

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.024

蒋发辉, 高磊, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响. 土壤, 2020, 52(3): 588–596.

粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响^①

蒋发辉^{1,2}, 高磊¹, 韦本辉³, 李录久⁴, 彭新华^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 广西农业科学院经济作物研究所, 南宁 530007; 4 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031)

摘要: 为改善红壤板结状况, 缓解红壤区季节性干旱对作物的胁迫, 本研究在江西省选择发育于第四纪红黏土的典型红壤设置传统旋耕 15 cm(RT)和粉垄耕作 20 cm(FL20)、30 cm(FL30)、40 cm(FL40)等 4 种耕作处理, 通过监测土壤耕层厚度、容重、水分、养分的变化及红薯产量, 以期揭示粉垄耕作对红壤理化性质和红薯产量的影响。结果表明: 与 RT 处理相比, FL30 和 FL40 处理显著增加了耕层厚度, 降低了土壤容重, 提高了土壤饱和导水率; 粉垄耕作显著提高了降雨后土壤水分下渗速度、下渗量、下渗深度以及耕层土壤储水量, 并导致干旱期土壤含水量的增幅大于湿润期。粉垄耕作导致土壤氮、磷等养分下移, 形成“上减下增”的分布格局, 与 RT 处理(23.10 t/hm²)相比, 粉垄耕作 20~40 cm(FL20、FL30 和 FL40)处理还提高了鲜薯产量 89%~117%。因此, 粉垄耕作显著改善了旱地红壤物理性质, 改变了土壤养分在耕层中的分布, 并有效调蓄了土壤水分合理分配, 产能提升效果显著。

关键词: 土壤物理性质; 粉垄耕作; 土壤储水量; 红薯产量

中图分类号: S341; S152 文献标志码: A

Impact of Fenlong Tillage on Soil Physicochemical Properties and Sweet Potato Yield in Dryland Red Soil

JIANG Fahui^{1,2}, GAO Lei¹, WEI Benhui³, LI Lujia⁴, PENG Xinghua^{1*}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*; 4 *Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: To improve clayey soil structure and alleviate seasonal drought stress in the red soil region of south China, this study investigated the impacts of different tillage treatments on plough layer thickness, soil bulk density, moisture, nutrients and sweet potato yield. The tillage treatments included: conventional rotary tillage to 15 cm depth (RT) as a control, Fenlong tillage to 20 cm (FL20), 30 cm (FL30) and 40 cm (FL40) depths. The results showed, compared with RT, FL30 and FL40 treatments significantly increased the thickness of plough layer, reduced soil bulk density and enhanced saturated hydraulic conductivity. Fenlong tillage increased the rate, amount and depth of water infiltration, as consequently enhanced soil water storage which was greater in the dry season than in the wet season. Fenlong tillage further redistributed nutrients down to deep soil layer, causing “less content of nutrients in the surface layer but higher content in the deep layer”. Therefore, compared to RT, Fenlong tillage promoted sweet potato yield by 89%–117%. In conclusion, Fenlong tillage can remediate soil physical properties, redistribute soil nutrients in the plough layer, increase soil water storage, and then enhance crop yield significantly.

Key words: Soil physical properties; Fenlong tillage; Soil water storage; Sweet potato yield

我国红壤区域总面积 218 万 km², 占全国耕地总面积的 1/5, 是我国最主要的土壤资源之一^[1]。但我国红壤长期存在“酸、瘦、黏、板、瘠”等土壤属性障碍问题, 同时也面临季节性干旱对作物生长的胁

迫, 加之过度集约化不合理的开发利用, 造成红壤耕层结构变差, 加剧水土流失及作物产量低且不稳等问题^[1-4]。这些问题严重威胁着我国红壤区农业的可持续发展。耕作措施可以改变土壤结构, 影响土壤养分

①基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112-05)、江苏省重点研发计划项目(BE2017385)和国家自然科学基金项目(41725004; 41571130053)资助。

* 通讯作者(xhpeng@issas.ac.cn)

作者简介: 蒋发辉(1996—), 男, 云南普洱人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构与耕作研究。E-mail: fhjiang@issas.ac.cn

运移和供给作物的能力,进而影响作物的产量^[5]。因此,寻求合理的耕作措施改良红壤结构、培肥红壤地力,对高效利用红壤区丰沛的水热资源意义重大。

传统旋耕是我国旱地红壤最主要的耕作方式。旋耕的耕作深度一般不超过 18 cm,长期连年旋耕会使耕层变浅、养分表聚,深层土壤紧实形成致密的犁底层,导致根系难以下扎,作物可利用的水分和养分空间缩小^[3,6-9]。前人研究表明,与常规旋耕相比,深耕能打破犁底层,降低土壤容重,扩大水分库容,具有一定蓄水保墒的作用,有利于作物根系利用深层土壤水分和养分^[10-15]。但是,目前的深耕方式,如深翻常把肥力低的亚表层土壤翻到表层,肥力高的表层土壤翻到下层,不但加速土壤养分的矿化,甚至可能导致作物产量下降^[16];而深松耕作仅间隔式打破土壤紧实层,松土区域有限,松紧程度不一,松后土块较大,也会给作物生长发育带来不利影响^[17]。韦本辉等^[18-19]提出的粉垄耕作很好地避免了这些问题,其利用特制的高速旋转钻头,垂直向下旋耕土壤,保持土壤上下层不扰动,并形成深厚的疏松耕层。而且,粉垄耕作结合了深耕与旋耕的特点,耕作后土块粉碎程度高,耕层孔隙连通性好。因此,粉垄耕作有望为我国红壤板结、季节性干旱等问题提供解决方案。

江西省是我国典型的红壤区,而红薯是江西旱地重要的农作物,年种植面积在 14 万 hm^2 左右,但由于红壤存在前述诸多缺点,导致江西红薯产量偏低^[20]。然而,该区土层深厚,水热资源丰富,具有巨大的生产潜力^[21]。因此,本文将粉垄耕作应用于江西红壤的红薯种植,针对该地区水分季节分配不均、质地黏重、肥力低下的特点,探讨粉垄耕作对该区域土壤结构、水分和养分在耕层分配及对红薯产量的影响,旨在为红壤区丰产增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在江西省鹰潭市余江区三分厂孙家小流域(28°15' N, 116°55' E)进行,试验地海拔 50 m,属于中亚热带湿润气候,年均日照数 1 809.5 h,年均气温 17.8 °C,年均积温 5 527.6 °C,年均降雨量 1 795 mm,年均蒸发量 1 318 mm。试验地土壤类型为第四纪红黏土发育而成的典型红壤,0~20 cm 土层的黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(0.05~2 mm)分别为 396、266 和 337 g/kg。

1.2 试验设计

本试验研究期为 2018—2019 年,试验地前茬作

物为油菜。用机械收割油菜后,留茬秸秆粉碎还田。耕作前一次性表施化学肥料尿素(含 N 464 g/kg)、磷钙镁肥(含 P_2O_5 120 g/kg)和复合肥(N : P_2O_5 : K_2O = 18 : 10 : 18),折合纯量 N、 P_2O_5 和 K_2O 分别为 190、128 和 68 kg/hm^2 。

试验共设 4 个耕作处理:传统旋耕 15 cm(RT)、粉垄耕作 20 cm(FL20)、粉垄耕作 30 cm(FL30)和粉垄耕作 40 cm(FL40)。每个处理重复 2 次,共计 8 个试验小区,每个试验小区长 117 m、宽 3.75 m。传统旋耕 15 cm,即使用传统旋耕机械作业,松土深度为 15 cm;粉垄耕作,即使用五丰粉垄机械作业,松土深度分别为 20、30 和 40 cm。粉垄和旋耕之后统一使用旋耕起垄机械作业,悬浮成垄平均高出地面 15 cm。起垄后,人工插植红薯苗(商薯 19),株行距为 0.3 m × 0.76 m。整个红薯生长季内无灌溉。

1.3 项目测定及方法

1.3.1 土壤耕层厚度 耕作当天(2018-05-03),在每个试验小区随机选取 3 个点,用钢尺插入土壤,测量地表水平面到地下坚硬土层之间的厚度作为耕层厚度。红薯苗期(2018-06-01)和收获期(2018-10-22),在每个小区随机选取一个点挖开剖面(含 2 垄 1 沟),观察并找到土壤松紧度和颜色存在明显差异的土层,并以该土层为分界,测量每个垄顶平面(计每个处理 4 个值)到该土层的深度作为土壤耕层厚度。

1.3.2 土壤容重、饱和导水率与耕层土壤储水量 红薯苗期和收获期,每个试验小区按 0~10、10~20、20~40 cm 分层取样,每个深度分别设置 3 个重复,计每个处理 6 个样品,环刀样品在 105 °C 下烘干测定土壤容重,铝盒样品在相同温度下烘干测定土壤质量含水量,并利用公式计算耕层土壤储水量(土壤储水量 = 土层厚度 × 土壤容重 × 土壤质量含水量^[22])。苗期环刀样品烘干前,采用定水头法测定土壤饱和导水率^[23]。

1.3.3 土层体积含水量动态变化 红薯苗期,在每个处理小区内以横埋方式埋设 TDR-315 水分传感器(公司,美国)。埋设深度:垄顶下 10、20、40 cm 处,分别代表 0~10、10~20、20~40 cm 土层含水量。同时,利用雨量计实时监测降水量。

1.3.4 土壤养分 红薯收获期,在每个试验小区随机选择 2 个点(计每个处理 4 个点),分别采集 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层土壤样品,混合均匀,带回实验室风干并测定土壤养分含量。其中,土壤全氮采用半微量开氏法、土壤全磷采用氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法、土壤全钾采用氢氟酸-高氯酸消

煮-火焰光度法^[24]、土壤碱解氮采用碱解扩散法^[25]、土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法、土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法、土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法^[24]。

1.3.5 作物生物量 红薯收获时,每个试验小区随机选取 2 个面积为 1 m × 1 m 的样方,采集地下部薯块,立即带回室内洗净,擦干,称重,并计算鲜薯产量。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2013 进行数据处理, Origin Pro 9.0 进行制图, SPSS 19.0 进行方差分析(One-Way ANOVA)及配对 T 检验,并利用 Duncan 法进行多重比较。文内表格中所列数据均为:平均值 ± 标准差。

2 结果

2.1 粉垄耕作对土壤物理性质的影响

粉垄耕作下土壤耕层厚度变化如表 1 所示。在耕作当日, FL20、FL30 和 FL40 处理耕层厚度分别为 24、31 和 43 cm, 而 RT 处理为 18 cm, 各处理均达到试验设计深度。在红薯苗期和收获期, 耕层厚度下

降幅度随粉垄耕作深度增加而更加显著。与苗期相比, 收获期 FL20、FL30 和 FL40 处理耕层厚度分别下降了 5%、13% 和 30%, 而 RT 处理下降了 19%。

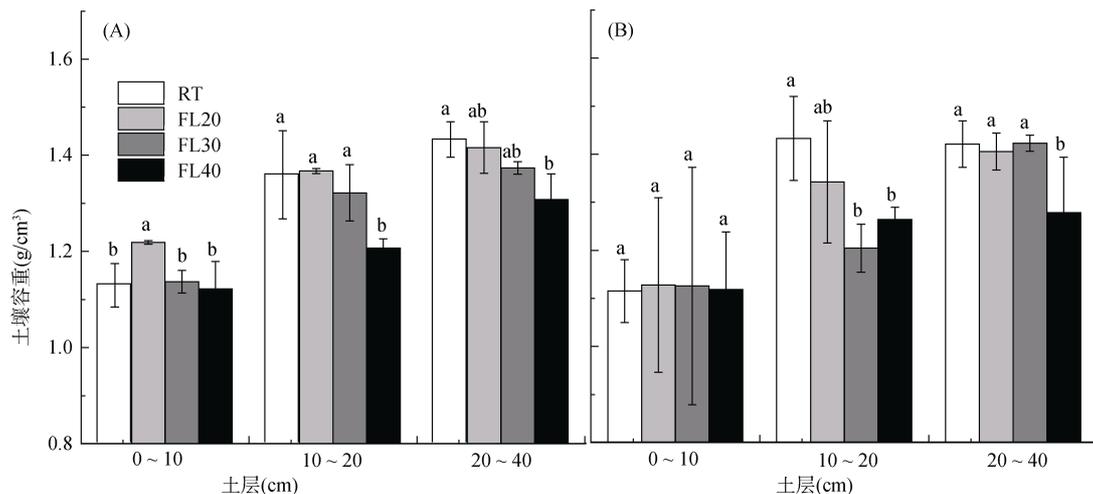
表 1 不同耕作处理对耕层厚度的影响

Table 1 Plough layer thickness under different tillage treatments

耕作处理	土壤耕层厚度(cm)		
	耕作当日	红薯苗期	红薯收获期
RT	18 ± 1 d	21 ± 2 c	17 ± 2 c
FL20	24 ± 2 c	21 ± 6 c	20 ± 3 c
FL30	31 ± 3 b	31 ± 2 b	27 ± 0 b
FL40	43 ± 5 a	44 ± 5 a	31 ± 6 a

注:表中同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$); 下同。

粉垄耕作可以显著降低($P < 0.05$)深层土壤容重(图 1)。粉垄耕作下 10 ~ 40 cm 各土层容重均有不同程度下降。与 RT 处理相比, FL30 处理显著降低 10 ~ 20 cm 土壤容重(收获期, 下降 16.0%); FL40 处理则显著降低 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土壤容重(苗期分别下降 11.2% 和 2.0%, 收获期分别下降 11.8% 和 10.8%)。并且, 与苗期相比, 收获期土壤容重下降程度更加明显。



(柱图上方不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 1 不同耕作处理对红薯苗期(A)和收获期(B)0 ~ 40 cm 土壤容重的影响

Fig. 1 Soil bulk densities under different tillage treatments in 0-40 cm layer at seeding (A) and maturity (B) stages of sweet potato

不同耕作处理下各土层土壤饱和导水率均随深度的增加而降低, 但下降的幅度差异很大。由表 2 可知, 各耕作处理 0 ~ 10 cm 土层的土壤饱和导水率无显著差异($P > 0.05$); 10 ~ 20 cm 土层 FL30 和 FL40 处理土壤饱和导水率较 RT 和 FL20 处理显著提升, 增幅可达上千倍; 而 20 ~ 40 cm 土层土壤饱和导水率在各耕作处理间亦无显著差异($P > 0.05$)。可见, 粉垄耕作 30 cm 和 40 cm 主要对 10 ~ 20 cm 土层土壤饱和导水能力有明显改善作用。

表 2 不同耕作处理对苗期 0 ~ 40 cm 土壤饱和导水率的影响

Table 2 Soil saturated hydraulic conductivity in 0-40 cm layer at seeding stage of sweet potato under different tillage treatments

耕作处理	土壤饱和导水率 ($\times 10^{-4}$ cm/s)		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
RT	456 ± 181 a	0.34 ± 0.00 b	0.05 ± 0.00 a
FL20	601 ± 102 a	0.08 ± 0.05 b	0.05 ± 0.01 a
FL30	511 ± 55.9 a	227 ± 183 a	0.27 ± 0.13 a
FL40	438 ± 35.7 a	377 ± 236 a	0.11 ± 0.05 a

2.2 粉垄耕作对土壤水分动态变化及储水量的影响

试验地降水随时间分配不均,故依降水量多少将监测期划分为湿润期(6—7月,累积降雨量603.6 mm,占监测期总降雨量的73.6%)和干旱期(8—10月,累积降雨量216.5 mm,仅占监测期总降雨量的26.4%)。如图2所示,各耕作处理0~40 cm土壤含水量随时间呈现整体波动下降的趋势,0~10、10~20和20~40 cm土层各处理含水量的变异系数在湿润期高于干旱期,湿润期含水量变化范围为0.035~0.203 cm³/cm³,变异系数达16.8%,而干旱期含水量变化范围缩小为0.085~0.179 cm³/cm³,变异系数只有9.5%。另外,不同耕作方式改变了土壤水分随剖面分布的规律。不同深度土层含水量分布规律变为0~10 cm土层FL40>FL30>FL20>RT(图2A);10~

20 cm土层FL20>RT>FL30>FL40(图2B);20~40 cm深层FL20>FL40>FL30>RT(图2C)。配对T检验显示,所有处理两两之间差异均显著($P < 0.05$)。

其次,粉垄耕作下土壤含水量显著高于传统旋耕,并且干旱期增幅大于湿润期。RT、FL20、FL30和FL40处理0~10 cm平均含水量在湿润期分别为0.156、0.169、0.171和0.169 cm³/cm³(图2A左),干旱期分别为0.103、0.119、0.120和0.121 cm³/cm³(图2A右);20~40 cm平均含水量依次是湿润期0.334、0.360、0.329和0.335 cm³/cm³(图2C左),干旱期0.239、0.244、0.260和0.253 cm³/cm³(图2C右)。与RT处理相比,粉垄处理0~10 cm土壤含水量在湿润期平均增幅为8.7%,干旱期为12.0%,20~40 cm土层平均增幅湿润期为1.4%,干旱期为6.7%。

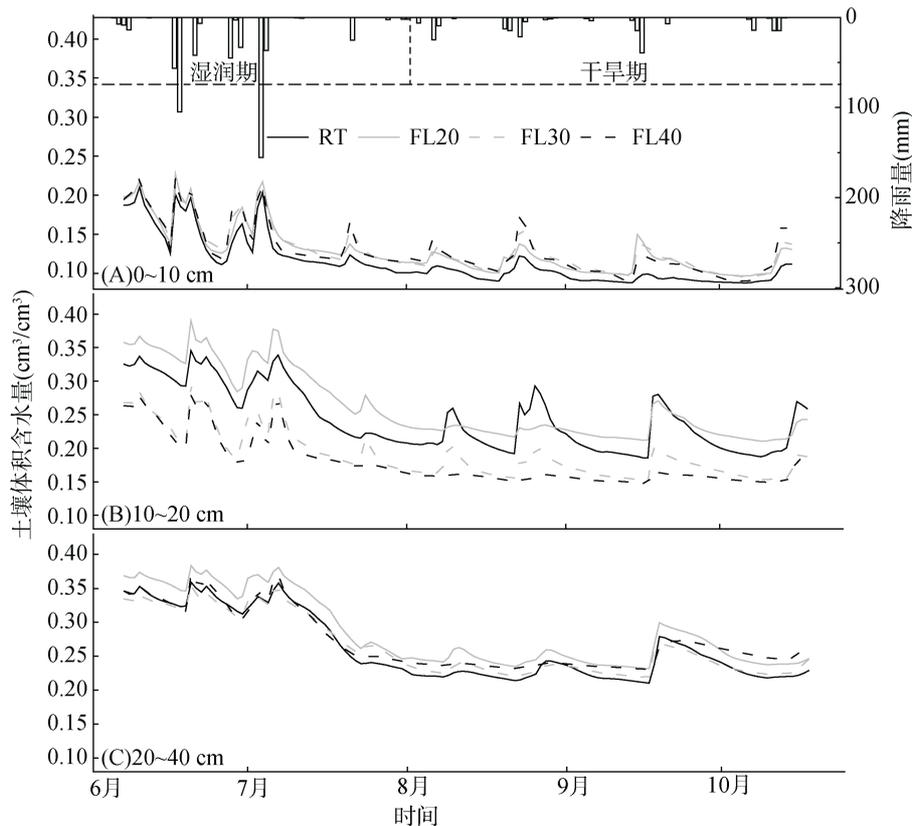
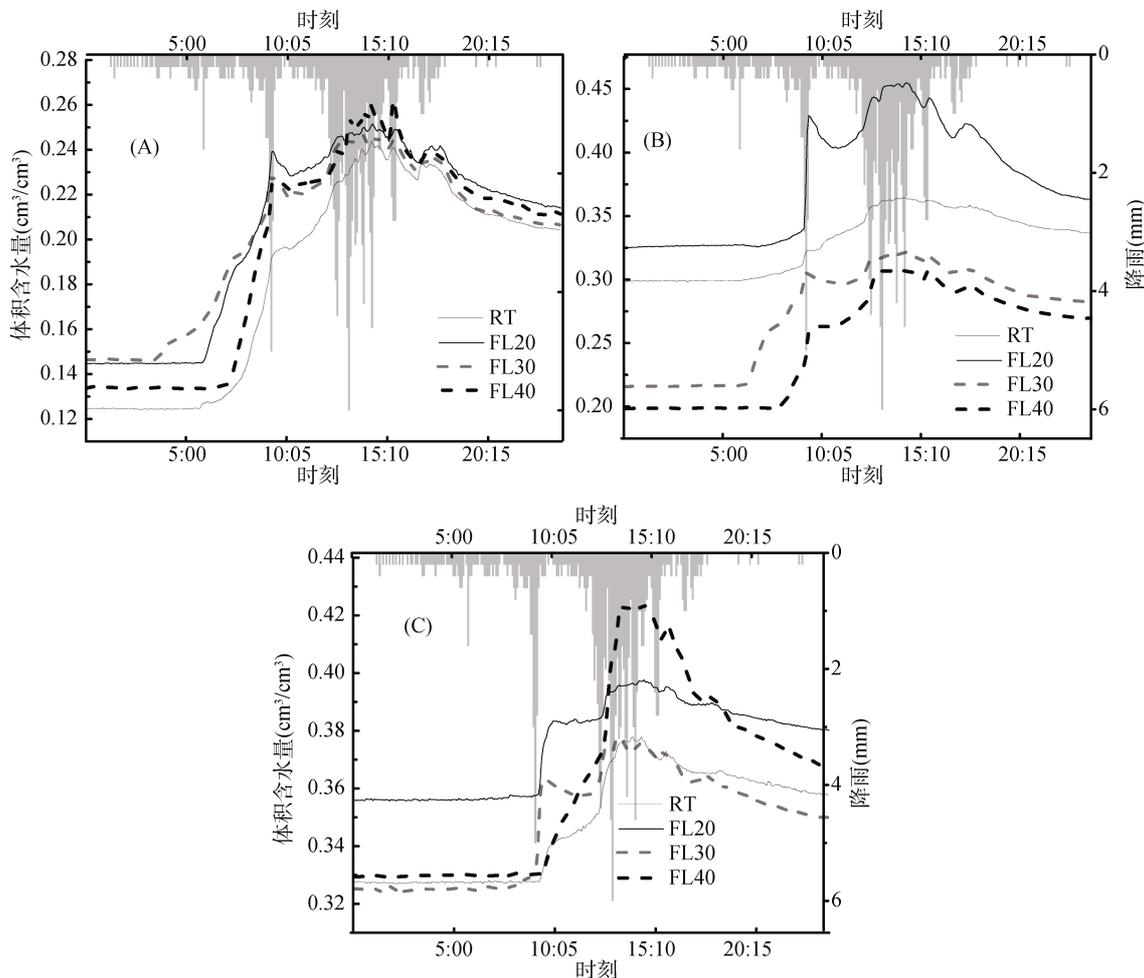


图2 不同耕作处理下0~40 cm土壤体积含水量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil water contents in 0-40 cm layers under different tillage treatments

粉垄耕作使土壤水分的下渗速度、下渗量、下渗深度均较传统旋耕提高。由最大降水日土壤水分5 min步长动态图(图3)可知,降雨发生后,不同土层FL20、FL30和FL40处理土壤含水量曲线出现首个拐点的时间(即重力水下渗到对应土层的时刻)均比RT处理早,说明粉垄耕作下土壤水分下渗速度大于传统旋耕。最大波峰的峰高可代表此次降水该深度的最大蓄水量,也可以在一定

程度上反映下渗到各土层的最大水量。10 cm和20 cm深度土壤不同耕作处理间土壤蓄水量差异不大(图3A和3B),而40 cm深度土层FL40处理约为RT处理的2倍(图3C),由此,粉垄耕作下土壤水分下渗深度和下渗量均大于传统旋耕。而且,FL40处理下40 cm深度土层极陡峭的峰尾还显示,40 cm深度土层土壤水分继续向下渗漏的速度也是粉垄耕作大于传统旋耕(图3C)。



(A: 土层深度 10 cm; B: 土层深度 20 cm; C: 土层深度 40 cm)

图 3 最大降水日不同土层土壤含水量动态变化图

Fig. 3 Dynamic changes of soil water contents on heaviest raining day at 10, 20 and 40 cm depths under different tillage treatments

粉垄耕作提升耕层土壤储水量显著(表 3)。与传统旋耕相比,苗期 FL20 处理 0~10、10~20 和 20~40 cm 土壤储水量分别提升 14.6%、16.8% 和 19.1%, FL30 处理分别提升 8.5%、11.7% 和 14.5%, FL40 处理 20~40 cm 土层提升 8.5%; 红薯收获期也有类

表 3 不同耕作处理对 0~40 cm 土壤储水量的影响

Table 3 Soil water storages in 0~40 cm layers under different tillage treatments

生育时期	耕作处理	土壤储水量(mm)		
		0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm
苗期	RT	21.5 ± 2.5 bc	28.1 ± 5.6 bc	61.3 ± 2.8 c
	FL20	24.6 ± 1.2 a	32.8 ± 0.0 a	73.0 ± 3.6 a
	FL30	23.3 ± 0.2 ab	31.4 ± 2.4 ab	70.1 ± 0.2 a
	FL40	21.3 ± 0.2 c	25.6 ± 1.3 c	66.5 ± 3.1 b
收获期	RT	16.3 ± 1.3 a	21.2 ± 1.7 a	56.1 ± 5.0 ab
	FL20	16.9 ± 0.2 a	21.4 ± 1.4 a	57.6 ± 5.0 ab
	FL30	13.9 ± 1.9 b	20.4 ± 0.6 a	51.6 ± 5.9 b
	FL40	16.4 ± 1.4 a	21.9 ± 0.5 a	62.4 ± 1.2 a

似结果。在干旱条件下即收获期, FL40 处理保水效果最佳, 0~40 cm 储水量为 100.7 mm, 高于 RT (93.6 mm)、FL20(95.9 mm)和 FL30(85.8 mm)等其他耕作处理。

2.3 粉垄耕作对土壤有机质和养分含量的影响

粉垄耕作下 0~40 cm 土层土壤有机质和全氮含量显著增加($P < 0.05$), 并且随耕作深度的增加下层土壤增幅更加明显(表 4)。0~10 cm 表层, FL20、LF30 和 FL40 处理有机质含量分别较 RT 处理增加 18.4%、24.1% 和 23.9%, 全氮含量分别增加 12.2%、11.1% 和 11.1%; 10~20 cm 土层, 前述处理有机质分别增加 5.3%、27.7% 和 29.7%, 全氮含量分别增加 1.2%、9.5% 和 12.0%; 20~40 cm 前述处理土壤有机质增加 10.2%、38.0% 和 69.3%, 全氮增加 2.3%、13.6% 和 25%。

粉垄耕作下土壤全磷和全钾含量变化均表现为: 上减(0~20 cm 土层)下增(20~40 cm 土层)。0~10 cm

土壤全磷和全钾含量降低但差异不显著; 10~20 cm 土层除 FL40 处理全磷含量外, 其余处理全磷、全钾

含量下降; 20~40 cm 土层 FL40 处理土壤全磷含量显著增加($P<0.05$), 全钾含量也有增加。

表 4 不同耕作处理对 0~40 cm 土壤有机质和全量养分含量的影响

Table 4 Contents of soil organic matter and total nutrients in 0-40 cm layers under different tillage treatments

土层深度(cm)	耕作处理	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)
0~10	RT	14.43 ± 0.53 b	0.90 ± 0.07 b	0.66 ± 0.01 a	8.98 ± 0.65 a
	FL20	17.06 ± 0.58 a	1.01 ± 0.01 a	0.60 ± 0.04 a	8.77 ± 0.73 a
	FL30	17.90 ± 1.18 a	1.00 ± 0.01 a	0.59 ± 0.05 a	9.52 ± 1.41 a
	FL40	17.85 ± 0.95 a	1.00 ± 0.01 a	0.62 ± 0.05 a	8.74 ± 0.32 a
10~20	RT	13.00 ± 0.18 b	0.84 ± 0.05 b	0.55 ± 0.01 b	9.01 ± 1.13 a
	FL20	13.67 ± 0.94 b	0.85 ± 0.06 b	0.51 ± 0.02 c	7.92 ± 0.45 a
	FL30	16.58 ± 0.63 a	0.92 ± 0.02 ab	0.51 ± 0.02 c	8.85 ± 0.37 a
	FL40	16.84 ± 0.45 a	0.94 ± 0.05 a	0.59 ± 0.01 a	8.13 ± 0.98 a
20~40	RT	4.92 ± 0.14 c	0.44 ± 0.01 c	0.25 ± 0.00 b	9.80 ± 0.06 a
	FL20	5.43 ± 0.26 c	0.45 ± 0.03 c	0.24 ± 0.01 b	9.95 ± 0.35 a
	FL30	6.79 ± 0.26 b	0.50 ± 0.01 b	0.25 ± 0.00 b	9.35 ± 0.54 a
	FL40	8.36 ± 0.46 a	0.55 ± 0.01 a	0.29 ± 0.01 a	9.87 ± 0.43 a

粉垄耕作对速效养分的影响与对全量养分的影响相似。粉垄耕作下 0~40 cm 土层土壤碱解氮含量显著高于传统旋耕, 粉垄耕作越深增幅越大, 扰动越深下层增幅越大(表 5)。与 RT 处理相比, FL20、FL30 和 FL40 处理 0~10 cm 土壤碱解氮含量分别增加

14.5%、11.6% 和 8.3%, 10~20 cm 土层增加 3.6%、6.4% 和 20.1%, 20~40 cm 土层除 FL20 处理外, FL30、FL40 处理增加 16.6% 和 83.4%。粉垄耕作下土壤有效磷和速效钾的含量基本与碱解氮存在相似的规律。

表 5 不同耕作处理对 0~40 cm 土壤速效养分含量的影响

Table 5 Contents of soil available nutrients in 0-40 cm layers under different tillage treatments

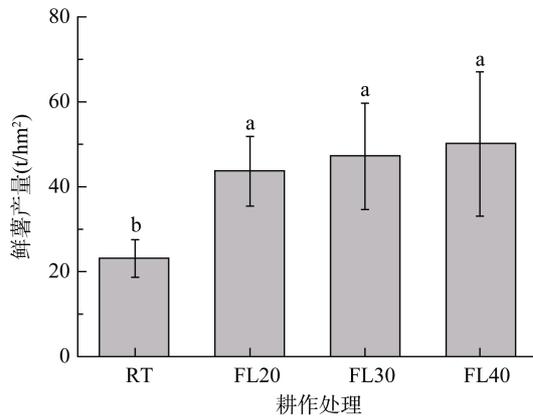
土层深度(cm)	耕作处理	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
0~10	RT	71.8 ± 2.3 b	29.3 ± 1.29 a	207 ± 4.1 c
	FL20	82.1 ± 3.20 a	22.1 ± 0.65 b	304 ± 3.1 a
	FL30	80.1 ± 4.5 ab	14.5 ± 0.38 d	263 ± 2.6 b
	FL40	77.7 ± 6.0 ab	19.8 ± 0.22 c	309 ± 4.7 a
10~20	RT	68.7 ± 5.9 b	16.4 ± 0.26 a	77.6 ± 1.5 d
	FL20	71.1 ± 5.9 ab	16.0 ± 0.14 a	197 ± 2.6 a
	FL30	73.1 ± 10 ab	15.8 ± 0.20 a	102 ± 2.6 c
	FL40	82.5 ± 2.2 a	16.1 ± 0.29 a	130 ± 4.0 b
20~40	RT	32.0 ± 4.0 b	0.81 ± 0.11 c	94.0 ± 5.5 b
	FL20	30.0 ± 2.3 b	1.09 ± 0.10 ab	96.5 ± 3.0 b
	FL30	37.3 ± 2.2 b	0.94 ± 0.17 b	134 ± 2.6 a
	FL40	48.6 ± 2.3 a	1.78 ± 0.19 a	71.1 ± 2.5 c

2.4 粉垄耕作对红薯产量的影响

粉垄耕作显著提高红薯的鲜薯产量($P<0.05$) (图 4)。FL20、FL30 和 FL40 处理鲜薯产量分别为 43.7、47.2 和 50.1 t/hm², 较 RT 处理(23.1 t/hm²)分别增加 89%、104% 和 117%。FL40 处理增幅最大, 但不同粉垄处理间差异不显著。

3 讨论

本研究通过对传统旋耕及不同深度粉垄耕作下土壤理化性质和红薯产量的分析, 发现与传统旋耕相比, 粉垄耕作增加了土壤耕层厚度(表 1), 降低了土壤容重(图 1), 提高了土壤饱和导水率(表 2)和土壤水



(柱图上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 4 不同耕作处理红薯鲜薯产量的影响

Fig. 4 Fresh yields of sweet potatoes under different tillage treatments

分库容(表 3), 显著改善了土壤结构, 这与多人研究结果一致^[26-29]。此外, 粉垄耕作使土壤磷和钾下移, 形成“上减下增”的分布格局(表 4、表 5)。

粉垄耕作能够有效调节红壤水分的传输和蓄存过程。粉垄耕作使得土壤含水量升高(图 2), 降水后水分下渗速快(图 3), 耕层土壤储水量大(表 3), 有助于抵御红壤区频发的季节性干旱。杨永辉等^[30]采集田间原状土进行室内模拟试验也得到深松耕作下土壤水分下渗速度大于常规耕作的结果, 而马强等^[31]直接测定田间土壤水分渗透速度证实了深松耕作下田间土壤入渗量显著提高的结论。其他研究也表明深耕、深松和深旋松(粉垄)均能增加土壤含水量, 提高土壤储水量, 增强土壤抗旱能力^[26, 32-35]。土壤持水能力由土壤颗粒与水分子间作用力和土壤毛细管力决定, 主要受土壤质地、土壤有机质以及土壤毛细管孔隙数量的影响^[36]。与传统旋耕相比, 粉垄耕作过程中秸秆旋磨较细, 与土壤颗粒混合较均匀, 并使土壤颗粒分散、破碎、重新排列形成蓬松土层, 这可能是土壤含水量提升的重要原因。而粉垄耕作下上层土壤水分下渗速度提高, 是因为其疏松了土壤耕作层, 降低了土壤容重(图 1), 增加了土壤孔隙度, 提高了土壤饱和和导水率(表 2)。此外, 粉垄耕作还能有效打破犁底层, 增厚耕层(表 1), 扩大储水空间, 深层土壤受到大气蒸发力的影响较小, 更有利于保存土壤水分, 这些水分在干旱期对作物生长发育尤为重要, 可以降低作物受季节性干旱的影响。对比不同深度粉垄耕作处理还发现, 粉垄耕作 40 cm 处理下土壤水分下渗最快, 水分含量及储量增幅最大, 抗旱能力最强, 对土壤水分调蓄效果最佳, 这也是本研究中红薯增产的一个重要原因。

粉垄耕作改变了土壤养分在土壤剖面的分布。本研究显示, 粉垄耕作下不同深度土壤全氮、碱解氮、有机质、速效钾含量显著升高, 表层有效磷含量显著降低, 而下层有效磷、全磷含量显著提高(表 4、表 5)。同此, Wei 等^[37]研究认为水稻土粉垄耕作 7 a 后所有养分含量明显增加; 聂胜委等^[38]研究表明粉垄耕作显著提高潮土速效钾含量及砂姜黑土有效磷含量。其中原因之一是粉垄耕作降低了 0~40 cm 土壤容重, 也就是说减少了土壤质量, 造成养分含量高于传统旋耕。如果综合考虑养分含量和土壤容重, 结果显示粉垄耕作下 0~40 cm 土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效钾的储量比旋耕分别增加了 16.9%、3.2%、5.7% 和 21.6%, 而全磷、全钾和有效磷的储量反而有所降低。另外, 粉垄耕作过程中把表施化学肥料带到土壤下层, 并且粉垄耕作增加入渗从而加大了养分淋溶并在土壤下层的富集。这造成了表层土壤有效磷含量低于传统旋耕, 而下层高于传统旋耕的现象。红壤坡耕地侵蚀严重, 将肥料养分带入下层土壤也消减了水土流失损失的部分^[39]。因此, 更为合理的土壤养分剖面分布特征是本研究中红薯产量大幅度提升的另一个重要原因。

在耕层土壤能够有效提供作物生长发育所需的水分和养分的前提下, 粉垄耕作显著提升了红薯产量。本研究中粉垄耕作较传统旋耕增加了鲜薯的产量, 其中以粉垄耕作 40 cm 增产最大, 增幅达到 117%。前人研究也表明深耕、深松、粉垄耕作均能增加作物产量^[28, 40-45]。红薯根系生长和块茎膨大需要疏松的土壤环境, 粉垄耕作能够有效降低土壤容重, 疏松土壤增厚耕层。红薯生长易受旱涝灾害的影响, 粉垄耕作能够有效调蓄土壤水分, 降低红薯生长过程中的干旱胁迫。此外, 红薯吸肥能力极强, 粉垄耕作不但打破犁底层, 促进根系下扎, 而且提高了深层土壤供肥能力。

4 结论

本研究表明, 与传统旋耕相比, 粉垄耕作显著改善了土壤耕层物理结构, 增加了耕层厚度, 降低了土壤容重, 提高了土壤饱和导水率及入渗速度, 打破了犁底层从而扩大了土壤有效水分库容, 有效调蓄土壤水分分配, 增强了作物抗旱能力。粉垄耕作提高了土壤有机质含量, 改变了养分在耕层的分布, 提升了下层养分含量, 有效改善了土壤养分状况。通过提升耕层土壤通气性、水分库容以及养分库容, 促进了红薯根系下扎和块茎膨大, 粉垄耕作明显提高红薯的产

量。在红壤旱地中，不同粉垄耕作深度的效果存在一定差异，但考虑经济效益，粉垄耕作 20 cm 足以满足产能大幅度提升。

参考文献：

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [2] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题[J]. 土壤通报, 1988, 19(2): 3-5.
- [3] 石彦琴, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 2057-2064.
- [4] 秦伟, 左长清, 郑海金, 等. 赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 115-125.
- [5] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939-948.
- [6] 张丽娜, Asenso Evans, 张陆勇, 等. 耕作方式对旱地红壤物理特性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 46-50.
- [7] 杨思存, 王成宝, 霍琳, 等. 不同耕作措施对甘肃引黄灌区耕地土壤有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 114-121.
- [8] Liu X W, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat [J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59-67.
- [9] 霍星辰, 杨诗韵, 赵鹏飞, 等. 深松技术及其对土壤理化性质的影响[J]. 农业科技与装备, 2016(3): 62-64.
- [10] Li X, Tang M J, Zhang D X, et al. Effects of sub-soiling on soil physical quality and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 65-69.
- [11] Mu X Y, Zhao Y L, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 78: 32-43.
- [12] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7-15.
- [13] Wang Q J, Lu C Y, Li H G, et al. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-Year experiment on alkaline soils of Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 137.
- [14] Zhang Y J, Wang R, Wang S L, et al. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system[J]. Field Crops Research, 2017, 209.
- [15] 潘金华, 庄舜尧, 曹志洪, 等. 条状超深耕对皖南旱坡地土壤性状及烤烟产质量的综合效应[J]. 土壤, 2016, 48(3): 559-564.
- [16] 赵小蓉, 赵燮京, 陈先藻. 保护性耕作对土壤水分和小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(S1): 6-10.
- [17] 赵建国, 王安, 马跃进, 等. 深松旋耕碎土联合整地机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 46-54.
- [18] 韦本辉, 甘秀芹, 俞健, 等. 旱地作物粉垄栽培方法: CN101779537A[P]. 2010-07-21.
- [19] 韦本辉. 旱地作物粉垄栽培技术研究简报[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4330.
- [20] 肖国滨, 黄天宝, 叶川, 等. 丘陵红壤旱地鲜食红薯稻草全程覆盖栽培技术初探[J]. 江西农业学报, 2009, 21(8): 35-37.
- [21] 赵其国, 徐梦洁, 吴志东. 东南红壤丘陵地区农业可持续发展研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 433-442.
- [22] 李荣, 王艳丽, 吴鹏年, 等. 宁南旱区沟垄覆盖改善土壤水热状况提高马铃薯产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 168-175.
- [23] 欧少亭. 林业管理常用标准及政策法规汇编——森林土壤渗透性测定[M]. 长春: 吉林电子出版社, 2002
- [24] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] 张莉, 翟振, 逢博, 等. 深旋松耕改善耕层结构促进马铃薯增产[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 17-23.
- [27] 李华, 逢焕成, 任天志, 等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 647-656.
- [28] Florian S, Axel D, Inga H, et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 193-204.
- [29] 杨雪, 逢焕成, 李轶冰, 等. 深旋松耕作法对华北缺水土壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3401-3412.
- [30] 杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 258-266.
- [31] 马强, 宇万太, 贺明慧, 等. 深松对棕壤农田土壤和玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 934-938.
- [32] 张玉娇, 王浩, 王淑兰, 等. 小麦/玉米轮作旱地长期轮耕的保墒增产效应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 126-136.
- [33] Min S. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 218(9): 24-32.
- [34] 翟振, 李玉义, 郭建军, 等. 耕深对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 115-123
- [35] 张绪成, 马一凡, 于显枫, 等. 西北半干旱区深旋松耕作对马铃薯水分利用和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3293-3301.

- [36] 杨金楼, 朱连龙, 朱济成. 上海地区土壤持水特性研究[J]. 土壤学报, 1982, 19(4): 331-343.
- [37] Wei B H, Gan X Q, Li Y Y, et al. Effects of once Fenlong cultivation on soil properties and rice yield and quality for 7 consecutive years[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(12): 2365-2371.
- [38] 聂胜委, 张玉亭, 张巧萍, 等. 粉垄耕作对小麦玉米产量及耕层土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 930-936.
- [39] 范亚琳, 刘贤赵, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 638-649.
- [40] 谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 167-173.
- [41] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 592-600.
- [42] 宫亮, 安景文, 邢月华, 等. 连年深松和施用有机肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1092-1099.
- [43] 孙慧, 吴燕, 马静, 等. 不同耕作方式对马铃薯土壤水分及产量的影响[J]. 新疆农业科技, 2017(6): 15-16.
- [44] Zhai L C, Xu P, Zhang Z B, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on dry matter accumulation and grain yield of summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 167-174.
- [45] Zhai L C, Xu P, Zhang Z B, et al. Improvements in grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize by optimizing tillage practice and nitrogen application rate[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111: 666-676.