

深耕改土方式对涝渍白浆土物理结构和作物生长影响分析

高中超¹ 黄文功² 王伟¹ 李玉梅¹ 蔡姗姗¹ 孙磊¹
王翠玲² 马兵兵³ 张俐俐⁴

(1. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院农产品质量安全研究所, 哈尔滨 150086;
3. 黑龙江省农业环境与耕地保护站, 哈尔滨 150011; 4. 黑龙江省农业科学院, 哈尔滨 150086)

摘要: 涝渍限制黑龙江省东部三江平原耕作土壤(白浆土)生产潜力,制约粮食稳产、丰产。本研究针对三江平原涝渍区域白浆土存在坚硬的障碍层,通气透水性差、排水不畅,易形成涝渍灾害问题,采取自主研发的鼠洞犁(RHPT)和秸秆深埋犁(SDBT)进行耕作改土作业,以常规耕作(灭茬起垄)为对照(CK),基于人工模拟涝渍对正处吐丝期的玉米进行7 d的涝渍胁迫,研究两种深耕改土方式打破障碍层,改善土壤耕层构造,抵御涝渍对玉米根系生长、干物质积累、产量构成的性能。试验结果表明:相对常规耕作(CK),2种耕作措施降低土壤硬度,改善土壤透性,三相比更合理。RHPT、SDBT处理与CK相比,亚表层(20~40 cm)土壤硬度最大降幅分别为25.9%、19.3%,土壤固相率降低7.9%、9.2%,液相率增加11.5%、10.6%;耕层透水系数增加451.1%、407.1%,各项指标差异均显著($P<0.05$)。2种耕作措施减缓涝渍对玉米的生长胁迫,提高玉米产量。RHPT、SDBT处理与CK相比,玉米根活力分别增加25.0%、28.0%,干物质量增加11.1%、11.8%;SPAD值增加17.1%、14.4%;花粉活力提高26.1%、22.7%;籽粒产量增加11.3%、12.0%。本研究采取2种耕作改土措施,增加土壤库容,减缓涝渍对玉米根系胁迫,提高作物抗逆性,为东北春玉米减灾保产调控提供技术支撑。

关键词: 涝渍; 白浆土; 玉米; 鼠洞犁; 秸秆深埋犁; 深耕改土方式

中图分类号: S-3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)01-0368-10 OSID: 

Analysis of Effects of Deep Plowing Soil Improvement Methods on Physical Structure and Crop Growth of Waterlogged Albic Soil

GAO Zhongchao¹ HUANG Wengong² WANG Wei¹ LI Yumei¹ CAI Shanshan¹
SUN Lei¹ WANG Cuiling² MA Bingbing³ ZHANG Lili⁴

(1. Heilongjiang Academy of Black Soil Conservation and Utilization, Harbin 150086, China
2. Safety and Quality Institute of Agricultural Products, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China
3. Heilongjiang Agricultural Environment and Cultivated Land Protection Station, Harbin 150011, China
4. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: The waterlogging limited the production potential of cultivated soil (waterlogged albic soil) in the eastern Sanjiang Plain of Heilongjiang Province, which restricted the stable and high yield of this region. Focusing on the hard barrier layer, poor ventilation and permeability, and poor drainage of white clay in the flooded areas of the Sanjiang Plain, which can easily lead to waterlogging disasters issues. Self-developed mouse hole plows (RHPT) and straw deep buried plows (SDBT) were used for tillage and soil improvement operations, with conventional tillage (stubble removal and ridge formation) as the control (CK). Based on artificial simulation of waterlogging, maize during the silk emergence stage was subjected to 7 days of waterlogging stress. Two deep tillage and soil improvement methods were studied to break through the barrier layer, improve soil tillage structure, and resist the nature of waterlogging on maize root growth, dry matter accumulation, yield composition, etc. The experimental results showed that

收稿日期: 2025-01-04 修回日期: 2025-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1501305)、黑龙江省重点研发计划项目(JD22B002)和联合国粮农组织项目(CPR/21/401)

作者简介: 高中超(1977—),男,研究员,主要从事土壤改良和耕作栽培技术研究,E-mail: gaozhongchao0713@163.com

通信作者: 孙磊(1981—),男,研究员,博士,主要从事黑土保护与利用技术研究,E-mail: tufeisuosunlei@163.com

compared with conventional tillage (CK), the two tillage measures reduced soil hardness, improved soil permeability, and had a more reasonable three-phase ratio. Compared with CK, RHPT and SDBT treatments resulted in a maximum decrease of 25.9% and 19.3% in subsoil (20 ~ 40 cm) hardness, a decrease of 7.9% and 9.2% in soil solid fraction, and an increase of 11.5% and 10.6% in liquid fraction, respectively. The permeability coefficient of the plow layer was increased by 451.1% and 407.1%, and the differences in various indicators were significant ($P < 0.05$). These two cultivation measures can alleviate the growth stress of waterlogging on corn and increase corn yield. Compared with CK, RHPT and SDBT treatments increased maize root vitality by 25.0% and 28.0%, respectively, and increased dry matter mass by 11.1% and 11.8%, respectively; SPAD values were increased by 17.1% and 14.4%, respectively. The pollen vitality was increased by 26.1% and 22.7%, and the grain yield was increased by 11.3% and 12.0%, respectively. The research adopted two tillage and soil improvement measures to increase soil storage capacity, alleviate waterlogging stress on maize roots, improve crop stress resistance, which provided technical support for disaster reduction and yield preservation regulation of spring maize in Northeast China.

Key words: waterlogging; waterlogged albic soil; maize; rat hole plow; deep buried straw plow; deep plowing soil improvement methods

0 引言

黑龙江省幅员辽阔,耕地面积 $1.72 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 其中涝渍面积为 $5.75 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[1];耕地土壤类型多样,以暗棕壤、草甸土、黑土、白浆土、黑钙土为主,其中白浆土面积 $1.16 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占耕地面积的 13.6%,主要分布地势低平的三江平原和黑龙江省东部山区,仅次于黑土和草甸土,占区域耕地面积 25.1%^[2]。白浆土自身存在深厚淋淀粘化层,通透性差,限制土壤水进出和土壤养分供给,渍涝时影响微生物活性及土壤养分补给,诱导土壤退化,最终影响到作物的生育,轻则减产,重则颗粒无收。文献[3-4]对三江平原涝渍地物理性质研究发现,其土壤剖面上松下紧,表层为草根层,比重小,饱和含水量大,土壤水分不易流出。马富亮等^[5]在东北黑土区研究涝渍土壤持水性和导水性证实,涝渍地上土壤具有较高的进气值,水吸力较大,保持在中小孔隙中的水分只有在较大吸力范围内才能缓慢释出,这造成涝渍地土壤具有极强的持水能力,极弱的导水能力,不易失水,导致了涝渍地土壤长期处于湿度过大的状态。涝渍土壤持水量大,阻碍农机耕作的连续性,严重降低了土地利用效率^[6]。姚章村等^[7]对三江平原涝渍地的土壤性质研究发现,该区域涝渍地 90% 的表层土壤为质地粘重、透水性差的白浆土和黑黏土,母质层存在不透水的黏土层或者亚黏土层,且土壤机械组成黏粒含量较高,因而形成上层滞水、地表积水严重。加之黑龙江省受大陆季风气候的影响,每年 6—8 月份降雨更为集中,致使部分低洼易涝地积水,导致耕种土壤处于过饱和状态,常给农业造成涝渍灾害。玉米生产遭受涝渍胁迫时,群体光合势和叶面积指数显著降低,透光率提高,进

而显著降低群体光能有效截获率和净光合速率等指标^[8],导致玉米穗长、穗粗、穗粒数及产量随着涝渍时间增加呈降低趋势^[9-10],涝渍灾害平均减产率达 43.7%^[11]。国内外对涝渍地治理主要采取土地平整^[12-13]、暗管工程^[14-15]等,取得较好的效果,但前期投入成本大、见效慢,不易在三江地区广泛推广;施用土壤结构改良剂^[16]、植物化调抗涝制剂^[17-18]等,受农业气候影响大,治标准难治本;三江平原早期采取以稻治涝取得良好的效果,但自然补水缺乏,需要开采大量的地下水,又会造成次生灾害^[19-20]。农业生产中缺少应对抗涝渍的轻简化生产技术。

黑龙江省黑土保护利用研究院根据涝渍区域障碍土壤自身特点,从耕作改土着手,采用研制的深松鼠洞犁和秸秆深埋犁作为改土手段,基于人工模拟涝渍条件下,研究深耕改土方式对耕层土壤物理性状及玉米生长的影响,明确深耕改土方式改善耕层构造,提高土壤通透性能、减缓涝渍对玉米生长胁迫,促进春玉米干物质的积累及产量的提高,为保障国家粮食安全生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2022 年在黑龙江省双鸭山市八五二农场(46°23'N,132°63'E)进行,该区域为三江平原的典型旱作涝渍区,地处中温带大陆性气候,年均降水量约 550 mm,年均气温 3.2℃,无霜期 145 d,有效积温为 2 600℃,年均太阳总辐射量约为 4 600 kJ/m²。

供试土壤:白浆土,基础养分如表 1 所示。土壤测试分析参照土壤农化分析^[21],机械组成参照文献[22]中测试方法,结果如表 2。

表 1 供试土壤初始基本理化参数

Tab.1 Initial basic physical and chemical properties of soil for test

土壤深度/ cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	全磷质量比/ (g·kg ⁻¹)	全钾质量比/ (g·kg ⁻¹)	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	交换性钠质量 分数/%	土壤渗透系数/ (cm·s ⁻¹)
0 ~ 20	1.15	1.8	0.9	23.8	35.6	6.1	4.0	1.1 × 10 ⁻⁴
20 ~ 40	1.34	0.6	0.5	24.7	11.2	6.8	7.7	1.7 × 10 ⁻⁵
40 ~ 60	1.41	0.4	0.6	26.0	10.7	6.9	4.2	4.2 × 10 ⁻⁵

表 2 供试土壤机械组成

Tab.2 Mechanical composition of soil for test

项目	粗砂粒(0.2 ~ 2 mm)	细砂粒(0.02 ~ 0.2 mm)	粉粒(0.002 ~ 0.02 mm)	黏粒(≤0.002 mm)
	质量分数	质量分数	质量分数	质量分数
腐殖质层(0 ~ 20 cm)	5.8	25.2	45.9	23.1
白浆层(20 ~ 40 cm)	9.0	22.6	45.0	23.4
淀积层(40 ~ 60 cm)	4.5	22.1	32.6	40.8

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理:

处理 1:常规处理(CK),采用 SGT-490 型灭茬旋耕联合整地机整地,土壤耕作深度控制在 12 ~ 15 cm。

处理 2:鼠洞犁处理(RHPT)。应用自主研发深松鼠洞犁^[23]进行秋整地(图 1),其中鼠洞犁结构示意图如图 1a 所示,作业效果如图 1b 所示。牵引机车配备功率大于 73.5 kW,并搭载高精 GPS 定位系统,以确保在起垄作业时,鼠洞的位置能够精确位于垄沟的中心区域,从而有利于降雨的渗透和排水过程。

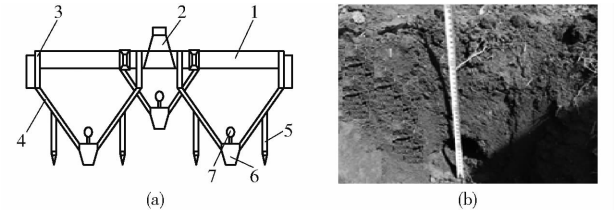


图 1 鼠洞犁结构示意图及田间作业效果图
Fig.1 Schematics of rat-hole plow structure and its field operation

1. 主犁架 2. 牵引架 3. 承重轮 4. 犁臂 5. 犁钩和尖刀
6. 犁铲 7. 铁锤

工作原理:鼠洞犁通过犁臂、犁钩及犁铲等部件相互配合,打破紧实的白浆层;犁铲牵引炮弹形铁锤在土体中行走,利用铁锤在行进中挤压土壤,并在耕层 30 ~ 40 cm 处形成孔径约 10 cm 的鼠洞形排水通道。此鼠洞犁采用斜拉式牵引,附带 4 个犁钩,犁后形成多条排水线,便于地表积水或土壤中过饱和水渗透到鼠洞里,通过鼠洞将多余水排出农田。

处理 3:秸秆深埋处理(SDBT)。玉米收获后,将采用东方红 1GM-210 型双轴灭茬旋耕机,将玉米根茬及秸秆粉碎,秸秆长度小于 12 cm,且均匀平

整地散布地表,然后采用自主研发秸秆深埋犁(图 2a)翻地^[24]。工作原理:第 1 犁铧犁出垄沟,紧接着第 2 犁铧将地表的秸秆刮到垄沟内,第 3 犁铧及下一幅作业第 1 犁铧,分别将 0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm 的土壤依次翻压到秸秆上面,田间作业效果如图 2b 所示,翻垡效果好,秸秆未裸露,防止土壤跑墒,易于翌年耕种。

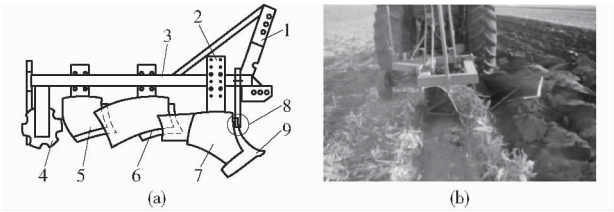


图 2 秸秆深埋犁结构图与田间作业效果图
Fig.2 Sketches of straw deep-buried plough structure and its field operation diagram

1. 牵引架 2. 犁柱 3. 犁架 4. 圆盘锯齿耙片 5. 第 3 犁铧
6. 第 2 犁铧 7. 第 1 犁铧 8. 限深轮 9. 犁头

1.3 人工模拟涝渍系统

构建简易模拟涝渍灾害的试验系统。如图 3 所示,系统由储水池、抽水泵、可控水表、喷水棚和框栽架 4 部分组成。储水池选址近农田的排水渠,蓄自然降雨,便于灌溉和排涝;控制装置由抽水泵和 PVC 管、三通接头、水表等共同协作,实现水量的准确控制和定量分配。框栽架是由柱桩、彩钢板(高为 100 cm)及内衬塑料薄膜(阻隔土壤水通过彩钢板折痕、瑕疵或接缝处横向渗透与扩散)等组成,埋藏深度为 70 cm,填埋后人工对彩钢板附近的土壤进行夯实,主要抵御水胁迫时产生的侧向胀力,防止水分溢出。彩钢板外围订设不同高度柱桩,以增强整体结构的稳定性。矮柱桩长度 120 cm,漏出地表 30 cm,主要用于固定彩钢板;高柱桩距地面高度为 3 m,用于架构遮阳网及 6 个分布均匀的喷灌喷头

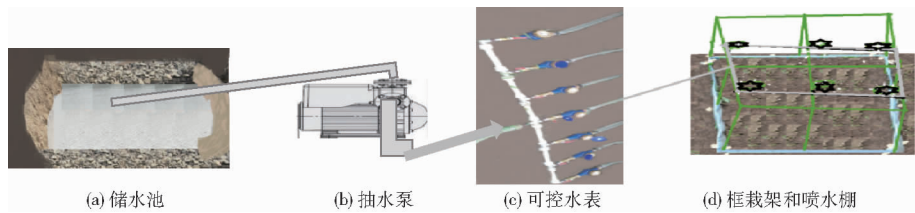


图 3 人工模拟田间涝渍灾害的简易浇灌系统示意图

Fig. 3 Sketches of simple irrigation system for artificial simulation of field waterlogging disaster

(图 3d),旨在模拟降雨、寡照的环境条件。该模拟试验系统获得国家专利^[25],其优点是便于人工操作,能够更精确控制喷水量,并且成本低。

于 2020 年 10 月 17 日,采用整地机-灭茬旋耕机、鼠洞犁及秸秸深埋犁进行秋整地,耙平后统一夹肥起垄,垄距为 65 cm,翌年播种后,出苗时把模拟涝渍的框架安装好,待到玉米吐丝期时,采用人工模拟系统对各处理进行喷灌,以对照水层高于垄台 5 cm 时的注水量(注水量约为 2 m³,耗时 12 h)为标准,其它 2 个处理的框栽内注入与对照相同的水量,当对照地表漏出土面时继续补水至高于垄台 4 ~ 5 cm,其它两个处理注入相同的水量,水面保持 7 d 后自然落干,落干后第 5 天进行取样。该框栽第 2 年采取人工播种,在玉米吐丝期时,模拟涝渍再一次进行定量喷灌,试验框栽区面积为 20 m²(长 5 m、宽 4 m),每个处理设置 4 次重复。

供试玉米品种:德美亚 3 号(北大荒垦丰种业股份有限公司),密度为 8.5 × 10⁴株/hm²。

供试肥料:化肥施用量纯氮(N)量为 105 kg/hm²(大庆石化公司昆仑尿素,N46%),纯磷(P₂O₅)量为 64 kg/hm²(云南云天化股份有限公司磷酸二铵,N18%、P₂O₅46%),纯钾(K₂O)量为 60 kg/hm²(德钾盐农业科技有限公司红牛硫酸钾(K₂O)含量 50%);腐熟的有机肥 15 t/hm²(牛粪养分质量分数:有机质 14.7%、全氮 0.3%、全磷 0.2%、全钾 0.1%)。

田间管理:试验区人工除草 2 次,中耕培土 2 次,其它同正常田间管理。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤理化指标

化学指标:秋季玉米收获后,采用专业取土钻,采用 S 型 5 点取样法分层(0 ~ 20 cm,20 ~ 40 cm)取土,混合后保鲜,带回实验室进行测试化验分析^[23]。

物理指标:土壤容重及土壤三相物理指标测定分别于秋季收获后(9 月 28 日)实施样本采集;土壤透水系数测定则在模拟降雨开始前 2 d 完成小区原位采样。土壤三相组成、容重及土壤透水系数指标取样则采用 100 cm³环刀,采样位置位于垄沟与垄脊中间处,按照土层深度梯度分层取样:首先铲去表

土,在 10 cm 土层深度处(环刀下沿与垄沟基准面持平),其次在 30 cm 深度处(环刀下沿接近于秸秆分布带或同鼠洞在同一水平线上),最后在 50 cm 处,垂直压入环刀,取原状土(要点:每次取样后应谨慎移除环刀,最大限度减少对下层土壤结构的扰动,从而保障下层取样操作的连续性及数据准确性),随后盖紧环刀盖,使用防水胶带密封,及时带回实验室以备后续测定。土壤三相(土壤固相、气相、液相)率:采用 DIK-1150 型土壤三相仪测定;土壤硬度:采用 DIK-5521 型硬度计,垂直于垄向,在垄台与垄沟之间的中心处探测土壤硬度,测定 5 个点,取硬度平均值并用 Excel 制图;硬度波动幅度:相同深度的深耕改土方式硬度减去常规耕作硬度的绝对值;土壤饱和透水系数:采用 DIK-4050 型饱和导水率仪测定。

1.4.2 作物生长与生理指标

经涝渍胁迫后,试验每个处理随机选取 4 个有代表性的点,每点连续选取 10 株,测定株高、叶绿素含量、干物质质量及根长、根系活力等生育指标。植株样品:在玉米吐丝期(R1),采用 SPAD-502 型叶绿素仪(Konica Minolta 公司),测定玉米倒三叶的穗位叶中部,读取叶绿素含量(SPAD)值,测定 10 株,取平均值。

根系指标的测定:完整取出地下 0 ~ 30 cm 根,用流水缓慢冲洗,防止根毛损失,洗完后利用根系扫描仪 Win Rhizo Program(Re. gent Instruments Inc., 加拿大)对根进行扫描测量,测定总根长、根表面积、根体积。

花粉活力测定采用碘化钾法、氯化三苯基四氮唑(TTC),在淹水 7 d 后,采集雄穗上的花粉,混合均匀,短暂低温(0℃)冷藏,带回实验室及时测定^[26]。

1.4.3 作物产量

玉米成熟收获前,每区选无缺苗断垄、连续拔 10 株玉米,带回进行室内考种,测定玉米株高、干物质质量、穗粗、穗长、秃尖长、百粒质量等产量指标;小区全区收获,称量并按面积折算出籽粒含水率为 14% 的玉米籽粒单产。

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 制图和 DPS(v3.01 专业版) 数据分析软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 涝渍胁迫对不同深耕改土方式的土壤物理性质影响

2.1.1 不同深耕改土方式对土壤硬度的影响

不同深耕改土方式对土壤扰动不同(图 4), 其中耕层 0~15 cm 土壤扰动较大,各处理间硬度差异不明显;而在亚表层 15~40 cm 的土层, RHPT、SDBT 处理与 CK 相比,硬度波动幅度分别为 0.01~0.42 MPa、0.01~0.35 MPa,最大变幅出现在土层深度约 17.5 cm 和 30 cm 处,其中耕层 17.5 cm 处分别比 CK 降低 12.2%~18.4%、16.1%~16.4%;耕层 30 cm 处比 CK 降低 5.7%~25.9%、8.4%~19.3%,与 CK 相比,差异显著($P<0.05$)。两年的试验结果呈现趋势较一致,常规处理(CK),耕作深度小于 15 cm,而土层深度约为 17.5 cm 处的白浆层或犁底层未被打破,该层次土壤最大硬度超过 2.0 MPa^[27],不利于玉米根系下扎及其对深层养分的需求,进而会影响到作物生长,降低玉米抗涝渍灾害的能力。

2.1.2 不同深耕改土方式对土壤三相率的影响

土壤三相率是指构成土壤的固相(土粒)、液相(土壤水)、气相(土壤空气)所占土壤容积的百分比,间接反映土壤松紧程度。不同深耕改土方式扰动土体,主要影响土壤固相容积率,进而影响到土壤三相率。从图 5 得出:RHPT、SDBT 处理与 CK 相比,表层 0~20 cm 的土壤固相率分别降低 6.5%、7.5%,液相率增加 3.9%、3.1%,气相率增加 59.0%、83.9%;亚表层(20~40 cm)土壤固相率, RHPT、SDBT 处理分别比 CK 降低 8.0%、9.2%,液相率增加 11.5%、10.6%,气相率增加 43.9%、159.6%;亚表层(40~60 cm)土壤固相率, RHPT、SDBT 处理比 CK 分别降低 1.5%、3.0%,液相率增加 2.2%、4.6%,气相率增加 3.4%、5.2%。2 种深耕改土方式与 CK 相比,改变 0~60 cm 土壤三相率,其中固相率降低,液相率、气相率增加,耕层 0~40 cm 三相数据差异均显著($P<0.05$),但 RHPT 与 SDBT 处理间差异不明显。

2.1.3 不同深耕改土方式对土壤渗透系数的影响

土壤透水系数直接反映单位面积、时间内排水量,反映重力水穿过土壤孔隙骨架的难易程度。不同深耕改土方式对土壤渗透系数的影响如图 6 所示(图中同一土层深度不同小写字母表示差异显

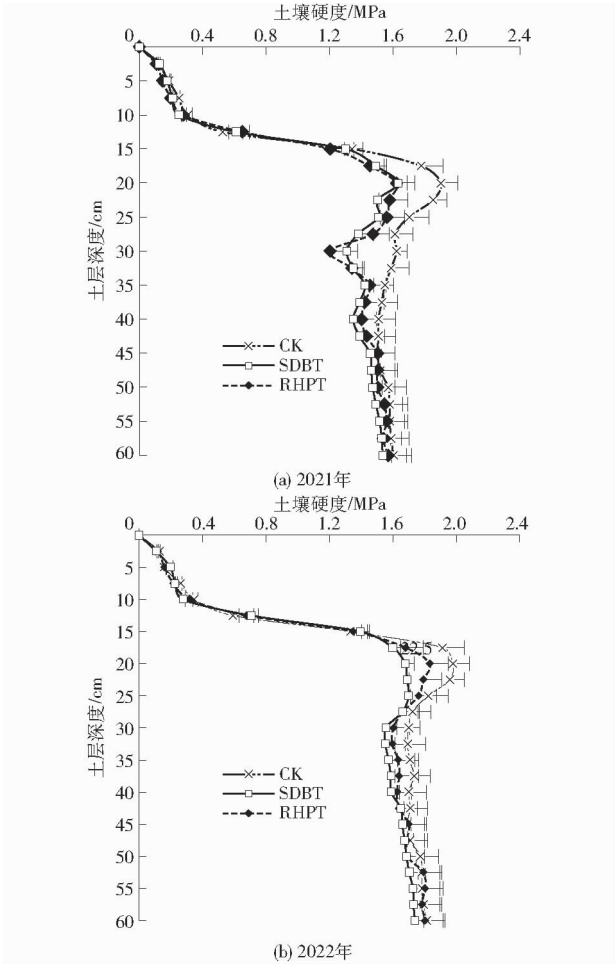


图 4 不同深耕改土方式的土壤硬度
Fig. 4 Soil hardness of different deep plowing and soil improvement methods

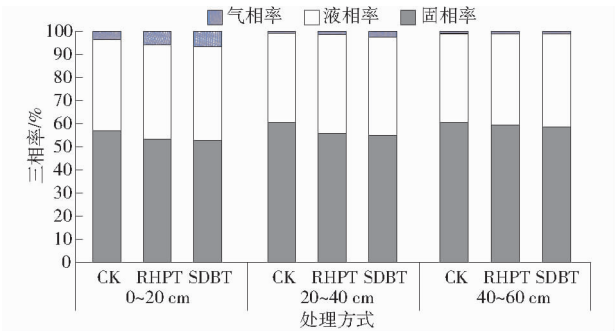


图 5 不同深耕改土方式下各土层深度土壤的三相比例
Fig. 5 Three phase ratio of soil at different depths of each soil layer under different deep tillage and soil improvement methods

著), RHPT、SDBT 处理与 CK 相比, 0~20 cm 土壤透水系数增加 41.3%~76.1%、47.6%~69.9%; 20~40 cm 土壤透水系数增加 210.2%~451.1%、325.0%~407.1%; 40~60 cm 土壤透水系数增加 3.7%~8.2%、10.7%~16.6%。深耕改土方式对不同土层扰动不同, 其中对土层 20~40 cm 影响最大, 其次为 0~20 cm 土层, 最小为 40~60 cm。两种深耕改土方式与 CK 相比, 0~40 cm 土壤的透水系

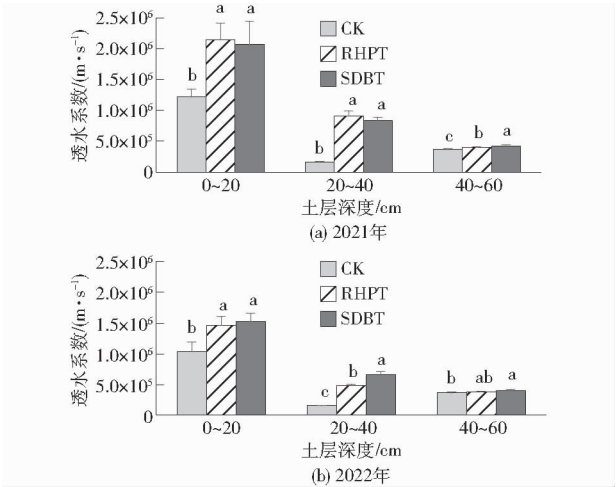


图 6 不同深耕改土方式下各土层深度的土壤透水系数
Fig. 6 Soil permeability coefficient at different depths of soil layers under different deep tillage and soil

数差异显著 ($P < 0.05$), 但 RHPT 与 SDBT 处理间差异不明显。常规耕作未打破障碍层, 透水性较差, 框栽内的玉米经过 7 d 的涝渍胁迫 (图 7), 对 CK 影响最大, 底部 3~4 叶片已枯死, 其次为 SDBT 处理下部叶片略微枯黄, 而 RHPT 的处理受胁迫影响最小。翌年同土层的土壤渗透系数由大到小依次为 SDBT、RHPT、CK, 0~40 cm 土层内的土壤渗透系数, RHPT、SDBT 处理与 CK 相比差异仍显著 ($P < 0.05$)。

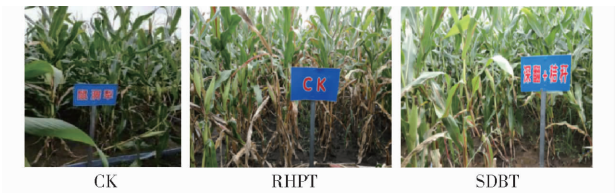


图 7 不同深耕改土方式下玉米长势情况
Fig. 7 Growth status of corn under different deep tillage and soil improvement methods

表 3 不同深耕改土方式下玉米根系指标的试验结果

Tab.3 Experimental results of maize root system indicators under different deep tillage and soil improvement methods				
处理方式	根系活力/($\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$)	根系干物质质量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	根长/cm	根体积/ cm^3
CK	(231.6 $\pm$ 10.7) ^b	(14.4 $\pm$ 0.3) ^b	(1261.7 $\pm$ 60.2) ^b	(134.6 $\pm$ 6.1) ^b
RHPT	(289.6 $\pm$ 6.1) ^a	(15.6 $\pm$ 0.3) ^a	(1591.2 $\pm$ 40.0) ^a	(147.2 $\pm$ 3.2) ^a
SDBT	(296.4 $\pm$ 4.3) ^a	(16.1 $\pm$ 0.2) ^a	(1667.1 $\pm$ 54.9) ^a	(149.0 $\pm$ 2.5) ^a

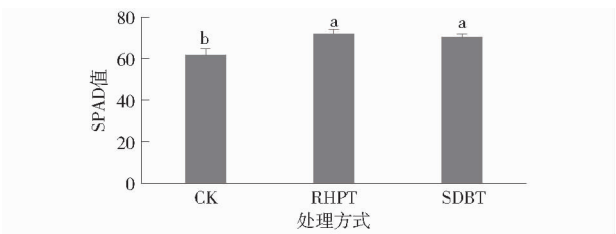


图 9 不同深耕改土方式下耐涝渍胁迫状态的 SPAD 值
Fig. 9 SPAD values of waterlogging stress tolerance under different deep tillage and soil improvement methods

2.2 涝渍胁迫对不同深耕改土方式的玉米生长影响

2.2.1 玉米根系生长

RHPT、SDBT 处理, 渗透性强, 排水效果好, 缓冲水分对根系胁迫, 较 CK 长势好、须根多 (图 8), 其根系各项指标变化如表 3 (同列数据中不同字母表示存在显著差异) 所示。RHPT、SDBT 处理根系活力分别为 289.6、296.4 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 比 CK 提高 25.0%、28.0%; 根干物质质量为 15.6、16.1 g/株, 比 CK 增加 11.1%、11.8%; 根长为 1 591.2、1 667.1 cm, 比 CK 增加 26.1%、32.1%; 根体积为 147.2、149.0 cm^3 , 比 CK 增加 9.4%、10.7%; RHPT、SDBT 处理与 CK 相比, 以上各项指标差异显著 ($P < 0.05$), 但 RHPT 与 SDBT 相比差异不明显。

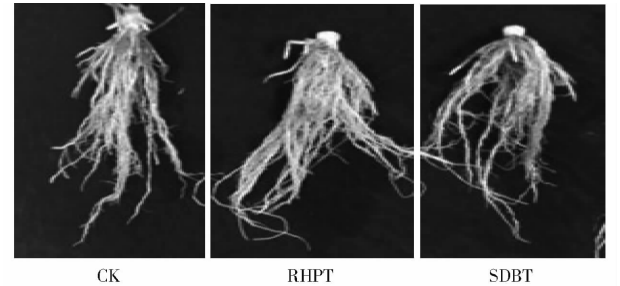


图 8 不同深耕改土方式的玉米根系表观特征
Fig. 8 Effect of different deep tillage and soil improvement methods on apparent appearance of maize roots

2.2.2 玉米地上部生长

涝渍胁迫玉米根系, 间接影响到玉米地上部生长。不同深耕方式对玉米各项指标影响如图 9~11 所示, 其中对叶绿素影响如图 9 所示, RHPT、SDBT 处理的 SPAD 值分别为 72.0、70.3, 分别比 CK 提高 17.1%、14.4%; 对干物质质量影响如图 10 所示, RHPT、SDBT 处理为 184.8、181.9 g/株, 比 CK 增加

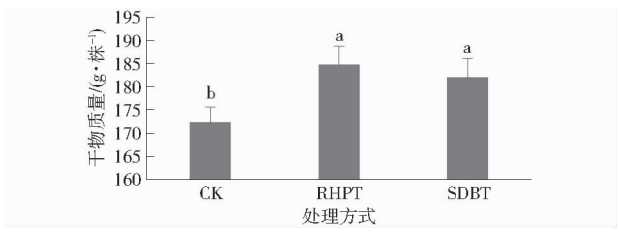


图 10 不同深耕改土方式下耐涝渍胁迫状态的干物质量
Fig. 10 Dry matter under waterlogging stress tolerance under different deep tillage and soil improvement methods

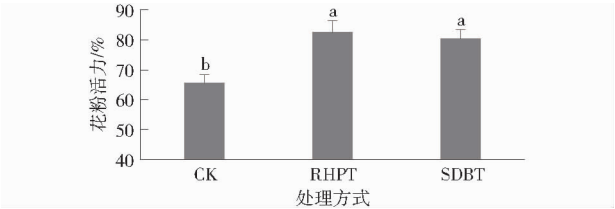


图 11 不同深耕方式下耐涝渍胁迫状态的花粉活力

Fig. 11 Pollen vitality under waterlogging stress tolerance under different deep tillage and soil improvement

7.3%、5.6%；对花粉活力影响如图 11 所示，RHPT、SDBT 处理为 82.6%、80.4%，比 CK 提高 26.1%、22.7%，与对照相比上述各指标差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)，而 RHPT 处理各项指标高于 SDBT 的处理，但两个处理间差异仍不显著。

表 4 不同深耕改土方式的玉米籽粒产量及构成

Tab. 4 Corn grain yield and composition under different deep tillage and soil improvement methods

年份	处理	穗长/cm	穗粗/cm	秃尖长/mm	百粒质量/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)
2021	CK	(16.8±0.7) ^b	(4.0±0.2) ^b	(27.6±1.7) ^a	(29.8±1.2) ^b	(9 086.2±167.6) ^b
	RHPT	(17.7±0.4) ^a	(4.4±0.1) ^a	(19.0±2.3) ^c	(32.6±0.8) ^a	(10 664.8±748.9) ^a
	SDBT	(17.6±0.5) ^a	(4.3±0.1) ^a	(22.4±1.7) ^b	(32.8±0.8) ^a	(10 205.3±773.7) ^a
2022	CK	(16.0±0.6) ^b	(3.9±0.2) ^a	(21.9±2.0) ^a	(29.4±0.5) ^b	(8 639.9±137.6) ^b
	RHPT	(16.9±0.5) ^a	(4.0±0.1) ^a	(18.4±2.2) ^b	(30.7±0.4) ^a	(9 070.2±366.3) ^{ab}
	SDBT	(17.1±0.5) ^a	(4.1±0.2) ^a	(18.2±1.7) ^b	(31.2±0.7) ^a	(9 655.3±552.3) ^a

效果由优到差顺序为：第 1 年 RHPT、SDBT、CK，第 2 年 SDBT、RHPT、CK，总体上表现秸秆深埋处理的抗涝性优于鼠洞犁处理。

3 讨论

根据白浆土理化特性，采用自主研发深耕改土犁对土壤实施机械扰动，有效破除紧实的白浆层；同步构建地下密集鼠道和铺设秸秆导渗层，增强土壤渗透性能，提升储水与排水协同效率，实现涝水地下疏导与深层调蓄，避免耕层土壤过饱和水对玉米根系胁迫，显著提升玉米抗涝性能及产量水平。调查数据显示：17.5~27.5 cm 土层深度（耕前）呈现较高土壤硬度值特征，通过深耕改土方式打破该障碍层后，在土层约 17.5 cm 及 30 cm 深度附近形成显著硬度降低区域，是因为深松改土方式打破土层 17.5 cm 附近的白浆层（或犁底层），而亚表层土壤硬度最低值出现在土层深度约 30 cm 附近，该区域与鼠洞布设位或秸秆导渗层空间分布高度吻合。深耕改土方式优化土壤“固-液-气”三相比，改善土壤通透性，增加土壤库容，减弱表层涝渍水对玉米根系的胁迫，延缓根系生理活性进程。相对于常规耕作（CK），两种深耕改土处理的根质量、根形态等关键指标都有所提高，间接促进地上部生长发育，使其光合能力、地上干物质质量等指标值有所增加，提升玉米

2.3 玉米籽粒产量及其构成

2 年试验结果（表 4）表明：RHPT、SDBT 处理的玉米籽粒产量分别为 9 070.2~10 664.8 kg/hm²、9 655.3~10 205.3 kg/hm²，比 CK 增产 5.0%~17.4%、11.8%~12.3%。2021 年的 2 种深耕改土方式与 CK 相比产量差异显著 ($P < 0.05$)，2022 年改土效果犹在，特别是 SDBT 的处理，增产 11.8%，差异仍显著 ($P < 0.05$)。RHPT、SDBT 两种深耕改土方式减缓涝渍对玉米生长胁迫，与 CK 相比穗长增长 5.3%~6.7%，穗粗增加 3.1%~9.3%，秃尖缩短 16.0%~31.1%，百粒质量增加 5.3%~12.0%，其中株高、穗长、秃尖、百粒质量差异均显著 ($P < 0.05$)。不同深耕改土方式抵御涝渍灾害增产

抗逆能力，进而提高玉米产量。从土壤物理属性及框栽长势（图 8）上间接得出，第 1 年鼠洞的完整性好，排涝效果强于秸秆深埋的处理，但随着时间的进展鼠洞持久性变差以及埋藏于亚表层秸秆部分腐解，土壤复原，硬度变大、透水系数变小，但秸秆处理缓冲性要强于其它处理，第 2 年抗涝效果仍明显。

两种深耕改土方式创新之处在于改土手段新，自主研发的鼠洞犁与以往鼠洞犁在结构设计上有所不同，常规鼠洞犁是把鼠洞锤后缀在深松钩的底部，地表水会垂直渗漏到鼠洞里，渗漏时浸泡顶部较易塌陷，影响鼠洞储水、排水能力差，而本文采用鼠洞犁，具有三角形斜式排水、多条水线渗水的全方位排水功能，可避免降雨集中入渗以及后期中耕碾压而导致鼠洞上方塌陷。鼠洞锤的长度及直径可根据土壤质地制定，如果土壤较紧实，鼠洞易成型，应适当增大鼠洞锤的直径；如果整地后土壤疏松，鼠洞锤的直径相应的减小，长度适当增加，这样利于锤体在土壤行进中被较长时间挤压，利于鼠洞造型，保证其功能的完整性，排水的鼠洞使用寿命会有所延长。农业生产上秸秆处理常采用五铧犁进行翻压，耕作阻力大，需要与之配套的大功率拖拉机牵引，翻压过程秸秆易裸落地表，影响翌年耕种，而本试验秸秆处理采用自主研发的秸秆深埋犁，利用分层耕作原理，减少了行进中的阻力，把秸秆深埋到土壤的亚表层约

30 cm 处, 秸秆地表无裸露, 同时打破犁底层, 增加土壤储水能力, 便于翌年耕种。

试验区选定于黑龙江省双鸭山市八五二农场, 土壤类型为潜育白浆土, 地势低洼易产生涝害。本试验所采取人工模拟涝渍条件下, 通过框栽架上布设挂式喷头和遮阳网, 精准调控喷水量, 更接近于涝渍灾害发生时多阴雨伴寡照的气候环境; 框栽区面积为 20 m², 模拟降雨用水量约为 2 m³, 耗时 12 h, 相当于 100 mm 的降雨量, 根据国家标准降雨量等级 (GB/T 28592—2012) 达到暴雨级别, 最大限度呈现深耕方式抵御灾害胁迫的效果。时期选择上更具有代表性, 因为玉米吐丝期, 正值花粉受精关键期, 其花粉活力直接影响到玉米的结实率, 进而影响到秃尖长度、穗粒数等产量指标, 最终影响到玉米产量^[28-29]。黑龙江玉米抽雄至吐丝期的生育阶段适逢区域降雨多发、集中时段, 该生育阶段涝渍灾害频发, 严重影响玉米扬花授粉生理过程, 导致结实率低, 籽实不饱满, 产量剧降。在玉米的吐丝阶段遭受渍涝胁迫时, 通过实施两种不同的深耕改土方式, 均能在不同程度上提升花粉的活性, 促进授粉过程, 从而提高玉米的结实率, 确保作物的稳定产量或实现增产目标。文献[30-31]研究证实玉米苗期及拔节期对涝害非常敏感, 但抽雄期如果积水 7 d 以上, 夏玉米基本绝收, 而本试验同样经 7 d 的胁迫得出的结论部分存在一定的差异, 这可能与玉米所处时期、品种、当时的气候条件及淹水时间、深度等有关。两种深耕改土后的第 1 年鼠洞处理渗透能力强于秸秆深埋处理, 第 2 年效果相反, 是由于秋整地、中耕时机械的多次碾压, 致使土体内部鼠洞倒塌, 蓄排能力变差。但两种深耕改土方式对土壤物理性质及产量影响与常规耕作相比差异明显 ($P < 0.05$), 进一步证明, 深耕改土抗涝能力长达 2 a。试验不足之处, 框栽的彩钢板内衬的塑料薄膜处的土壤采压不够紧实, 导致少部分水外渗, 但总体上不影响试验效果; 缺乏涝渍前后的土壤微生态环境监测数据, 未来将在土壤微观领域深入探索, 以明确深耕方式对抗涝渍的机理及机制。此项技术的关键点在于打破紧密的白浆层, 改善耕层土壤环境, 促进根系生长, 提

高玉米抗涝渍胁迫的能力, 进而提高玉米产量, 对于灾害严重的地区, 应在地势低洼处构建暗管或沟、渠, 做到降雨量集中时能够及时排涝。此项措施不但在亚表层构建排水网, 还构建地下储水库, 在生产中起到抗涝保墒的作用。该项技术推广应结合抗涝渍的玉米品种及喷施叶面肥、化调剂等配套使用, 确保耕作措施抗涝渍效果更高效。两种深耕改土方式都具有减缓土壤涝渍对玉米的生长胁迫, 但从耕地质量提升方面, 秸秆深埋处理后期, 秸秆分解可转化为有机质, 既实现碳元素固定, 减少碳排放, 又培肥地力^[32]。长远上看, 秸秆深埋处理要优于鼠洞犁耕作的处理, 建议该措施在东北春玉米防灾减灾中进一步应用。

4 结论

(1) 鼠洞犁 (RHPT) 和秸秆深埋犁 (SDBT) 两种深耕改土方式与常规耕作 (CK) 相比, 均能有效改善土壤耕层构造, 降低耕层土壤的硬度, 减少固相比例, 同时增加液相和气相比例, 显著提升土壤的渗透性能; 两种深耕改土方式对亚表层 (20 ~ 40 cm) 土壤的物理属性改善效果尤为显著。

(2) 针对鼠洞犁 (RHPT) 与秸秆深埋犁 (SDBT) 两种深耕改良土壤技术, 相较于传统耕作 (CK), 均能显著改善亚表层土壤结构。具体表现为耕层土壤硬度的降低, 固相率的减少以及液相和气相率的增加, 从而导致土壤渗透系数的显著提升。此外, 深耕改良技术在亚表层 (20 ~ 40 cm) 土壤的物理性质改善方面表现出更为显著的效果。

(3) RHPT、SDBT 处理与 CK 相比, 减缓涝渍对根系的胁迫, 促进玉米生长发育, 其中根干物质质量增加 11.1%、11.8%; 根长增加 26.1%、32.1%; 根体积增加 9.4%、10.7%; 根系活力提高 25.0%、28.0%; 地上部干物质质量增加 7.3%、5.6%; 花粉活力提高 26.1%、22.7%。

(4) RHPT、SDBT 与 CK 相比, 减缓涝渍对玉米 (吐丝期) 生育的胁迫, 玉米增产 5.0% ~ 17.4%、11.8% ~ 12.3%, 效果显著 ($P < 0.05$), 其中 SDBT 效果最佳, 后效长达 2 a。

参 考 文 献

[1] 李梦倩. 2021 年中国大陆涝渍灾害及对华北主要农作物影响分析 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2023.
LI Mengqian. Waterlogging in Mainland China in 2021 and its impact on major crops in North China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2023. (in Chinese)

[2] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策 [J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.
XU Yingde, PEI Jiubo, LI Shuangyi, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 495-504. (in Chinese)

[3] 乔樵, 沈善敏, 周绍权. 东北北部黑土水分状况之研究 I: 黑土水分状况的基本特征及其与成土过程的关系 [J]. 土壤学

- 报,1963,11(2):143-158.
- QIAO Qiao, SHEN Shanmin, ZHOU Shaoquan. Study on the water condition in the north of Northeast China I: moisture status of black soil and its relationship with growth process[J]. Journal of Soil Science, 1963,11(2):143-158. (in Chinese)
- [4] 郭大本,王清.三江平原沼泽湿地开垦前后下垫面水理性质变化研究[J].黑龙江水专学报,1995,2(1):1-8.
- GUO Daben, WANG Qing. Research on water physical characteristics in marshland and lowland of Sanjiang Plain[J]. J. of HLJ. Hydr. Eng. Col., 1995,2(1):1-8. (in Chinese)
- [5] 马富亮,符素华,罗广惠.东北典型黑土区坡耕地渍涝地土壤持水性和导水性研究[J].水土保持研究,2017,24(6):222-226.
- MA Fuliang, FU Suhua, LUO Guanghui. Study on soil water holding capacity and water conductivity of sloping farmland in typical black soil region of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation Research, 2017,24(6):222-226. (in Chinese)
- [6] 刘兵,朱广石,王平,等.东北农田渍涝成因和治理研究概况[J].广东农业科学,2010(11):276-278.
- LIU Bing, ZHU Guangshi, WANG Ping, et al. Research on the causes and control of farmland waterlogging in Northeast China[J]. Guangdong Agricultural Science, 2010(11):276-278. (in Chinese)
- [7] 姚章村,刘宗建.三江平原渍涝分类和不同治理阶段研讨[J].现代化农业,1993,165(4):7-9.
- [8] 任佰朝,张吉旺,董树亭,等.生育前期淹水对夏玉米冠层结构和光合特性的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2093-2103.
- REN Baizhao, ZHANG Jiawang, DONG Shuting, et al. Effect of waterlogging at early period on canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(11):2093-2103. (in Chinese)
- [9] 刘祖贵,刘战东,肖俊夫,等.淹涝胁迫对夏玉米光合特性参数及产量的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(6):41-46.
- LIU Zugui, LIU Zhandong, XIAO Junfu, et al. Effects of waterlogging stress on photosynthetic characteristic parameters and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014,33(6):41-46. (in Chinese)
- [10] 朱世蝶,袁刘正,齐红志,等.渍涝胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J].种业导刊,2024(2):7-11.
- ZHU Shidie, YUAN Liuzheng, QI Hongzhi, et al. Research progress on effects of waterlogging stress on growth and development of maize[J]. Seed Industry Guide, 2024(2):7-11. (in Chinese)
- [11] 俄有浩,马玉平.农田渍涝灾害研究进展[J].自然灾害学报,2022(4):12-30.
- E Youhao, MA Yuping. Advances in research on cropland waterlogging disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2022(4):12-30. (in Chinese)
- [12] KHUDAEV I J, KUCHKAROV J J, NORO B N, et al. The importance, methods of land leveling and analysis of equipment for their implementation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022,1076(1). DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012075.
- [13] MANSOUR N E, EISAYED A, SABRA D M, et al. Water productivity of barley crop under laser land leveling technique and minimum tillage[J]. Water Science, 2023,37(1):458-471.
- [14] 孙仕军,苏慧,焦平金,等.暗管埋深与控制排水对农田地下水埋深及排水量的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(5):135-144.
- SUN Shijun, SU Hui, JIAO Pingjin, et al. Effect of buried depth and exit control of subsurface tile on drainage and groundwater depth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023,42(5):135-144. (in Chinese)
- [15] BREVE M, SLCAGGS R, PARSONS J, et al. Using the DRAINMOD-N model to study effects of drainage system design and management on crop productivity, profitability and $\text{NO}_3\text{-N}$ losses in drainage water[J]. Agricultural Water Management, 1998,35(3):227-243.
- [16] BALUSAMY A, UDAYASOORIAN C. Effect of subsurface drainage system and amendments on soil quality parameters under waterlogged saline alkali soil[J]. International Journal of Agriculture Sciences, 2016,8(63):3568-3571.
- [17] 曾宪成,李双.腐植酸与智慧农业[J].腐植酸,2018(6):11-19.
- ZENG Xiancheng, LI Shuang. Humic acid and intelligent agriculture[J]. Fulvic Acid, 2018(6):11-19. (in Chinese)
- [18] 苏杭,翟建荣,邓苛莉,等.2,4-表油菜素内酯对甜高粱和青贮玉米幼苗耐涝性的影响[J].草地学报,2022,30(11):3140-3147.
- SU Hang, ZHAI Jianrong, DENG Keli, et al. Effects of 2,4-epibrassinolide on water-flooding resistance of sweet sorghum and silage maize[J]. Journal of Grassland, 2022,30(11):3140-3147. (in Chinese)
- [19] 张梦南,程旭学,李志红,等.三江平原建三江地下水位下降区地面形变监测、评估与预测[J].地质通报,2023,42(7):1211-1217.
- ZHANG Mengnan, CHENG Xuxue, LI Zhihong, et al. Monitoring, evaluation and prediction of ground deformation in the groundwater level drop area of Jiansanjiang area, Sanjiang Plain[J]. Geological Notification, 2023,42(7):1211-1217. (in Chinese)
- [20] 冯文嵩,项小华,阮学燕,等.贵港市覃塘区樟木镇土地综合整治现状及对策分析[J].南方自然资源,2023(3):31-34.
- FENG Wensong, XIANG Xiaohua, RUAN Xueyan, et al. Analysis on the present situation and countermeasures of land comprehensive improvement in Zhangmu Town, Qintang District, Guigang City[J]. Southern Natural Resources, 2023(3):31-34. (in Chinese)

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30 – 165.

[22] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227 – 241.
WU Kening, ZHAO Rui. Soil texture classification and its application in China[J]. Soil Science Journal, 2019, 56(1): 227 – 241. (in Chinese)

[23] 高中超, 杜春影, 孙磊, 等. 一种深松鼠洞犁: ZL2018 2 0726618. X [P]. 2018 – 11 – 30.

[24] 高中超, 刘峰, 藤险峰, 等. 秸秆深埋犁: ZL2014 2 0425414. 4 [P]. 2014 – 12 – 24.

[25] 高中超, 孙磊, 杜春影, 等. 一种模拟田间渍涝灾害的试验系统: ZL2018 2 1964227. 8 [P]. 2019 – 08 – 06.

[26] 王艳哲, 崔彦宏, 张丽华, 等. 玉米花粉活力测定方法的比较研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(3): 173 – 176.
WANG Yanzhe, CUI Yanhong, ZHANG Lihua, et al. Comparative study on methods for testing pollen viability of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(3): 173 – 176. (in Chinese)

[27] 高中超, 宋柏权, 王翠玲, 等. 不同机械深耕的改土及促进作物生长和增产效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 79 – 86.
GAO Zhongchao, SONG Baiquan, WANG Cuiling, et al. Soil amelioration by deep ploughing of different machineries and its effect on promoting crop growth and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 79 – 86. (in Chinese)

[28] 杨琴, 陈艺博, 赵文龙, 等. 增温对玉米冠根形态、生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(6): 67 – 77.
YANG Qin, CHEN Yibo, ZHAO Wenlong, et al. Effects of elevated temperature on maize crown root morphological traits, growth and yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(6): 67 – 77. (in Chinese)

[29] 高中超, 孙磊, 王丽华, 等. 黑龙江省渍涝的成因和危害及治理措施[J]. 黑龙江农业科学, 2019(11): 142 – 148.
GAO Zhongchao, SUN Lei, WANG Lihua, et al. Causes, hazards and control measures of waterlogging in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(11): 142 – 148. (in Chinese)

[30] 房稳静, 武建华, 陈松, 等. 不同生育期积水对夏玉米生长和产量的影响试验[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 616 – 618.
FANG Wenjing, WU Jianhua, CHEN Song, et al. Experiment for the impact of flood in different development stages on summer maize growth and yields[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 616 – 618. (in Chinese)

[31] 刘祖贵, 刘战东, 肖俊夫, 等. 苗期与拔节期淹涝抑制夏玉米生长发育、降低产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 44 – 52.
LIU Zugui, LIU Zhandong, XIAO Junfu, et al. Waterlogging at seedling and jointing stages inhibits growth and development, reduces yield in summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 44 – 52. (in Chinese)

[32] 胡明成, 邱子健, 王洲章, 等. 农田土壤地力提升和固碳减排协同研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(2): 275 – 286.
HU Mingcheng, QIU Zijian, WANG Zhouzhang, et al. Research progress on the synergy between enhancing farmland fertility and soil carbon sequestration and greenhouse gases emission mitigation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(2): 275 – 286. (in Chinese)