

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

邹文秀¹, 陆欣春¹, 韩晓增¹, 王凤仙²

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 黑土区农业生态重点实验室, 海伦农田生态系统国家野外观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 黑龙江省林甸县农业技术推广中心, 黑龙江 林甸 166300)

摘要: 黑土是我国重要的农田土壤, 耕作深度和秸秆还田是影响黑土生产力的重要因素。此研究利用一个三年的田间试验, 分析了耕作深度和秸秆还田深度对玉米和大豆产量的影响, 并探讨了其影响机制。试验采用裂区设计, 主处理包括浅耕 0~15 cm (D15), 中浅耕 0~20 cm (D20), 深耕 0~35 cm (D35) 和深耕 0~50 cm (D50), 副处理对照和秸秆还田 (+S)。结果表明增加耕作深度能够增加玉米和大豆的产量, 并在 D35 处理达到了最大值, 分别为 8 999 kg·hm⁻² 和 2 424 kg·hm⁻², 说明耕作深度是影响作物产量的一个重要因子。每个耕作深度又裂区为是否秸秆还田, 即增加了 D15 + S, D20 + S, D35 + S, D50 + S 处理, 与非秸秆还田处理相比, 当秸秆还田深度 ≤ 20 cm 时, 作物产量降低了 10.62% ~ 16.81%, 而当还田深度 ≥ 35 cm 时, 作物产量提高了 2.25% ~ 7.29%, 说明秸秆还田深度是影响秸秆还田效果的重要因素, D35 + S 处理作物的产量达到了最大值。与 D15 + S 相比, D20 + S, D35 + S, D50 + S, 0~15 cm 土层土壤含水量增加了 7.81% ~ 12.63%, 作物的出苗率增加了 11.42% ~ 16.94%, 土壤的供水量增加 6.71% ~ 10.43%, 其中 D35 + S 的效果最佳, 说明上述因素是能够调控秸秆还田效果; 虽然 D50 + S 也能够增加作物产量, 但是增加了作业成本, 同时不利于保水。因此, 在典型黑土区为了提高粮食产量, 提高大气降水的利用效率, 推荐的耕作深度是 0~35 cm 配以全层秸秆深混还田。图 3, 表 3, 参 30。

关键词: 耕作深度; 作物产量; 土壤供水能力; 秸秆深混还田; 农田黑土

中图分类号: S155.2⁺⁷

文献标识码: A

The Impact of Tillage Depth and Straw Incorporation on Crop Yield and Soil Water Supply in Arable Black Soil

ZOU Wenxiu¹, LU Xinchun¹, HAN Xiaozeng¹, WANG Fengxian²

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, National Observation Station of Hailun Agroecology System, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081, China;
2. Lindian center of Agriculture Technology Extension, Lindian 166300, China)

Abstract: Black soil is one of important arable soil in China, tillage depth and straw incorporation both impacted the agricultural production of black soil. The impact of tillage depth and straw incorporation depths on maize and soybean yield were considered based on a three-year field experiment which is a split block design. The main treatments included shallow cultivation within 0~15 cm (D15), medium-shallow cultivation within 0~20 cm (D20), deep cultivation within 0~35 cm (D35) and 0~50 cm (D50), secondary treatments included contrast and straw incorporation (+S). Yields of maize and soybean were increased along with the increase in cultivation depth, and obtained the greatest values of 8 999 kg·hm⁻² and 2 424 kg·hm⁻², respectively, suggesting that the cultivation depth was an important factor impacting crop yield. Straw incorporation within 0~15 cm (D15 + S), 0~20 cm (D20 + S), 0~35 cm (D35 + S), 0~50 cm (D50 + S) were added after each cultivation depth treatment was split. Comparison with corresponding no straw incorporation treatments, maize and soybean yields were decreased when cultivation depth was ≤ 20 cm, but were increased when cultivation depth was ≥ 35 cm, and obtained the greatest yield in D35 + S treatments, which suggested that the depth of straw incorporation was key factor impacting the role of straw incorporation. Comparison with D15 + S, soil water content in 0~15 cm soil layer, crop emergence rate and soil water supply under D20 + S, D35 + S and D50 + S treatments were increased by 7.8% ~

收稿日期: 2016-04-05; 修回日期: 2016-06-06.

基金项目: 国家自然科学基金 (41571219, 41371296, 41301312); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303126, 201303011, 201303030, 201503120) .

第一作者简介: 邹文秀 (1982-), 女, 黑龙江巴彦人, 博士, 副研究员, 主要从事农田生态方面的研究工作.

通讯作者: 韩晓增 (1957-), 男, 辽宁瓦房店人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤生态方面的研究工作.

12.6% , 11.4% ~ 16.9% and 6.7% ~ 10.4% , respectively , suggesting that above factors could regulate the role of straw incorporation. D50 and D50 + S treatments increased maize and soybean yields , but increased also mechanical operation cost and was not in favor of soil water conservation. Therefore , combination of 0 ~ 35 cm cultivation depth and straw incorporation was recommended with the objectives of increasing crop yield and rainfall use efficiency in study site.

Key words: tillage depth; crop yield; soil water supply; straw incorporation; arable black soil

0 前言

土壤是陆地表层能够生长植物的疏松表层^[1] , 其能生长植物的基本条件是具有植物生长需要的养分和供水、气、热交换的物理条件^[2]。在自然土壤中, 通过植物、微生物和动物与土壤的不断的相互作用, 形成了土壤团聚结构, 构成了适合植物生长的大小不等的孔隙, 控制着水、气、热的交换和根系生长^[3]。自然土壤开垦后, 受人类活动尤其是机械的压实, 破坏了土壤团聚结构, 导致土壤孔隙恶化, 限制了土壤中的水、气和热传导^[4]。在粘重土壤条件下, 会出现滞水、厌氧和土壤热量传导不畅而产生的低温冷凉, 减小根系生长空间^[5]。迫使人类不得不采用机械进行疏松耕作, 通过干扰增加土壤孔隙, 调节土壤中的固体、液体和气体的3项比例, 改善耕层土壤的物理、化学和生物学性质, 协调土壤中水、肥、气和热之间的关系, 促进作物的生长, 进而增加土壤生产力^[6]。但是由于缺乏合理的耕作深度、频度和强度等指标, 耕作便导致土壤物理结构进一步破坏, 同时也促使了土壤有机质快速氧化, 土壤肥力下降。在很多的情况下, 农业耕作实践能够导致土壤物理性质的恶化, 改变土壤的水量平衡^[7-8]。以黑土为例, 自然黑土被开垦为农田后由于不合理的耕作导致储水量减少了17.6% ~ 30.8% , 0 ~ 100 cm 土层碳库储量减少了23.71% , 土壤肥力下降^[9]。同时由于小型拖拉机和牛马犁耕作使农田耕作层变浅, 化肥和农药使用量加大, 引起土壤板结、堆密度增大及孔隙度减少等物理性状恶化。与开垦初期相比, 开垦40年的黑土, 土壤堆密度由 $0.79 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.06 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 总孔隙度由69.7%下降到58.9% , 田间持水量由57.7%下降到41.9% , 开垦80年后, 3项指标进一步恶化, 分别是 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 52.5%和26.69% , 土壤质量退化严重^[10]。

关于旱地耕作层深浅对作物产量影响的已有报道^[11-13]。但是在我国东北黑土区系统研究土壤耕作深度和秸秆还田条件下对玉米、大豆产量的影响及其对土壤水分的影响机制未见报道。文章通过3年耕作深度试验和秸秆还田条件下的不同深度试验, 试图筛选出最佳的耕作深度, 旨在为建立合理耕作制提供理论支撑。

1 材料与方方法

1.1 试验概况

试验设置于中国东北黑土区中心地带, 行政隶属于黑龙江省海伦市胜利村。研究属于温带大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 雨热同季, 年均气温 1.5°C , 极端最高气温 37°C , 极端最低气温 -39.5°C , 近50年降水的平均值为550 mm , 主要集中在7月-9月份, 年均有效积温 2450°C , 年均日照时数 $2600 \text{ h} \sim 2800 \text{ h}$, 年无霜期125 d。土壤类型为中厚层黑土, 是在第四纪形成的黄土状母质上发育起来的地带性土壤, 质地以粘土为主, 土壤固相和液相比 $>50\%$, 土壤膨胀性 $>25\%$, 土体结构致密。

1.2 试验设计

试验始于2008年10月份, 试验地全部是玉米茬口, 秋季收获后整地至待播状态。2009年5月开始播种。主区试验设置为不同耕作深度包括免耕(D0)、浅耕15 cm(D15)、中浅耕20 cm(D20)、深耕35 cm(D35)、深耕50 cm(D50)。在每个耕作深度主区试验中设置裂区, 分为秸秆还田与没有秸秆还田, 即浅耕+秸秆(D15+S)、中浅耕+秸秆(D20+S)、深耕+秸秆(D35+S和D50+S), 其中每个处理均种植大豆和玉米, 所以合计18个处理, 每个处理3次重复。大豆和玉米均采用连作的种植模式, 连作周期为3年。每年秋季结合秋整地进行玉米秸秆还田, 按照当地秸秆平均 $10000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的秸秆量还田, 秸秆长度均小于5 cm。在作物生育期内进行3次中耕耕作。

1.3 测定目标及分析方法

土壤含水量的测定: 在2009年、2010年和2011年春季播种前和作物收获后用土钻在每个小区的中央取土, 测定土壤含水量, 取样深度为200 cm, 取样间隔为20 cm。在春季干旱的2009年, 利用烘干法测定土壤0~15 cm土层的土壤。选择2011年6月11日~6月30日时段内0~35 cm土层内土壤含水量的变化分析土壤供水能力。

大豆和玉米产量的测定依据参考文献 [14], 土壤水分利用效率依据参考文献 [15] 中方法进行计算。

1.4 统计分析方法

数据用SPSS13.0进行方差分析, 采用Sigmaplot 10.0进行作图。试验所得数据均为3次重复的平均值, 误差线用标准差表示。所有的差异显著性分析均采用新复极差法(SSR)在 $p < 0.05$ 水平上进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同耕作深度对作物产量的影响

耕作深度具有调节土壤环境和作物生长发育的功能, 通过耕作协调水、肥、气和热, 供给作物生长发育需要^[16]。适宜的耕作深度很重要, 耕作过深容易造成土壤漏水漏肥, 过浅易造成土壤蒸散量加大而导致干旱, 根据土壤剖面特征, 筛选适宜的耕作深度, 是增产的保证。

2.1.1 对玉米产量的影响。玉米产量对土壤不同耕作层深度响应是不同的, 见图1。免耕显著减少了玉米产量($p < 0.05$), 3年平均值为 $5\,943\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与耕作土壤相比减少了23.14%。耕作能够增加玉米的产量, 与免耕(D0)相比, D15, D20, D35和D50玉米产量分别显著增加了12.75%, 36.55%, 51.43%和27.59% ($p < 0.05$)。从图1可以得出玉米产量并没有随着耕作深度的增加而增加, 而是在耕作深度为35 cm时达到了最大值, 说明0~35 cm的耕作层是最有利于玉米生长发育和产量形成的耕层厚度。秸秆还田深度是影响玉米产量的主要因素, 当分别向0~15 cm、0~20 cm、0~35 cm和0~50 cm耕作层中施入相同质量的秸秆后玉米产量又发生了不同的变化, 在D35+S处理中玉米的产量是达到了最大值, 为 $9\,655\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与D15+S, D20+S和D50+S相比, 产量分别增加了71.91%、33.11%和24.53%, 说明相同质量的秸秆施入不同厚度的耕层中, 由于秸秆与土壤的比例不同导致对玉米产量产生了不同的影响, 见图1。当分析同一耕层深度秸秆还田与否对玉米产量的影响时发现, 当秸秆还田深度 $< 20\text{ cm}$ 时, 对玉米产量有负的影响, 即显著降低了玉米产量($p < 0.05$), 与D15和D20处理相比, D15+S和D20+S处理玉米产量分别降低了16.81%和10.62%; 当秸秆还田深度 $> 35\text{ cm}$ 时, 对玉米产量有正的影响, 即显著增加了玉米产量($p < 0.05$), 与D35和D50处理相比, D35+S和D50+S处理玉米产量分别增加了7.29%和2.25%。所以, 在中厚层黑土上, 对于玉米产量来说最佳耕层深度为0~35 cm, 而最佳的秸秆还田深度为0~35 cm和0~50 cm, 但是考虑到机械等方面因素的影响, 秸秆进入0~35 cm耕层厚度是最佳的选择。

2.1.2 对大豆产量的影响。大豆产量对不同耕层深度的响应与玉米一致, 见图2。免耕显著减少了大豆的产量($p < 0.05$), 3年平均值为 $2\,147\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与耕作土壤相比减少了7.29%。耕作能够增加大豆的产量, 与免耕(D0)相比, D15, D20, D35和D50大豆产量分别显著增加了2.76%, 6.98%, 12.88%和8.50% ($p < 0.05$)。从图2可以得出大豆产量并没有随着耕作深度的增加而增加, 而是在耕作深度为35 cm时达到了最大值, 说明0~35 cm的耕作层是最有利于大豆生长发育和产量形成的耕层厚度。秸秆还田深度是影响玉米产量的主要因素, 当分别向0~15 cm、0~20 cm、0~35 cm和0~50 cm耕作层中施入相同质量的秸秆后大豆产量又发生了不同的变化, 在D35+S处理中大豆的产量是达到了最大值, 为 $2\,689\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与D15+S, D20+S和D50+S相比, 产量分别增加了39.89%、26.36%和14.63%, 说明相同质量的秸秆施入不同厚度的耕层中, 由于秸秆与土壤的比例不同导致对大豆产量产生了不同的影响, 见图2。当分析同一耕层深度秸秆还田与否对大豆产量的影响时发现, 当秸秆还田深度 $< 20\text{ cm}$ 时, 对大豆产量有负的影响, 即显著降低了大豆产量($p < 0.05$), 与D15和D20处理相比, D15+S和D20+

S 处理大豆产量分别降低了 12.86% 和 7.33%; 当秸秆还田深度 >35 cm 时, 对大豆产量有正的影响, 即显著增加了大豆产量 ($p < 0.05$), 与 D35 和 D50 处理相比, D35 + S 和 D50 + S 处理玉米产量分别增加了 10.97% 和 0.72%。所以, 在中厚层黑土上, 对于大豆来说最佳耕作深度为 0~35 cm, 而最佳的秸秆还田深度为 0~35 cm 和 0~50 cm, 但是考虑到机械等方面因素的影响, 秸秆进入 0~35 cm 耕层厚度是最佳的选择。

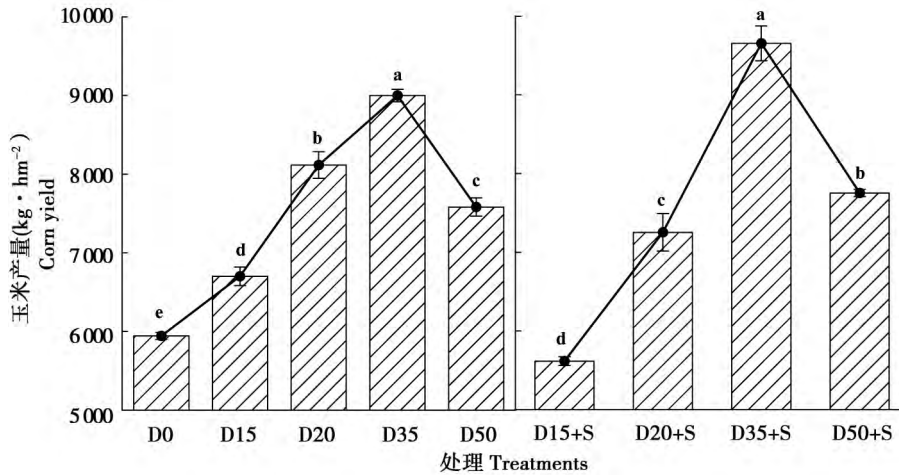


图 1 不同耕作深度和秸秆还田对玉米产量的影响

Fig. 1 The combination of cultivation depth and straw incorporation impacted on maize yield

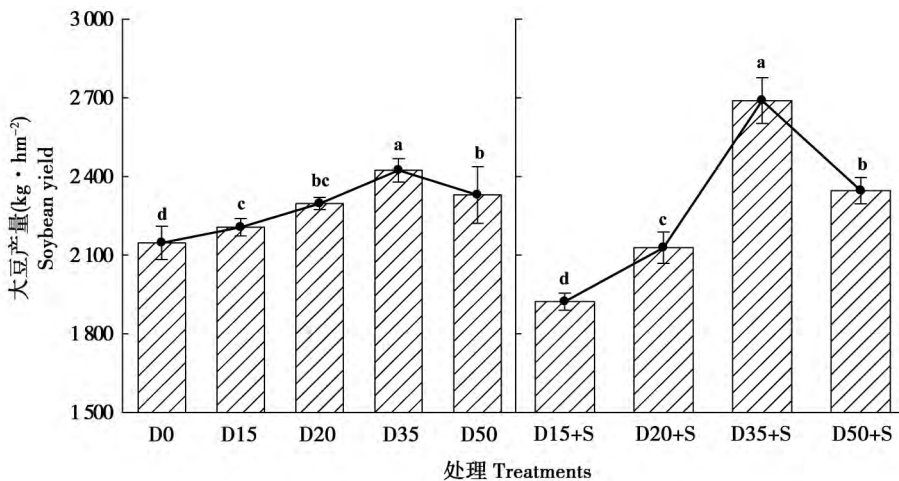


图 2 不同耕作深度和秸秆还田对大豆产量的影响

Fig. 2 The combination of cultivation depth and straw incorporation impacted on soybean yield

2.2 不同耕作深度对土壤蓄水供水能力的影响

2.2.1 春季干旱条件下土壤含水特征及其保苗状况。春季土壤含水量对作物出苗的影响是至关重要的, 尤其是对作物种床 0~15 cm 土层的土壤含水量^[16-17]。不同耕作深度对春季 0~15 cm 土层土壤含水量的影响表现为 D35 > D0 > D50 > D20 > D15, 见表 1。东北地区春季风比较大, 是影响表层土壤含水量的重要因素^[18]。不同的耕作深度导致土壤孔隙度发生变化, 进而在风力和温度的影响下, 对土壤含水量产生一定的影响^[16, 19]。众所周知免耕的土壤未经耕作, 土壤孔隙度小, 土壤水分蒸发慢, 进而表层土壤含水量较高, 而当土壤进行耕作后, 增加了土壤孔隙, 进而增加了土壤蒸发, 降低了表层 (0~15 cm) 土壤含水量, 与 D0 相比, D15 和 D20 处理 0~15 cm 土层土壤储水量分别减少了 6.54% 和 5.75%。但是当耕作深度为 0~35 cm (D35) 和 0~50 cm (D50) 时, 虽然在同一气候条件下, 但是由于打破了犁底层, 同时处理土壤为冻层融化的时期, 0~15 cm 土层能够接收来自 15 cm 以下土层向上传导的水分, 因此土壤含水量显著高于 D15 和 D20, 与 D15 和 D20 处理的平均值相比分别增加了 11.82% 和 5.90%。秸秆还田亦是

影响土壤含水量的重要因素,对于不同的耕作深度,秸秆还田后0~15 cm 土层土壤储水量均表现为减小,成对 T 检验结果显示仅 D15 与 D15 + S, D20 与 D20 + S 处理之间0~15 cm 土层土壤储水量的差异达到了显著水平 ($p < 0.05$),说明虽然耕作深度为0~35 cm 和0~50 cm 的处理在秸秆还田后0~15 cm 土层土壤储水量也减少了,但是不显著。秸秆不同还田深度对0~15 cm 土层土壤储水量的影响表现为 D35 + S 显著高于其他处理 ($p < 0.05$),秸秆还田深度最浅的 D15 + S 处理0~15 cm 土层土壤储水量最小。

不同耕作深度对玉米和大豆出苗率没有显著的影响,但是表现出来一定趋势,即免耕处理大豆和玉米的出苗率均表现为最低,分别为97.44%和95.40%,而耕作深度为0~35 cm 的处理大豆和玉米的出苗率略高于其他的处理,分别为95.94%和97.87%,见表1。不同耕作深度下秸秆还田后大豆和玉米的出苗率均表现为降低,T 检验显示当耕作深度 < 20 cm 时,秸秆还田后大豆和玉米的出苗率显著降低,而当耕作深度 > 35 cm 时,秸秆还田对玉米和大豆出苗率则没有显著的影响(结果未列出)。同样在秸秆还田条件下,秸秆还田深度是影响玉米和大豆出苗率的重要因素。随着秸秆还田深度的增加,玉米和大豆的出苗率表现为增加,与 D15 + S 相比,D20 + S, D35 + S 和 D50 + S 玉米的出苗率分别增加了7.04%、14.54%和13.10%,大豆的出苗率分别增加了6.26%、4.45%和5.26%。

表1 不同耕作深度对出苗时土壤含水量及大豆和玉米出苗率的影响

Tab. 1 The impact of cultivation depth and straw incorporation on soil moisture in 0~15 cm soil layer and emergence rate of maize and soybean

处理 Treatment	0~15 cm 土壤含水量 (mm) Soil moisture	出苗率 (%) Emergence rate		处理 Treatment	0~15 cm 土壤含水量 (mm) Soil moisture	出苗率 (%) Emergence rate	
		大豆 Soybean	玉米 Maize			大豆 Soybean	玉米 Maize
D0	31.54 b	94.77 a	95.40 ab				
D15	29.48 c	95.57 a	97.53 a	D15 + S	27.89 c	82.57 c	85.27 c
D20	29.72 c	95.80 a	97.83 a	D20 + S	28.88 b	87.73 b	91.27 b
D35	33.10 a	95.94 a	97.87 a	D35 + S	32.65 a	94.50 a	97.67 a
D50	31.35 b	94.90 a	96.43 a	D50 + S	29.83 b	95.17 a	96.43 ab

2.2.2 典型降水过程中土壤蓄水供水能力的变化过程。耕作是影响土壤含水量的重要因素^[20]。2011年6月11日前经历累计80.2 mm 降水后不同耕作深度对0~35 cm 土层土壤储水量的影响,见表2。免耕能够增加土壤储水量已经被广泛报道^[21],此研究得出了相似的结果,与D0处理相比,浅耕(D15和D20)处理的0~35 cm 土层土壤储水量在6月11日分别降低了3.43%和1.31%,而深耕与D0相比则增加了0~35 cm 土层的土壤储水量,D35和D50分别增加了5.00%和3.29%,说明增加耕层深度能够增加黑土对大气降水的蓄积能力。与仅耕作土壤相比,在浅耕的情况下,秸秆还田降低了6月11日0~35 cm 土层土壤的储水量,与D15和D20相比,D15 + S和20 + S的土壤储水量分别降低了6.38%和3.35%;而当耕作深度 > 35 cm 后秸秆还田则能够增加土壤储水量,与D35和D50相比,D35 + S和D50 + S土壤储水量分别增加了6.67%和1.27%,说明秸秆还田对土壤储水量的影响取决于秸秆还田深度。经历了29天没有降水的条件下不同耕作深度处理0~35 cm 土层土壤储水量均显著下降,在忽略水分在35 cm 土层界面的上下传导的条件下,定义损失的水分为土壤的供水量,即0~35 cm 土层中供给作物吸收利用的水分总和。从表2分析得出随着耕作深度的增加0~35 cm 土层土壤储水量有增加的趋势在耕作深度为35 cm 时土壤的储水量达到了最大值,与其他处理相比增加了1.65%~8.73%。与耕作处理相比,秸秆还田后0~35 cm 土层土壤供水量增加了0.90%~5.82%,其中秸秆还田深度为35 cm 时土壤的供水量达到最大值。

2.3 大气降水利用效率

本研究将三年大豆和玉米的水分利用效率进行了平均后得到图3。不同耕作深度对玉米的水分利用效率在 $11.78 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ ~ $13.94 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ 之间,大豆的水分利用效率在 $3.49 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$ ~ $5.73 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$,两者不同处理间均表现为D35 > D50 > D20 > D15 > D0,说明耕作深度通过影响产量和土壤供水量进而调控了大豆和玉米的水分利用效率。与仅耕作土壤相比,土壤耕作配合秸秆还田对

大豆和玉米水分利用效率的影响决定于秸秆还田的深度，当秸秆还田深 < 20 cm 时，秸秆还田降低了大豆和玉米的水分利用效率，降低了 2.25% ~ 7.07%；而当秸秆还田深度 > 35 cm 时，秸秆还田则增加了大豆和玉米的水分利用效率，增加了 4.23% ~ 6.05%。大豆和玉米的水分利用效率均表现为随着秸秆还田深度的增加而增加，在 D35 + S 时达到了最大值。

表2 不同耕作深度对 0 ~ 35 cm 土层土壤蓄水和供水能力的影响

Tab. 2 The impact of cultivation depth and straw incorporation on soil water supply in 0 ~ 35 cm soil layer

处理 Treatment	土壤含水量 (mm) Soil moisture		土壤供水量 (mm) Soil water supply	处理 Treatment	土壤含水量 (mm) Soil moisture		土壤供水量 (mm) Soil water supply
	6月11日 Jun 11th	6月30日 Jun 30th			6月11日 Jun 11th	6月30日 Jun 30th	
D0	102.50	83.79	18.71				
D15	98.98	76.81	22.17	D15 + S	92.67	70.11	22.56
D20	101.16	77.89	23.27	D20 + S	97.77	74.29	23.48
D35	107.63	81.70	24.93	D35 + S	114.80	88.43	26.38
D50	105.88	81.94	23.94	D50 + S	107.22	82.45	24.77

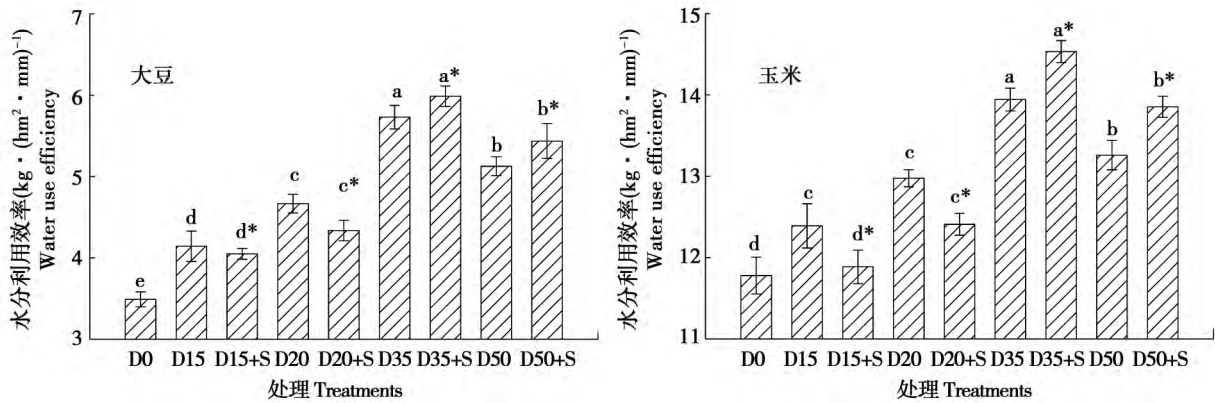


图3 不同耕作深度对大豆和玉米水分利用效率的影响

Fig. 3 The impact of cultivation depth and straw incorporation on water use efficiency of maize and soybean

注：小写字母表示仅耕作深度处理在 $p < 0.05$ 水平上的差异显著性，小写字母* 表示耕作深度 + 秸秆还田处理在 $p < 0.05$ 水平上的差异显著性分析

Note: Low cases indicate that difference significance on $p < 0.05$ level among cultivation depth treatments, Low cases added * indicate difference significance on $p < 0.05$ level among straw incorporation treatments

4 讨论

4.1 大豆和玉米产量的变化

4.1.1 大豆和玉米产量年际间的变化。在同一耕作深度下作物产量年际间的差异主要受气候条件和病虫害草害等的影响^[22-23]。在病虫害得到有效防治的情况下，有效降水量及分布是影响作物产量的重要因素之一^[24]。以往的研究分析全年降雨量与作物产量的关系时，关注的是作物生长年内从1月-12月份的降水量^[25]，但是在研究区域内作物的生长季为5月-9月，作物可以利用的当年的降水来自1月-9月份，10月-12月份的降水则不能被作物利用，而是贮存在土壤中供给下一季作物利用。因此，本研究定义了有效降水量，即为上一季10月-12月份的降水和当季1月-9月份降水的和。在此，我们分析了有效降水量与作物产量的关系，见表3。根据韩晓增和邹文秀等对研究区域内降水分布特征的分析^[26-27]，可以得出2009年和2010年在划分标准上均属于枯水年，而2011年属于平水年。2011年大豆和玉米的各处理平均产量均分别比2009年增加了8.29%和10.33%，比2010年增加了4.85%和11.39%，证明了有效降水总量是影响作物年际间产量差异的重要因素。在降水总量相近的2009年和2010年产量之间的差异是由年内降水量分布与不同耕作深度和秸秆还田导致的。2009年降水的特点是全年降水的61.23%发生在6月

份, 导致在作物需水关键的7月份和8月份降水较少, 虽然2010年降水与2009年相似, 但是2010年降水分布与近50年降水平均值的分布相一致(表未列出)。在耕作深度 <20 cm时, 由于耕层较薄, 导致在2009年内出现降水分布不均时, 对土壤水分的调节能力低, 显著降低了大豆和玉米的产量(表3), 而在降水分布符合作物生长发育需求的2010年大豆和玉米的产量均显著高于2009。而当耕作深度 >35 cm时, 虽然能够增加土壤对水分的调节能力(表2), 但是由于深翻的过程中将20 cm以下的未熟化的土壤混入了0~35 cm或者0~50 cm(D35和D50)耕层导致作物的产量仍然表现为下降的趋势, 随着20 cm以下土壤的逐渐熟化, 作物产量大幅度提高。

表3 不同耕作深度和秸秆还田对2009–2011年大豆和玉米产量的影响 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Tab. 3 The impact of cultivation depth and straw incorporation on maize and soybean yield in 2009–2011

处理 Treatment		2009	2010	2011	处理 Treatment		2009	2010	2011
玉米 Maize	D0	5 655 b	6 062 a	6 112 a					
	D15	6 492 b	6 729 a	6 882 a	D15 + S	5 337 b	5 984 a	5 529 b	
	D20	7 578 c	8 050 b	8 718 a	D20 + S	6 837 b	7 612 a	7 310 ab	
	D35	8 004 c	9 167 b	9 827 a	D35 + S	8 475 b	10 326 a	10 164 a	
	D50	7 110 c	7 619 b	8 018 a	D50 + S	7 082 b	8 103 a	8 075 a	
处理 Treatment		2009	2010	2011	处理 Treatment		2009	2010	2011
大豆 Soybean	D0	1 940 b	2 162 ab	2 338 a					
	D15	2 055 b	2 251 a	2 314 a	D15 + S	1 967 ab	2 025 a	1 776 b	
	D20	2 187 b	2 338 a	2 365 a	D20 + S	2 143 ab	2 299 a	1 943 b	
	D35	2 261 b	2 379 ab	2 631 a	D35 + S	2 389 c	3 054 a	2 625 b	
	D50	2 206 b	2 441 a	2 341 ab	D50 + S	2 186 b	2 510 a	2 343 ab	
有效降水量 (mm) Effective precipitation		465	456	556					

4.1.2 耕作深度效应。耕作层是人类为了栽培作物, 利用工具对土壤进行扰动的深度层。耕作层的结构和厚度决定了作物的生存环境及养分和水分的供给。随着机械的发展, 耕作层的厚度能够从几厘米到数米, 但是适宜的土壤耕层深度, 应根据作物根系生长发育分布空间和土层储水能力以及土壤类型而定^[15]。在典型中厚层粘壤质黑土上, 不同耕作深度对大豆和玉米的产量的影响并没有随着耕作深度的增加而一直增加(图1和图2), 而在两者均在耕作深度为0~35 cm时达到了最大值, 分别为 $2\,424\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\,999\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 当耕作深度达到50 cm时, 虽然与浅耕相比(耕作深度 <20 cm), 也表现为增加, 但是增加幅度减小; 此研究结果与陈恩凤等的研究结果相一致^[11], 其研究表明耕作深度33 cm时小麦的增产效果最显著, 当耕作深度为33 cm~48 cm时仍然表现为增产, 但增产幅度开始降低, 当耕作深度大于48 cm后增产效果逐渐减少了。增加耕作深度即增加耕作层厚度能够打破犁底层, 疏松耕层土壤, 降低土壤的容重, 增加孔隙度, 增加土壤的蓄水、保墒能力, 为作物根系创造疏松深厚的土壤环境^[26], 进而增加了作物的产量。同时增加耕作深度、打破犁底层后, 增强了接纳大气降水的能力, 减少了地表径流的发生, 扩大了土壤水分库容, 进而提高了水分利用效率^[16]。作物通过根系吸收和利用土壤中的水分与养分, 大豆和玉米的根系密集地分布于耕作层, 为作物的生长提供水分和养分^[15]。但是当耕作深度 <20 cm时, 由于犁底层等障碍性层次的存在, 减小了耕作层的深度, 限制了作物根系生长发育的空间^[28], 梁金凤等的研究表明增加耕作深度, 可打破犁底层, 促进了玉米根系向深处生长, 有利于根系吸收水分、养分, 为高产奠定了物质基础; 并随着耕深增加, 玉米根重密度及根长密度越大, 与浅耕相比(耕作深度 <20 cm), 深耕后玉米的根重密度增加了26.4%和40.9%, 促进了作物对水分和养分的吸收, 增加了产量和水分利用效率^[29]。增加土壤耕作深度的同时, 向相应的耕作层中施入一定量的秸秆对玉米和大豆产量的影响取决于秸秆进入土壤的耕作层厚度。当耕作深度 <20 cm, 秸秆还田对产量具有负影响, 与相应的耕作深度秸秆还田处理相比, 降低了作物的产量, 其原因主要在于秸秆浅层还田时, 影响作物的出苗率

和玉米生育期间内土壤中水分与养分的吸收,进而降低了产量。而当耕作深度 > 35 cm 时,降低了秸秆与土壤的比例,增加了作物的出苗率。同时增加耕层的同时施入秸秆有效地改善了土壤结构,有利于土壤中的气体交换,增加了土壤中微生物的活性和多样性,促进了土壤中养分和被施入秸秆的矿化与分解,增加了土壤养分含量,进而增加了作物产量^[16]。

4.2 秸秆还田对土壤水分的影响机制

4.2.1 秸秆还田对春季含水量的影响。秸秆还田对土壤含水量的影响取决于秸秆的还田量、还田深度、还田秸秆的长度等因素^[3]。秸秆还田通过影响土壤孔隙结构与大小分布,调控土-气-植物界面的水分传导,进而影响土壤的含水量^[30]。本研究中将相同数量的秸秆施入不同厚度的耕作层,即在不同厚度的耕作层中土壤与秸秆的比例是不同的,以本研究秸秆还田量 $10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (烘干重) 为例,当秸秆还田深度为 0~15 cm、0~20 cm、0~35 cm 和 0~50 cm 时,土壤(土壤容重参考典型土壤剖面的容重值)与秸秆的质量比分别为 170:1, 220:1、410:1 和 600:1。当秸秆浅层还田(D15+S)和中浅层还田(D20+S)时,土壤与秸秆比例较小,增加了土壤中因秸秆施入而增加的孔隙的比例,即增加土壤的总孔隙度,进而增加了土壤蒸发^[19],降低了土壤含水量。当土壤深耕并进行秸秆还田时(D35+S),与秸秆浅层和中浅层还田相比,将同质量的秸秆施入 0~35 cm 和 0~50 cm 土层,降低了秸秆在土壤中的比例,相应地减小了土壤的大孔隙和无效水分蒸发,有效地地蓄了土壤水分,使更多的土壤水分保存在深层的土层中,同时增加了 0~35 cm 土层内的水分交换,当表层的土壤水分通过蒸腾作用减少时,下层对上层有补给效应,见表 1 和表 2。与 D15+S 和 D20+S 相比, D30+S 处理春季 0~15 cm 土层土壤储水量增加了 17.07% 和 2.4%。虽然 D50+S 处理与 D35+S 处理相似,均是降低了秸秆在土壤中的比例,但是由于耕作深度增加,增加了土壤水渗漏,降低了土壤的保水性,进而导致 0~15 cm 土层土壤储水量较低。

4.2.2 对调控土壤水分的作用。在旱作农田土壤-植物-大气连续体中,以土壤为载体,接纳大气降水,水分进入土壤后,在土壤中形成“地下水库”,供给作物吸收利用。土壤供给水分的能力与土壤的剖面性质、耕层厚度等密切相关^[15]。典型耕作中厚层黑土在约 20 cm 存在犁底层,犁底层容重 $> 1.23\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,总孔隙度 $< 50\%$,限制了水分的入渗和根系生长。当耕作深度 $< 20\ \text{cm}$,有效调控接纳大气降水的土层厚度最大为 20 cm,0~20 cm 土层的饱和持水量为 101 mm^[15],研究区域内 10 年平均土壤含水量为 42 mm^[30],计算可以得出 0~20 cm 土层最多可以接纳单次降水量为 59 mm 的降水,即当单次降雨量或者短期内累计降雨量 $> 59\ \text{mm}$ 时可能会出现地表径流,引起水土流失。而当通过深耕打破犁底层,增加耕层厚度为 35 cm 时,0~35 cm 土层土壤的饱和持水量为 227.5 mm,该层 10 年平均土壤含水量为 84 mm,因此,0~35 cm 土层可接纳最大单次降雨量或者短期内累计降雨为 143.5 mm。通过对研究区域内近 50 年大气降水进行统计发现,研究区域内最大的单次降水量为 81 mm,所以当耕作深度为 35 cm 时,能够有效地蓄积大气降水。同时该层土壤有效水分(田间持水量-凋萎含水量)为 115.5 mm,说明吸收的降水能够完全转换为有效水分供作物利用。耕作深度越深,调蓄大气降水的耕层越厚,能够调蓄的大气降水就越多,0~50 cm 土层能够调蓄的降水为 156 mm,但是当耕作深度为 50 cm 时增加了土壤水分的入渗,不利于表层土壤水分的保持(表 1 和表 2)。秸秆还田能够增加土壤的总孔隙度,进而增加饱和持水量,相应地能够增加土壤调蓄大气降水的能力。因此,当耕作深度为 35 cm 并配合全层秸秆还田时,能够最有效地蓄积大气降水和保持土壤水分。

5 结 论

(1) 耕作和秸秆还田深度对干旱条件下土壤含水量和作物出苗率具有显著的影响。与其他处理相比,35 cm 耕作深度配合全层秸秆混施(D35+S)能够显著增加出苗时的土壤含水量,进而保障出苗率。同时 D35+S 处理在土壤处理在降水不足时,能够增加土壤的供水量,保障作物生育期间对水分的需求。

(2) 不同耕作深度对玉米和大豆产量的影响表现为 $D35 > D50 > D20 > D15 > D0$,表明耕作能够增加黑土区大豆和玉米的产量,但是其产量并没有随着耕作深度的增加而呈线性增加。与非秸秆还田的处理相比,当耕作深度 $< 20\ \text{cm}$,秸秆还田量为 $10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,降低了大豆和玉米的产量;而当耕作深度 $> 35\ \text{cm}$ 时,同质量的秸秆进行全层混施后显著增加了大豆和玉米的产量,说明耕作和秸秆还田深度是影响

作物产量的重要因素。当耕作深度为 35 cm 配以全层秸秆深混还田时作物的产量和水分利用效率达到了最大值, 因此, 在典型中厚层黑土区建议的合理耕作深度和秸秆还田深度为 35 cm。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [2] 孙波, 解宪丽. 全球变化下土壤功能演变的响应与反馈 [J]. 地球科学进展, 2005, 20 (8): 903-909.
- [3] Lipiec J, Turski M, Hajnos M, et al. Pore structure, stability and water repellency of earthworm casts and natural aggregates in loess soil [J]. *Geoderma*, 2015, 243-244: 124-129.
- [4] 王风, 韩晓增, 李海波, 等. 不同黑土生态系统的土壤水分物理性质研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 67-70.
- [5] 詹其厚, 陈杰, 周峰, 等. 淮北变性土性状特点对其生产性能的影响及农业利用对策 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (6): 1041-1047.
- [6] 孙利军, 张仁陟, 黄高宝. 保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化性状的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25 (6): 207-211.
- [7] Lipiec J, Arvidsson J, Murer E. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction [J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 73 (1-2): 15-29.
- [8] Blanco-Canqui H, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Tillage and crop influences on physical properties for an Epiaqualf [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (2): 567-576.
- [9] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 土地利用/覆盖变化对黑土生态环境的影响 [J]. 地理科学, 2005, 25 (2): 203-208.
- [10] 于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策 [J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18 (1): 99-103.
- [11] 陈恩凤. 耕翻深度与耕层的层次发育 [J]. 中国农业科学, 1961, 2 (12): 1-6.
- [12] Abu-Hamdeh N H. Compaction and sub-soiling effects on corn growth and soil bulk density [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (4): 1213-1219.
- [13] Blevins R L, Thomas G W, Smith M S, et al. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn [J]. *Soil and Tillage Research*, 1983, 3 (2): 135-146.
- [14] Zou W X, Yang C B, Heng J. The effect of long-term fertilization on soil water dynamics and water use efficiency in a field experiment of black soil region in northeast china [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, 23: 840-850.
- [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.
- [16] 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.
- [17] 侯玉虹, 尹光华, 刘作新, 等. 土壤含水量对玉米出苗率及苗期生长的影响 [J]. 安徽农学通报, 2007, 13 (1): 70-73.
- [18] 马建勇, 许吟隆, 潘婕. 东北地区农业气象灾害的趋势变化及其对粮食产量的影响 [J]. 中国农业气象, 2012, 33 (2): 283-288.
- [19] 邹文秀, 韩晓增, 王守宇, 等. 长期施肥对大豆地土壤蒸发和水分利用效率的影响 [J]. 大豆科学, 2009, 28 (3): 487-494.
- [20] 江恒, 韩晓增, 邹文秀, 等. 黑土区短期免耕对大豆田土壤水分物理性质的影响 [J]. 大豆科学, 2012, 31 (3): 374-380.
- [21] Moreno F, Pelegrin F, Fernández J E, et al. Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in southern Spain [J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 41 (1-2): 25-42.
- [22] Zou W X, Si B C, Han X Z, et al. The effect of long term fertilization on soil water storage and water deficit in the black soil zone in Northeast China [J]. *Canadian Journal of Soil Sciences*, 2012, 92 (3): 439-448.
- [23] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (1): 66-71.
- [24] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施肥管理对农田黑土土壤水分盈亏的影响 [J]. 土壤与作物, 2014, 3 (4): 132-139.
- [25] 周怀平, 杨治平, 李红梅, 等. 施肥和降水年型对旱地玉米产量和水分利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22 (3): 27-31.
- [26] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 海伦地区黑土农田土壤水分动态平衡特征研究 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19 (4): 252-255.
- [27] 邹文秀, 韩晓增, 江恒, 等. 东北黑土区大气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.
- [28] 赵兰坡, 王鸿斌, 刘会青, 等. 松辽平原玉米带黑土肥力退化机理研究 [J]. 土壤学报, 2006, 43 (1): 79-84.
- [29] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19 (4): 945-950.
- [30] Yao S H, Teng X L, Zhang B. Effects of rice straw incorporation and tillage depth on soil puddlability and mechanical properties during rice growth period [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 125-132.