

短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响

李娜^{1,2,4}, 龙静泓^{1,2}, 韩晓增¹, 张凤琴³, 雷琬莹^{1,2}, 盛明¹, 韩智勇⁴

(1. 中国科学院黑土区农业生态重点实验室, 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; 3. 黑河市爱辉区农业技术推广站, 黑河 164300; 4. 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室, 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059)

摘要: 构建适宜作物生长的耕层是解决农田土壤耕层“变浅、变薄、变硬”和透气透水性差的重要技术途径之一, 对于土壤黏粒含量较高的土壤来说, 更是如此。该研究以黑龙江省较为典型的农田暗棕壤为研究对象, 在黑河市爱辉农业示范园区设置不同耕层构建模式试验, 分析不同翻耕深度(15、35 cm)和不同有机物还田(秸秆和牛粪)对暗棕壤物理性质、玉米产量及产量构成的影响。田间试验包括: 1) 对照处理: 常规浅翻 15 cm, 无有机物还田(T15); 2) 深翻 35 cm, 无有机物还田(T35); 3) 浅翻 15 cm, 秸秆浅混还田(T15+S); 4) 深翻 35 cm, 秸秆深混还田(T35+S); 5) 免耕秸秆全覆盖(NT+SM1); 6) 免耕秸秆条覆盖(NT+SM2); 7) 深翻 35 cm, 有机肥深混还田(T35+OM); 8) 深翻 35 cm, 有机肥加秸秆深混还田(T35+S+OM), 秸秆和有机肥的还田量分别为 10 000 和 30 000 kg/hm²。2019 年和 2020 年试验结果表明, 不同耕作和有机物还田对土壤物理性质影响较大, 与 T15 处理相比, T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理可显著减少土壤容重, 增加土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量和>0.25 mm 水稳性团聚体比例, 优化土壤三相比; T15+S 处理对 0~15 cm 耕层的土壤容重、总孔隙度、饱和含水量、土壤三相比和>0.25 mm 水稳性团聚体影响显著, 而 T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理可显著改善 15~35 cm 亚耕层的土壤物理性质。不同耕层构建模式对玉米产量和收获指数也产生影响, 且在不同降水年型间存在差异: 与 T15 处理相比, 在降水正常年(2019 年), T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理玉米产量差异均不显著($P>0.05$); 在丰水年(2020 年), T15+S 和 T35+S+OM 处理玉米产量和收获指数增加最显著, 分别增加了 27.6%~37.0%和 22.75%~28.57% ($P<0.05$), 免耕可导致玉米减产。翻耕配合有机物还田通过增加玉米穗长和行粒数, 减少秃顶长, 是玉米增产的主要影响因素。综合分析认为, 深翻配合秸秆或有机肥还田能显著改善土壤物理结构, 优化土壤三相比, 增加玉米产量和收获指数, 在东北北部暗棕壤地区构建适宜作物生长的耕层具有一定的指导意义和应用价值。

关键词: 耕作; 土壤; 有机物还田; 物理性质; 三相比; 玉米产量; 暗棕壤

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.012

中图分类号: S152; S-3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0099-09

李娜, 龙静泓, 韩晓增, 等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 99-107. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.012 <http://www.tcsae.org>

Li Na, Long Jinghong, Han Xiaozeng, et al. Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 99-107. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

东北黑土地肥力高, 结构良好, 适宜作物生长, 是“耕地中的大熊猫”。东北黑土区也是中国的粮食主产区, 粮食产量占全国粮食产量的五分之一以上, 是国家粮食安全的“压舱石”。但是, 近年来, 黑土大规模、高强度的开垦利用, 化肥施用量剧增, 而秸秆和有机肥还田量很少, 这导致黑土地资源退化明显, 量在减少、质在退化, 土壤养分流失严重; 同时, 由于黑土质地一般较黏重, 为节约成本而长期采用连年浅耕的耕作措施, 土

壤物理结构更差, 土壤紧实, 犁底层增厚, 耕层变浅, 造成土壤的水、肥、气、热性质传导和运移转化受阻, 作物生长受限, 致使玉米产量降低^[1]。因此, 改善耕层土壤物理结构, 打破犁底层, 增加耕层水分和养分有效库容^[2], 是解决粮食稳产增产技术瓶颈, 保证黑土地战略地位和黑土区农业可持续发展的重要举措。

暗棕壤是东北黑土区主要的土壤类型之一, 主要分布于黑龙江省、吉林省及内蒙古自治区东部山区、半山区及低山丘陵区, 根据第二次土壤普查结果, 暗棕壤总面积约 3 200 万 hm²^[3], 是东北主要粮食产区。暗棕壤表层的肥沃土层较薄, 一般 25~28 cm, 在 28~35 cm 深度出现一个明显的分层现象, 下层的养分含量和土壤结构性显著降低。长期不合理耕作, 也使得暗棕壤 15~20 cm 土层存在明显的犁底层, 是制约作物生产和粮食产量增加的主要限制因子。

作物秸秆或有机物还田是目前被广泛采用的高成本低成本的培肥土壤的农艺措施, 减少环境污染的同时还能有效

收稿日期: 2021-02-10 修订日期: 2021-05-03

基金项目: 中国科学院前沿科学重点计划项目(No. ZDBS-LY-DQC017); 国家重点研发计划项目(No. 2016YFD0300802-01); 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室开放基金(No. GHBK-2020-008)

作者简介: 李娜, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 研究方向为土壤肥力调控及有机质稳定机制。Email: nal@iga.ac.cn

改善土壤结构^[4],降低土壤容重、增加土壤孔隙度,为微生物和作物根系提供良好的生长环境^[5],促进土壤水肥气热的传导和输送^[6],同时还田的有机物料通过微生物的分解,释放出供作物生长需要的营养元素,为土壤微生物和作物根系增加了食物来源,进一步反馈增强土壤养分库容,培肥土壤^[7],提高作物产量^[8]。目前常用的有机物还田方式主要包括免耕覆盖、浅翻混入、深翻混入和深埋等,还田有机物的种类主要为作物秸秆和有机粪肥。将作物秸秆翻埋还田(埋入地表下 20~35 cm 土层内),仅是改善了该土层的土壤容重和提高了有机质含量^[7,9],短期内对全耕层的土壤性质并未改善。前人研究发现深翻和有机物全耕层深混还田是构建适宜作物生长的肥沃耕层的主要农艺措施^[3,10-12]。深翻可打破土壤犁底层,配合秸秆或有机肥深混还田已被证实沙性土壤^[10]、黑土^[13]、褐土^[12,14]和潮棕壤^[15]中均可改善土壤物理结构,优化土壤三相,进而培肥土壤,提高作物产量。但在暗棕壤地区是否也能采取深翻打破犁底层,通过向土壤中深混秸秆或有机肥来改善土壤物理属性、培肥土壤、提升土壤产能,尚不清楚。特别是同时对比研究浅翻和深翻、有机物是否还田下土壤物理性质、作物产量及产量构成因素,进一步优化耕作和有机物还田措施方面的研究更少。

为此,本研究以第四季温带上广泛发育的暗棕壤为研究对象,基于不同的翻耕深度和有机物还田田间对比试验,将已在典型中厚黑土区的耕层构建技术^[3,13]应用于暗棕壤地区,通过打破犁底层,分析不同翻耕和有机物还田方式组合对土壤物理性质,包括容重、孔隙度、饱和含水量、田间持水量、土壤三相、>0.25 mm 水稳性

团聚体比例的影响,阐明短期不同耕作培肥措施对暗棕壤土壤物理性质的影响,探讨不同翻耕和有机物还田对农作物产量及产量构成要素的影响,以期指导构建适合当地种植模式的沃土培肥黑土技术模式,为东北农田黑土区构建适宜的耕层提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设置于黑龙江省黑河市爱辉区农业示范园区内(50°15'N, 127°27'E),海拔 600 m,属寒温带大陆性季风气候,春季气温不稳定,干旱多风,夏季温热多雨,秋季凉爽舒适,冬季严寒、漫长而干燥,冬长夏短、四季分明。年均气温-1.3~0.4℃,多年平均降水量为 500~600 mm,无霜期 110~120 d,有效活动积温 1 950~2 300℃,日照时数为 2 560~2 700 h。观测数据显示,黑河市爱辉区 2019 年和 2020 年降水量分别为 533 和 885 mm,分别为降水正常年和丰水年。土壤类型属于草甸暗棕壤,分布在低山和丘陵区。0~50 cm 剖面土壤基本肥力指标见表 1,属于肥力较高的土壤;土壤质地为壤土,整个土壤剖面在 28~35 cm 处呈现较明显的分层现象,表层为富含腐殖质的暗灰色黏壤土,略有团粒结构,表层以下为 AB 层,呈灰棕或灰色,团块结构,再向下为棕黄色的 B 层,在此层中常出现有铁锈、铁锰结核或灰色条纹,具有草甸化过程的特征。黏土矿物以水云母为主,伴有蛭石和高岭石,蒙脱石较少。当地种植制度主要以一年一熟的玉米或大豆为主,土壤耕作多采用浅旋耕,作业深度 10~15 cm。

表 1 试验地暗棕壤基本性质

Table 1 Basic soil properties of Dark Brown soil in studied area

土层深度 Soil depth/cm	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	pH 值 pH value	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorous/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorous/(mg·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)
0~15	19.7±0.5a	5.4±0.06b	1.45±0.04a	129.1±5.90a	0.23±0.007b	5.28±0.96b	22.4±1.1a	110.8±3.3a
>15~35	18.1±0.8b	5.4±0.08b	0.34±0.04c	125.3±5.37a	0.26±0.009a	5.78±0.56b	19.8±0.9b	57.4±2.1b
>35~50	14.0±0.3c	5.6±0.02a	1.11±0.03b	108.80±5.44b	0.19±0.01c	6.66±0.19a	16.4±0.6c	31.6±1.6c

注:数据为平均值±标准误,不同字母表示同一指标在不同土层间在 0.05 水平显著。

Note: Values represent average ± SE. The different letters indicate significance among different soil layer at 0.05 level.

1.2 试验设计

采用随机区组设计,设置 8 种不同耕层构建模式田间处理,如表 2 所示。本试验中腐熟牛粪和玉米秸秆的有机质质量分数分别为 14.5%和 44.2%,全氮质量分数分别为 0.38%和 0.65%。为保证所有处理等碳量还田,氮素不作为本试验考虑因素,有机物在田间处理中与土壤均匀混匀。每个小区 6 m×4 m,种 6 垄,4 次重复,随机排列,处理重复间留有 1 m 的保护行,试验区总面积 896 m²。2019 年 5 月 11 日坐水播种,以保证出苗率,10 月 4 日收获;2020 年 5 月 11 日未坐水播种,10 月 15 日收获。玉米品种为鑫科玉 1 号,种植密度为 7 万株/hm²,行距为 65 cm,株距为 20 cm。每个小区施化肥量:播种时施 N、P₂O₅ 和 K₂O 量分别为 80、70 和 60 kg/hm² 作为种肥,拔节期追施 N 量 65 kg/hm²;作物生长期无灌溉。

表 2 翻耕和有机物还田田间处理

Table 2 Field treatments under different combinations of plowing and organic amendments

处理 Treatments	耕作 Soil tillage	有机物还田 Organic amendments	有机物还田量 Amounts or organic amendments
T15	浅翻 15 cm	秸秆不还田	无
T35	深翻 35 cm	秸秆不还田	无
T15+S	浅翻 15 cm	秸秆浅混还田	10 000 kg·hm ⁻² 玉米秸秆
T35+S	深翻 35 cm	秸秆浅混还田	10 000 kg·hm ⁻² 玉米秸秆
NT+SM1	免耕	秸秆全覆盖	10 000 kg·hm ⁻² 玉米秸秆
NT+SM2	免耕	秸秆条覆盖	10 000 kg·hm ⁻² 玉米秸秆
T35+OM	深翻 35 cm	有机肥深混还田	30 000 kg·hm ⁻² 腐熟牛粪
T35+S+OM	深翻 35 cm	有机肥加秸秆深混还田	30 000 kg·hm ⁻² 腐熟牛粪; 10 000 kg·hm ⁻² 玉米秸秆

1.3 田间取样、测定指标及方法

1.3.1 玉米产量及产量性状

在玉米收获时,从每个试验小区随机选取具有代表性

的 2 垄, 连续 10 株玉米进行测产, 测定水分后, 折合成公顷产量。在每个试验小区选 10 株玉米果穗和 3 株玉米植株, 带回实验室测定玉米产量性状和生物量。玉米果穗按照常规方法测定穗长、穗粗、秃顶长、穗行数、行粒数、百粒质量等玉米产量性状。地上植株贴地表切断后全部装入尼龙网带; 用取样锹挖取 20 cm×20 cm×35 cm 的根土混合体, 尽可能抖落根上的土, 装入塑料袋全部带回实验室, 置于 0.25 mm 筛中, 清水洗掉泥土, 和地上植株均在 85 ℃ 下烘干称质量, 计算植株地上和地下生物量分配。

收获指数按式 (1) 计算为

$$HI=GY/BY \quad (1)$$

式中 HI 为收获指数; GY 为籽粒产量, kg/hm²; BY 为生物产量 (作物地上生物量), kg/hm²。

1.3.2 土壤理化性状

2019 年春季在试验开始前取样测定 0~50 cm 剖面的土壤基本理化性质, 见表 1。2019 年秋季作物收获后在每个试验小区按照 0~15、15~35 cm 分层取样, 每层取土壤样品约 1 kg, 风干, 过筛, 备用。取土样同时用环刀取样测定各土层土壤容重 (Bulk Density, BD)、总孔隙度 (Total Porosity, TP)、田间持水量和饱和含水量, 每个小区测定 3 次重复, 每个处理共 9 个重复。铝盒烘干法测定土壤含水率 (Water Content, WC)。2020 年由于雨水太大, 秋收时无法采集试验土样, 故只测定了玉米穗部性状和产量土壤 TP、三相比等计算如下:

$$TP=(1-BD/2.65) \times 100\% \quad (2)$$

$$Xg:Xy:Xq=(100\%-TP):(WC \cdot BD):[TP-(WC \cdot BD)] \quad (3)$$

STPSD

$$=[(X_g-50)^2+(X_g-50)(X_g-25)+(X_y-25)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$GSSI=[(X_g-25)X_yX_q]^{0.4769} \quad (5)$$

式中 X_g 为固相体积百分比 (>25%), X_y 为液相体积百分比 (>0), X_q 为气相体积百分比 (>0); STPSD (Soil Three-phase Structure Distance) 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; GSSI (Generalized Soil Structure Index) 代表广义土壤结构指数, 土壤结构越接近理想状态, GSSI 越接近 100^[14,16]。

土壤水稳性团聚体分级, 将风干土样利用湿筛法^[17]获得 >2 mm 和 2~0.25 mm 水稳性大团聚体, 计算各粒级团聚体的质量分数。

1.4 数据处理

文中数据采用 SPSS 15.0 和 Origin 18.0 软件进行数据处理和制图, 不同处理以及剖面不同层次之间数据的差异显著性采用 Duncan 法 (新复极差法) 进行比较。

2 结果与分析

2.1 肥沃耕层构建对土壤水分物理性质的影响

2.1.1 土壤容重和总孔隙度

土壤容重能反映土壤紧实度, 是评价土壤质量的主要指标之一。短期不同翻耕和有机物还田在不同程度上降低了暗棕壤土壤容重 (表 3)。与浅翻有机物不还田对

照 (T15) 相比, NT+SM1 和 NT+SM2 处理 0~35 cm 土壤容重未显著变化 ($P>0.05$), T15+S 显著降低了 0~15 cm 耕层土壤容重, 降低了 15.0% ($P<0.05$)。土壤深翻 35 cm 配合有机物还田显著降低了 0~15 cm 耕层和 15~35 cm 亚耕层土壤容重。与 T15 处理相比, T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理在 0~15 cm 耕层土壤容重分别减少了 10.0%、8.7% 和 15.0%, 均与 T15 处理差异显著 ($P<0.05$); 随土层深度增加, 0~35 cm 土层翻耕和有机物还田由于打破了犁底层, 与 T15 处理相比, T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理在 15~35 cm 亚耕层的容重分别减少 9.6%、9.3% 和 15.7%, 且差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 短期翻耕和有机物还田对土壤容重、总孔隙度、饱和含水量和田间持水量的影响

Table 3 Effects of short-term plowing and organic amendments on soil bulk density, total porosity, saturation water capacity and water holding capacity

土层 Soil layer/cm	处理 Treatments	土壤容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	饱和含水量 Saturation water capacity/%	田间持水量 Water holding capacity/%
0~15	T15	1.27±0.03a	42.42±1.39c	41.33±2.24c	31.62±1.95b
	T35	1.23±0.03a	44.24±1.39c	42.16±3.14bc	33.31±1.23b
	T15+S	1.12±0.02bc	49.09±0.91ab	52.62±3.61ab	32.29±1.87b
	T35+S	1.14±0.04b	48.18±1.72b	47.61±2.94bc	33.47±1.72b
	NT+SM1	1.22±0.02a	44.39±0.95c	43.24±3.07bc	32.80±1.82b
	NT+SM2	1.23±0.03a	43.94±1.14c	44.29±3.19bc	33.04±1.91b
	T35+OM	1.16±0.03b	47.42±1.2b	55.49±3.36a	42.51±2.04a
	T35+S+OM	1.08±0.03c	51.06±1.14a	57.15±3.49a	43.78±2.14a
>15~35	T15	1.32±0.04a	40.15±1.6c	34.91±2.94c	25.94±1.92d
	T35	1.27±0.03ab	42.42±1.46bc	35.24±2.67c	27.23±1.39cd
	T15+S	1.27±0.03ab	42.42±1.39bc	39.46±2.81bc	26.99±1.51cd
	T35+S	1.19±0.07bc	45.91±3.19ab	38.79±3.89bc	29.71±1.68bc
	NT+SM1	1.3±0.02a	40.91±0.69c	38.01±3.95bc	29.12±1.73cd
	NT+SM2	1.3±0.01a	40.76±0.45c	39.15±3.27bc	29.99±1.97bc
	T35+OM	1.19±0.04bc	45.76±1.64ab	44.74±2.28b	33.63±1.98ab
	T35+S+OM	1.11±0.04c	49.55±1.64a	50.34±2.69a	35.09±2.06a

注: 不同字母表示同一指标在同一土层不同处理在 0.05 差异显著; 下同。
Note: Different letters indicate significant differences among treatments in the same layer at 0.05 level; Same as below.

2.1.2 土壤总孔隙度

根据土壤容重计算了土壤总孔隙度, 翻耕和有机物还田对土壤总孔隙度的影响如表 3。与土壤容重的变化趋势相反, 翻耕和有机物还田不同程度增加了土壤总孔隙度。与 T15 处理相比, T15+S 显著提高了 0~15 cm 耕层土壤总孔隙度, 提高了 20.3% ($P<0.05$), 但 NT+SM1 和 NT+SM2 处理 0~35 cm 土壤容重均未显著增加 ($P>0.05$); 土壤深翻 35 cm 配合有机物还田显著提高了 0~15 cm 耕层和 15~35 cm 亚耕层土壤总孔隙度。与 T15 处理相比, T15+S、T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理在 0~15 cm 耕层总孔隙度分别增加了 15.7%、13.6%、11.8% 和 20.4% ($P<0.05$); 深翻和有机物还田使 15~35 cm 亚耕层的土壤总孔隙度也增加, T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理土壤总孔隙度分别增加了 14.3%、14.0% 和 23.4% ($P<0.05$)。

2.1.3 土壤饱和含水量和田间持水量

短期翻耕和有机物还田对土壤饱和含水量和田间持

水量的影响趋势和总孔隙度的变化趋势基本一致, 翻耕和有机物还田下土壤饱和含水量和田间持水量不同程度增加(表3)。与T15处理相比, 免耕秸秆覆盖处理对0~35 cm 整个耕层土壤的饱和含水量和田间持水量的影响不显著($P>0.05$), 浅翻秸秆还田(T15+S)仅显著提高了0~15 cm 耕层土壤饱和含水量($P<0.05$)。与T15处理相比, T35处理0~35 cm 土壤饱和含水量和田间持水量增加不显著($P>0.05$)。在0~15 cm 耕层, T35+OM和T35+S+OM处理的饱和含水量显著高于T15和T35处理($P<0.05$), 特别是T35+OM和T35+S+OM增加幅度显著高于T35+S处理; T35+OM和T35+OM+S处理的田间持水量显著高于T15和T35处理($P<0.05$)。在15~35 cm 亚耕层, T35+OM和T35+S+OM处理的饱和含水量显著高于T15和T35处理($P<0.05$), T35+S, T35+OM和T35+S+OM处理的田间持水量显著高于T15处理, 特别是T35+S+OM显著高于T35+S处理($P<0.05$)。

2.1.4 土壤三相比

短期翻耕和有机物还田对暗棕壤三相比影响较大, 大致趋势表现为翻耕和有机物还田使0~15 cm 耕层土壤的固相比比例降低, 液相比比例升高, 气相比比例在翻耕处理增加, 在免耕处理降低; 在15~35 cm 亚耕层, 翻耕和有机物还田使土壤固相和液相比比例在翻耕处理降低, 免耕处理增加, 气相比比例在翻耕处理增加, 在免耕处理降低(表4)。在0~15 cm 耕层, 与T15处理相比, T15+S、T35+S、T35+OM和T35+S+OM的固相比比例显著降低($P<0.05$), 以T35+S+OM处理固相比比例降低幅度最大, 降低了13.0%; 液相比比例在T15+S、NT+SM1、NT+SM2、T35+OM和T35+S+OM处理增加显著($P<0.05$), 具体表现为在NT+SM2、T35+OM和T35+S+OM处理最高, 其次为T15+S和NT+SM1处理, 液相比比例最小的是T15、T35和T35+S处理; 气相除T35和T35+S+OM外, T15与其他5个有机物还田处理均差异显著($P<0.05$), 气相比比例最大的处理为T15+S和T35+S, 其次为T35+S+OM、T15和T35, 在NT+SM1、NT+SM2和T35+OM处理中最小; 与T15处理相比, T15+S、T35+S、T35+OM和T35+S+OM这4个处理的STPSD指标显著降低($P<0.05$), 具体大小顺序为T35+S+OM、T15+S、T35+S、T35+OM; GSSI指标仅在T15+S和T35+S+OM处理中显著增加($P<0.05$)。T15+S处理0~15 cm 耕层秸秆碳的还田量比T35+S和T35+OM处理0~15 cm 耕层碳还田量多, 此时0~15 m 耕层, T15+S和T35+S+OM处理的土壤三相结构最接近理想状态。

在15~35 cm 土壤亚耕层, 与T15相比, T35+S、T35+OM、T35+S+OM固相比比例显著降低($P<0.05$); 液相比比例在NT+SM1和NT+SM2显著增加, 在T35+OM和T35+S+OM显著降低($P<0.05$); 气相比比例在T35+S、T35+OM和T35+S+OM显著增加, 在NT+SM1和NT+SM2显著降低($P<0.05$); STPSD指标在T35+OM和T35+S+OM显著降低, GSSI指标亦在T35+OM和T35+S+OM处理显著增加($P<0.05$), 说明T35+S+OM和T35+OM处理下土壤结构最接近理想状态。

表4 短期翻耕和有机物还田对土壤三相比的影响

Table 4 Effects of short-term plowing and organic amendments on soil three phase ratio

土层 Soil layer/ cm	处理 Treatments	固相 Solid phase /%	液相 Liquid phase /%	气相 Gas phase /%	土壤三相 结构距离 Soil Three-phase Structure Distance (STPSD)	广义土壤 结构指数 Generalized Soil Structure Index (GSSI)
0~15	T15	56.06±0.95a	24.90±1.18c	19.04±0.95b	15.01±1.59a	94.13±0.73b
	T35	54.55±0.91ab	25.73±0.48c	19.72±0.56b	12.46±1.55ab	95.03±0.52ab
	T15+S	51.21±0.52b	28.15±0.79b	20.64±1.16a	4.53±1.38d	98.72±0.64a
	T35+S	51.20±0.95b	26.78±0.91bc	22.02±1.45a	5.88±2.30c	96.37±0.55ab
	NT+SM1	54.53±0.96ab	28.90±1.60ab	16.55±2.21cd	13.07±1.79ab	95.04±2.42ab
	NT+SM2	55.45±1.20ab	30.40±0.72a	14.14±1.89d	14.98±2.11a	91.67±3.28b
	T35+OM	51.82±0.95b	31.10±1.90a	17.08±2.34c	9.45±2.00bc	95.38±2.91ab
	T35+S+OM	48.79±0.52c	30.64±0.75a	20.57±0.53ab	2.27±0.35d	98.04±1.41a
>15 ~35	T15	58.79±0.69a	32.78±0.56b	8.43±0.82c	20.86±0.84bc	78.21±1.41c
	T35	57.12±1.14a	32.53±0.83b	10.35±0.94c	18.34±1.58c	83.81±2.39b
	T15+S	57.58±1.39a	30.67±0.70b	11.75±1.84c	18.33±2.21c	86.97±4.04b
	T35+S	54.09±1.64b	30.47±0.58bc	15.44±1.81b	12.82±2.76d	93.65±2.35a
	NT+SM1	59.09±0.45a	36.65±1.56a	4.26±1.19d	23.02±1.37a	59.36±6.79e
	NT+SM2	59.24±0.69a	34.09±0.57a	6.67±1.26d	22.01±1.21ab	71.43±5.44d
	T35+OM	51.84±0.45c	28.50±0.63c	19.66±0.77a	8.02±0.92e	98.18±0.54a
	T35+S+OM	51.97±0.52c	27.52±1.42c	20.51±0.32a	7.95±1.01e	98.76±0.17a

2.1.5 土壤>0.25 mm 水稳性团聚体含量

土壤中>0.25 mm 水稳性团聚体($WSA_{>0.25}$)含量被认为是评价土壤物理结构的主要指标之一, 其含量越高, 说明土壤结构越稳定, 抗侵蚀和水土流失能力越强^[20]。本研究中, 短期翻耕和有机物还田下土壤 $WSA_{>0.25}$ 含量如图1。

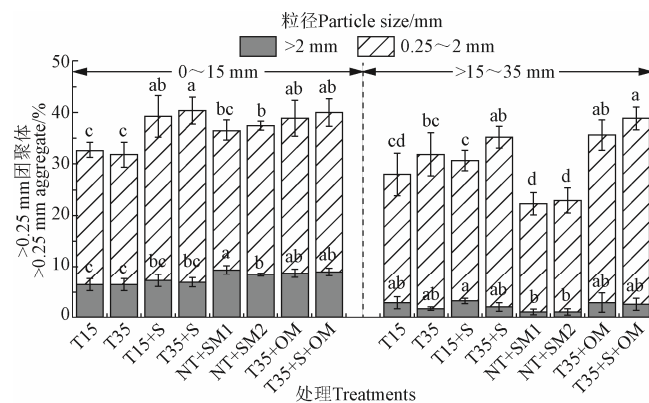


图1 短期翻耕和有机物还田对土壤>0.25 mm 水稳性团聚体含量的影响

Fig.1 Effects of short-term plowing and organic amendments on content of >0.25 mm water-stable aggregate

由图1可知, 在0~15 cm 耕层, 与T15处理相比, >2 mm 团聚体比例在NT+SM1、NT+SM2、T35+OM和T+S+OM处理中增加显著, 2~0.25 mm 团聚体比例在T15+S、T35+S、NT+SM2、T35+OM和T35+S+OM处理中增加显著($P<0.05$), 在其他处理增加不显著; 15~35 cm 亚耕层中 $WSA_{>0.25}$ 含量均低于耕层土壤中的含量, 与T15相比, 所有处理>2 mm 粒径大团聚体均无显著变化, 2~

0.25 mm 团聚体含量仅在 T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理中显著增加 ($P<0.05$)，说明深翻对亚耕层土壤水稳性大团聚体的影响更显著。

2.2 短期翻耕和有机物还田对玉米产量及产量构成的影响

2.2.1 玉米产量、收获指数和产量构成因素

短期翻耕和有机物还田对玉米产量和收获指数的影响见表 5。整体而言，2019 年玉米产量和收获指数均显著大于 2020 年，这说明在不同类型降雨年份下深翻和有机物还田对寒地玉米产量有显著影响。在降水正常年份（2019 年），与 T15 相比，深翻 35 cm 秸秆或有机肥还田短期内玉米产量差异显著 ($P>0.05$)；免耕覆盖处理

NT+SM2 显著降低了玉米产量 ($P<0.05$)；T35+OM 和 T35+S+OM 处理的玉米产量显著高于免耕 NT+SM1 和 NT+SM2 处理 ($P<0.05$)，可能说明在该地区，免耕秸秆覆盖在短期内不能提高玉米产量。与 T15 处理相比，在降水正常年（2019 年），T35+S、T35+OM 与 T35+S+OM 处理玉米产量差异不显著 ($P>0.05$)；在丰水年（2020 年），T15+S 和 T35+S+OM 处理玉米产量和收获指数增加最显著，分别增加了 27.6%~37.0% 和 22.75%~28.57% ($P<0.05$)。所有田间处理的收获指数在 2019 年和 2020 年分别在 0.47~0.54 和 0.35~0.45 之间，2020 年由于降水偏多导致收获指数较降水正常年份偏低 ($P<0.05$)，2019 年处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。

表 5 短期翻耕和有机物还田对玉米产量构成、产量和收获指数的影响

Table 5 Effects of short-term plowing and organic addition on maize yield components, maize yield and harvest index

年份 Year	处理 Treatments	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/cm	秃顶长 Bare top length/cm	穗行数 Kernel-row number per ear	行粒数 Number of kernels per row	百粒质量 100-kernel mass/g	籽粒产量 Seed yield/(kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index
2019	T15	14.6±0.8bc	13.2±1.0a	0.9±0.2b	17±3a	25±4b	24.1±0.7b	7 559.2±351.1ab	0.51±0.06a
	T35	15.4±1.0bc	13.4±0.9a	1.0±0.3ab	17±3a	28±5b	24.9±0.7ab	7 747.6±587.8ab	0.54±0.06a
	T15+S	15.0±0.9bc	13.5±0.8a	0.5±0.2c	16±4a	26±4b	25.6±0.7ab	7 785.5±258.1ab	0.52±0.06a
	T35+S	16.5±0.9b	13.4±0.7a	0.9±0.2b	16±3a	30±5b	25.1±0.9ab	8 198.8±652.0ab	0.52±0.04a
	NT+SM1	14.2±0.8c	13.0±1.0a	1.6±0.3a	15±4a	23±4b	24.2±0.7b	6 629.7±1170.7bc	0.47±0.05a
	NT+SM2	15.0±1.1bc	13.3±0.9a	1.5±0.3a	15±4a	25±4b	24.5±0.8ab	6 628.8±427.8c	0.48±0.05a
	T35+OM	20.1±0.6a	13.1±0.9a	0.4±0.1c	17±2a	41±5a	26.0±0.8a	8 950.6±930.0a	0.53±0.06a
	T35+S+OM	19.7±1.0a	13.5±0.7a	0.6±0.2c	18±3a	43±5a	25.5±1.0ab	8 646.0±525.3a	0.52±0.05a
2020	T15	11.1±1.9ab	12.8±1.2a	0.8±0.2c	16±3a	17±5ab	20.0±0.9ab	3 846.9±277.6cd	0.35±0.03b
	T35	11.2±1.8ab	12.5±1.2a	0.9±0.1c	16±3a	19±5ab	20.9±0.7ab	3 280.6±179.9e	0.37±0.05ab
	T15+S	8.8±1.2b	12.0±0.9a	0.8±0.2c	15±3a	13±4b	19.6±0.6b	5 270.0±203.2a	0.45±0.04a
	T35+S	10.8±1.8ab	12.4±1.0a	0.8±0.4c	16±3a	18±4ab	18.0±1.0b	4 224.4±100.4c	0.38±0.03ab
	NT+SM1	11.5±1.5ab	12.4±1.0a	1.5±0.2b	16±3a	19±5ab	20.3±0.7ab	3 290.7±134.0e	0.37±0.04ab
	NT+SM2	11.5±1.7ab	12.1±0.8a	1.3±0.3b	15±3a	18±5ab	20.3±0.8ab	3 733.7±169.9d	0.36±0.04ab
	T35+OM	12.8±1.6a	12.9±0.7a	1.5±0.3b	18±1a	22±4a	19.7±0.6ab	4 760.7±216.0b	0.38±0.05ab
	T35+S+OM	12.0±1.7a	13.0±0.9a	2.0±0.2a	17±3a	20±4ab	21.3±0.9a	4 909.0±275.0ab	0.43±0.04a
P 值 P-Value									
处理 Treatments (T)		<0.001	0.878	0.031	0.468	<0.001	0.141	<0.001	0.042
年份 Year (Y)		<0.001	0.085	0.004	0.650	<0.001	0.022	<0.001	0.037
处理×年份 (T×Y)		<0.001	0.929	0.018	0.689	0.031	0.069	<0.001	0.039

玉米产量构成因素在不同翻耕和有机物还田处理中存在差异（表 5），其中，所有处理在 2019 正常年和 2020 丰水年玉米的穗粗、穗行数和百粒质量差异不显著 ($P>0.05$)，穗长、秃顶长、行粒数和籽粒产量在田间处理和年份间均存在显著差异 ($P<0.05$)。具体来讲，与 T15 处理相比，只有 T35+OM 和 T35+S+OM 处理的玉米穗长显著增加 ($P<0.05$)；2020 年 T15+S 处理与 T35+OM 和 T35+S+OM 处理的玉米穗长差异显著 ($P<0.05$)，其他处理间差异不显著。玉米秃顶长的变化规律与穗长有所不同。与 T15 处理相比，2019 正常年，2 个免耕处理秃顶长显著增加 ($P<0.05$)，而 T15+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理秃顶长显著减少 ($P<0.05$)；在 2020 丰水年，各处理玉米秃顶长在 T35+S+OM 处理中最大，其次为 T35+OM，NT+SM1 和 NT+SM2，均与 T15 处理差异显著 ($P<0.05$)。玉米行粒数的变化与穗长和秃顶长度存在必然联系，穗越长，秃顶长越短，行粒数就越多。行粒数年际间显著差异 ($P<0.05$)，在 2019 年，T35+OM 和

T35+S+OM 处理的行粒数显著高于其他处理 ($P<0.05$)；在 2020 年，T35+OM 处理行粒数显著高于 T15+S ($P<0.05$)，其他处理间差异均不显著。相关分析表明，玉米产量与行粒数和穗长呈极显著正相关 ($r=0.892^{**}$ 和 0.814^{**})，与秃顶长呈显著负相关 ($r=-0.722^{*}$)。这表明，翻耕和有机物还田提高暗棕壤玉米产量，在产量构成因素方面主要是穗长增加、秃顶长降低和行粒数显著提高。

2.2.2 玉米地上地下生物量分配

进一步分析了玉米收获期地上和地下生物量的分配特征（表 6），发现短期翻耕和有机物还田改变了玉米地上和地下生物量分配格局，各处理之间地上生物量无显著差异，翻耕和有机物还田主要影响了地下根系和籽粒的生物量。深翻 35 cm 和有机物还田促进了玉米主根系的生长，翻耕后地下根系生物量增加，其中 T15+S 和 T35+S 处理根系增加显著高于 T15 处理 ($P<0.05$)，但未显著增加籽粒产量；而深翻 35 cm 和有机物还田提高了籽粒生物量，以 T35+OM 增加最显著 ($P<0.05$)。这

说明, 相比秸秆, 腐熟的牛粪还田短期内可更快速提高作物产量, 是快速提升土壤产能的主要措施。

表 6 短期翻耕和有机物还田对玉米生物量分配的影响
Table 6 Effects of short-term plowing and organic addition on biomass allocation

处理 Treatments	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)		
	籽粒 Maize seed	秸秆 Maize straw	根 Root
T15	148.09±40.87ab	86.78±12.6a	10.9±2.6b
T35	158.36±42.62ab	78.47±11.56a	14.23±4.12ab
T15+S	151.86±42.1ab	77.76±16.77a	19.44±5.69a
T35+S	160.96±24.69ab	82.2±16.23a	17.75±6.68a
NT+SM1	112.85±40.05b	78.63±22.17a	14.06±3.84ab
NT+SM2	154.94±10.4ab	83.96±3.22a	16.53±5.43ab
T35+OM	192.04±40.5a	100.56±16.48a	16.78±3.3ab
T35+S+OM	165.37±31.84ab	90.43±20.39a	16.11±5.38ab

3 讨论

3.1 翻耕耦合有机物还田对土壤物理性质的影响

免耕减少了人类活动对土壤的搅动, 土壤碳损失降低, 是目前公认比较好的保护土壤的农艺措施^[18]。免耕处理由于土壤颗粒的自然沉降, 加上春播和秋收的机械压实, 耕层的土壤容重一般高于翻耕处理, 总孔隙度低于翻耕处理^[18]。本试验结果发现与 T15 常规耕作处理相比, 免耕 1 a 后土壤容重、孔隙度、饱和含水量和田间持水量的变化不显著, 这与前人研究结果不一致, 可能由于试验时间短, 土壤自然沉降和压实还不明显, 同时, 覆盖地表的秸秆也会腐解进入土壤, 抵消土壤颗粒压实对土壤容重和孔隙度的影响(表 3)。免耕秸秆覆盖对土壤物理性质的影响仍需要长时间序列的试验研究来验证。

翻耕和有机物还田可显著影响土壤物理属性, 特别是对于比较黏重的黑土, 影响更明显^[12]。与 15 cm 常规浅耕处理相比, 深翻 35 cm 可有效打破犁底层, 将全耕层土壤混匀, 深翻的同时在全耕层中施入作物秸秆或有机肥, 这些秸秆或有机肥在土壤中扮演“楔子”的角色^[19], 会显著降低了耕层和亚耕层土壤容重, 增加土壤 15~35 cm 总孔隙度(表 3)。这些外源有机物质一般含有较高的纤维素和可利用养分含量, 容重较低^[6], 进入土壤后与土壤混合能有效降低土壤容重; 同时, 秸秆或有机肥的疏松结构会增加土壤通透性, 还具有较大的吸水特性, 进而增强土壤的导水能力和蓄水能力(表 3), 显著改善土壤的固液气三相比(表 4), 对改善暗棕壤土壤物理结构的短期效果很明显。翻耕加有机物还田处理下亚耕层土壤的三相比也更优于常规浅翻有机物不还田处理, 这也说明翻耕同时配施秸秆或有机肥是快速有效改善深层土壤结构的技术措施。韩晓增等^[10]在内蒙古沙性土中添加腐熟的牛粪, 发现添加牛粪可显著减少土壤容重, 增加总孔隙度、田间持水量和饱和持水量, 配肥耕层土壤; 李晓龙等^[16]研究表明, 深翻秸秆还田比常规浅翻具有较大的 GSSI 值和较小的 STPSD 值, 耕层土壤结构更加接近理想状态, 可有效地改善土壤物理结构, 特别是 20~40 cm 土层的 GSSI 和 STPSD 均显著优于对照处理; 白伟

等^[14]在辽西褐土区也发现虚实并存和全虚耕层构造下 20~30 cm 深层土壤的三相比优于上虚下实耕层和全实耕层构造处理。本研究中, 与 T15 处理相比, 翻耕和有机物还田对土壤三相比影响显著 ($P<0.05$), 0~15 cm 耕层土壤的三相比以 T35+S+OM 和 T15+S 为宜, 15~35 cm 土壤的三相比以 T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 优于其他处理。

土壤 $WSA_{>0.25}$ 含量也可反映土壤物理结构^[20]。秸秆和有机肥还田通过向土壤中增加外源有机物输入量, 提高了土壤的微生物活性, 微生物分泌的多糖等胶结物质更有利于大团聚体的形成, 使土壤中 $WSA_{>0.25}$ 含量增加, 土壤结构稳定性更好^[21](图 1)。在本研究中, 与 T15 处理相比, NT+SM1 和 NT+SM1 处理 0~15 cm 耕层的 $WSA_{>0.25}$ 含量增加, 而 15~35 cm 亚耕层的 $WSA_{>0.25}$ 含量降低(图 1), 说明免耕秸秆覆盖降低了对土壤的搅动, 能显著增加表层土壤中 $WSA_{>0.25}$ ^[4,22]。但 15 cm 浅翻或免耕仅能对耕层土壤团聚体水稳性的提升效果较好, 由于未打破犁底层, 根系分泌物和外源有机物很难进入到亚耕层或深层土壤, 无法影响亚耕层或深层土壤 $WSA_{>0.25}$ 团聚结构。深翻 35 cm 有机物不还田处理使深层结构较差的土壤上移, 表层结构较好的土壤下移, 导致耕层 $WSA_{>0.25}$ 降低, 亚耕层 $WSA_{>0.25}$ 升高。且由于深翻打破了犁底层, 促进了作物根系生长, 通过根系沉积碳归还增加了耕层土壤有机质含量, 根系和根系的分泌物也能够促进 $WSA_{>0.25}$ 团聚体的形成^[8,19,23]。在本试验中, 深翻的同时混入秸秆或者牛粪增加了土壤中的有机质含量, 能胶结促进大团聚体的形成, 0~35 cm 整个耕作层的土壤 $WSA_{>0.25}$ 的性质均得到了提升, 同时亚耕层土壤的孔隙增大, 土壤三相结构(STPSD 和 GSSI)显著改善, 土壤 $WSA_{>0.25}$ 含量也显著增加(表 4, 图 1)。有机物在 0~35 cm 土层深混过程中将更多的有机物带入土壤, 促进了微生物生长, 形成土壤有机质在深层土壤中积累稳定^[24]。T35+OM 处理中牛粪深混还田处理比 T35+S 处理中秸秆深混还田处理对耕层和亚耕层土壤 $WSA_{>0.25}$ 增加幅度更高, 主要是因为秸秆还田当年并不能全部腐熟进入土壤, 而腐熟的牛粪中半分解或分解后可利用性的养分更高, 能直接快速被微生物利用并参与土壤的团聚化过程和养分循环过程, 短期内改善土壤物理结构的效果优于秸秆还田。

3.2 翻耕和有机物还田对作物产量的影响

近年来, 关于耕层构建与作物产量、作物收获指数方面的研究更多注重于多元耕作方式上, 特别是在干旱半干旱地区开展不同耕层构建方式对作物产量的影响的研究越来越多^[10,12,14]。本试验在暗棕壤上构建不同的肥沃耕层, 通过连续 2 a 的实测数据, 发现短期翻耕和有机物还田方式对玉米产量及产量构成因素的影响显著 ($P<0.05$), 2020 年深翻 35 cm 配合秸秆或有机肥还田能够不同程度增加玉米产量和作物收获指数, 同时, 玉米产量与行粒数和穗长呈极显著正相关 ($r=0.892^{**}$ 和 0.814^{**}), 与秃顶长呈显著负相关 ($r=-0.722^{*}$)。由此

表明, 翻耕和有机物还田不同程度提高了玉米产量, 特别是深翻 35 cm 牛粪还田和深翻 35 cm 牛粪合秸秆同时还田处理玉米产量增加显著, 在产量构成因素方面主要是穗长增加、秃顶长降低和行粒数显著提高(表 5)。白伟等^[12]在辽西半干旱地区开展的不同耕层构建试验结果也发现虚实并存耕层(深翻秸秆还田)可显著增加玉米百粒质量, 比上虚下实耕层(浅翻秸秆还田)平均增产 16.4%, 并提高收获指数; 冯倩倩等^[25]研究表明, 虚实并存耕层能增加作物有效穗数、穗粒数、千粒质量等产量构成因素, 进而增加籽粒产量; 免耕下的全实耕层显著降低穗粒数和千粒质量, 不利于作物增产。不同的耕作方式也通过影响作物根系在土壤中的生长发育, 间接影响作物产量^[12,26-27]。本研究中, 也发现免耕秸秆覆盖处理下的全实耕层短期内降低了暗棕壤的玉米产量(表 5)。本文中发现深翻同时秸秆和/或有机肥还田可显著增加亚耕层土壤孔隙度, 改善全耕层土壤物理结构性质, 主要原因一是外源有机物还田增加了外源可利用有机物含量, 供作物根系吸收利用的营养物质增加; 二是为作物根系创造了更加适宜生长的土壤结构系统, 促进作物根系的生长, 进而提高作物产量。邹洪涛等^[28]研究表明, 深松与传统浅旋耕相比产量提高 10.5%; 刘武仁等^[11]研究表明, 行间深松分别比旋耕和全方位深松增产 20.1%和 4.1%。

不同耕层构造方式对旱作区玉米籽粒产量的影响与作物生育期降雨的数量与分布息息相关, 在降水不同的年份表现也不同^[12]。由于 2020 年降水量比历史降水量偏高, 2020 年作物产量显著低于 2019 年, 相比浅翻 15 cm 秸秆还田处理, 深翻 35 cm 处理减产, 深翻增加了亚耕层土壤的孔隙度, 作物根系不能扎实生长, 体现了深翻处理对产量影响的后效性, 与白伟等^[12]深翻后全虚耕层在丰水年出现减产的结果相一致, 但与正常年份增产作用明显结果不一致, 这是因为影响作物产量的因素很多, 区域气候条件、积温、土壤类型都可能是导致差别的原因。丰水年份浅翻秸秆还田和深翻配合牛粪还田可提高作物产量。

4 结 论

1) 相比浅翻 15 cm 处理, 深翻 35 cm 可有效打破犁底层, 同时辅以全耕层中施入作物秸秆或有机肥, 可显著降低全耕层土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 优化土壤三相比结构、提高土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量; 在 0~15 cm 耕层, 以 T35+S+OM 和 T15+S 处理效果最佳, 在 $>15\sim35$ cm 亚耕层以 T35+S、T35+OM 和 T35+S+OM 处理效果优于其他处理;

2) 作物产量受短期翻耕和有机物还田影响, 且在降水正常年和丰水年存在差异。与 T15 处理相比, 在降水正常年, 不同的翻耕和有机物还田对作物产量影响不显著, 但在丰水年, T15+S 和 T35+S+OM 处理可显著增加玉米产量和作物收获指数;

3) 与 T15 处理相比, 短期免耕对土壤容重、孔隙度、饱和含水量和田间持水量的影响不显著, 但显著降低了

全耕层土壤的气相比比例, 增加了液相比比例, 亚耕层土壤水稳定团聚体含量降低, 可导致玉米减产;

4) 基于 2 a 的田间试验发现深翻配合秸秆或牛粪还田能显著改善土壤物理结构, 优化土壤三相比, 通过增加玉米的穗长和行粒数、减少秃顶长使丰水年玉米增产和提高收获指数, 可指导中国东北北部暗棕壤地区肥沃耕层构建技术和效果评价。

[参 考 文 献]

- [1] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041.
Han Xiaozeng, Li Na. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041. (in Chinese with English abstract)
- [2] 黑龙江土地管理局. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [3] 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 soil cultivated layer in dry land and technical patterns in cultivated soil fertility[J]. Soil and Crop, 2015, 4(4): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.
- [5] 王艺嘉. 秸秆还田对土壤改良及作物生长影响的研究进展[J]. 农业与技术, 2020, 40(15): 44-45.
Wang Yijia. Research progress on effects of straw returning on soil improvement and crop growth[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(15): 44-45. (in Chinese with English abstract)
- [6] 赵丽丽, 李陆生, 蔡焕杰, 等. 有机物料还田对土壤导热导气性的综合影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(6): 1045-1057.
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)
- [7] 盛明, 龙静泓, 雷琬莹, 等. 秸秆还田对黑土团聚体内有机碳红外光谱特征的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4): 355-366.
Sheng Ming, Long Jinghong, Lei Wanying, et al. Effect of straw returning on the characteristics of Fourier Infrared Spectroscopy of organic carbon within aggregates in a Mollisol[J]. Soils and Crops, 2020, 9(4): 355-366. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
- [9] 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)
- [10] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 构建肥沃耕层对沙性土壤水分物理性质及玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2017, 6(2): 81-88.
Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Lu Xinchun, et al. Effects of constructed fertile layer on sandy soil physical properties and maize yield[J]. Soils and Crops, 2017, 6(2): 81-88. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(5): 1-3.
Liu Wuren, Zheng Jinyu, Luo Yang, et al. Effects of structures of different tillage layer on growth and yield of maize[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2013, 38(5): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- [12] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 81-90.
Bai Wei, Sun Zhanxiang, Zheng Jiaming, et al. Furrow loose and ridge compaction plough layer improve spring maize yield and water use efficiency in dry-land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 81-90. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
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)
- [14] 白伟, 孙占祥, 张立祯, 等. 耕层构造对土壤三相和春玉米根系形态的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(5): 759-771.
Bai Wei, Sun Zhanxiang, Zhang Lizhen, et al. Effects of plough layer construction on soil three phase rate and root morphology of spring maize in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(5): 759-771. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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.
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)
- [16] 李晓龙, 高聚林, 胡树平, 等. 不同深耕方式对土壤三相及玉米根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 1-7.
Li Xiaolong, Gao Julin, Hu Shuping, et al. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize[J]. Agric Res Arid Areas, 2015, 33(4): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [17] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14: 20-23.
- [18] 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)
- [19] 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.
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. (in Chinese with English abstract)
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macro-aggregate turn over and micro-aggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biol Biochem, 2000, 32: 2099-2103.
- [21] Li N, You M Y, Zhang B, et al. Modeling soil aggregation at the early pedogenesis stage from the parent material of a Mollisol under different agricultural practices[J]. Advances in Agronomy, 2017, 142: 181-214.
- [22] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 681-689.
- [23] Li N, Long J H, Han X Z, et al. Molecular characterization of soil organic carbon in water-stable aggregate fractions during the early pedogenesis from parent material of Mollisols[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20: 1869-1880.
- [24] Berhane M, Xu M, Liang Z Y, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2020, 26: 2686-2701.
- [25] 冯倩倩, 韩惠芳, 张亚运, 等. 耕作方式对麦-玉轮作农田固碳、保水性能及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 869-879.
Feng Qianqian, Han Huifang, Zhang Yayun, et al. Effects of tillage methods on soil carbon sequestration and water holding capacity and yield in wheat-maize rotation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(4): 869-879. (in Chinese with English abstract)
- [26] 孙仕军, 闫瀛, 张旭东, 等. 不同耕作深度对玉米田间土壤水分和生长状况的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(4): 458-462.
Sun Shijun, Yan Ying, Zhang Xudong, et al. Effect of plowing depth on soil moisture and plant growth status in maize field[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(4): 458-462. (in Chinese with English abstract)
- [27] 宫亮, 孙文涛, 包红静. 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.
Gong Liang, Sun Wentao, Bao Hongjing. Effects of different tillage managements on soil moisture and growth of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(3): 118-120, 125. (in

Chinese with English abstract)

- [28] 邹洪涛, 张玉龙, 黄毅, 等. 辽西北半干旱区土壤深松对玉米生长发育及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(4): 475-477.

Zou Hongtao, Zhang Yulong, Huang Yi, et al. Effect of deep tillage on maize growth in the semi-arid region of Liaoning northwest area[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(4): 475-477. (in Chinese with English abstract)

Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China

Li Na^{1,2,4}, Long Jinghong^{1,2}, Han Xiaozeng¹, Zhang Fengqin³, Lei Wanying^{1,2}, Sheng Ming¹, Han Zhiyong⁴

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Heihe Aihui Agricultural Technology Extension Center, Heihe 164300, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution, College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Constructing a suitable plough layer is one of the important technical methods to solve the problem of “shallowing, thinning and hardening” of the plough layer in dry farmland, especially for soils with high soil clay content. In this study, a field experiment including different tillage layer construction models was set up in Aihui experiment garden, Heihe. Effects of different soil tillage depth (15 cm and 35 cm) and organic matter (maize straw and cattle manure) amendments on soil physical properties, maize yield and its yield components were investigated. Eight field treatments were established with four replicates and random block design, including shallow tillage (0-15 cm) without or with maize straw return (T15 and T15+S), deep plowing (0-35 cm) without or with straw return (T35 and T35+S), deep plowing (0-35 cm) with cattle manure (T35+OM) and cattle manure plus maize straw (T35+S+OM), no tillage with maize straw mulching (NT+SM1) or ridged-mulching (NT+SM2) on the surface. The returning rate of maize straw and cattle manure were 10 000 kg/hm² and 30 000 kg/hm², respectively. Results obtained from 2019 and 2020 showed that soil physical properties were largely influenced after one-year different soil plowing and organic amendments practices. Compared with T15, T35+S, T35+OM and T35+S+OM significantly decreased soil bulk density, increased total porosity, saturated water capacity, water holding capacity, content of >0.25 mm water-stable aggregates, as well as optimized the soil three phase ratio ($P<0.05$). T15+S obviously improved soil physical properties in 0~15 cm soil layer, while T35+S, T35+OM and T35+S+OM significantly improved soil physical properties in 15-35 cm sublayer. The maize yield, harvest index and yield components were also influenced by soil plowing and organic amendments practices, and seemed to differed with annual precipitation. Compared with T15, in the year of normal precipitation (2019), the maize yield in T35+S, T35+OM and T35+S+OM treatments was not significantly different ($P>0.05$). While in 2020 with surplus precipitation, the maize yield in T15+S and T35+S+OM and significantly increased by 27.6%-37.0%, harvest index increased by 22.75%-28.57% ($P<0.05$). Averaged crop yield in no-tilled soils decreased ($P<0.05$). Soil tillage and organic amendments significantly increased ear length and number of kernels per row, decreased bare top length, consequently caused increases in maize yield. In conclusion, deep plowing plus organic amendment into soil is a feasible agricultural management for improving soil physical properties, optimizing soil three phase ratio, and increasing maize yield. This technique is applicable in the construction of reasonable plough layer of dryland in dark brown soil in northern China.

Keywords: tillage; soils; organic amendments; physical properties; three phase ratio; maize yield; dark brown soil