SF3 和 SF4 比 CK 显著降低 1.95%和 1.70%, 各处理间为 SF1>SF2>SF4>SF3。秸秆腐解还田后, 秸秆中的木质素、纤维素和矿质营养元素还田到土壤中, 增加土壤有机质和速效养分, 秸秆还田具有培肥土壤的作用; 但因为秸秆当季腐解的速率较低, 适当配合施用氮肥可促进秸秆的腐解, 有利于恢复深翻破坏的土壤结构, 秸秆还田 3~4 年后, 可促进土壤团聚体团粒结构的形成, 培肥土壤。

表 7 深翻秸秆还田对土壤有机质、速效养分和 pH 的影响

Table 7 Effects of deep tillage and straw return on contents of organic matter and available nutrients and pH

处理 Treatment	有机质含量 Organic matter content ($g \cdot kg^{-1}$)	速效养分含量 Available nutrient content ($mg \cdot kg^{-1}$)			pH
		速效氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	
CK	10.29±0.41c	48.61±1.06b	5.88±0.11c	50.81±0.91c	8.22±0.01a
SF1	11.87±0.34b	58.47±0.60a	6.28±0.08bc	59.75±0.05b	8.23±0.02a
SF2	12.84±0.17a	55.64±2.16a	6.59±0.23b	59.11±1.26b	8.13±0.02a
SF3	12.87±0.08a	56.97±4.51a	6.93±0.03ab	61.22±1.40b	8.06±0.04b
SF4	12.92±0.06a	59.28±0.84a	7.25±0.26a	65.98±2.46a	8.08±0.06b

同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

3 讨论

土壤形成坚硬犁底层的原因是机械压实、灌水和降雨等。耕层(0~20 cm)土壤中的黏粒随水向下迁移, 在下层土壤中沉积, 造成下层土壤坚实度增大, 形成新的犁底层[20]; 另外大型机械, 如运输的拖拉机和联合收割机的压实作用, 对形成新的犁底层有一定影响。针对上述问题, 本研究设计不同年限的深翻和秸秆全量还田处理, 发现 0~40 cm 土层, 1~4 年深翻和秸秆全量还田使土壤容重和坚实度显著降低, 说明深翻和秸秆还田打破了土壤 20~40 cm 土层坚硬的犁底层, 改善了土壤物理性状, 这与马永良等[21]研究结果一致。

团聚体是土壤结构的物质基础, 有供给作物生长养分的功能, 其组成结构和稳定性(机械稳定性和水稳性)影响土壤复杂生物、化学和物理过程。土壤团聚体的组成结构及其稳定性决定了土壤的水力特征和生物活动。本研究发现, 4 年深翻和秸秆全量还田使土壤 $R_{0.25}$、MWD、GWD 显著减小; 且水稳性团聚体不稳定系数随深翻和秸秆全量还田年限逐渐降低, 团聚体破坏率减小, 这与张鹏等[22]研究结果一致。因本研究在沙壤土的农田进行定位试验, 而张鹏等[22]在黄绵土的轻壤农田进行的定位试验, 且两个试验区气候差异较大, 秸秆分解速率存在差异, 以致对土壤团聚的组成和稳定性影响不同。分形维数是评价土壤结构分布的综合指标, 不仅描述了土壤颗粒的大小及分布, 而且反映了土壤质地的均一程度, 其值越高, 表明土壤质地越黏重, 通透性越差[23]。很多研究认为, 团聚体分布具有分形特征[24]。本研究发现, 深翻秸秆还田后, 耕层(0~20 cm 土层)土壤团聚体分形维数值显著高于犁底层(20~40 cm 土层), 且呈逐年增大的趋势。犁底层分形维数值变化规律与耕层相反。说明深翻秸秆还田 4 年后, 耕层土壤黏粒被翻到犁底层处, 犁底层土壤腐殖质的

胶结作用形成大团聚体, 促进团粒结构的形成; 而耕层土壤通透反而变差。深翻秸秆还田措施有利于耕层水稳性团聚体的稳定性, 但不利于犁底层水稳性团聚体的稳定性, 深翻在改善土壤物理性质的同时也破坏了犁底层土壤结构的稳定性, 深翻秸秆还田使耕层土壤质地越来越黏重, 犁底层土壤质地越来越轻, 因此在秋深翻整地时, 尤其要关注犁底层水稳性团聚体的破坏和不稳定性, 防止土壤退化, 这与张鹏等[22]的研究结果不完全一致。

4　结论

玉米秸秆全量深翻还田处理后, 耕层土壤物理性质、土壤结构得到改良, 土壤速效养分、土壤有机质显著增加, 土壤 pH 显著减小, 因此该措施可以达到改良犁底层、培肥土壤的目标, 尤其是玉米秸秆全量深翻还田 4 年处理。对于改良土壤耕层结构和地力状况应继续玉米全量深翻还田, 达到长期改良培肥土壤耕层的作用。犁底层土壤的物理性质、土壤养分变化规律与耕层相同, 但是土壤结构的变化规律与耕层相反, 土壤团聚体 $R_{0.25}$、MWD、GWD、水稳性团聚体不稳定系数(SWA)、团聚体破坏率(PAD)随秸秆全量深翻还田呈逐年增大的趋势, SWA 和 PAD 的增大指示犁底层土壤结构被破坏, 尤其是玉米秸秆全量深翻还田 2 年和 4 年处理土壤结构被破坏的程度最为显著, 因此犁底层土壤结构被破坏的变化规律呈现隔年增大且达到峰值的规律, 因此应用该措施时可以隔年降低深翻深度至 30 cm, 即隔年深翻, 既可达到培肥改良土壤耕层的目的, 同时又能降低土壤犁底层水稳性团聚体不稳定系数(SWA)、团聚体破坏率(PAD), 达到保护犁底层土壤结构的目的。因此, 玉米秸秆全量深翻还田对内蒙古平原灌区玉米高产田耕层和犁底层土壤的改良是一项利于生态农业发展可持续的耕作措施。

参考文献 References

[1] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3–22

[2] 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 501–506
ZHOU H, LÜ Y Z, LI B G. Advancement in the study on quantification of soil structure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 501–506

[3] MADARI B, MACHADO P L O A, TORRES E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80(1/2): 185–200

[4] LETEY J. Relationship between soil physical properties and crop production[M]//Stewart B A. Advances in Soil Science. New York: Springer, 1985: 277–294

[5] SHOUSE P J, GERIK T J, RUSSELL W B, et al. Spatial distribution of soil particle size and aggregate stability index in a clay soil[J]. Soil Science, 1990, 149(6): 351–360

[6] 丁启朔. 耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 1–5
DING Q S. Soil structure and its assessment for soil tillage research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006: 1–5

[7] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85–94
HOU X Q, JIA Z K, HAN Q F, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 85–94

[8] 朱红霞, 姚贤良. 有机物料在稻作制中的物理作用[J]. 土壤学报, 1993, 30(2): 137–145
ZHU H X, YAO X L. Physical effect of organic material on rice-based cropping system[J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(2): 137–145

[9] DOU S, CHEN E F, XU X C, et al. Effect of organic manure application on physical properties and humus characteristics of paddy soil[J]. Pedosphere, 1994, 4(2): 127–135

[10] 刘巽浩, 王爱玲, 高旺盛. 实行作物秸秆还田促进农业可持续发展[J]. 作物杂志, 1998, (5): 1–5
LIU X H, WANG A L, GAO W S. The crop straw returned to promote agricultural sustainable development[J]. Crops, 1998, (5): 1–5

[11] 高明, 魏朝富, 陈世正. 稻草还田对土壤性状及水稻产量的影响[J]. 西南农业大学学报, 1995, 17(5): 436–439
GAO M, WEI C F, CHEN S Z. The effect of returning straws into paddy fields as fertilizer on soil properties and rice yield[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1995, 17(5): 436–439

[12] ROLDÁN A, CARAVACA F, HERNÁNDEZ M T, et al. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico)[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 72(1): 65–73

[13] BESCANSA P, IMAZ M J, VIRTO I, et al. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 19–27

[14] SASAL M C, ANDRIULO A E, TABOADA M A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 9–18

[15] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18–25
CHEN E F, ZHOU L K, WU G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level[J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 18–25

[16] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627–633

[17] HINDS A A, LOWE L E. Distribution of carbon, nitrogen, sulphur and phosphorus in particle-size separates from Gleysolic soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1980, 60(4): 783–786

[18] 于博. 松辽平原玉米带高产田土壤结构性对冻结的响应及机理研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012
YU B. Research of the mechanism and response of high yield farmland soil structure characteristics to freeze in corn belt of the Songliao Plain[D]. Changchun: Jilin Agriculture University, 2012

[19] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896–1899
YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal features of soils characterized by grain weight distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896–1899

[20] 于博. 春玉米高产田土壤结构及深翻秸秆还田调控机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016
YU B. The mechanism of high yield farmland soil structure and deep tillage and straw returning regulation in spring maize[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2016

[21] 马永良, 师宏奎, 张书奎, 等. 玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(S1): 42–46
MA Y L, SHI H K, ZHANG S K, et al. Whole maize straw addition: The changes of soil physical and chemical properties and the effect on winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(S1): 42–46

[22] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513–1520
ZHANG P, JIA Z K, WANG W, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1513–1520

[23] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 等. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4148–4155
YANG C M, OUYANG Z, YANG L Z, et al. Organic carbon fractions and aggregate stability in an aquatic soil as influenced by agricultural land uses in the Northern China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4148–4155

[24] LEBISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Ⅰ. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425–437