

机械化整地方式对低洼水田土壤理化性质及水稻产量影响

王秋菊^{1,2}, 焦 峰³, 韩东来⁴, 隋玉刚⁴, 杨兴玉⁴, 王雪冬⁴,
丁德会⁴, 郝明俊⁴, 刘 峰^{1*}

(1. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江八一农垦大学, 大庆 163319; 4. 黑龙江省农垦建三江管理局八五九农场, 饶河 155700)

摘 要: 低洼地是黑龙江省分布在三江平原地区的地势较低的一类耕地土壤, 由于地势低、易受渍涝影响, 土壤生产力低, 作物产量低而不稳, 提高这类土壤生产力对农业生产尤为重要。该文以低洼地典型的一类土壤沼泽土为供试土壤, 采用大田对比试验的方法, 开展旋耕、深松、深翻、深松鼠洞 4 种不同机械化整地方式对低洼水田理化性质改良效果的研究。结果表明: 与常规旋耕比, 深松、深翻机械整地可以使 0~30 cm 土层土壤含水率降低 10.03%~27.23%, 土壤透水性提高, 土壤容重增加 0.05~0.18 g/cm³、增幅为 6.60%~16.98%, 差异显著, 深松、深翻使土壤硬度提高, 总孔隙降低幅度 3.16%~11.92%, 滞水现象得到改善, 深松鼠洞机械整地效果与旋耕比差异不明显; 在排水晒田后, 土壤温度明显上升, 平均每天增加 1~2℃, 深松效果好于深翻, 土壤氮素供应强度增加; 深松整地水稻产量连年增加, 第 1 年增产 4.21%, 第 2 年增产 10.46%, 达到显著水平, 深翻对水稻产量无影响, 第 2 年有增加趋势, 差异不显著, 深松鼠洞整地第 1 年和第 2 年水稻产量与旋耕比无差异显著, 在深松鼠洞改土技术及机械研发上要进行新的改进与探讨。

关键词: 机械化; 土壤; 整地; 低洼水田; 沼泽土; 土壤物理性质; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.009

中图分类号: S343.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0070-08

王秋菊, 焦 峰, 韩东来, 隋玉刚, 杨兴玉, 王雪冬, 丁德会, 郝明俊, 刘 峰. 机械化整地方式对低洼水田土壤理化性质及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 70—77. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.009

http://www.tcsae.org

Wang Qiuju, Jiao Feng, Han Donglai, Sui Yugang, Yang Xingyu, Wang Xuedong, Ding Dehui, Hao Mingjun, Liu Feng. Impact of different mechanical soil preparation methods on physical and chemical properties of soil in low-lying paddy fields and rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 70—77. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.009 http://www.tcsae.org

0 引 言

三江平原位于黑龙江省东部, 是黑龙江、松花江和乌苏里江汇流冲积形成的低平原区, 总面积 10.89 万 km², 耕地面积 366.77 万 hm², 其中低湿耕地占 63.7%^[1]。平原区海拔为 65~80 m, 地势低洼, 土质黏重, 降水集中, 易发生涝灾, 导致大田作物大幅度减产; 另外, 收获季节土壤过湿, 机械不能作业, 经常发生丰产不丰收现象^[2]。因此, 在三江平原开发初期, 首先是通过建立大型排水渠道解决了地表水问题; 其次是通过开展深松、超深松和心土混层等技术打破滞水层, 在排除“壤中水”方面取得了一定效果^[3-4]但在降雨集中季节, 洪涝灾害仍频繁困扰农业生产。为彻底解决农田涝害, “七五”期间黑龙江省提出“以稻治涝”的低湿地治理对策, 通过推进“旱改水”大力发展水稻, 不仅粮食产量大增, 也为改善国家口粮构成做出重要贡献^[5-6]。随种稻时间推移, 一些

排水不良的低洼地块产生了新的问题, 一是由于土壤质地黏、土体冷凉、透水性差, 加之排水渠系不完善, 水田落水后土壤干湿交替过程缓慢, 难以形成犁底层, 土壤通体软黏, 机械承载力低, 影响机械收获等作业, 导致水稻在田间发生霉变、雪捂等次生灾害^[7-8]; 二是土壤长期处于还原条件, 易产生硫化氢等有毒物质危害水稻根系, 影响生育和产量^[9-10]; 三是由于这类土壤有机质多在 50 g/kg 以上, 土壤有机质在水稻生育中后期供氮过盛而导致水稻倒伏减产。改良低洼水田滞水问题刻不容缓, 改良这类土壤的目标就是要使它变硬, 提高机械承载力, 促进有机质分解, 提高土壤养分有效性。目前有关低洼水田的机械改良研究仍处于空白状态, 相关的耕整地技术也是为了保水、保肥、提高土壤养分供给、建立水田耕层为目的, 当前的耕整地主要为旋耕和翻耕, 但不同土壤上效果不同, 王秋菊等在黑土和盐化草甸土上开展深翻研究, 得出深翻在黑土上对水稻增产效果明显, 在盐化草甸土上则明显减产^[11], 说明任何耕作技术都要以土壤自身特性为前提, 因地制宜, 才能达到预期的效果。三江平原的低洼水田存在的问题, 也急需相应的耕作技术去改善这类土壤。因此, 本文针对低洼水田滞水问题, 在耕作方面根据生产上常用的旋耕机械开

收稿日期: 2019-02-13 修订日期: 2019-07-08

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFD0300502-5)

作者简介: 王秋菊, 博士, 副研究员, 从事土壤改良研究。

Email: bqjwang@126.com.

*通信作者: 刘 峰, 研究员, 从事土壤改良研究。

Email: liufengjms@163.com.

展旋耕耕作、深翻机械开展深翻耕作、根据自主研发的水田深松机械开展深松和深松鼠洞耕作技术的对比研究,明确土壤的排水状况,以期通过提高土壤的通透性,提高低洼水田土壤生产能力,为改良低洼水田提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验地点设在黑龙江省农垦建三江管理局 859 农场第 29 作业区(47°30'N、134°20'E,海拔为 65.6 m),年降雨量 550~600 mm,有效积温 2 200 ℃。

供试土壤为草甸沼泽土型水田土壤,种植水稻年限 15 a。草甸沼泽土剖面发育明显(图 1):第 1 层为黑土层,厚度约 18 cm,富含有机质,松软,大孔隙多;第 2 层为氧化还原层,厚度约 10 cm,无结构,软黏致密,由于水汽交换频繁,氧化铁大量聚集,土色呈亮黄色;第 3

层为潜育层,灰色、有斑纹,无结构,软黏,不透水;土体内未见明显犁底层。



图 1 典型草甸沼泽土剖面
Fig.1 Profile of meadow marsh soil

供试土壤化学性质如表 1 所示,0~18 cm 表层土壤有机质和全氮含量高于相同区域的其他耕地土壤^[12],向下层呈明显降低趋势。从土壤物理性质看,供试土壤土体的黏粒含量均为 40%以上,土质黏重。

表 1 供试土壤物理化学性质
Table 1 Physical and chemical characteristic of tested soil

深度 Depth/cm	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	pH 值 pH value	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	颗粒组成 Particle composition/%		
							黏粒 Clay <0.002 mm	粉粒 Silt 0.002~0.02 mm	砂粒 Sand >0.02~2 mm
0~18	58.14±3.45	3.05±0.15	0.78±0.08	19.49±1.98	6.58±0.18	0.93±0.06	44.54±2.35	41.46±1.14	15.94±1.21
>18~30	11.10±2.12	1.44±0.12	0.49±0.11	17.32±1.65	6.49±0.14	1.30±0.04	46.09±2.24	45.52±1.51	9.93±0.56
>30~50	5.31±0.56	0.54±0.08	0.39±0.05	11.40±0.67	6.72±0.08	1.30±0.03	40.80±1.49	48.16±2.32	9.36±0.83

1.2 试验设计

试验于 2016 年秋季开始实施,每年水稻收获后在同一处理区进行相同耕作处理,试验设以下 4 个处理。

1) 旋耕(CK):为对照处理,采用旋耕机(山东潍坊象力机械有限公司生产,型号:GAN200)进行旋耕处理(图 2a),耕深 10~12 cm,旋耕 1~2 遍,土块均匀,翌年水泡田整地。

2) 深松(DS):采用自主研发的水田深松犁(图 2b)作业,该深松犁为 5 个深松铲双行排列,前 3 后 2,前后相间,铲间距 50 cm,每条深松沟距离 25 cm,作业深度 30~35 cm。深松前旋耕 1~2 遍,土块均匀,然后

深松,翌年水泡田整地。

3) 深翻(DP):采用自主研发的水田深耕犁(图 2c)作业,耕深 20~25 cm。该犁有 2 组犁铧组成,单铧耕幅 46 cm。深翻后旋耕 1~2 遍,土块均匀,然后深松,翌年水泡田整地。

4) 深松鼠洞深耕(MH):采用自主研发的水田深松鼠洞犁(图 2d)作业,该犁由两个深松铲组成,铲间距离为 100 cm,在深松铲尖后面用铁链链接 1 个直径 8 cm 的圆锥钢体,作业时可在深松沟底部形成孔洞,深松深度 40~45 cm。深松前旋耕 1~2 遍,土块均匀,然后深松,翌年水泡田整地。



注: CK、DS、DP、MH 分别代表旋耕、深松、深翻和深松鼠洞,下同。
Note: CK, DS, DP, MH mean the rotary tillage, deep scafification, deep plowing and mouse hole, respectively, the same as below.

图 2 田间机械作业
Fig.2 Operation of mechanical in field

试验设 3 次重复,每小区宽 15 m,长 30 m,宽度根据机械作业幅度适当微调,小区面积约 450 m²。水稻于 2017 年 4 月 10 日播种,5 月 20 日移栽到试验区,9 月

30 日收获,收获后秸秆移出田块。人工插秧,插秧规格行距 30 cm,株距 10 cm,每穴插 3 株,水稻品种龙粳 31。试验区灌排系统设施完善,能及时灌水和排出田面水。

试验区水分管理一致,采用浅-湿-干间歇灌溉模式。试验区施肥一致, N、P₂O₅、K₂O 肥施用量分别为 120、60、60 kg/hm²。其中 N 按照基肥、返青肥、穗肥比例 4:3:3 施肥;钾肥按基肥、穗肥比例 3:2 施肥;磷肥作为基肥一次性施入。2018 年管理同 2017 年一致。试验区 10 a 平均降雨量 580 mm,有效积温 2 210 °C^[13]。

1.3 测定项目与方法

土壤取样方法:土壤取样时间为 2017 年 10 月份,水稻收获前取样。化学样品取样,耕层土壤化学样品 0~10、>10~20、>20~30 cm 土层土壤每个处理按 S 型取样 5 点,混合后按四分法留 500 g 左右土样带回实验室备用。原状土用装有 100 cm³ 环刀的取土器采取土壤,每小区取 3 次重复。取样层次为 5~10、20~25、30~35 cm 土层。深松区和深松鼠洞区取样位置为深松犁铧经过之处,按照土壤不同层次取样,对照区和深翻区在试验区随机选出有代表性的位置取样。

化学指标分析方法:土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮含量测定采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用 HF-硝酸混合消煮,钼锑蓝比色法,全钾含量采用 HF-硝酸混合消煮,火焰光度法测定;碱解氮采用扩散吸收法测定;土壤 pH 值采用土壤 pH 计测定^[14-15]。

物理指标测定方法:土壤容重采用 100 cm³ 环刀法测定、土壤自然含水率采用烘干法测定;土壤饱和导水率采用 DIK-4012 透水性测定仪测定;土壤通气系数采用 DIK-5001 透气性测定仪测定^[16];土壤硬度采用圆锥角 30°、底面积 2 cm² 的贯入式土壤硬度仪田间现场测定;土壤质地采用 MS-2000 激光粒度仪测定^[17];土壤总孔隙度采用 100 cm³ 环刀法测定^[18];孔隙组成比,先用压力模测定不同水吸力下的土壤体积含水量,然后计算出孔隙当量直径,根据不同当量直径间的体积含水量差值计算出孔隙组成,最后计算出各组空隙占总孔隙度的百分数。土壤孔隙当量直径计算公式如下

$$d=h/3$$

式中 d 为孔隙当量直径,mm; h 为土壤水吸力,cm (以 H₂O 计)。

本文将孔隙当量直径 $d>0.05$ mm 的孔隙定义为大孔隙;当量直径 d 在 0.05~0.000 2 mm 的孔隙定义为中孔隙;当量直径小于 0.000 2 mm 的孔隙定义为小孔隙。

土壤水分变化动态采用 6050X3K5B-MiniTrase Kit 土壤水分监测仪测定,测定深度为 5~10 cm,从 2017 年 6 月 23 日—6 月 29 日水稻撤水晒田期逐日测定土壤水分变化,测定时间为每日上午 9—10 时;同时采用 MicroLite II-U 盘式土壤温度记录仪监测土壤温度日变化,并计算出日平均温度。

产量测定:水稻籽实收获采用久保田水稻联合收割机进行全区实收,计算水稻单位面积产量。

1.4 数据分析

所有测定数据采用 Microsoft Excel 软件进行输入和作图,数据显著性分析采用 DPS 6.85 进行 LSD 分析方法进行试验数据的显著性分析, $P<0.05$ 的显著性水平下认为均值具有显著性差异, $P<0.01$ 的显著性水平下认为

均值具有极显著性差异。

2 结果与分析

2.1 机械化整地方式对水稻产量的影响

表 2 为不同机械处理的水稻产量。从表 2 看出,连续 2 年调查水稻产量,深松比对照旋耕处理分别增产 4.21%、10.46%,其中第 2 年达到差异显著水平;深翻处理第 1 年与对照相比无差异,第 2 年比对照增产 5.15%,差异不显著;深松鼠洞处理与旋耕对照相比第 1 年减产 6.48%,第 2 年有增产趋势,比对照增产 2.38%,连续 2 a 差异不显著。

表 2 不同机械化处理对水稻产量影响

Table 2 Effect of different mechanical operations on rice yield

处理 Treatment	第 1 年 The first year		第 2 年 The second year	
	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产 Increased output/%	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产 Increased output/%
旋耕 CK	9 504.75aA	—	8 867.61bA	—
深松 DS	9 904.95aA	4.21	9 795.06aA	10.46
深翻 DP	9 519.30aA	0.16	9 324.66abA	5.15
深松鼠洞 MH	8 888.54aA	-6.48	9 078.58bA	2.38

注:同一列不同小写字母、大写字母分别代表在 0.05 和 0.01 水平上差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters and capital letters in the same column represent significant differences at the level of 0.05 and 0.01 respectively, the same below.

2.2 对土壤通气、透水、容重、硬度等性质影响

表 3 为 2017 年水稻收获时土壤水分、容重、通气性和透水性调查结果。从表 3 看出,0~10 cm 表层土壤水分,深松区和深翻区分别比对照降低 10.50%和 10.03%,>20~30 cm 土层,深松区比对照低 27.23%;深翻区和深松鼠洞区分别低 13.48%和 14.29%,达到差异显著或极显著水平。

表 3 不同机械处理土壤物理性质

Table 3 Soil physical characteristics of different mechanical operation

土层 Soil layer	处理 Treatment	自然含水率 Natural water content/ %	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	饱和透水系数 Saturated hydraulic coefficient/ (10 ⁻² cm·s ⁻¹)	通气系数 Permeability coefficient/ (10 ⁻² cm·s ⁻¹)
0~10 cm	对照	47.43abA	1.06bB	56.32aA	5.726aA
	深松	42.45cB	1.13bAB	58.45aA	5.325aA
	深翻	42.67bcAB	1.24aA	10.11aA	0.282aA
	深松鼠洞	49.31aA	1.06bB	43.63aA	1.077aA
>20~ 30 cm	对照	50.74aA	1.07bA	0.004aA	0.028aA
	深松	36.87cC	1.15aA	0.15aA	0.054aA
	深翻	43.90bAB	1.19aA	0.190aA	1.575aA
	深松鼠洞	43.49bB	1.17aA	0.123aA	0.612aA
>30~ 40 cm	对照	43.99aA	1.16aA	0.041bA	0.029aA
	深松	41.37aA	1.21aA	0.153aA	0.235aA
	深翻	42.45aA	1.20aA	0.012bA	0.020aA
	深松鼠洞	36.08bA	1.20aA	0.066abA	0.002aA

从土壤容重看,深翻和深松可增加各层土壤,在 0~10 cm 土层与对照相比分别增加 0.18 和 0.05 g/cm³,增加比例为 16.98%和 6.60%,深翻土壤容重与对照相比差异达到显著性水平;在 20~30 cm 土层,与旋耕对照相比

分别增加 0.12 和 0.08 g/cm³, 增加比例为 11.21% 和 7.48%, 差异显著; 在 30~40 cm 土层各处理土壤容重差异不显著。深松鼠洞处理各层不规律。不同处理对土壤通气性和透水性影响不明显, 深松对深层土壤的通气、透水性有一定的提高作用。

从土壤硬度(图 3)调查结果看出, 由于土壤水分降低, 土壤硬度有所增加, 其中深松土区土壤硬度高于旋耕对照及其他处理, 在 >20~30 cm 土层可达到 1.5 MPa, 深翻和深松鼠洞处理土壤硬度与对照间差异不明显。

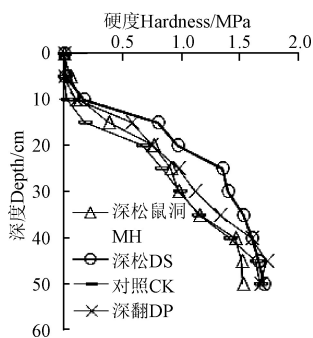


图 3 不同机械化处理对土壤硬度的影响

Fig.3 Effect of different mechanical operations on soil hardness

2.3 对土壤孔隙的影响

2017 年土壤孔隙调查结果如表 4 所示。总体来看, 供试土壤以小孔隙为主, 当量直径 <0.000 2 mm 小孔隙占土壤总孔隙度的 76.18%~88.48%, 大孔隙和中孔隙分别仅占总孔隙度的 0.17%~6.01% 和 10.99%~20.06%, 这样的孔隙组成特点是土壤排水性不良的内因。比较不同处理土壤总孔隙度变化看出, 0~10、20~30 cm 土层, 深松区分别比对照降低 3.97% 和 11.92%, 深翻区分别降低 3.16% 和 4.81%; 而深松鼠洞区 0~10 cm 土层与对照差异不显著, 20~30 cm 土层降低显著, 30~40 cm 土层差异不显著。结合自然土壤含水率看出, 凡是孔隙度降低的处理土壤含水率均低, 表明土壤在干燥收缩是导致土壤孔隙度降低的重要原因。

表 4 不同机械化处理土壤总孔隙度及不同孔隙比例

Table 4 Soil total pore and pore ratio of different mechanical operations

土层 Soil layer	处理 Treatment	孔隙比例 Porosity ratio/%			总孔隙 Total pore/%
		大孔隙 Large pore >0.05 mm	中孔隙 Middle pore 0.000 2~ 0.05 mm	小孔隙 Little pore <0.000 2 mm	
0~10 cm	对照	6.01aA	17.80abA	76.18bA	56.56aA
	深松	3.33abA	17.15abA	79.54abA	52.59bB
	深翻	3.09bA	15.82bA	81.10aA	53.40bB
	深松鼠洞	2.67bA	20.06aA	77.27bA	56.28aA
>20~30 cm	对照	4.84aA	17.90aA	77.25bA	55.74aA
	深松	1.07bA	15.36bA	83.60aA	43.82cC
	深翻	2.58abA	19.41aA	78.03bA	51.56bB
	深松鼠洞	0.71bA	17.63aA	81.67aA	52.53bB
>30~40 cm	对照	2.08abA	19.23aA	78.71aA	51.53aA
	深松	4.09aA	18.71aAB	77.23aA	48.22aA
	深翻	0.68abA	15.91aAB	83.41aA	51.73aA
	深松鼠洞	0.17bA	10.99bB	88.84aA	47.50aA

2.4 晒田期土壤水温变化动态

为控制水稻无效分蘖, 2017 年 6 月 22 日于盛期开始排水晒田。6 月 23 日~6 月 29 日土壤水分、温度连续监测结果如图 4 所示。从图 4 看出, 土壤含水量随晒田天数增加而降低。其中深松区排水效果最佳, 从排水后第 2 天开始土壤水分明显低于其他各处理, 并且在整个晒田期间土壤水分始终处于最低状态; 深翻区土壤水分下降也较快, 但深松鼠洞处理和旋耕对照区差异不大, 直到晒田结束, 土壤含水量仍较高。土壤温度与土壤含水量相反, 深松土壤温度最高, 平均每天比旋耕对照处理高 1~2 °C; 深翻对土壤温度也有一定的提高作用, 深松鼠洞对土壤温度影响不明显。

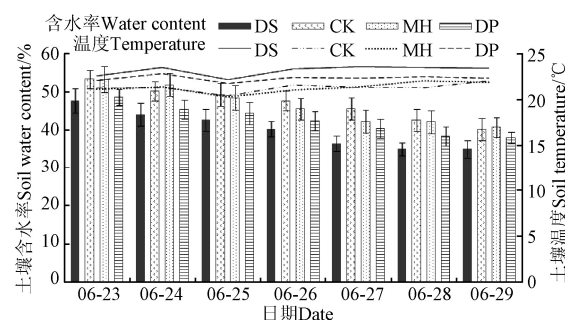


图 4 不同机械处理土壤水温动态变化

Fig.4 Dynamic change of soil water content and temperature of different mechanical operations

2.5 对土壤有机质和氮素影响

表 5 是晒田期土壤氮素调查结果, 从表 5 看出, 由于深翻将一部分下层瘠薄土壤混入到耕层中, 因此深翻区 0~10 cm 土层土壤有机质、全氮和碱解氮含量均低于对照区, 差异不显著, 其他处理与旋耕对照差异不显著。从氮素释放强度看, 各层土壤以深松区处理土壤氮素释放强度最高。

表 5 不同机械处理土壤养分变化

Table 5 Soil nutrient change of different mechanical operation

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	氮素释放强度 Nitrogen release strength/%
0~10	对照	64.65aA	3.22aA	226.35abA	7.03abA
	深松	69.26aA	3.41aA	276.36aA	8.10aA
	深翻	53.40bA	3.02aA	187.92bA	6.22bA
	深松鼠洞	63.70aA	3.31aA	229.77abA	6.94abA
>20~30	对照	69.40aA	3.93aA	271.10aA	6.90abA
	深松	63.68aA	3.86aA	291.49aA	7.55aA
	深翻	61.40aA	3.57aA	207.66bA	5.82bA
	深松鼠洞	64.80aA	3.38aA	228.76abA	6.77abA
>30~40	对照	12.74aA	0.88bB	61.85bB	7.03aA
	深松	15.87aA	1.61 aA	116.47aA	7.23aA
	深翻	13.10aA	1.78 aA	97.90abA	5.50bB
	深松鼠洞	12.80aA	1.02abA	75.21bAB	7.37aA

3 讨 论

三江平原属于低平原, 地势低、土质黏重、透水性低,

经常受涝害威胁,旱田作物产量低而不稳^[19]。改为水田可以充分发挥土壤自身的保水性能,趋利避害。但土质黏重也影响土壤气体交换,不利于水稻生长发育^[20-22],及土壤微生物区系组成和微生物活性^[23-25];长期滞水会导致土壤氧化还原电位降低,产生的有毒物质危害水稻生育;高产稻田犁底层土壤透水系数指标为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s、24 h 减水深指标为 1.5~2.0 cm,水分的渗透有利于水稻根系获得生长所需要的氧分子^[26]。水田的犁底层是承载机械行走的基础^[27-28],供试土壤在 0~30 cm 土层硬度小于 1 MPa,表层硬度接近 0,即使种植水稻多年也无犁底层形成,造成机械作业困难,降低了机械化作业水平;日本研究认为高产稻田土壤剖面中要有人为形成的犁底层,具有较高的土壤硬度,一般犁底层厚度 10~12 cm,硬度要达到 2~2.5 MPa 是理想稻田犁底层的厚度和硬度^[29]。本研究中,深松和深翻处理增加土壤容重、增加硬度效果明显,对于提高土壤承载机械的能力,提高土壤通气、透水性、在浅-湿-干间歇灌溉模式下,促进土壤内部水分下渗、降低土体内含水量,对增强土壤硬化有一定作用。

关于深松、深翻对土壤的影响,在旱田上大量研究结果认为可以降低耕层以下土层土壤容重、硬度,提高土壤孔隙^[30-31],我们课题在水田黑土上研究也得出可以降低犁底层硬度^[11,32],稻麦轮作区对犁底层厚的水田土壤上深松,同样得出可降低犁底层硬度^[33],这些研究与本文并不矛盾,大量研究证实,耕层土壤容重一般为 1.1~1.3 g/cm³ 是最适合作物生长的范围,高于或低于这个范围都不利于作物生长^[34-35]。同样的耕作技术在不同的土壤上表现的效果不同。旱田土壤随着长期耕作,会在耕层下形成坚硬的犁底层,一般容重超过 1.5 g/cm³,硬度在 3 MPa 以上,导致作物根系不能下扎,生存空间变小,影响作物正常生长,如白浆土的白浆层容重超过 1.5 g/cm³,就是作物生长的障碍土层^[36],还有黑土、黑钙土都会因长期浅耕导致犁底层变硬和增厚^[37-38],深松、深翻都是有效的打破犁底层的耕作方式,降低土壤硬度,提高通透性,黑土老稻田由于犁底层坚硬也适合每 2~3 年进行深松或深翻一次,但盐化草甸土不适合深翻,会导致耕层土壤盐离子增加,使水稻生长受阻^[11]。有些砂质稻田或漏水稻田不适合深耕作业,深耕易造成土壤漏水、漏肥^[29]。本文的沼泽土深松 30~40 cm,在土壤中每个 25 cm 宽度会形成 1 个深松沟,当水田排水晒田时,田面水在水平方向排到沟渠后,土体内部的水分会通过深松沟向下入渗到距地表 30~40 cm 的位置,上层土壤会很快达到干燥状态,试验中调查也发现深松处理 0~30 cm 土层在秋季干燥状态时土壤含水量明显低于对照,长期干湿交替有利于这类土壤硬度增加,容重增加,使这类水田不良的物理性质得到改善,向着适合作物生长的条件转变。深松和深翻处理晒田后均可迅速降低土壤水分,提高地温 1~2 °C,有利于土壤微生物活动,促进土壤养分矿化,对于改善土壤供氮能力,提高水稻产量有重要作用。连续 2 a 深松,可提高水稻产量 4.21%~

10.46%;深翻虽然在改良低湿土壤不良理化性质方面有一定效果,但短期内效果不明显,与水田黑土或盐化草甸土深翻效果均不一致^[11-32],可能与深翻导致耕层土壤肥力降低有一定关系。深松鼠洞处理对土壤理化性质没有明显影响,与作业机械深松铲间距过宽,不能使土壤通透性得到有效提高、土壤排水效果差有关;另外,水田土壤由于机械搅浆整地,土粒的机械破碎和下移过程会使机械作业形成的大孔洞被土粒回填,形成的孔洞很快恢复原土壤状态,造成改土效果不明显,深松鼠洞技术应在机械作业间距上改变。利用机械耕作改良低湿土壤所需成本低于埋设暗管等的工程排水技术,且便于实施^[39]。因此,应该根据土壤的特性选择适合的改土技术,才能达到事半功倍的效果。

三江平原低湿地水田土壤有机质丰富,潜在肥力高,但养分释放缓慢。因此改善土壤排水性对于活化土壤养分有重要意义^[40-41]。随气温升高,养分释放速度逐渐增加,在水稻生育后期易出现氮素供应过剩,可能招致水稻后期生长过旺,降低食味和产量^[42],因此,在改良这类土壤的同时也要关注施肥的调整。

4 结 论

在三江平原地区的低洼水田上,深耕可改良这土壤的软、黏、滞、冷凉、有机质分解慢等不良理化性质,且不同机械化深耕技术改土效果不同。

深松改土使土壤向下透水特性得到提高,土壤容重、硬度升高,增强土壤的机械承载能力,在排水晒田后,土壤温度明显上升,氮素供应强度增加,水稻产量连年增加,增产 4.21%~10.46%。深翻也可改善土壤不良理化性质,但效果不如深松明显,且深翻会导致上层土壤肥力降低,水稻产量没有得到提高,在黑土层薄的土壤上深翻应慎重。深松鼠洞对低洼水田改良效果不明显,在深松鼠洞改土技术及机械研发上要进行新的探讨。

【参 考 文 献】

- [1] 姜秋香,付强,王子龙,等. 三江平原水土资源空间匹配格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 270-278.
Jiang Qiuxiang, Fu Qiang, Wang Zilong, et al. Spatial matching patterns of land and water resources in Sanjiang plain[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 270-278. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵魁义,姜彦景,胡金明,等. 三江平原湿地生态环境受威胁现状及其保育研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 790-796.
Zhao Kuiyi, Lou Yanjing, Hu Jinming, et al. A study of current status and conservation of threatened wetland ecological environment in Sanjiang Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 790-796. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘彦随,甘红,张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局[J]. 地理学报, 2006, 61(8): 847-854.
Liu Yansui, Gan Hong, Zhang Fugang. Analysis of the

- matching patterns of land and water resources in northeast China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 847—854. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孟庆英, 张春峰, 贾会彬, 等. 不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 552—559.
- Meng Qingying, Zhang Chunfeng, Jia Huibin, et al. Effects of mechanical soil amelioration method on physical properties of and enzyme activity in planosol[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 552—559. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张守金, 王学农, 袁斌. “以稻治涝”是近期解决三江平原渍涝的好办法[J]. *黑龙江水利科技*, 1988(2): 16—17.
- Zhang Shoujin, Wang Xuenong, Yuan Bin. “Rice for Waterlogging” is the good way to solve the waterlogging of Sanjiang Plain[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 1988(2): 16—17. (in Chinese with English abstract)
- [6] 程思顺, 黄润哲, 李芳. 以稻治涝, 以稻致富[J]. *黑龙江水利科技*, 1998(1): 28—30.
- Cheng Sishun, Huang Runzhe, Li Fang. Using rice to govern waterlogging and to become rich[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 1998(1): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [7] Oster J D, Frenkel H. The chemistry of the reclamation of sodic soils with gypsum and lime[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(1): 41—45.
- [8] Oster J D, Grattan S R. Drainage water reuse[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2002, 16(4): 297—310.
- [9] 陆建建. 湿地生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 夏贵菊, 何彤慧, 于骥, 等. 银川平原草甸湿地盐土及其盐分分布特征[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 785—792.
- Xia Guiju, He Tonghui, Yu Ji, et al. Salt profile distributions of meadow wetland in Yinchuan Plain[J]. *Soils*, 2016, 48(4): 785—792. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 盐化草甸土和黑土型水田土壤连续深耕改土效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 152—158.
- Wang Qiuju, Liu Feng, Jiao Feng, et al. Effect on improving mollisol paddy soil and saline meadow soil by continuous deep ploughing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(22): 152—158. (in Chinese with English abstract)
- [12] 黑龙江省土地管理局, 黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [13] 黑龙江省统计局. 黑龙江省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007—2017.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30—165.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [16] 翁德衡. 土壤物理性测定法[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1979.
- [17] 杨金玲, 张甘霖, 李德成, 等. 激光法与湿筛-吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地的确定[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 772—780.
- Yang Jinling, Zhang Ganlin, Li Decheng, et al. Relationships of soil particle size distribution between sieve-pipette and laser diffraction methods[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 772—780. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘孝义, 依艳丽. 土壤物理学基础及其研究法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998.
- [19] 何琰. 中国三江平原[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2000.
- [20] 龚子同, 张效朴. 我国水稻土资源特点及低产水稻土的增产潜力[J]. *农业现代化研究*, 1988(3): 33—36.
- Gong Zitong, Zhang Xiaopu. The characteristics of our country paddy soil resources and potential of low yield paddy soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 1988(3): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张琳, 张凤荣, 姜广辉, 等. 我国中低产田改造的粮食增产潜力与粮食安全保障[J]. *农业现代化研究*, 2005, 26(1): 22—25.
- Zhang Lin, Zhang Fengrong, Jiang Guanghui, et al. Potential improvement of medium low yielded farmland and guarantee of food safety in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(1): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘占军, 艾超, 徐新朋. 低产水稻土改良与管理研究策略[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 509—516.
- Liu Zhanjun, Ai Chao, Xu Xinpeng. Research strategy of reclamation and management for low-yield rice paddy soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 509—516. (in Chinese with English abstract)
- [23] Boehm M J, Wu T, Stone A G, et al. Cross polarized magic-angle spinning ^{13}C nuclear magnetic resonance spectroscopic characterization of soil organic matter relative to culturable bacterial species composition and sustained biological control of pythium root rot[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63: 162—168.
- [24] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 240—246.
- Tang Hong, Shen Jianlin, Zhang Yangzhu, et al. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 240—246. (in Chinese with English abstract)
- [25] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 113—119.
- Hou Cuicui, Song Changchun, Li Yingchen, et al. Light fractions of soil organic carbon and microbial activity

- dynamics in marshes under different water conditions[J]. China Environmental Science, 2012, 32(1): 113—119. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [27] 周卫. 低产水稻土改良与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [28] 陈溢, 郑亭, 樊高琼, 等. 不同土壤水分条件下拖拉机行走对四川丘陵旱地土壤特性及小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 147—151.
Chen Yi, Zheng Ting, Fan Gaoqiong, et al. Effects of tractor traffic on soil properties and wheat growth in sichuan hilly areas under different soil moisture content[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 147—151. (in Chinese with English abstract)
- [29] 川口桂三郎编, 汲惠吉译. 水田土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- [30] 何鑫. 不同耕作方式对农田黑土理化性质及玉米叶片 PS II 功能的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
He Xin. Effects of Different Tillage on Physicochemical Properties of Farmland Mollisol and PS II Function of Maize Leaves[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [31] 宋涛. 耕作及秸秆还田对土壤蓄水能力及春玉米水分利用效率的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
Song Tao. The Effect of Tillage and Straw Application on Soil Water and Water Use Efficiency of Spring Maize[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王秋菊, 高中超, 张劲松, 等. 黑土型稻田连续深耕改善土壤理化性质提高水稻产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 126—132.
Wang Qiuju, Gao Zhongchao, Zhang Jinsong, et al. Improvement of soil physical and chemical properties and rice yield by continuous deep ploughing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(9): 126—132. (in Chinese with English abstract)
- [33] 葛双洋. 水稻土深松对土壤物理性质及小麦生长影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
Ge Shuangyang. Effects of Subsoiling on Paddy Soil Physical Properties and Growth of Wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [34] 曹立为. 耕层深度及土壤容重对大豆生长发育和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
Cao Liwei. The Effect of Topsoil Depth and Bulk Density on Soybean Growth and Yield[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王加旭. 关中农田土壤物理质量退化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Wang Jiaxu. Soil Physical Quality Degradation Characteristics in the Guanzhong Farmland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [36] 朱宝国, 张春峰, 贾会彬, 等. 深翻结合心土与不同改土物料混合改良白浆土的效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 107—114.
Zhu Baoguo, Zhang Chunfeng, Jia Huibin, et al. Improving effect of planosol by deep tillage combined with subsoil mixed with ameliorative materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 107—114. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019[2019-06-18] DOI:10.11766/trxb201902280624.
Wang Yuekai, Guo Zichun, Zhang Zhongbin, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil (vertisol)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019[2019-06-18], DOI:10.11766/trxb201902280624. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张薇. 不同耕作与施肥对黑钙土理化性状的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
Zhang Wei. Effects of Tillage and Fertilization on Physical and Chemical Properties of Chernozem[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王秋菊, 刘峰, 常本超, 等. 三江平原低湿地水田土壤特性及暗管排水效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 138—143.
Wang Qiuju, Liu Feng, Chang Benchao, et al. Characteristics of paddy soil and the effect of the underground pipe drainage in Sanjiang Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 138—143. (in Chinese with English abstract)
- [40] 古汉虎, 向万胜, 李玲. 湿地农田低产土壤改良利用研究[J]. 长江流域资源与环境, 1997(11): 334—339.
Gu Hanhu, Xiang Wansheng, Li Ling. A study on wetland low-yield soil and its improvement[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1997(11): 334—339. (in Chinese with English abstract)
- [41] 李凯, 窦森, 张庆联, 等. 暗管排水技术及其在苏打盐碱土改良上的应用[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(1): 41—43.
Li Kai, Dou Sen, Zhang Qinglian, et al. Subsurface pipe drainage technology and its application on improvement of soda-saline soil[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2012, 37(1): 41—43. (in Chinese with English abstract)
- [42] 王秋菊. 黑龙江地区土壤肥力和积温对水稻产量、品质影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
Wang Qiuju. Effect of Soil Fertility and Temperature on Rice Yield and Quality in Heilongjiang Area[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)

Impact of different mechanical soil preparation methods on physical and chemical properties of soil in low-lying paddy fields and rice yield

Wang Qiuju^{1,2}, Jiao Feng³, Han Donglai⁴, Sui Yugang⁴, Yang Xingyu⁴,
Wang Xuedong⁴, Ding Dehui⁴, Hao Mingjun⁴, Liu Feng^{1*}

(1. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China;

2. Key Laboratory of Heilongjiang Soil Environment and Plant Nutrient, Harbin 150086, China; 3. Heilongjiang Bayi

Agricultural University, Daqing, 163319, China; 4. The 859 Farm of Jiansanjiang Management Bureau, Heilongjiang Province Agricultural Reclamation Administration, Raohe 155700, China)

Abstract: Located in the east of Heilongjiang Province, the Sanjiang Plain is an alluvial low plain formed by the confluence of Heilongjiang River, Songhua River and Nen River, and covers a total area of 108 900 km², with 3 667 700 hm² of cultivated area, in which the low-lying wet cultivated land accounts for 63.7%. The low-lying wet cultivated land generally features heavy soil and frequent waterlogging disaster, resulting in dramatic production reduction. In the harvest season, the soil is too wet to cause machinery operation unavailable, resulting in generally "high yield not bumper harvest". Which due to the following three reasons. First, the drying and wetting alternation process of soil after the water falls is slow and it is difficult to form a plough pan due to heavy clay soil, poor drainage property of soil body, and imperfect drainage channel system. The entire soil body is soft and sticky and has a low mechanical bearing capacity, which is bad for field drying and meanwhile impacts the mechanical harvest, and other operations, causing rice mildewed and snow-clad in the field, and other secondary disasters; second, the soil is in the reducing condition for a long term, so it easily generates hydrogen sulfide, and other poisoning substances to harm the rice root system; third, such kind of soil organic matters are generally 50g/kg above, so at the early stage, the soil is cold and stiffen, and the seedlings don't spring up. While at the middle and late growth stage, lodging is always caused to reduce production due to excessive soil nitrogen supply along with the decomposition of soil organic matters. It is extremely urgent to improve the issue of stagnant water in the low-lying wet soil. We took the boggy soil in the Sanjiang Plain as the test soil, and conducted field comparison experiment including the rotary tillage, deep scarification, deep plowing, mouse hole four treatments in 2017 and 2018, and studied the improvement effect of different mechanical soil preparation methods on physical and chemical properties and rice yield of the low-lying paddy field. The results show that the mechanical soil preparation methods of deep scarification and deep plowing can achieve the following: the soil water cut in 0-30 cm soil layer reduces by 10.03%-27.23%, the soil drainage property improves, the soil volume weight increase by 0.05-0.18 g/cm³, increasing degree is 6.60%-16.98%, the hardness rises, and the total pore space decrease by 3.16%-11.92%. While the mouse-hole effect is not obvious; after water drainage and field drying, the soil temperature rises significantly on an average of 1-2 °C every day. The effect of deep scarification is better than that of deep plowing, and the nitrogen supply intensity increases; the rice production by deep scarification increases year on year, achieving a significant level, namely, increasing by 4.21% in the 1st year and 10.46% in the 2nd year. While deep plowing generates no impact on the rice production, the rice production shows an increase trend in the 2nd year but the effect is not obvious. As for the mouse-hole, the rice production and contrast ratio in the 1st year and the 2nd year show no significant difference. So the new improvement and discussion is required on the mouse-hole soil improvement technology and machinery research & development.

Keywords: mechanization; soils; soil preparation; low-lying paddy; boggy soil; physical property of soil; production