

耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响

邹文秀¹, 韩晓增¹, 严君¹, 陈旭¹, 陆欣春^{1*}, 邱琛^{1,2}, 郝翔翔¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了明确耕翻和秸秆还田深度对土壤物理性质的影响, 在东北黑土区中部进行了 6 a 的耕翻和秸秆还田定位试验, 设置了免耕 (D0)、浅耕翻 (0~20 cm) (D20)、浅耕翻+秸秆 (D20S)、深耕翻 (0~35 cm) (D35)、深耕翻+秸秆 (D35S)、超深耕翻 (0~50 cm) (D50) 和超深耕翻+秸秆 (D50S) 7 个处理开展研究, 秸秆还田处理将 10 000 kg/hm² 秸秆均匀地还入相应的耕翻土层。结果表明, 耕翻和秸秆还田深度是影响土壤物理性质的重要农艺措施。与初始土壤相比, 免耕显著增加了 0~20 cm 土层土壤容重, 减少了孔隙度、持水量、饱和导水率和 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量 ($P<0.05$), 而对 20~50 cm 土层没有显著影响 ($P>0.05$)。在 0~20 cm 土层, 除了 D50 处理显著降低了 WAS_{>0.25} 含量以外, D20, D35 和 D50 处理对各项土壤物理指标均没有显著影响; 而 D20S 和 D35S 处理则显著改善了该层各项土壤物理指标。在 >20~35 cm 土层, D35、D35S、D50 和 D50S 处理显著改善了该土层各项土壤物理指标 (除了 2014 年的容重)。在 >35~50 cm 土层, D50 和 D50S 处理对各项土壤物理指标改善效果显著, 特别是相应土层通气孔隙度和饱和导水率显著增加。研究结果表明耕翻配合秸秆对土壤物理指标的改善效果优于仅耕翻处理。综合评分结果也表明 D35S 和 D50S 处理分别对 >20~35 cm 和 >35~50 cm 土层土壤物理性质的改善效果最好, 说明在质地黏重的黑土上深翻耕或者超深翻耕配合秸秆还田通过土层翻转秸秆全层混合施用能够显著改善全耕作层土壤的物理性质, 增加耕层厚度, 扩充土壤的水分库容, 提高黑土的水分调节能力。

关键词: 土壤; 耕作; 秸秆还田; 饱和导水率; 孔隙度; 土壤持水量; >0.25 mm 水稳性团聚体

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.002

中图分类号: S152⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-15-0009-10

邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 9-18.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.002 <http://www.tcsae.org>

Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Yan Jun, et al. Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 9-18. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.002 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤物理性质通过影响土壤中水分、空气和热量的传导^[1], 养分的迁移和转化^[2-3], 微生物的丰富度及多样性^[4]等土壤性质而影响作物生长, 是农业生产中制定合理耕作和灌排等管理措施的重要依据。黑土的黏粒含量在 40% 以上^[5], 土壤质地较为黏重, 导致土壤物理性质较差, 在农业生产中存在导水性能差、通气不畅, 易造成土壤内涝、冷凉等问题, 限制了区域内粮食生产能力^[6]。尤其是黑土开垦以后, 经过长期高强度利用和不合理耕作, 导致土壤物理性质恶化^[7], 表现为土壤总孔隙度和田间持水量下降和犁底层出现等。犁底层的存在增加了亚耕层的土壤容重、减小了孔隙度, 阻隔了降水的入渗进而影响土壤蓄积大气降水的能力^[8], 同时增加了地表径流和土

壤侵蚀的风险^[9]。因此改善黏重黑土的土壤物理性质, 打破犁底层, 增加耕作层厚度对东北黑土区的农业可持续发展具有重要的意义。

秸秆作为富含有机质及各类营养元素的农业副产物, 已经被广泛地应用到了土壤培肥实践中, 并取得了显著的效果^[10-11], 但是其效果取决于秸秆还田的深度^[12-13]。免耕由于缺乏对土壤的扰动增加了表层土壤的容重, 降低了总孔隙度^[14]。韩晓增和白伟等研究发现耕作和秸秆还田是构建土壤肥沃耕层的核心^[15-16]。秸秆还田过程中由于秸秆归还和增加了对土壤的扰动, 显著提高土壤的导水导气性^[1], 改善土壤孔隙结构^[17], 促进土壤团聚体的形成^[18], 增加土壤持水量^[11]。目前很多研究学者开展了秸秆深层还田 (包括翻埋还田和亚耕层混合还田)^[16,19-20]对土壤物理性质影响的研究。王秋菊等研究发现秸秆翻埋还田 (将秸秆埋入地表下 >30~35 cm 土层内) 后具有减小 30~40 cm 土层土壤容重, 增加土壤持水量的作用, 但是仅显著提高了该土层的土壤大孔隙含量^[19]; 当秸秆混合施入亚耕层后 20~35 cm 土层土壤容重显著下降了 11.3%^[12], 说明秸秆还入土壤中某一层后不能够改善全耕作层的土壤物理性质。研究已经报道了秸秆混合施入不同深度土层后能够显著增加全耕作层的土壤肥力, 提高土壤蓄水、供

收稿日期: 2020-05-15 修订日期: 2020-07-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41771327, 41807085, 41571219); 黑龙江省应用技术与开发计划 (GY2017ZB006, GA19B10); 中国科学院野外台站联盟项目 (KFJ-SW-YW035-4); 现代农业产业技术体系 (CARS04)

作者简介: 邹文秀, 博士, 副研究员, 主要从事土壤物理与水分高效利用方面的研究。Email: zouwenxiu@iga.ac.cn

*通信作者: 陆欣春, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥力方面的研究。Email: luxinchun@iga.ac.cn

水能力及水分利用效率和产量^[6,21],但是秸秆不同混合还田深度对土壤物理性质的影响缺少系统的研究,同时黑土区关于耕翻深度和秸秆混合还田深度对土壤物理性质的综合评价还鲜有报道。本研究基于耕翻深度和秸秆混合还田深度的田间对比试验,探讨了其对土壤容重、孔隙度及组成、持水量、饱和导水率及>0.25 mm 水稳性团聚体的影响,明确了土壤物理性质对耕翻和秸秆混合还田的响应;并基于主成分分析获取改善黑土物理性质效果最优的农艺措施,以期为东北黑土区建立以“土壤质量提升、秸秆高效利用”为核心的秸秆还田模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2008—2014 年在东北黑土区黑龙江省海伦市胜利村进行。海伦市胜利村地处暖温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥、夏季高温多雨,雨热同季,年均气温 1.5℃,近 50 a 大气降水平均值为 550 mm,70%以上集中在 7—9 月份,无霜期 125 d。土壤类型为中厚黑土,土壤质地为壤黏土^[5]。2008 年试验区基础土壤物理性质见表 1。

表 1 2008 年试验区土壤物理性质
Table 1 Soil physical properties in study site in 2008

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	土粒密度 Soil particle density/ (g·cm ⁻³)	饱和持水量 Saturated water capacity/%	田间持水量 Field water capacity/%	永久萎蔫点 Permanent wilting point/%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm·h ⁻¹)
0~20	1.10	2.59	51.2	36.2	13.8	34.2
>20~35	1.23	2.62	44.5	32.4	14.6	29.4
>35~50	1.27	2.66	43.2	27.6	15.0	27.0

1.2 试验设计

试验始于 2008 年秋季,采用裂区设计。主区为 5 个耕翻深度,包括免耕(D0)、浅耕翻 20 cm(D20)、深耕翻 35 cm(D35)、超深耕翻 50 cm(D50);副区为秸秆管理方式,秸秆还田和无秸秆还田(免耕除外)。每年秋季作物收获后对相应的处理进行秸秆还田,即将粉碎长度约 10 cm 的秸秆均匀混入 0~20 cm 土层(D20S),0~35 cm 土层(D35S)和 0~50 cm 土层(D50S),秸秆还田量均为 10 000 kg/hm²。在秸秆还田小区,首先使用铁锹挖相应深度的一条“垄沟”,然后将粉碎后的秸秆平铺在“垄沟”的横截面上,再用铁锹挖土盖在铺了秸秆的横截面上,最后将秸秆和土壤进行充分混匀,以此类推,完成整个小区的秸秆还田工作。小区面积为 52 m² (10 m×5.2 m),每个处理 3 次重复。供试玉米品种为海玉 6,密度为 6.5 万株/hm²。施肥量:氮肥(N) 150.0 kg/hm²,磷肥(P₂O₅) 70.0 kg/hm²,钾肥(K₂O) 50.0 kg/hm²。田间管理与当地相同。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤样品采集

在 2008 年秋季试验开始前,2010 年、2012 年和 2014

年秋季收获后采集土壤样品,样品采集方法:每个处理分 0~20、>20~35 和>35~50 cm 3 个土层深度进行取样,每个小区随机选取 3 个点。采用体积为 100 cm³ 的环刀分层采集原状土土壤,然后使用环刀的盖子盖住两端,再用胶带密封后带回实验室备用;同时分层采集原状土放入取样盒,用于土壤团聚体的测定,在采集和运输过程中减少对土壤样品的扰动,减少对土壤团聚体的破坏。

1.3.2 测定方法

土壤容重、田间持水量、饱和持水量采用环刀法测定,土粒密度采用比重瓶法测定^[22],土壤饱和导水率采用 TST-55 型渗透仪测定^[23],土壤水稳性团聚体采用湿筛法^[20],凋萎含水量采用生物法测定^[24]。

1.3.3 土壤孔隙度计算方法^[25]

$$\text{土壤总孔隙度} = (1 - (\text{容重} / \text{土粒密度})) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{毛管孔隙度} = (\text{田间持水量} - \text{凋萎含水量}) \times \text{容重} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{通气孔隙度} = \text{总孔隙度} - \text{田间持水量} \times \text{容重} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{非活性孔隙度} = \text{土壤总孔隙度} - \text{毛管孔隙度} - \text{通气孔隙度} \quad (4)$$

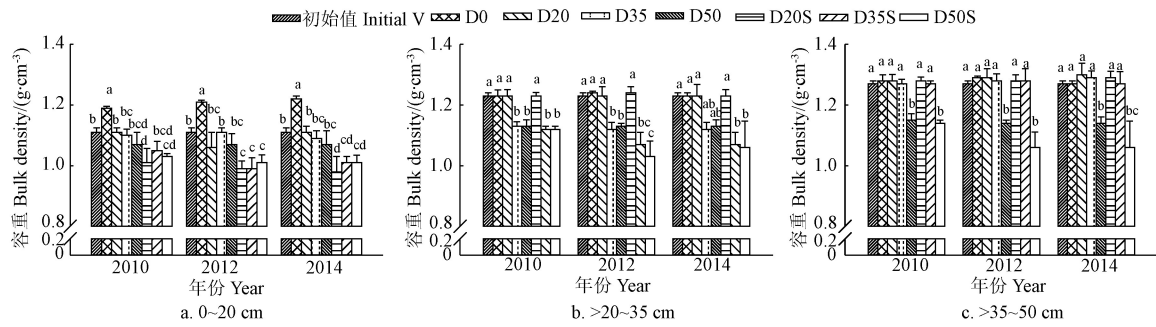
1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2017 对试验数据进行整理,运用 SPSS19.0 进行统计分析,其中方差分析为单因素方差(One Way-ANOVA),显著水平为 0.05。采用 Origin 2019 进行画图。采用 Canoco 5.0 软件对不同处理间土壤物理性质差异进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),采用 SPSS19.0 计算不同处理下土壤物理性质的综合得分,采用 Pearson 相关分析统计分析了耕翻和秸秆还田深度对土壤物理性的影响。

2 结果与分析

2.1 对土壤容重的影响

耕翻和秸秆还田深度是影响土壤容重的重要因素(图 1)。在 0~50 cm 土层内土壤容重整体上表现为随着土层深度的增加而增加。D0 处理显著增加了 0~20 cm 土层土壤容重,而对>20~35 和>35~50 cm 土层土壤容重则没有显著影响。随着耕翻和秸秆还田深度的增加,减小了相应土层的土壤容重(图 1)。在 0~20 cm 土层,与初始土壤相比,D20、D35 和 D50 处理对土壤容重影响差异不显著,但是 D20S 和 D50S 处理土壤容重显著下降了 6.93%~11.14%($P < 0.05$)。在>20~35 cm 土层,与初始土壤和其他处理相比,D35 和 D50 处理在 2010 年和 2012 年显著降低了该层容重;D35S 和 D50S 处理在 3 个取样年份均显著降低了该层土壤容重。与其他处理相比,D50 和 D50S 处理>35~50 cm 土层土壤容重分别显著下降了 10.39%~12.27%和 11.16%~18.41%,其他处理间没有显著差异。0~20、>20~35 和>35~50 cm 土层土壤容重对不同耕翻和秸秆还田深度的时间响应不一致(图 1)。



注：D0、D20、D35 和 D50 分别代表耕翻深度为 0、20、35 和 50 cm，D20S、D35S 和 D50S 分别代表耕翻秸秆混合还入 0~20、0~35 和 0~50 cm 土层，Initial V 代表起始土壤值。下同。不同小写字母表示相同年份同一土层不同处理间在 $P < 0.05$ 的水平上差异显著。

Note: D0, D20, D35 and D50 represent tillage within 0, 20 and 35, 50 cm, respectively; D20S, D35S and D50S represent straw return within 0-20 cm, 0-35 cm and 0-50 cm, respectively. Initial V represents the values of initial soil sample. The same below. Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments under the same experimental year at 0.05 level.

图 1 耕翻和秸秆还田对土壤容重的影响

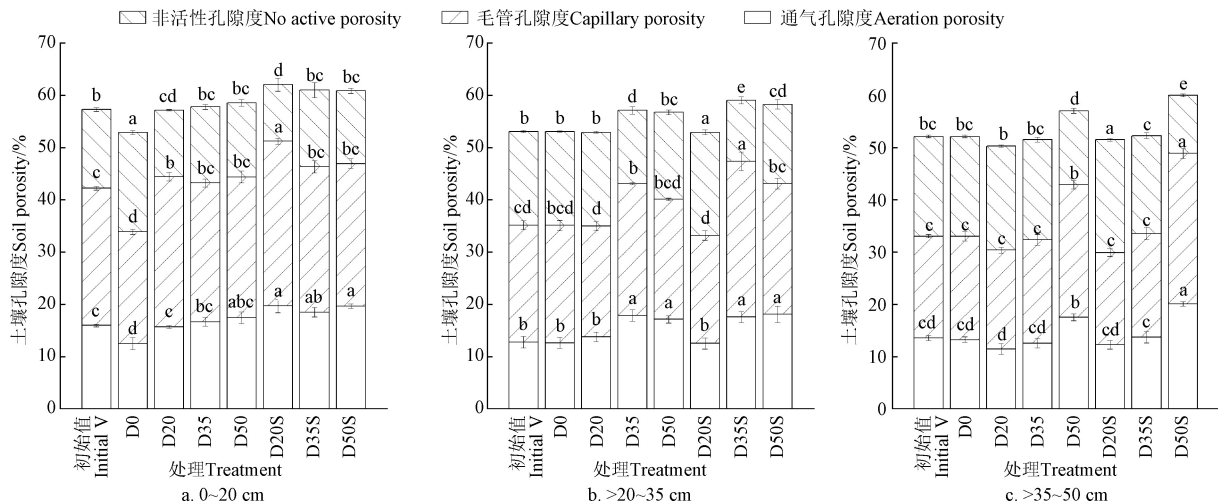
Fig.1 Effects of tillage and straw return on soil bulk density

2.2 对土壤孔隙度的影响

图 2 为试验 6 a 后分析了耕翻和秸秆还田对土壤孔隙度的影响。土壤总孔隙度、通气孔隙度和毛管孔隙度随着土层深度的增加而增加，而非活性孔隙度随着土壤深度的增加而减少。与初始土壤相比，D0 处理在 0~20 cm 土层土壤总孔隙度显著降低了 7.64%，而在 >20~35 和 >35~50 cm 土层则没有显著差异。与初始土壤相比，仅进行耕翻的处理对 0~20 cm 土层土壤总孔隙度没有显著影响，但是耕翻过程中配合秸秆还田后土壤总孔隙度显著增加了 6.29%~8.31% ($P < 0.05$)。随着耕翻和秸秆还田深度的增加，D35、D50、D35S 和 D50S 处理显著增加了 >20~35 cm 土层土壤总孔隙度，D50 和 D50S 处理显著增加了 >35~50 cm 土层土壤总孔隙度。

耕翻和秸秆还田能够影响土壤中的孔隙组成(图 2)。在 0~20 cm 土层，与初始土壤相比，D0 处理土壤通气孔

隙度显著降低了 21.79%，而 D20、D35 和 D50 处理则对土壤通气孔隙度没有显著影响。与其他处理相比，D35、D50、D35S 和 D50S 处理 >20~35 cm 土层土壤通气孔隙度显著增加了 24.30%~43.00% ($P < 0.05$)，它们之间没有显著差异。D50 和 D50S 处理均显著增加了 >35~50 cm 土层土壤通气孔隙度；其中与 D50 相比，D50S 处理显著增加了 14.66% ($P < 0.05$)。与初始土壤相比，D0 处理 0~20 cm 土层土壤毛管孔隙度显著降低了 18.66%，而 D20S 处理显著增加了 23.30%。与其他处理相比，在 >20~35 cm 土层，D35S 处理土壤毛管孔隙度显著增加了 18.41%~44.13%；在 >35~50 cm 土层，D50 和 D50S 处理均显著增加了土壤的通气孔隙度 29.11%~48.03%，其中 D50 和 D50S 之间差异显著。与初始土壤相比，免耕显著增加了 0~20 cm 土层土壤的非活性孔隙度，而耕翻和秸秆还田处理则减少了相应土层土壤非活性孔隙度。



注：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 indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same as below.

图 2 耕翻和秸秆还田对土壤孔隙度的影响

Fig.2 Effects of tillage and straw return on soil porosity

2.3 对土壤田间持水量和饱和持水量的影响

本研究中土壤田间持水量和饱和持水量均表现为随

着土壤深度的增加的减小(图 3)。与初始土壤相比，D0 处理 0~20 cm 土层土壤田间持水量和饱和持水量分

别显著下降了 11.80% 和 7.88%, 而 >20~35 和 >35~50 cm 土层没有显著差异。在 0~20 cm 土层, 耕翻配合秸秆还田处理田间持水量和饱和持水量分别显著增加了 8.70%~15.08% 和 7.23%~9.51%, 不同处理间表现为 D20S>D35S>D50S。在 >20~35 cm 土层, 与 D0, D20 和 D20S 相比, D35、D35S、D50 和 D50S 处理田间持水量

和饱和持水量分别显著增加了 6.59%~17.95% 和 9.84%~21.12% ($P<0.05$), 其中 D35S 和 D50S 处理的田间持水量显著高于 D35 和 D50 处理。在 >35~50 cm 土层, 仅 D50 和 D50S 处理显著增加了该层田间持水量和饱和持水量, 与其他处理相比分别增加了 13.41%~26.23% 和 8.19%~14.69%。

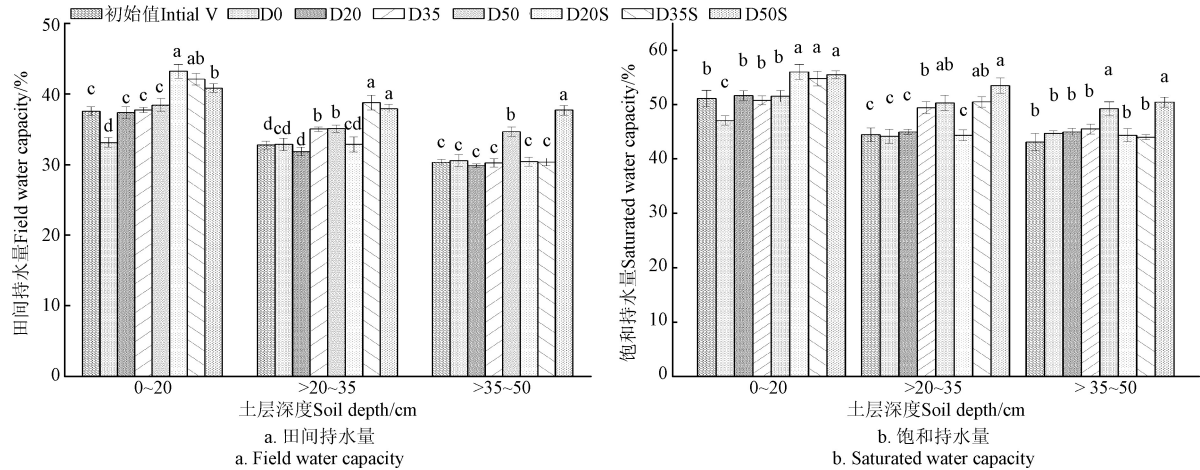


图3 耕翻和秸秆还田对土壤田间持水量和饱和持水量的影响
Fig.3 Effects of tillage and straw return on field water capacity and saturated water capacity

2.4 对土壤饱和导水率的影响

耕翻和秸秆还田对土壤饱和导水率的影响见表2。D0处理显著降低了0~20 cm土层的土壤的饱和导水率($P<0.05$), 与初始土壤相比, 显著下降了12.15%; 而对>20~35和>35~50 cm土层饱和导水率没有显著影响。耕翻配合秸秆还田处理0~20 cm土层土壤饱和导水率显著增加了10.91%~12.76% ($P>0.05$)。当耕

翻深度达到35和50 cm后, 显著增加了>20~35 cm土层的饱和导水率, 当向0~35和0~50 cm土层施用秸秆后, >20~35 cm土层饱和导水率有进一步增加的趋势, 但是D35、D50、D35S和D50S处理间差异不显著。仅D50和D50S处理显著增加了>35~50 cm土层的饱和导水率, 与其他处理相比显著增加了9.86%~24.68%。

表2 耕翻和秸秆还田对土壤饱和导水率的影响

Table 2 Effects of tillage and straw return on saturated hydraulic conductivity

土层深度 Soil depth/cm	初始值 Initial V	D0	D20	D35	D50	D20S	D35S	D50S
0~20	34.23±1.17b	30.07±0.75c	33.87±1.03b	34.00±0.61b	34.60±0.66b	38.20±0.87a	38.60±0.40a	37.97±1.10a
>20~35	29.63±1.06c	29.23±0.72c	30.03±0.42c	33.50±0.40b	33.90±0.96ab	30.07±0.61c	34.67±1.23ab	35.23±1.50a
>35~50	26.70±1.05b	27.73±0.78b	26.07±1.04b	26.97±0.71b	32.33±0.85a	26.03±0.67b	25.93±1.23b	30.47±0.76a

注: 同一行不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 的水平上差异显著。下同。

Note: The different lowercases in one row indicate the significantly different among the treatments in the same soil layer at $P<0.05$ level. The same as below.

2.5 对土壤>0.25 mm水稳性团聚体的影响

>0.25 mm水稳性团聚体($WSA_{>0.25}$)是评价土壤结构的重要指标之一, 随着土层深度的增加, $WSA_{>0.25}$ 含量逐渐减小(表3)。与初始土壤相比, D0处理0~20 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量显著下降了15.63% ($P>0.05$), 在20~35 cm和>35~50 cm土层没有显著差异。与初始土壤相比, D50处理显著降低了0~20 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量, 但是

显著增加了>35~50 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量; D35处理显著增加了>20~35 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量。耕翻配合秸秆还田有增加相应土层 $WSA_{>0.25}$ 含量的趋势, 与其他处理相比, 仅D20S和D35S处理显著增加0~20 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量。与初始土壤相比, D35、D35S和D50S显著增加了>20~35 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量, 他们之间差异不显著; D50和D50S显著增加了>35~50 cm土层 $WSA_{>0.25}$ 含量。

表3 耕翻和秸秆还田对>0.25 mm水稳性团聚体的影响

Table 3 Effects of tillage and straw return on >0.25 mm water stability aggregate

土层深度 Soil depth/cm	初始值 Initial V	D0	D20	D35	D50	D20S	D35S	D50S
0~20	33.70±0.95b	28.43±0.87d	33.93±1.31b	31.77±1.01bc	30.40±1.04cd	39.30±1.31a	38.57±1.72a	34.63±0.55b
>20~35	23.53±2.15c	24.27±1.79c	23.53±2.64c	28.97±0.70ab	25.60±1.11bc	24.17±1.37c	31.73±0.85a	29.43±1.04ab
>35~50	17.23±1.29b	18.37±1.14b	17.80±1.40b	18.33±0.85b	23.23±0.85a	17.03±1.19b	19.40±0.46b	25.27±0.67a

2.6 主成分分析及耕翻和秸秆还田深度对土壤物理性质影响的统计分析

6 a 翻耕和秸秆还田后，对土壤物理性质进行主成分(PCA)分析(图 4 和表 4)。在 0~20 cm 土层，D0 处理的样本在第一主成分上明显与其他处理区分开(图 4)，D20S 处理的样本在第二主成分上明显与其他处理的样本

区分开，D20S 处理对土壤物理性质综合得分最高(表 4)。在>20~35 cm 土层，耕翻与秸秆还田处理的样本在第一主成分上明显与 D0 和初始土壤样品区分开，其中 D35S 处理对土壤物理性质综合得分最高。在>35~50 cm 土层，D50 和 D50S 处理的样本在第一主成分上明显与其他处理有明显区分，其中 D50S 处理对土壤物理性质综合得分最高。

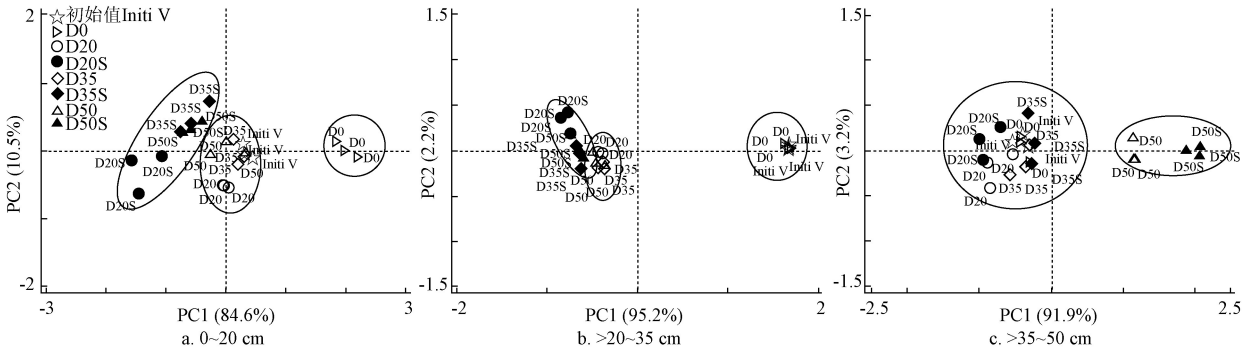


图 4 耕翻和秸秆还田处理下土壤物理性质的主成分分析
Fig.4 Principle components analysis of soil physical properties under tillage and straw return treatments

表 4 耕翻和秸秆还田对土壤物理性质影响的综合得分

Table 4 Comprehensive scores of effects of tillage and straw return on soil physical properties								
土层深度 Soil depth/cm	初始值 Initial V	D0	D20	D35	D50	D20S	D35S	D50S
0~20	-0.3	-1.59	-0.15	-0.24	-0.06	1.1	0.66	0.59
>20~35	-1.25	-1.21	0.11	0.02	0.15	0.61	0.99	0.58
>35~50	-0.43	-0.29	-0.58	-0.36	0.98	-0.62	-0.31	1.6

基于 Pearson 相关分析，统计了耕翻和秸秆还田深度对土壤物理性质的影响(表 5)。在 0~20 cm 土层土壤物理指标与秸秆还田深度极显著相关，容重和饱和导水率与耕翻深度极显著相关。在>20~35 cm 土层容重、田间持水量和 WAS_{>0.25} 与秸秆还田深度极显著相关，总孔

隙度和饱和导水率与秸秆还田深度显著相关；除了 WAS_{>0.25} 以外的土壤物理指标与耕翻深度极显著相关。在>35~50 cm 土层 WAS_{>0.25} 与秸秆还田深度极显著相关，容重、总孔隙度和田间持水量与秸秆还田深度显著相关；土壤物理指标均与耕翻深度极显著相关。

表 5 耕翻和秸秆还田深度对土壤物理性质影响的统计分析

Table 5 Statistical analysis on soil physical properties impacted by the depth of tillage and straw return						
指标 Indicators	0~20 cm		>20~35 cm		>35~50 cm	
	秸秆还田深度 Depth of straw return	耕翻深度 Depth of tillage	秸秆还田深度 Depth of straw return	耕翻深度 Depth of tillage	秸秆还田深度 Depth of straw return	耕翻深度 Depth of tillage
容重 Bulk density	-0.652**	-0.574**	-0.578**	-0.732**	-0.518*	-0.702**
总孔隙度 Total porosity	0.707**	0.532*	0.532*	0.750**	0.529*	0.701**
田间持水量 Field water capacity	0.668**	0.490*	0.725**	0.663**	0.525*	0.695**
饱和持水量 Saturated water capacity	0.741**	0.505*	0.302	0.709**	0.302	0.709**
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	0.761**	0.568**	0.543*	0.861**	0.058	0.589**
WAS _{>0.25}	0.606**	0.446*	0.629**	0.536*	0.559**	0.690**

注：*表示显著相关，**极显著相关。
Note: * indicates significant correlation, ** indicates highly significantly correlation.

3 讨论

大量研究已经证明耕翻和秸秆还田是影响物理性质的重要因素^[26]。与传统耕作相比，免耕虽然对土壤不产生扰动，但是土壤自身下沉而引起土壤颗粒间排列比较紧实，加之播种和收获环节的机械压实增加了表层土壤的容重^[27]，但是对 20 cm 以下土层没有显著影响。与免耕相比，耕翻处理由于对相应土层进行了翻转作业从而

导致土壤疏松，减少土壤容重^[28]；但是，不同耕翻深度处理对 0~20 cm 土层土壤容重没有显著影响(图 1)。黑土由于长期不合理耕作导致约 20 cm 以下存在一个土壤容重较大的犁底层^[15]，限制了作物根系的下扎和土壤中的水分传导^[29]。本研究中随着耕翻深度的增加，D35 和 D50 处理能够打破了犁底层，显著降低了>20~35 cm 土层的土壤容重，改善土壤结构。在土层翻转作业的同时将秸秆均匀地混入相应的土层对改善土壤容重的效果

优于单独的耕翻作业(图1)。秸秆在土壤中起到了“楔子”的作用^[7],能够有效改善土壤的三相比,进一步降低相应土层的土壤容重,说明翻耕过程中配合秸秆还田是有效改善深层土壤结构的途径。在0~20 cm 土层秸秆还田处理对土壤容重的影响表现为 $D20S < D35S < D50S$ (2010 年除外),其主要原因是等量秸秆还入不同深度的土层而引起的秸秆在土壤中含量的不同而导致^[21]。2012 和 2014 年 $D50S$ 处理 >35~50 cm 土层土壤容重显著小于 2010 年,表现出了秸秆深层混合施用的时间累积效应。秸秆累计输入量的增加和 >35~50 cm 土层秸秆腐解慢是产生上述现象的主要原因^[12]。邹文秀等研究发现在 0~50 cm 土层范围内,随着秸秆还田深度增加,秸秆残留率呈增加的趋势;残留在土壤中的秸秆对持续改善土壤结构具有重要的作用^[7,21]。

土壤孔隙度是衡量土壤物理质量的重要指标,对作物根系生长、通气、排水、微生物及土壤动物活动至关重要^[30-31]。免耕处理由于土壤自身下沉而导致土壤颗粒排列紧密,降低了土壤总孔隙度,特别是降低了土壤中的通气孔隙度^[32]。苏丽丽等的研究发现,与传统旋耕相比,耕翻处理 >20~30 cm 土层土壤总孔隙度显著增加了 5.7%^[2],本研究得到了相似的结果。 $D35$ 和 $D50$ 处理显著增加了 20 cm 以下相应土层的总孔隙度,改善了土壤中的孔隙分布,特别是增加了土壤的通气孔隙和毛管孔隙度的含量,这对土壤蓄水和保水功能的提升至关重要^[6]。秸秆还田是增加土壤孔隙度,改善土壤孔隙结构的有效措施^[33]。相关研究已经报道了有机物料还田能够促进土壤中已有孔隙向大孔隙发育,在 10 cm 以下土层效果尤为显著^[1]。本研究发现土壤翻耕过程中配合秸秆还田,较不进行秸秆还田的处理进一步增加了相应土层的土壤总孔隙度、通气孔隙度和毛管孔隙度,尤其是增加了有效孔隙的比例(图2)。深耕翻和超深耕翻秸秆还田后能够显著增加深层土壤的有机质含量^[12,21],促进土壤中团聚体的形成(图5),因次,更有效地增加了土壤中的总孔隙度,明显改善深层土壤的通气性和持水能力^[34]。

东北黑土区是雨养农业,大气降水是土壤水分的主要来源,如何提高土壤对大气降水的蓄持能力,对区域农业生产至关重要^[35]。本研究中免耕处理受较大土壤容重和较小土壤孔隙度的影响,0~20 cm 土层田间持水量和饱和持水量均显著小于其他处理(图3)。翻耕和秸秆还田通过增加土壤孔隙度,改善土壤中的孔隙分布(图2),进而扩大土壤中的蓄水空间,接纳更多的大气降水贮存在土壤中^[15]。在 0~20 cm 土层,秸秆还田后不同耕翻深度处理均显著增加了土壤田间持水量和饱和持水量,与武志杰等研究结果相一致^[11]。本研究中对于 20 cm 以下的土层,通过深耕打破犁底层,能够有效地增加相应土层土壤的田间持水量和饱和持水量,耕翻的过程中进行秸秆还田效果更佳(图3)。通过深耕翻和超深耕翻配合秸秆还田增加耕作层厚度,提高田间持水量和饱和持水量,能够对 <143.5 mm 的单次大气降水或者累计大气降水的进行贮存,有效预防田间径流的发生^[15],同

时提高土壤的储水量和有效水含量^[6,36],对于缓解研究区域内由年际间降水不均和年内降水分布不均而引起的季节性干旱具有十分重要的作用。

土壤饱和导水率反映了土壤导水性,是土壤水分和溶质运移的重要水力参数^[1]。相关研究已经发现翻耕和秸秆还田能够提高土壤大孔隙含量,改善土壤的孔隙分布^[33],进而增加土壤的饱和导水率,提高土壤水分传导能力。本研究中土壤深耕翻和超深耕翻过程中对相应土层进行翻转作业,使上下土层的土壤进行混合,创造了大量的大孔隙,有效改善了土壤紧实的状态,进而增加了土壤饱和导水率(表2),促进了水分向深层的传导。秸秆具有较高的纤维素含量和低容重特性^[1],还田以后能够有效降低容重(图1),增加土壤中通气孔隙数量(图2),显著改善土壤的导水能力。秸秆还田后在增加土壤有机质含量的同时^[7],促进了土壤中孔隙结构的形成,使土壤中已有孔隙向大孔隙发育^[17],而大孔隙是土壤水分运移的优势路径^[37],对土壤饱和导水率具有显著的增加效果。 $Kasteel$ 等研究还发现在秸秆还田处理中,秸秆本身就能够导致土壤水分流态发生变化^[38],即秸秆施入土壤以后,其自身就具有水分通道的作用,增加土壤中水分的入渗和传导。黑土质地较为黏重,特别亚耕层土壤常年受机械碾压的影响,土壤饱和导水率普遍较低^[7],影响了土壤中的水分传导,不利于大气降水的入渗,部分低洼地块易产生内涝现象,限制了作物根系的生长及其对水分和养分的吸收^[26]。本研究发现在该区域进行深耕翻和超深耕翻同时配合秸秆还田在培肥土壤同时能够有效解决土壤水分入渗难的问题。

>0.25 mm 水稳性团聚体($WSA_{>0.25}$)含量是评价土壤结构的重要指标^[5]。本研究中免耕处理显著降低了 0~20 cm 土层的 $WSA_{>0.25}$ 含量,与已有研究结果不一致^[39],其主要原因取样深度不同。耕翻处理在耕翻作业过程土壤发生了土层翻转,使下层土壤与表层土壤进行了充分混合,导致 0~20 cm 土层 $WSA_{>0.25}$ 含量表现为下降(表3)。深耕翻和超深耕翻处理在耕翻过程中一方面将 $WSA_{>0.25}$ 含量较高的表层土壤通过翻转和混合的方式带入深层土壤;另一方面通过耕层加厚和土壤结构的改善,促进了作物根系向深层土壤的伸展^[40],根系及根系分泌物能够促进深层土壤中 $WSA_{>0.25}$ 的形成^[41]。本研究中 $D35$ 和 $D50$ 处理增加了 >20~35 cm 土层 $WSA_{>0.25}$ 的含量, $D50$ 处理增加了 >35~50 cm 土层 $WSA_{>0.25}$ 含量(表3)。目前,秸秆还田对土壤团聚体促进作用的研究主要集中在耕作层^[18],但是为了更有效地改善黑土犁底层紧实程度,构建肥沃耕层,促进土壤中的水、热、气交换,建议将秸秆与深耕翻或者超深耕翻相结合,能够实现短期内增加 $WSA_{>0.25}$ 含量的目标^[20]。秸秆还田后能够增加土壤中的有机质含量,土壤有机质中的长链分子能够有效地束缚和黏结矿质颗粒,促进大团聚体的形成^[17]。还田后的秸秆为微生物提供了丰富碳源和氮源,同时由于土壤孔隙结构的改善,增加了土壤中的通气孔隙(图2),有利于土壤中真菌的生长^[4];亚耕层秸秆还田后能显著提高土

壤磷脂脂肪酸的总量,特别是真菌的数量^[4]。众所周知,真菌菌丝的缠绕作用是促进团聚体形成的机制之一。秸秆分解过程中产生的胶结物质也是促进 WSA_{>0.25} 形成的重要因素之一^[20]。黑土深层土壤结构的改善对于作物根系的生长及对深层土壤中水分和养分的利用至关重要。

黑土质地较为黏重,长期不合理耕作导致土壤耕层变薄,犁底层增厚,限制了土壤中的水分和养分库容及有效性^[15,21]。本研究发现耕翻和秸秆还田具有改善黑土的物理性质的作用。通过主成分分析对土壤物理性质进行综合评价,耕翻 20、35 和 50 cm 并进行秸秆还田,分别对 0~20、>20~35 和>35~50 cm 土层土壤物理性质的改善效果均达到了最优。因此,相对于单独的耕翻处理,秸秆还田更能有效地改善土壤的物理性质,其对黏粒含量高的土壤效果尤为明显^[1]。因此,耕翻秸秆还田是改善黑土物理性质的有效途径。虽然,随着耕翻深度和秸秆还田深度的增加,能够有效改善全耕作层土壤的物理性质,但是耕翻深度的增加必将伴随着机械作业成本的加大,可能造成能源上的浪费和经济收益上的降低。因此,综合大量已有的研究结果^[20,33]和本研究中的发现,建议粘壤质黑土的耕翻秸秆还田深度为 0~35 cm。考虑到耕翻过程中进行秸秆还田对土壤扰动较大,建议在秋季进行秸秆还田操作,以便深厚肥沃的耕作层能够充分蓄积冬季和春季的降水,保证第二年春季的土壤含水量;规避春季耕翻作业可能带来的土壤跑墒,影响作物出苗的潜在风险。

4 结 论

基于 6a 的田间试验研究发现,耕翻和秸秆还田是改善土壤物理性质的重要农艺措施。免耕虽然对>20~50 cm 土层土壤物理性质没有显著影响,但是因增加了 0~20 cm 土层的土壤容重,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,而有利于黏重黑土良好土壤物理性质的形成。除了超深耕翻处理显著降了 0~20 cm 土层>0.25mm 水稳性团聚体以外,不同耕翻深度对 0~20 cm 土层土壤物理性质没有显著影响,深耕翻和超深耕翻处理改善了>20~35 和>35~50 cm 土层土壤物理性质。与初始土壤相比,不同耕翻深度配合秸秆还田显著改善全耕作层的土壤物理性质,特别是深耕翻和超深耕翻配合秸秆还田分别对>20~35 和>35~50 cm 土层土壤物理性质的改善效果最佳,说明通过深耕翻和超深耕翻进行秸秆混合还田能够有效地打破犁底层、增加耕作层厚度、扩充土壤的水分库容,提高黑土的水分调节能力。鉴于深耕翻和超深耕翻配合秸秆还田对黏重土壤物理性质的改善效果和免耕的局限性,综合考虑机械成本投入和经济收益,建议在东北黑土区建立深耕翻(深耕翻配合秸秆还田)与免耕相结合的耕作制度。该项技术也适用于土壤黏重的其他区域。

[参 考 文 献]

- [1] 赵丽丽,李陆生,蔡焕杰,等. 有机物料还田对土壤导水导气性的综合影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(6): 1045-1057.
- [2] 苏丽丽,李亚杰,徐文修,等. 耕作方式对土壤理化性状及夏大豆产量的影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 43-48, 58.
- [3] 梁海,陈宝成,韩惠芳,等. 深松 35 cm 可改善潮棕壤理化性质并提高小麦和玉米产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1879-1886.
- [4] 丛萍,王婧,董建新,等. 秸秆还田对黑土亚表层微生物群落结构的影响特征及原因分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 109-118.
- [5] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.
- [6] 邹文秀,陆欣春,韩晓增,等. 耕作深度及秸秆还田对农田黑土土壤供水能力及作物产量的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(3): 141-149.
- [7] 韩晓增,邹文秀,王凤仙,等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2996-3002.
- [8] Zhao Lili, Li Lusheng, Cai Huanjie, et al. Comprehensive effects of organic materials incorporation on soil hydraulic conductivity and air permeability[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(6): 1045-1057. (in Chinese with English abstract)
- [9] Su Lili, Li Yajie, Xu Wenxiu, et al. Effects of tillage methods on soil physical and chemical properties and yield of summer soybean[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 43-48, 58. (in Chinese with English abstract)
- [10] Liang Hai, Chen Baocheng, Han Huifang, et al. Subsoiling 35 cm in depth improve soil physicochemical properties and increase grain yields of wheat and maize in aquic brown soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(11): 1879-1886. (in Chinese with English abstract)
- [11] 丛萍,王婧,董建新,等. 秸秆还田对黑土亚表层微生物群落结构的影响特征及原因分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 109-118.
- [12] Cong Ping, Wang Jing, Dong Jianxin, et al. Effects and analysis of straw returning on subsoil microbial community structure in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(1): 109-118. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.
- [14] Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Lu Xinchun, et al. Effect of land use types on physical properties of black soil profiles[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 187-193, 199. (in Chinese with English abstract)
- [15] 邹文秀,陆欣春,韩晓增,等. 耕作深度及秸秆还田对农田黑土土壤供水能力及作物产量的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(3): 141-149.
- [16] Zou Wenxiu, Lu Xinchun, Han Xiaozeng, et al. The impact of tillage depth and straw incorporation on crop yield and soil water supply in arable black soil[J]. Soil and Crop, 2016, 5(3): 141-149. (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩晓增,邹文秀,王凤仙,等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2996-3002.
- [18] Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Wang Fengxian, et al. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2996-3002.

- 2996-3002. (in Chinese with English abstract)
- [8] Ana V F A, Nelson F F, João P L M, et al. Effect of plough plan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1-2): 94-104.
- [9] 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): 226-230.
- [10] Al Kaisi M M, Yin X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn - soybean rotations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(2): 437-445.
- [11] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 539-542.
Wu Zhijie, Zhang Haijun, Xu Guangshan, et al. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 539-542. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 563-570.
Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Lu Xinchun, et al. Effects of straw incorporated to different locations in soil profile on straw humification coefficient and maize yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 563-570. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(6): 114-120.
Chen Xuewen, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, et al. Tillage effects on soil pore size distribution and soil moisture in Northeast China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(6): 114-120. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 439-444.
Chen Xuewen, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 439-444. (in Chinese with English abstract)
- [15] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. *土壤与作物*, 2015, 4(4): 145-150.
Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Lu Xinchun, et al. The soli cultivated layer in dryland and technical patterns in cultivated soil fertility[J]. *Soil and Crop*, 2015, 4(4): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [16] 白伟, 安景文, 张立祯, 等. 秸秆还田配施氮肥改善土壤理化性状提高春玉米产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 168-176.
- Bai Wei, An Jingwen, Zhang Lizhen, et al. Improving of soil physical and chemical properties and increasing spring maize yield by straw turnover plus nitrogen fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(15): 168-176. (in Chinese with English abstract)
- [17] 丁奠元, 冯浩, 赵英, 等. 氮化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 650-658.
Ding Dianyuan, Feng Hao, Zhao Ying, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(3): 650-658. (in Chinese with English abstract)
- [18] 闫雷, 李思莹, 孟庆峰, 等. 秸秆还田与有机肥对黑土区土壤团聚性的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2019, 50(12): 58-67.
Yan Lei, Li Siying, Meng Qingfeng, et al. Effect of straw returning and organic manure on soil aggregate in black soil area[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(12): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田对土壤物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 43-49.
Wang Qiuju, Liu Feng, Jiao Feng, et al. Effects of strip-collected chopping and mechanical deep-buried return of straw on physical properties of soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(17): 43-49. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 128-134.
Meng Qingying, Zou Hongtao, Han Yanyu, et al. Effects of straw application rates on soil aggregates, soil organic carbon content and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(23): 128-134. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 玉米秸秆混合还田深度对土壤有机质及养分含量的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(2): 139-147.
Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Lu Xinchun, et al. Responses of soil organic matter and nutrients contents to corn stalk incorporated into different soil depths[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(2): 139-147. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵其国. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1981.
- [23] 迟春明, 王志春. 客土改良对碱土饱和导水率与盐分淋洗

- 的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(1): 98-101.
- Chi Chunming, Wang Zhichun. Effects of additional soil amount on saturated hydraulic conductivity and salts leaching in sodic soil[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2011, 27(1): 98-101. (in Chinese with English abstract)
- [24] 邹文安, 姜波, 顾李华. 土壤水分常数的测定[J]. 水文, 2015, 35(4): 62-66.
- Zou Wenan, Jiang Bo, Gu Lihua. Measurement of soil moisture constants[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(4): 62-66. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丛晓峰, 刘立成, 王宇超, 等. 不同干扰对城市绿化用地土壤物理性质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(28): 166-172.
- Cong Xiaofeng, Liu Licheng, Wang Yuchao, et al. Influence of different interference on physical properties of urban green space soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(28): 166-172. (in Chinese with English abstract)
- [26] 翟振, 李玉义, 郭建军, 等. 耕深对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 115-123.
- Zhai Zhen, Li Yuyi, Guo Jianjun, et al. Effect of tillage depth on soil physical properties and yield of winter wheat-summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 115-123. (in Chinese with English abstract)
- [27] Dam R F, Mehdi B B, Burgess M S E, et al. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 84(1): 41-53.
- [28] Xie J, Wang L, Li L, et al. Subsoiling increases grain yield, water use efficiency, and economic return of maize under a fully mulched ridge-furrow system in a semiarid environment in China[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 199: 104584.
- [29] Mondal S, Chakraborty D, Das T K, et al. Conservation agriculture had a strong impact on the sub-surface soil strength and root growth in wheat after a 7-year transition period[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 195: 104385.
- [30] Kay B D, VandenBygaart A J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 107-118.
- [31] Hill R L, Horton R, Cruse R M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49: 1264-1270.
- [32] Da Veiga M, Horn R, Reinert D J, et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1): 104-113.
- [33] 王秋菊, 高中超, 常本超, 等. 有机物料深耕还田改善石灰性黑钙土物理性状[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 161-166.
- Wang Qiuju, Gao Zhongchao, Chang Benchao, et al. Deep tillage with organic materials returning to field improving soil physical characters of calcic chernozem[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 161-166. (in Chinese with English abstract)
- [34] 邹洪涛, 王胜楠, 闫洪亮, 等. 秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 52-60.
- Zou Hongtao, Wang Shengnan, Yan Hongliang, et al. Effects of straw deep returning on soil structure moisture in semiarid region of Northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 52-60. (in Chinese with English abstract)
- [35] 邹文秀, 韩晓增, 江恒, 等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 196-202.
- Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Jiang Heng, et al. Characteristics of precipitation in black soil region and response of soil moisture dynamics in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 196-202. (in Chinese with English abstract)
- [36] 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 Qiuju, Liu Feng, Jiao Feng, et al. Effect of deep tillage on water characteristics in black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 942-948. (in Chinese with English abstract)
- [37] Kuncoro P H, Koga K, Satta N, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 143: 172-179.
- [38] Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. Geoderma, 2007, 137(3): 360-369.
- [39] 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 等. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2801-2808.
- Liang Aizhen, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Short-term impacts of no tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in black soil of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2801-2808. (in Chinese with English abstract)
- [40] Gill J S, Sale P W G, Peries R R, et al. Changes in soil physical properties and crop root growth in dense sodic

subsoil following incorporation of organic amendments[J].
Field Crops Research, 2009, 114(1): 137-146.
[41] Wang S B, Guo L L, Zhou P C, et al. Effect of subsoiling

depth on soil physical properties and summer maize (*Zea mays L.*) yield[J]. Plant Soil and Environment, 2019, 65(3): 131-137.

Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China

Zou Wenxiu¹, Han Xiaozeng¹, Yan Jun¹, Chen Xu¹, Lu Xinchun^{1*}, Qiu Chen^{1,2}, Hao Xiangxiang¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Black soil in northeast China is well known as high natural fertility for grain production, but the growth and yield of crop can be limited due to the high clay content of black soil can deteriorate physical properties. In this case, both tillage and straw return can be expected to serve as the important agronomic practices, in order to efficiently improve soil physical properties. However, the optimal depth of tillage and straw return into soil for favorable soil physical properties still remained unknown, particularly in black soil region. In this study, a field experiment, referred to the depth of tillage and straw return into soil, was conducted for six years in the black soil region in northeast China, in order to investigate the effects of incorporation depth of tillage and straw return into soil on soil physical properties of black soil. Seven treatments consisted of four replicates and random block design, including no tillage (D0), shallow tillage (0-20 cm) without or with straw return (D20 or D20S), deep tillage (0-35 cm) without or with straw return (D35 or D35S), super deep tillage (0-50 cm) without or with (D50 or D50S) straw return. In the treatments with straw return, a straw rate of 10 000 kg/hm² was set to return into the corresponding tilled soil layer. Bulk density and water holding capacity were measured using cutting ring method, while the hydraulic conductivity was determined using constant head method, and the aggregate was measured using wet sieving method. The results showed that: 1) Compared with initial soil values, D0 treatment significantly increased soil bulk density, while decreased soil porosity, water holding capacity, hydraulic conductivity and >0.25 mm water stability aggregate (WAS_{>0.25}) within 0-20 cm soil layer ($P<0.05$). However, there was no significantly impact on those indicators in soil layer within 20-50 cm ($P>0.05$). 2) In D20, D35 and D50 treatments, there was no obvious impact on the soil physical properties within 0-20 cm soil layer with exception for WAS_{>0.25} in D50 treatment, but D20S and D35S treatments remarkably all indicators of soil physical properties within 0-20 cm soil layer. 3) D35, D35S, D50 and D50S treatments significantly improved soil physical properties within >20-35 cm soil layer with exception of bulk density in 2014, while D50 and D50S treatments dramatically enhanced soil physical properties within in >35-50 cm soil layer ($P<0.05$). Specially, aeration porosity and hydraulic conductivity increased significantly, within the corresponding soil layers, while the higher effect was found in the treatment with straw return, compared with only tilled treatments. The comprehensive evaluation also showed that D35S and D50S treatments reached the best effect for improving soil physical properties. Therefore, the findings demonstrated that deep tillage or super deep tillage with straw return can efficiently improve soil physical properties within the whole tilled soil layers, concurrently to increase the depth of tilled soil layer, and thereby to enhance the water infiltration rate and soil water storage in black soil with heavy clay. In view of the positive effect of deep tillage and super tillage with straw return on soil physical properties and the limit of no tillage, the combined tillage practices of deep tillage (or with straw return) and no tillage were proposed for the black soil with high clay in northeast China and other regions.

Keywords: soils; tillage; straw return; hydraulic conductivity, soil porosity, water holding capacity; >0.25 mm water stability aggregate