

冷凉区黑土有机质和玉米产量双提升 技术探索及经济效益分析

徐超¹, 侯瑞星², 杨克军^{1,3}, 付健^{1,3},
王宇先⁴, 孙淑楠¹, 苗宇¹, 齐翔琨¹

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319; 4. 黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:为明确有机肥还田+保护性耕作措施下黑龙江省西部土壤有机质和作物产量的双提升技术效果, 2021年10月, 在黑龙江省西部齐齐哈尔市梅里斯区开展试验, 以玉米为供试作物, 设置5个处理: 有机肥+深松40 cm (YS40)、秸秆留茬+深松40 cm (WS40)、有机肥+旋耕20 cm (YS20)、秸秆留茬+旋耕20 cm (WS20)、有机肥表施+免耕(YB); 一个对照: 秸秆留茬+免耕(CK)。结果表明: 施入有机肥的处理能够提升深土层土壤肥力, 在20~40 cm土层中YS20处理与CK处理相比有机质和全氮依次提升11.56 g·kg⁻¹和0.57 g·kg⁻¹; 40~60 cm土层中YS40处理与CK处理相比有机质和全氮依次提升2.83 g·kg⁻¹和0.28 g·kg⁻¹。土壤结构方面, 在0~20 cm土层中YB处理的容重较CK降低17.5%、含水量提升35.5%, 40~60 cm土层中YS40处理的容重较CK处理降低5.3%、含水量提升38.4%。有机肥与保护性耕作处理提高了玉米不同生育时期叶面积指数、叶绿素含量和干物质积累量, 进而提高了玉米产量, 第二年的YS40、YS20、YB处理较CK处理分别增产14.5%、18.5%、11.4%。收益分析表明, 与CK处理相比, 2021年YB处理和2022年YS20处理收益增加最多, 分别增加5770元·hm⁻²和5223元·hm⁻²。综上所述, 黑龙江省西部薄层黑土实施有机肥还田+保护性耕作是提升土壤有机质、有机碳储量、全氮、全氮储量、玉米产量和经济效益的有效措施。

关键词:冷凉区黑土; 有机肥深施深松; 玉米产量; 经济效益; 土壤培肥

中图分类号:S513;S365 **文献标志码:**A

Exploration of technology and economic benefit analysis for double improvement of soil organic matter and maize yield in cold area black soil

XU Chao¹, HOU Ruixing², YANG Kejun^{1,3}, FU Jian^{1,3},
Wang Yuxian⁴, SUN Shunan¹, MIAO Yu¹, Qi Xiangkun¹

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang, 163319, China;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Modern Agricultural

Cultivation Technology and Crop Germplasm Improvement of Heilongjiang Province, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

4. Qiqihar Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

Abstract: To examine dual improvement effects of organic fertilizer' return and conservation tillage measures on soil organic matter and crop yield in western Heilongjiang Province, in 2021, the experiment was carried out in Meilisi District, Qiqihar City, western Heilongjiang Province. Maize was used as the test crop, and five treatments

收稿日期:2023-07-22

修回日期:2023-11-20

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项 A 类"黑土地保护与利用科技创新工程专项"资助(XDA28130301, XDA28130103); 国家自然科学基金面上项目(32071607)

作者简介:徐超(1997-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向为黑土保护与地力提升。E-mail:2837734169@qq.com

通信作者:杨克军(1968-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 教授, 主要从事玉米高产理论与技术研究。E-mail:byndykj@163.com

were set up: organic fertilizer deep loosening 40 cm (YS40), straw stubble + deep loosening 40 cm (WS40), organic fertilizer + rotary tillage 20 cm (YS20), straw stubble + rotary tillage 20 cm (WS20), organic fertilizer surface application + no tillage (YB); straw stubble + no-tillage (CK). The results showed that the treatment of applying organic fertilizer after two consecutive growing seasons improved the soil fertility of the deep soil layer. In the 20~40 cm soil layer, the organic matter and total nitrogen of the YS20 treatment increased by $11.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.57\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively compared with the CK treatment. Compared with CK treatment, the organic matter and total nitrogen of YS40 treatment in the 40~60 cm soil layer increased by $2.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.28\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. In terms of soil structure, the bulk density of YB treatment in the 0~20 cm soil layer was 17.5% lower than that of CK, and the water content was increased by 35.5%. The bulk density of YS40 treatment in the 40~60 cm soil layer was 5.3% lower than that of CK, and the water content was increased by 38.4%. Organic fertilizer and conservation tillage treatments increased leaf area index, chlorophyll content, and dry matter accumulation at different growth stages of maize, thus significantly increasing maize yield. In the second year, YS40, YS20, and YB treatments increased yield by 14.5%, 18.5%, and 11.4% respectively compared with CK treatment. Compared with CK treatment, the income difference in YB treatment in 2021 and YS20 treatment in 2022 increased the most, with an increase of $5\,770\text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $5\,223\text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. In summary, the implementation of organic fertilizer returning + conservation tillage in thin black soil in western Heilongjiang Province was an effective measure to improve soil organic matter, organic carbon storage, total nitrogen, total nitrogen storage, maize yield and economic benefits.

Keyword: cool area black soil; organic fertilizer deep application and loosening; corn yield; economic benefits; soil fertilization

嫩江平原是黑龙江省重要的粮食主产区、商品粮基地,主要分布在黑龙江省西部。由于近年过度开垦以及翻种等人为活动,导致黑土的土壤肥力、结构、持水能力逐渐下降,造成土壤变薄、硬化^[1];同时由于不合理施用化肥,使黑土中的微量元素不平衡,破坏土壤生物结构^[2];加之风沙等不确定气候环境因素,如果不及时改善西部黑土区薄层黑土的现状,可能会对中厚层黑土理化性质和作物产量造成进一步影响。

当地主要通过秸秆覆盖、秸秆深翻和秸秆留茬的耕作方式来增加土壤中的有机质含量、改善土壤物理结构和植株农艺性状,以实现玉米增产的目的。前人研究表明,在冷凉地区秸秆覆盖,会使土壤地温变低,不仅会影响出苗率,而且阻碍植株生长,从而影响粮食产量,发生减产现象^[3];马忠明等^[4]研究表明,早期秸秆覆盖影响地温回升,雨水入渗困难,进而造成种子萌发晚,影响后期根系的吸收,导致玉米减产和水分利用率降低。另一方面,由于当地黑土层深度在 10~30 cm 左右,所以秸秆深翻还田会导致“破皮黄”,对土壤结构造成严重破坏,土壤扰动大,不利于保水保墒,最后影响作物产量。然而,研究表明秸秆留茬较秸秆覆盖的全氮和土壤水分提升 4% 以上,容重降低 5.38%~6.77%^[5]。因此,亟须一种适合当地的保护性耕作模式来提高产

能。还有研究表明,长期施用有机改良剂(来源于动物的原料或堆肥材料(例如,粪肥)后土壤碳含量从 23% 增加到 49%^[6-7]。有机肥和秸秆留茬还田可以提升土壤养分,增加耕层厚度,使有机质降低的区域能够快速培肥,同时向土壤中投入更多碳源。

还有研究表明,旋耕措施下碎土、松土及将秸秆混入土壤能显著减少残茬覆盖量^[8]。深松耕作不翻转土层,对土壤扰动小,既有利于保墒,又减少风蚀。免耕措施下土壤容重较传统翻耕有所减小。上述 3 种耕作措施与秸秆留茬和有机肥结合,哪一种耕作模式对有机质和玉米产量提升效果更好尚不明确,这是本研究的出发点。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4 月在黑龙江省齐齐哈尔市梅里斯区进行,地处松嫩平原西部($123^{\circ}75'E, 47^{\circ}30'N$)梅里斯达斡尔族区,属中温带大陆性季风气候,年平均气温 $3.2^{\circ}C$;降水集中,年降雨量 415 mm;日照时数为 2 861.9 h;无霜期为 136 d。作物一年一季种植,该区土壤为黑钙土型砂土。

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理,分别为:(1)有机肥深施深松 40 cm (YS40);(2)秸秆留茬+深松 40 cm

(WS40);(3)有机肥+旋耕 20 cm(YS20);(4)秸秆留茬+旋耕 20 cm(WS20);(5)有机肥表施+免耕(YB);(6)秸秆留茬+免耕(CK)。小区之间间隔 2 m,小区面积为 5 m×10 m,采用有机肥深施深松还田一体机进行有机肥深施,深度在 40~60 cm,旋耕深度在 20~25 cm 左右。秸秆留茬部分用于机械粉碎后还于土壤中,一般留茬高度 8~10 cm,生育期机械喷灌 35 mm 水量,生育期内不扰动土壤。

试验种植作物选用玉米‘嫩单 19’,2021 年 5 月 4 日进行播种,种植密度 6.75 万株·hm⁻²,收获日期为 10 月 8 日。有机肥同年春整地(4 月)时施入,每 3 年施入一次,所用有机肥为牛沤肥,施入量为 6 750 kg·hm⁻²,牛沤肥养分含量:有机质 14.5%、氮 0.8%、磷 0.6%、钾 0.5%。所用化肥为缓释肥,施用方式为底肥一次性施入,施肥量为 750 kg·hm⁻²,其养分含量为:N:P₂O₅:K₂O=(26:10:12),总养分≥48%。各处理具体情况见表 1。

表 1 不同处理肥料和秸秆施用情况

Table 1 Application of fertilizer and straw in different treatments

处理 Treatment	有机肥施用量 Organic manure application amount /(kg·hm ⁻²)	化肥施用量 Fertilizer application rate /(kg·hm ⁻²)	秸秆还田量 Straw returning amount /(kg·hm ⁻²)
YS40	6750	750	3000
WS40	0	750	3000
YS20	6750	750	3000
WS20	0	750	3000
YB	6750	750	3000
CK	0	750	3000

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤与植株取样时期及试验方法 于 2021 年 10 月 1 日采集土壤样品,按照 0~20、20~40、40~60 cm 土层深度进行取样,每个小区随机选取 3 个点,取回后将土壤中的植株残体和石块等去除,所有土壤样品均过 2 mm 的筛网,置于阴凉干燥处自然晾干用于土壤养分的测定。

土壤容重和含水量通过环刀法测定^[9],将 100 cm³环刀垂直插入土壤中,分别采集 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤样品,每一土层 3 次重复,取回土样后在 80℃ 的烘箱中烘 12 h,烘干后称重计算含水量和容重。

土壤有机碳和全氮浓度采用碳氮分析仪测定。土壤有机碳、全氮储量采用以下公式计算^[10]:

$$SOCFD = \sum_1^n (\rho b \times C_{soc} \times d) \times 0.1$$
$$TNFD = \sum_1^n (\rho b \times C_{tn} \times d) \times 0.1$$

式中,SOCFD 和 TNFD 分别为土壤有机碳(SOC)和

全氮(TN)的固定深度储量(Mg·hm⁻²),C_{soc}和 C_{TN}分别为 SOC 和 TN 浓度(g·kg⁻²),0.1 为转换系数,ρb 为土壤容重(g·cm⁻³),d 为土层厚度(cm),n 为特定深度土层中划分的层数(0~20、20~40 cm 和 40~60 cm)。

分别于拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期进行田间取样,将处理好的地上部植株装入牛皮纸袋,置于烘箱中,105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干至恒重,最后称量干物质量。

叶绿素含量:使用手持式叶绿素仪(SPAD-502,青岛聚创嘉恒分析仪器有限公司)测定玉米叶片叶绿素含量,分别在玉米拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期进行,选择晴朗无云天气,在 10:00—16:00 之间进行测量,在每片叶的中间位置避开叶脉,选取同一叶片上分散的 3 个点进行测量后取平均值^[11]。

叶面积指数(LAI):分别于拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期测量叶面积,在田间每个小区选取 3 株进行 LAI 测量,叶面积测量方法采用长宽系数法进行^[12]:

$$S = \sum_{i=1}^n L \times D \times K$$

式中,S 为单株叶面积(cm²);L 为叶长(cm),D 为

叶宽(cm)。K 为叶面积校正系数,取 0.7。

1.3.2 产量计算方法 产量测定:成熟期每个处理的试验田内随机取 3 个取样点,面积 3.3 m²,每个样点取 20 穗,称重、脱粒并称籽粒重量以及测定含水量(使用谷物水分仪测定)。最后折算成 14.0%标准含水量的玉米产量。

1.4 经济效益计算

纯收益(Net income)=玉米当季产值-玉米当季总投入

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2022 对试验数据进行整理和绘图。运用 SPSS 22.0 单因素方差分析(One way-ANOVA)对同一土层不同处理之间的显著性进行检验,采用 Duncan 多重比较分析不同处理间在 P<0.05 水平上的差异。

2 结果与分析

2.1 有机肥深施深松对土壤有机质的影响

图 1 结果表明,在 0~20 cm 土壤中以 YB 处理有机质含量最高,与 CK 处理相比增加 15%;20~40 cm 土层中有机肥的施入主要对 YS20 处理的有机质含量提升效果最显著,与 CK 处理相比增加了 91.6%(图 1B);在 40~60 cm 土层中以 YS40 处理有

机质含量最高,为 $5.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与 CK 处理相比增加了 89.55%(图 1C),有机肥+保护性耕作措施随着土层深度的变化响应效果不同。不同处理的土壤碳储量之间存在较大差异。从有机碳储量(图 1D)可知,YS40、YS20 处理有机碳储量较 WS40、WS20、CK 处理和 YB 处理差异显著,分别增加 20.5%、23.7%、21.2%、14.8%和 23.4%、26.7%、24.2%、17.7%。与 CK 处理相比,YS40、YS20 处理能够更好地提升有机碳储量。

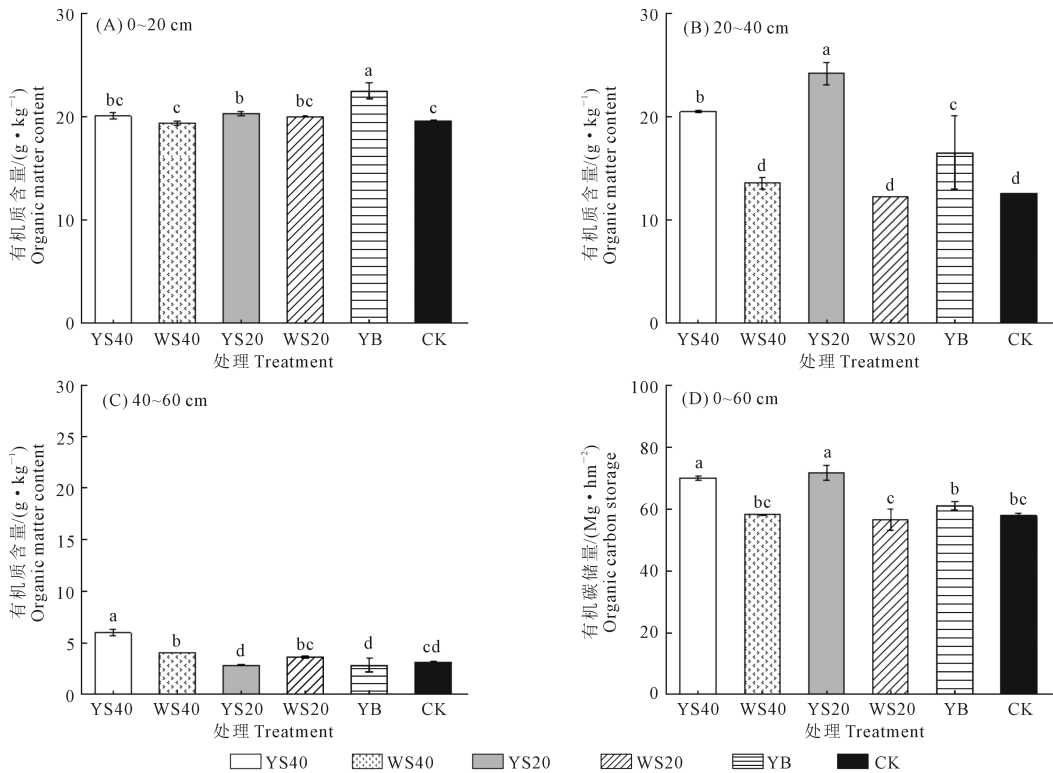
2.2 有机肥深施深松对土壤全氮的影响

由图 2 可知,在不同耕作措施下,有机肥施入到不同土层中对全氮含量均有一定影响。0~20 cm 土层中 YB 处理含氮量最高,为 $1.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 处理增加了 8.5%(图 2A);在 20~40 cm 土层中 YS20 处理提升最为显著,与 CK 处理相比提升 61.5%(图 2B);40~60 cm 土层下 YS40 处理全氮含量显著高于其他处理,其中与 CK 处理之间差异最大,增幅达 97.2%,说明有机肥深施深松可以显著提高深土层中的全氮含量(图 2C)。土壤氮储量测定发现,YS20 处理下氮储量值最高,且显著高于其他处理,其中与 CK 处理相比增幅最大,达 18.5%(图 2D),其他处理之间差异不显著。总体来看,随着土层加深,各处理全氮含量呈现下降趋势,且变化趋势与有机质一致。

2.3 有机肥深施深松对土壤物理性质的影响

从图 3 可知,土壤容重值随着土层深度的加深而增大。在 0~20 cm 土层中与 CK 处理相比,YB 处理容重下降幅度最显著,为 17.5%,其次是 YS40、YS20、WS40 处理,分别降低 15.4%、11.9%、9.1%;20~40 cm 土层与 WS40 相比,CK 处理容重下降幅度最显著,达 7.9%,其他各处理值介于二者之间,差异不显著;而 40~60 cm 土层中各处理间无显著性差异,但 CK 处理容重值较高,整体来看,容重的变化并不明显,这可能与有机肥施入的时间或耕作措施导致的结果有关。

同一土层不同处理之间可以看出,含水量随着土层深度的增加呈降低趋势(图 4)。在 0~20 cm 土层中 YB 处理与 CK 处理相比含水量提升 26.5%,YS40 处理次之,其余处理之间差异不显著;20~40 cm 土层 YB 含水量最小,以 YS40、YS20 处理较 YB 处理增幅最高,含水量分别提升 50.48%和 51.05%;40~60 cm 土层中 YS40 处理含水量值均显著高于其他处理,YB 处理含水量最低,40~60 cm 这一土层中未施有机肥的处理(WS40、WS20、CK)分别较 YS40 处理有一定程度的下降,降幅为 29.29%~54.88%。说明有机肥深施深松可以显著增加深土层土壤中的含水量。



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同处理对各土层土壤有机质含量及有机碳储量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on organic matter content and carbon storage in different soil layers

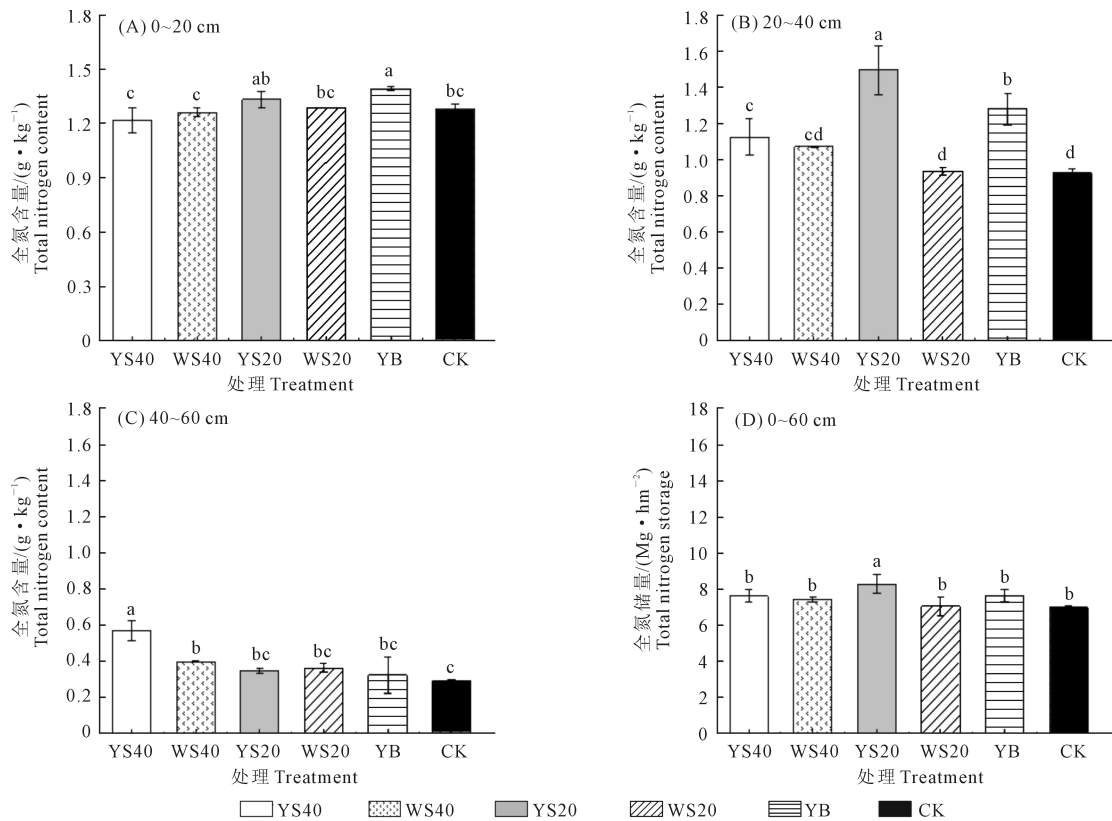


图 2 不同处理对各土层土壤全氮含量及储量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on total nitrogen content and nitrogen storage in different soil layers

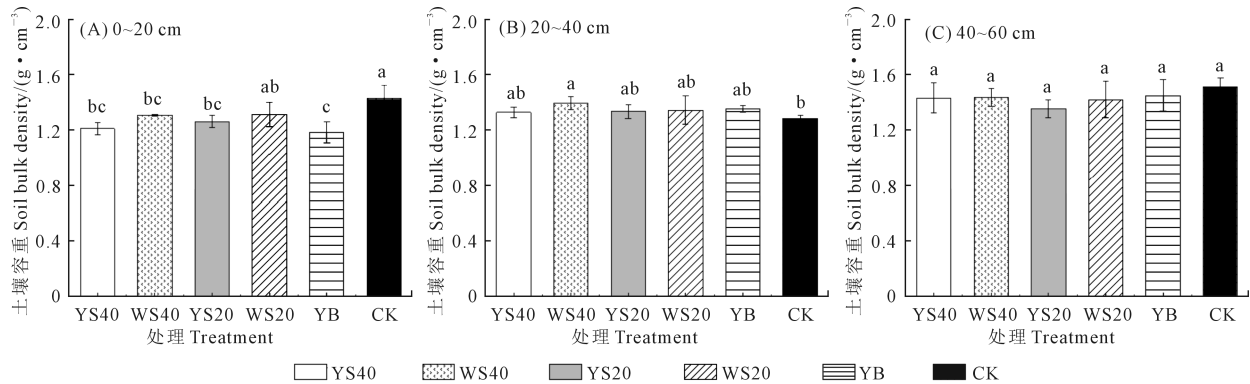


图 3 不同处理对土壤容重的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil bulk density

2.4 有机肥深施深松对玉米植株叶面积、SPAD 值和地上部干物质积累的影响

从图 5 可知,4 个时期玉米 LAI 以有机肥+保护性耕作处理的值最大。抽雄期 YS20 处理显著高于其他处理,与 CK 处理相比增加 34.5%,灌浆期和成熟期均是 YS40 处理值最高。SPAD 值随着生育时期的推进,抽雄期和灌浆期中分别是 YS40、YB 处理值最大,与 CK 处理相比分别增加 24.22%和 32.4%。

不同处理对植株地上部分干物质积累的影响存在差异,灌浆期和成熟期分别以 YS40、YB 处理值最高,为 $308 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $341 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,与 CK 处理相比分别增加 54.3%和 53.2%,不施有机肥的处理 (WS40、WS20、CK) 之间无显著差异。以上结果表明, LAI 和 SPAD 值保持较高,植株吸收和传递光能的能力较强,有利于干物质的生产和积累。

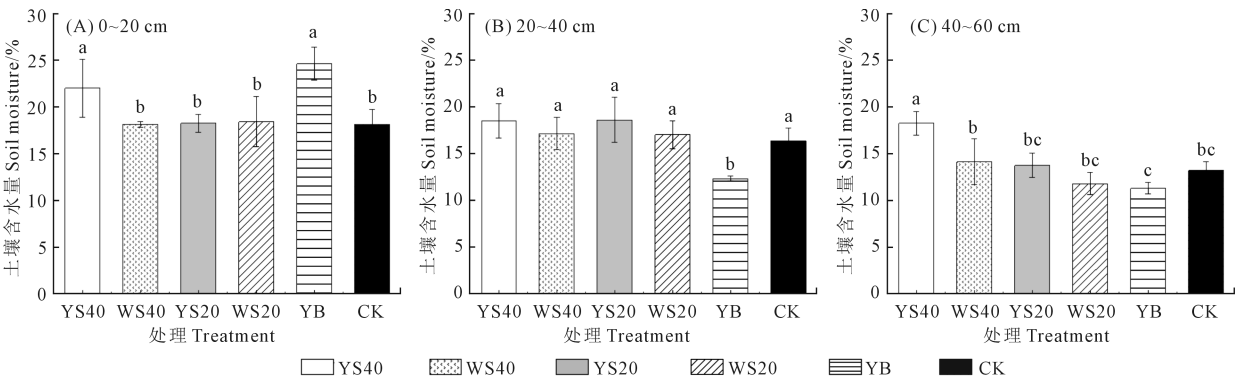


图 4 不同处理对土壤含水量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on soil moisture content

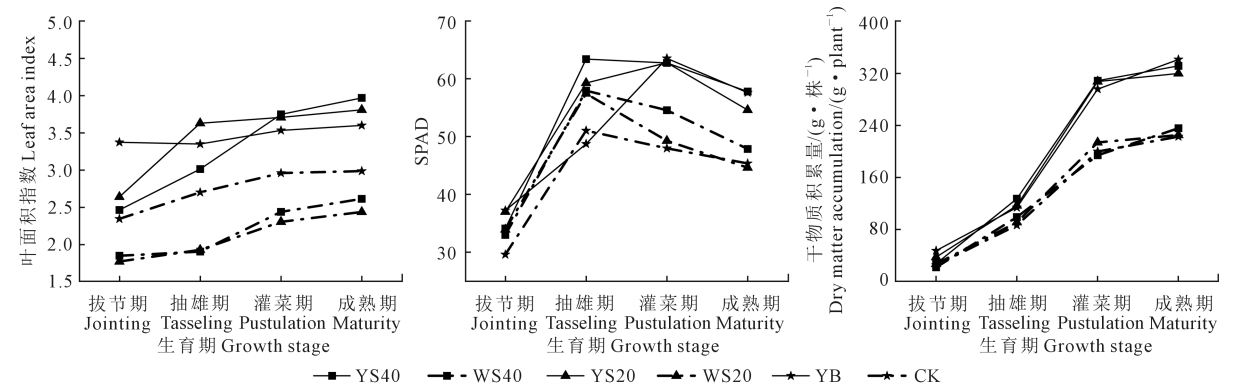


图 5 4 个生育期不同处理对植株叶面积指数、SPAD 值和干物质积累量的影响

Fig.5 Effects of different treatments on leaf area index, SPAD value and dry matter accumulation in four stages

2.5 有机肥深施深松对玉米产量及经济效益的影响

结合 2021 年和 2022 年两年的产量数据发现 (图 6),在两年中产量分别以 2021 年 YB 和 2022 年 YS20 最高,其产量值分别为 13 325 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 12 683 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2021 年,YB 处理较 CK、WS20、WS40 处理依次增加 22.7%、34.2%、27.5%,差异显著。在 2022 年,YS20 处理较 CK、WS20、WS40 处理产量依次提升了 18.5%、29%、22.8%,差异显著。从表 2 经济效益分析来看,产值、纯收益、收益差额分别以 2021 年 YB、2022 年 YS20 处理最高,但与 YS40 处理差异不显著。从两年的收益差额中得出,2021 年 YB 处理、2022 年 YS20 处理分别较 CK 处理增收 5 770 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 和 5 223 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。年度间玉米平均产量及收益差额无显著差异,但表现为 2022 年略高于 2021 年,随着有机肥和耕作措施的不同而有变化。

3 讨论

3.1 有机肥深施深松对土壤肥力和结构的影响

耕作措施和施肥方式对于薄层黑土的土壤肥力和结构改善有重要的影响^[13],施用有机肥处理下

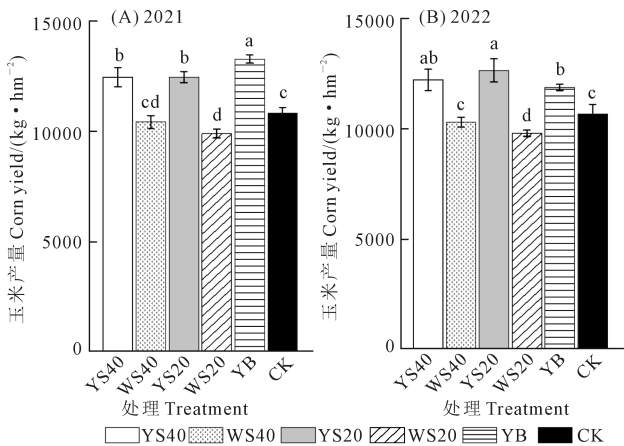


图 6 不同处理对玉米产量的影响

Fig.6 Effects of different treatments on corn yield

各土层的 SOM、TN 含量以及有机碳、全氮储量均有所增加,这主要是有机肥+耕作措施带来的结果。邹文秀等^[14]研究有机肥对黑土肥力影响的试验中表明,有机肥可显著提升次表层土壤有机质和全氮含量 12.4%和 16%。梁路等^[15]研究表明,化肥与牛粪配合施用可提高 0~20 cm 耕层土壤的 18.2%有机质和 27.4%全氮含量。与前人研究不同的是,本试

表 2 各处理的经济收益分析/(CNY·hm⁻²)
Table 2 Analysis of economic benefits of each treatment

年份 Year	处理 Treatment	有机肥投入 Manure input	其他成本投入 Other cost inputs	总投入 Total investment	产值 Output value	纯收益 Net income	收益差额 Yield gap
2021	YS40	1275	5400	6675	32167b	25492	2637
	WS40	0	4800	4800	26920c	22120	-735
	YS20	1275	5400	6675	32169b	25494	2639
	WS20	0	4800	4800	25563d	20763	-2092
	YB	1275	4800	6075	34325a	28625	5770
	CK	0	5100	5100	27955c	22855	
2022	YS40	0	5565	5565	33082ab	27517	4060
	WS40	0	4965	4965	27885cd	22920	-537
	YS20	0	5565	5565	34245a	28680	5223
	WS20	0	4965	4965	26538c	21573	-1884
	YB	0	5115	5115	32190b	27075	3618
	CK	0	5415	5415	28890c	23457	

注:2021 年玉米价格为 2.58 元·kg⁻¹、2022 年玉米价格为 2.70 元·kg⁻¹,其他成本投入包括种子、化肥、农药、人工、机械作业等。收益差额为各处理±CK 的值。不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The price of corn in 2021 was 2.58 CNY·kg⁻¹, and the price of corn in 2022 was 2.70 CNY·kg⁻¹. Other cost inputs include seeds, fertilizers, pesticides, manual, mechanical operations etc. The difference in yield gap is the value for each treatment ±CK. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year ($P<0.05$).

验将有机肥通过耕作措施不同层次地施入到土壤中,向土层中投入更多碳源,结果显示在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层分别以 YB 处理、YS20 处理、YS40 处理有机质和全氮含量提升最多,与 CK 处理相比提升显著。由此可见有机肥对养分含量均有明显的提升作用,但随着有机肥施入土层的不同,有机质和全氮含量以 YB、YS20、YS40 处理分别在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中增加最为显著。在 40~60 cm 土层中,YS40 处理与 CK 处理相比,有机质和全氮含量增加显著。由于 CK 处理的玉米秸秆在免耕处理下主要覆盖于土壤表层,更容易出现土壤有机碳、全氮等养分聚集在表层形成养分分层化^[16]。而深松打破了犁底层,并且在次表层施入有机肥,加之玉米根系根茬量又较多,又为土壤增加一定的养分,一并提高了土壤有机碳含量。此外,深松对土壤扰动小,降低有机质矿化,不易被微生物分解利用^[17-18]。农家肥的营养物质比秸秆更丰富,且更易矿化被作物吸收利用,在土壤中养分释放速率更快,与赵海成等^[19]和王长军等^[20]的研究结果相似。

前人研究表明,以黑土为研究对象,与单施化肥相比长期施用有机肥的土壤有机碳、全氮储量分别提升 69.9%和 56.6%,均呈现升高的现象^[21-22]。通过本研究测定的有机碳、全氮储量可知,施有机肥的处理(YS40、YS20、YB)较 CK 处理有机碳储量和全氮储量平均提升 5.5%~24.2%、7.8%~18.5%。从 0~60 cm 的整个土壤剖面来看,其中以 YS20 处

理升幅最大,其次是 YS40、YB 处理,但它们之间差异不显著。

耕作措施还会影响土壤物理性状,从而间接影响作物生长^[23-24]。相关研究指出,长期免耕对表层土壤容重和含水量有一定的降低和增加作用且有局限性,极易形成犁底层,阻碍作物根系下扎的同时也影响作物对养分的吸收利用^[25]。施入有机肥的处理土壤容重有所降低、含水量有所增加,原因是由于容重较低的有机肥与土壤混合后降低土壤容重进而增加含水量,并且有机肥中含有较高的有机质,与保护性耕作结合起到疏松土壤的作用^[26]。此外,深松能打破犁底层,显著降低深层土壤容重并增加含水量,深松耕作由于比传统的旋耕作业深度更深,对耕层土壤扰动程度小,且不翻转土壤,因此能够影响深层土壤的物理性质^[27]。与 CK 处理相比较来看,将有机肥和耕作措施两者结合的处理能显著降低耕层土壤容重并提升含水量。本试验中 YS20 处理能够显著降低 0~40 cm 土层的容重值,YS40 处理能够提升 40~60 cm 土壤中的含水量,表明保护性耕作加施有机肥对降低土壤容重、提升含水量效果优于保护性措施加秸秆留茬的处理。

3.2 有机肥深施深松对植株叶面积指数、SPAD 值、生物量、产量及经济效益的影响

玉米高产稳产与叶面积指数、光合作用和植株干物质积累量直接相关,合适的叶面积更有利于光合作用的顺利进行,光合形成的有机物质养分累积

越多,越有利于产量的提高。王维等^[28]在宁南旱区连续 2 年的田间定位试验得出,与免耕相比,深松更有利于提高叶片光合作用能力。王玉凤等^[29]与王丹等^[30]研究表明,深松处理与旋耕处理相比能够打破犁底层并改善土壤水分供应,促进根系发育进而提高叶面积指数和干物质积累量。本试验研究结果与前人研究结果不同的是,单纯的耕作措施如深松和旋耕处理并不能增加叶面积指数(*LAI*)、叶绿素含量(*SPAD* 值)、生物量和产量,只有伴随耕作措施将有机肥一同施入到土层中,才能发挥最大的作用,且差异显著($P<0.05$)。原因一,深松可以疏松土壤,增加土壤水分在下层的有效性和渗透性,并改善玉米根系向土壤中横、纵向的伸展,促使其吸收养分的空间增多,进而影响着干物质量及产量^[31]。原因二,与施入的有机肥有关,通过深松和旋耕的方式将有机肥分别施入次表层和深土层,这将增加耕层厚度也保证深土层的养分供给,最后促进地上部生长,保证了地上植株的良好生长发育状况。有机肥具有较长时间的肥力释放,能够促进玉米整个生育期的养分吸收,有利于玉米的高产优质^[32]。YS40、YS20、YB 这 3 个处理的干物质积累量在灌浆期与 CK 处理之间差异达到最大,这一时期增长显著的原因可能是前期较高的 *LAI* 和 *SPAD* 值,说明其营养器官发育状况良好,同时为作物高产打下良好的基础,*LAI* 和 *SPAD* 值、干物质量保持平稳说明有机肥减缓了叶片衰老速度,能够为籽粒灌浆和产量形成提供充足的养分^[17]。施有机肥的处理与 CK 之间产量差异显著,其原因是有机肥肥效迟缓,但养分释放稳定^[33],特别是能够在生育后期满足玉米的养分需求,增加光合产物向玉米籽粒的转运^[34],进而提高籽粒产量。有研究表明冷凉区作物对免耕反应不同:大豆增产,玉米减产^[35],这也与本试验结果类似。从 2021 年和 2022 年的产量结果来看,第一年中 YB 产量显著高于 CK,第二年是 YS20 产量最高,据此趋势,分析可能与有机肥养分的释放有关,雨水的淋洗和微生物的矿化作用使得不同土层中的养分为作物吸收利用的情况不同。经济效益方面,两年间各处理经济效益存在差异,但可以看出施用有机肥的处理年纯收益高于 CK 处理。收益差额更好地说明了有机肥加保护性耕作措施应用的可行性。

4 结 论

黑龙江省西部地区缺乏适合的保护性耕作措施,与秸秆留茬+免耕相比,有机肥还田+保护性耕

作可以有效提升 40~60 cm 深土层土壤有机质和全氮含量,其中 YS40 处理对有机质含量的提升作用最佳,有机质含量增加 89.55%,全氮含量增加 97.2%;与 CK 相比 2021 年 YB、2022 年 YS20 处理可使作物产量提升,分别提升 22.7% 和 18.5%,同时经济效益中差额同样增加,依次为 5 770 元·hm⁻² 和 5 223 元·hm⁻²。生产实践中采用有机肥+保护性耕作措施可以有效解决冷凉区有机物料还田的瓶颈问题。

参 考 文 献:

- [1] 孟凯, 张兴义, 隋跃宇. 东北北部农田黑土障碍因子分析[J]. 土壤, 2003, 35(2): 145-147, 151.
MENG K, ZHANG X Y, SUI Y Y. Impedient Factors in black soil in the Northern-northeast China[J]. Soils, 2003, 35(2): 145-147, 151.
- [2] 高威, 王连峰, 贾仲君. 长期不同施肥模式对农田黑土微生物群落构建的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1437-1448.
GAO W, WANG L F, JIA Z J. Changes in community assembly of microbiomes in black soil under distinct scenarios of long-term field fertilization[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11): 1437-1448.
- [3] 曹国璠. 半干旱冷凉区微型种植方法, 覆盖材料和补灌时期研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(2): 13-18.
CAO G F. A study on micro planting methods, covering materials, and supplementary irrigation periods in semi-arid cold regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(2): 13-18.
- [4] 马忠明, 徐生明. 甘肃河西绿洲灌区玉米秸秆覆盖效应的研究[J]. 甘肃农业科技, 1998, (3): 15-17.
MA Z M, XU S M. A study on the effect of corn straw coverage in the oasis irrigation area of Hexi, Gansu[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 1998, (3): 15-17.
- [5] 戚颖, 李铁男, 白雪峰, 等. 秸秆覆盖对寒旱区农田土壤理化性状的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(7): 56-63.
QI Y, LI T N, BAI X F, et al. Effects of straw mulching soil physico-chemical properties in cold and arid regions[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(7): 56-63.
- [6] O'BRIEN P L, HATFIELD J L. Dairy manure and synthetic fertilizer: a meta-analysis of crop production and environmental quality[J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2019, 2(1): 1-12.
- [7] CHEN, S Y, CAMPS-ARBESTAIN C, et al. The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: a meta-analysis and review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 111: 103-125.
- [8] 高焕文. 机械化保护性耕作技术[J]. 现代化农业, 2002, (4): 31-33.
GAO H W. Mechanized conservation tillage technology[J]. Modernizing Agriculture, 2002, (4): 31-33.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-24.
LU R K. Soil agrochemical analysis methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 22-24.
- [10] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 15 年保护性耕作对黄土坡耕地区土壤及团聚体固碳效应的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):

- 4690-4697.
- Li J, Wu H J, Wu X P, et al. The effects of 15 years of conservation tillage on soil and aggregate carbon sequestration in loess slope cultivated areas [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (23): 4690-4697.
- [11] 张钢. 不同耕作方式对夏玉米光合生理特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- ZHANG G. The effect of different cultivation methods on the photosynthetic physiological characteristics of summer maize [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [12] 彭记永, 李军玲, 张志红. 夏玉米叶面积指数模型适用性及误差分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 70-76, 91.
- PENG J Y, LI J L, ZHANG Z H. Applicability and error analysis of leaf area index model of summer maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 70-76, 91.
- [13] 王淑娟, 李有兵, 吴玉红, 等. 耕作措施与秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤质量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 8-15.
- WANG S J, LI Y B, WU Y H, et al. Effects of tillage and residue management on soil quality in a wheat-maize cropping system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 8-15.
- [14] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4): 407-418.
- ZOU W X, QIU C, HAN X Z, et al. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4): 407-418.
- [15] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 544-554.
- LIANG L, MA C, ZHANG R, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 544-554.
- [16] KUMAR S, KADONO A, LAL R, et al. Long-term no-till impacts on organic carbon and properties of two contrasting soils and corn yields in Ohio[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1798-1809.
- [17] 陈文超, 徐生, 朱安宁, 等. 保护性耕作对潮土碳、氮含量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 224-230.
- CHEN W C, XU S, ZHU A N, et al. Effects of conservation tillage on the content of carbon, nitrogen in fluvo-aquic Soil[J]. *Chinese agricultural science bulletin*, 2015, 31(9): 224-230.
- [18] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 等. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 229-237.
- WANG X D, ZHANG X, WANG Y L, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial soil on loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 229-237.
- [19] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1836-1844.
- ZHAO H C, ZHENG G P, JIN M F, et al. Effects of successive straw and biochar residue incorporation on physical and chemical characters of saline alkali soil and rice yield[J]. *Southwest China journal of agricultural sciences*, 2018, 31(9): 1836-1844.
- [20] 王长军, 李凤霞, 吴霞. 不同有机物料对银北灌区盐碱地土壤养分含量及氮有效性的影响[J]. 现代农业科技, 2021, (23): 141-142, 153.
- WANG C J, LI F X, WU X. The effect of different organic materials on soil nutrient content and nitrogen availability in saline alkali soil of Yinbei Irrigation District[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021, (23): 141-142, 153.
- [21] 查燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4649-4659.
- ZHA Y, WU X P, ZHANG H M, et al. The effect of long-term organic inorganic combined application of black soil organic carbon on the improvement of farmland basic soil fertility[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2015, 48(23): 4649-4659.
- [22] 解丽娟, 王伯仁, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下黑土与灰漠土有机碳储量的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 98-105.
- XIE L J, WANG B R, XU M G, et al. Changes of soil organic carbon storage under long-term fertilization in black and grey-desert soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(1): 98-105.
- [23] 邱岭霜, 王西娜, 李培富, 等. 不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 182-189.
- QIU Y S, WANG X N, LI P F, et al. Different kinds of organic fertilizers and amounts on dryland soil fertility and corn yield in the current season[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019, (6): 182-189.
- [24] BANDYOPADHYAY K K, MISRA A K, GHOSH P K, et al. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 115-125.
- [25] 翟振, 李玉义, 逢焕成, 等. 黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2322-2332.
- ZHAI Z, LI Y Y, PANG H C, et al. The current situation and characteristics of the plow bottom layer in farmland in the northern part of the Huanghuaihai[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2016, 49(12): 2322-2332.
- [26] 王西和. 长期定位施肥下灰漠土有机质及物理性质的变化特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- WANG X H. Changes in organic matter and physical properties of grey desert soil under long term fertilization [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.
- [27] 丛聪, 王天舒, 岳龙凯, 等. 深松配施有机物料还田对黑土区坡耕地土壤物理性质的改良效应[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (3): 227-236.
- CONG C, WANG T S, YUE L K, et al. Amendment effect of subsoiling with organic materials application on soil physical properties of slope cropland in mollisol region[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021, (3): 227-236.
- [28] 王维, 韩清芳, 吕丽霞, 等. 不同耕作模式对旱地小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 20-26.
- WANG W, HAN Q F, LV L X, et al. Effects of different tillage pat-

terms on photosynthetic characteristics and yield of dryland wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 20-26.

[29] 王玉凤, 陈天宇, 付健, 等. 不同耕作方式对松嫩平原半干旱区玉米生长和产量的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(2): 104-111.

WANG Y F, CHEN T Y, FU J, et al. Effects of tillage methods on maize growth and yield in semiarid area of songnen plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(2): 104-111.

[30] 王丹, 李升东, 冯波, 等. 不同耕作方式对小麦光合性能和产量形成的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(10): 35-39.

WANG D, LI S D, FENG B, et al. Effects of different tillage methods on photosynthetic performance and yield formation of wheat [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(10): 35-39.

[31] FENG X M, HAO Y B, LATIFMANESH H, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of northeastern China[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1607-1615.

[32] 赵明, 陈雪辉, 赵征宇, 等. 鸡粪等有机肥料的养分释放及土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 47-50.

ZHAO M, CHEN X H, ZHAO Z Y, et al. Releasing of N,P and K of organic fertilizers and their effects on the contents of available Cu, Zn, Fe and Mn in soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 47-50.

[33] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943.

XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2016, 49(20): 3934-3943.

[34] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 有机氮替代无机氮对旱作全膜双垄沟播玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1199-1206.

XIE J H, CHAI Q, LI L L, et al. Effects of the substitution of inorganic nitrogen by organic nitrogen fertilizer on maize grain yield and water and nitrogen use efficiency under plastic film fully mulched ridge-furrow in semi-arid area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 30(4): 1199-1206.

[35] 张兴义, 陈强, 陈渊, 等. 东北北部冷凉区免耕土壤的特性及作物效应[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2271-2277.

ZHANG X Y, CHEN Q, CHEN Y, et al. Characteristics and crop effects of no-tillage soil in cold regions of northern Northeast China [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2013, 46(11): 2271-2277.

(上接第 96 页)

[23] 郭志刚. 钾对黄土高原旱塬区元帅苹果糖酸代谢调控机理研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.

GUO Z G.Regulation mechanism of potassium on sugar and acid metabolism of ‘red delicious’ apple in dryland region of loess plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.

[24] 张弦. 不同施钾水平对“嘎拉”苹果果实糖、酸生理代谢的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

ZHANG X. Effects of different potassium level on sugar and acid metabolism in ‘Gala’ apple fruit [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[25] 赵佐平, 同延安, 高义民, 等. 不同肥料配比对富士苹果产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1130-1135.

ZHAO Z P, TONG Y A, GAO Y M, et al. Effect of different fertilization on yield and quality of Fujiapple[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(5): 1130-1135.

[26] 武晓. 施钾对黄冠梨产量与品质及钾素营养的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2016.

WU X. Effects of different potassium application rates on fruit yield and quality and potassium nutrition of ‘Huangguan’ pear [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.

[27] 吴翠云. 钾肥对骏枣叶片光合特性和果实品质及糖代谢影响的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2016.

WU C Y. Effect of potassium on photosynthesis, fruit quality and sugar metabolism of jujube [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.

[28] ZÖRB C, SENBAYRAM M, PEITER E. Potassium in agriculture-status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(9): 656-669.

[29] 申长卫. 施钾影响梨叶片和果实糖合成及分配的生理与分子机制 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

SHEN C W. Physiological and molecular mechanism of affecting sugar biosynthesis and distribution in pear leaves and fruit by potassium supply [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.

[30] PETTIGREW W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 133(4): 670-681.

[31] OURA Y, YAMADA K, SHIRATAKE K, et al. Purification and characterization of a NAD⁺-dependent sorbitol dehydrogenase from Japanese pear fruit[J]. Phytochemistry, 2000, 54(6): 567-572.

[32] BANTOG N A, YAMADA K, NIWA N, et al. Gene expression of NAD⁺-dependent sorbitol dehydrogenase and NADP⁺-dependent sorbitol-6-phosphate dehydrogenase during development of loquat (Eriobotrya japonica Lindl.) fruit[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2000, 69(3): 231-236.

[33] 苏静, 祝令成, 刘茜, 等. 果实糖代谢与含量调控的研究进展[J]. 果树学报, 2022, 39(2): 266-279.

SU J, ZHU L C, LIU Q, et al. Research progress on sugar metabolism and concentration regulation in fruit[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(2): 266-279.

[34] CHONG C. Study of the seasonal and daily distribution of sorbitol and related carbohydrates within apple seedlings by analysis of selected tissues and organs[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1971, 51(6): 519-525.