

丁琪洵,汪甜甜,童 童,等. 深耕深松对土壤特性和作物产量影响研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):34-41.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.004

# 深耕深松对土壤特性和作物产量影响研究进展

丁琪洵,汪甜甜,童 童,王 强,马友华

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院,安徽合肥 230031)

**摘要:**土壤板结、耕层变浅等障碍因素影响了土壤肥力特征和作物产量,深耕深松耕作方式有助于提升耕地质量和农作物增产增效,促进农业可持续发展。本文综述深耕深松对耕地土壤物理性状、主要养分指标、生物性状以及作物产量、品质的影响。深耕深松可以降低土壤容重、土壤紧实度,增加耕层厚度和土壤孔隙度;短期降低耕地土壤浅层的养分含量,但秸秆还田后深耕可增加耕地深层土壤养分含量;深耕深松可以增加微生物数量、土壤有机碳储存,增强绝大多数土壤酶活性和微生物碳源代谢能力,但会降低土壤微生物量氮和生物量碳;深耕深松与秸秆还田、增施有机肥等其他技术组合利于玉米、香蕉等作物深层根系吸收养分,带动荚果对镁、磷及籽仁对锌的吸收,增加作物糖分积累、蛋白质含量、百果质量等,达到作物增产的效果。但不同地区土壤深耕深松效果有一定差异,尤其是水稻田深耕深松技术模式及效果需要进一步开展系统研究。

**关键词:**深耕;深松;微生物;容重;产量

**中图分类号:**S341 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0034-08

民以食为天,食以土为本。古代的刀耕火种、铁犁牛耕随科技发展演变至如今常见的旋耕、深耕、深松、翻耕等耕作方式。因不同耕作方式对土

壤扰动和作用强度不同,最终会影响土壤理化特性和作物生长发育<sup>[1]</sup>。因免耕对土壤扰动强度小,可保持土体的原状结构及肥力分布梯度,而被世界粮农组织认定为值得推荐的保护性耕作方式之一,但长期免耕易降低土壤的通透性和蓄水保肥能力<sup>[2-3]</sup>;翻耕在一定程度上改善了土壤理化性质但会破坏土体原状稳态结构,加剧水土流失且生产成本较高;旋耕可以清除杂草,简化整地程序,具有省工节本、保水保肥的优点,但长期旋耕亦会破坏土

收稿日期:2022-09-20

基金项目:耕地质量保护专项-国家耕地质量监测(编号:21190017/125C0505)。

作者简介:丁琪洵(1997—),女,江苏泰兴人,硕士研究生,主要从事耕地质量评价与提升相关研究。E-mail:929411721@qq.com。

通信作者:马友华,博士,教授,主要从事耕地质量与土壤修复相关研究。E-mail:yhma@ahau.edu.cn。

[104] Fu S W, Chen G F, Zhao S, et al. Research and application of spark platform on big data processing in intelligent agriculture of Jilin Province [M]//Computer and computing technologies in agriculture XI. Cham:Springer International Publishing,2019:1-12.

[105] 彭秀媛,王 枫. 农业大数据应用研究[J]. 园艺与种苗,2020,40(11):56-57.

[106] 刘 彪.“云计算”和大数据在“互联网+”时代的应用[J]. 电子技术与软件工程,2020(12):201-203.

[107] Zhang X H, Cao Z Y, Dong W B. Overview of edge computing in the agricultural Internet of Things: key technologies, applications, challenges[J]. IEEE Access,2020,8:141748-141761.

[108] Zhou L J, Chen N C, Chen Z Q. A cloud computing-enabled spatio-temporal cyber-physical information infrastructure for efficient soil moisture monitoring[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information,2016,5(6):81.

[109] 崔晓军,高子航. 基于 GIS 与云计算的温州市农业大数据可视

化平台研究[J]. 电脑编程技巧与维护,2020(4):113-115.

[110] Zha X. Design of rice regional test information collection system based on cloud computing [J]. INMATEH Agricultural Engineering,2021,64(2):497-506.

[111] Hsu T C, Yang H, Chung Y C, et al. A creative IoT agriculture platform for cloud fog computing [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems,2020,28:100285.

[112] 蔡自兴. 中国人工智能 40 年[J]. 科技导报,2016,34(15):12-32.

[113] 张彬露. 农业专家系统概述与优化研究[J]. 农村经济与科技,2020,31(15):341-342,354.

[114] 兰玉彬,王天伟,陈盛德,等. 农业人工智能技术:现代农业科技的翅膀[J]. 华南农业大学学报,2020,41(6):1-13.

[115] Li D K. Application of artificial intelligence and machine learning based on big data analysis in sustainable agriculture [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science,2021,71(9):956-969.

壤结构;深松属于保护性耕作方式之一,深耕则是对土壤性质影响深远的耕作方式,两者区别在于深耕会将土体深处的土壤翻到浅层,即扰乱土体结构。深耕和深松均可疏松耕层深处土壤,具有打破犁底层、提高土壤渗透性和蓄水能力、促进表土加深和根系生长的优点,也会有耕作深度不理想、效果差、能源消耗高等常见限制因素<sup>[4]</sup>。采取契合当地实际的耕作方式确保协调土壤水热关系,为不同作物创造最佳生长发育环境,对保证作物持续高产、稳产具有重要的战略意义<sup>[5]</sup>。

国外侧重保护性耕作,从农业系统和农业经济角度研究耕作方式,重点探究耕作制度熟制如何由少变多,耕作次数如何由多变少<sup>[6-7]</sup>。国内侧重研究深耕深松对耕地土壤常见理化性质的作用机制和对旱地作物产量、生长情况的影响,涉及探寻深耕深松对土壤物理性状、主要养分指标、生物性状和作物产量的长期影响研究较少,以及深耕深松搭配其他耕作培肥技术后产生的差异性研究较少。长期采用单一耕作方式会引起土壤结构或肥力某一方面不协调<sup>[8]</sup>,如今免耕、少耕、旋耕的耕作方式以及地膜覆盖等技术大面积推广造成土壤结构破坏、耕层变浅、土壤板结、土壤养分不均衡等现实问题,导致土壤质量明显下降<sup>[9-10]</sup>。土壤板结已于 2015 年被列为影响世界土壤的十大威胁之一<sup>[11]</sup>,学者们重新关注深耕深松,以期配合培肥措施、土壤调理措施、多样化轮作等手段缓解土壤板结<sup>[12-13]</sup>。因此,本文系统性地概述深耕深松对耕地土壤的物理性状(紧实度、容重、土壤水分、孔隙度、土壤团聚体状)、主要养分指标、生物性状(土壤微生物、土壤酶活性、有机碳、腐殖质)的综合影响,大量举例比较旱地作物与水稻产量结果的差异性,总结深耕深松与其他技术集成模式产生的效果,从而确保深耕深松更契合现代农业发展,对耕地质量提升提出更高的要求,并为农田生态系统的可持续发展提供参考。

## 1 深耕深松对土壤物理性状的影响

### 1.1 深耕深松对主要土壤物理指标的影响

主要土壤物理指标包括土壤紧实度、容重、土壤水分含量、土壤孔隙度等,这些指标之间关系密切,相互影响。比如一般用土壤容重、土壤孔隙度和土壤穿透阻力作为土壤紧实度的衡量指标,而紧实度又能反映土壤紧实程度和根系下扎受阻程度。

土壤容重高则说明土壤结构紧实,透气性差。土壤孔隙度表征土壤通气性、透水性及植物根系穿插的难易程度,土壤中良好的孔隙大小与分布利于土壤水分的入渗和储存、生物的活性和活动、有机质的熟化和分解及土壤养分的活化和迁移<sup>[14]</sup>。土壤水分受土壤容重、孔隙度大小及类别的直接影响<sup>[15]</sup>,且其作为植物吸收水分的主要来源,土壤储水保水的能力影响着作物的生长发育<sup>[16]</sup>。

不同耕作方式对土壤紧实度、土壤容重、土壤水分、土壤孔隙度的影响存在显著差异,大多数研究认为,深耕深松相比免耕和旋耕耕作深度较深,因此利于疏松深层土壤,降低土壤紧实度和土壤容重<sup>[17-18]</sup>,并且增加耕层厚度和土壤孔隙度<sup>[19]</sup>。深耕深松可以通过降低土壤容重、土壤三相比综合值等指标调节土壤水肥气热<sup>[20-21]</sup>。孔晓民等研究发现,相比旋耕,深松可以增加 0~40 cm 土层土壤水分含量,降低 40~60 cm 土层水分含量,且深松深度越深,土壤紧实度越小<sup>[22]</sup>;罗锡文等研究发现,砖红壤地区最佳耕作方式是深松结合浅耕,且深松能改变土壤贮水量,提高土壤含水率<sup>[23]</sup>;李晓龙的研究表明,深耕使土壤物理结构合理化,能够降低土壤容重,提高蓄水能力,降低土壤三相结构距离,利于玉米根系吸收土壤中的水分和养分<sup>[24]</sup>;郭海斌等研究发现,深耕处理后土壤容重和三相比  $R$  值相比常规耕作处理分别降低 0.7% 和 19.0%,深耕配合秸秆还田后土壤水分含量增加了 3.2%,三相比综合值显著降低 9.3%<sup>[25]</sup>;赵亚丽等研究发现,深耕深松通过显著降低土壤紧实度和土壤三相比  $R$  值来提高水分利用效率,促进旱地作物根系生长发育<sup>[26]</sup>。

### 1.2 深耕深松对土壤结构的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,大量研究表明,耕作方式显著影响土壤团聚体的稳定性。粉垄耕作后,大型团聚体逐渐大量向小型团聚体转化<sup>[27]</sup>,更利于植物根系吸收利用养分。Ulén 等总结出沙质土壤或其他结构不稳定的土壤需定期深耕,黏土则应在干燥条件下翻耕从而避免磨损土壤团聚体,减少颗粒和磷的损失<sup>[28]</sup>。李锡锋等以砂姜黑土农田为试验对象,发现深松显著增加了 0~40 cm 土层 >0.25 mm 水稳性大团聚体含量,而长期深耕则显著降低了其含量<sup>[29]</sup>;深耕后壤土和黏土 20~30 cm 土层水稳性土壤团聚体的含量分别增加了 42.4% 和 52.3%<sup>[30]</sup>;连续深耕处理会显著降低

20 ~ 30 cm 土层大团聚体质量比例和团聚体稳定性<sup>[31]</sup>。总之,深松的耕作方式能够增加土壤大团聚体含量,而深耕的耕作方式因扰乱了土体结构从而破坏了土壤团聚体,会大大降低大团聚体含量。

## 2 深耕深松对主要土壤养分指标的影响

有机质、有效磷、速效钾等土壤养分含量的高低决定土壤肥力的高低,直接影响作物生长发育<sup>[32]</sup>。大量试验表明,深耕深松的耕作方式会显著影响土壤养分的含量、分布、移动及有效性。聂良鹏等的研究表明,深耕利于地力培肥,可增加稻田土壤养分含量,但在耕层浅薄的土壤上直接深耕会破坏土壤团粒结构、降低土壤养分含量,因此作物产量提升效果不显著<sup>[33-34]</sup>。但有学者持其他观点,王玉玲等研究发现,相比旋耕和免耕,深耕可以提高土壤速效磷及不同形态氮的含量<sup>[10]</sup>;唐先亮等研究发现,深松可以提高土壤透气性,促进有机质分解,从而提高了耕地土壤有效养分水平<sup>[35]</sup>;李锡锋等的研究表明,随着长期深耕翻动砂姜黑土,表层秸秆翻到深土层使得有机碳、全氮含量在深土层显著增加<sup>[29]</sup>;全昊天的研究表明,深耕会降低 0 ~ 20 cm 土层土壤有机质、全氮、速效钾的含量,但是将培肥物料随深耕分布到更深处时可以增加 20 ~ 30 cm 土层土壤养分含量<sup>[36]</sup>;土壤碱解氮、速效磷、速效钾的含量随土层的加深而减小,但深耕处理的速效养分含量显著高于常规处理<sup>[37]</sup>;小麦季深耕结合玉米季深松处理则提升了 20 ~ 40 cm 土层土壤主要养分含量和微生物量碳含量<sup>[38]</sup>。造成深耕深松对土壤养分含量影响差异化的原因可能是区域土壤状况、配肥措施、轮作方式等不同<sup>[39]</sup>。

## 3 深耕深松对土壤生物性状的影响

### 3.1 深耕深松对土壤微生物数量与微生物量碳、氮的影响

土壤微生物作为陆地生态系统的重要组成部分,其种类和数量随成土环境及土层深度发生变化。因土壤微生物量对环境变化较敏感,且具有促进土壤养分循环和物质转化的优点,因此将土壤微生物作为衡量土壤肥力、作物生产水平和耕地质量的重要指标<sup>[40-42]</sup>。Wang 等的研究表明,降低土壤扰动的保护性耕作方式可维持土壤细菌群落稳定性,从而改善根际土壤生态功能,为作物生长提供养分<sup>[43]</sup>。刘淑梅等研究发现,小麦季深耕处理后

0 ~ 20 cm 土层微生物量碳含量与旋耕处理结果差异不显著,但微生物量氮含量和土壤微生物熵比旋耕处理显著降低,并且还提高了 30 ~ 40 cm 土层微生物量氮全氮比<sup>[44]</sup>;杜聪阳等研究发现,对砂姜黑土进行深耕处理后可提高 15 ~ 25 cm 土层土壤微生物量碳、氮含量和土壤酶活性<sup>[45]</sup>;刘洪等的研究表明,粉垄处理可以显著降低变形菌门的丰度,增加厚壁菌门和绿弯菌门相对丰度后可促进植物的生长发育<sup>[27]</sup>。部分研究结果中,土壤微生物量氮和生物量碳含量的降低不仅是深耕深松导致的,施肥、栽培等土地管理措施以及土壤类型、温度、湿度等自然环境条件均会影响它们的含量。

### 3.2 深耕深松对土壤酶活性的影响

土壤酶活性可以体现土壤生物学活性,表征土壤养分含量水平变化情况。Pandey 等的研究表明,相较于旋耕处理,深耕处理利于微生物繁殖,提高土壤酶活性<sup>[46]</sup>;深耕-条旋耕轮耕模式显著增加了 10 ~ 30 cm 土层土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶的活性<sup>[47]</sup>;深耕处理可以增加土壤微生物数量,提高土壤磷酸酶和蔗糖酶活性,抑制土壤脲酶活性<sup>[48]</sup>;黄炳林等研究发现,提前进行培肥和深松处理能提高大豆开花期土温,从而通过改善土壤微生物生存环境来增加土壤微生物数量<sup>[49-50]</sup>,另一方面土壤保水保墒后酶活性较大幅度提高,更利于大豆生根发芽;岳衡等在宁南山区马铃薯田研究发现,深松耕处理下土壤菌群丰度指数与多样性指数整体高于传统翻耕措施,且深耕深松 50 cm 显著增加了土壤脲酶活性 12.9%,深耕深松 30 cm 显著增加了土壤蔗糖酶活性 33.3%<sup>[51]</sup>;刘淑梅等在砂姜黑土玉米农田进行试验发现,深耕深松处理的土壤脲酶活性显著高于免耕处理,因此深耕深松更利于土壤氮转化<sup>[44]</sup>。总而言之,深耕深松打破犁底层,疏松土壤后改善了增肥不增产的现象,对增加微生物数量、提高绝大多数酶活性的积极作用毋庸置疑。

### 3.3 深耕深松对土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳与微生物活性密切相关,通常将土壤有机碳分解速率与土壤微生物活动强度相提并论。随着碳中和理念的兴起,土壤有机碳已成为国内外学者的研究重点。大量学者研究认为,传统翻耕、旋耕等耕作方式不利于土壤碳固定,采用少耕、免耕以及秸秆还田技术可有效增加土壤有机碳储量,减缓土壤有机物质矿化<sup>[52-53]</sup>。Guo 等研究发现,在华北平原玉米种植区,免耕与 70 mm 播前灌

溉相结合是一种有效的作物管理策略,能够增强土壤对有机碳的储存,提高夏玉米的水分利用效率<sup>[54]</sup>。

近年来,也有学者论证出深松能通过改善土壤理化性质提高土壤微生物碳源代谢能力的观点。韦安培等研究发现,同一秸秆量还田模式下,深松处理后聚合物类、糖类、氨基酸碳源代谢强度最高,旋耕处理最低<sup>[55]</sup>;张霞等研究发现,深耕深松后土壤通气性加强,稳定的有机大分子转化为易氧化的小分子,从而增加了土壤有机碳和易氧化有机碳的含量<sup>[56]</sup>;深松的耕作方式可以改良深层土壤性能,增加深层有机碳活性,提高土壤碳库指数、碳库活度等;鉴于土壤有机碳与土壤呼吸速率呈显著正相关关系,赵亚丽等研究发现,深耕通过增加土壤通透性,便于土壤气体扩散、迁移,从而加快有机碳分解<sup>[57]</sup>;王永慧等发现深耕结合旋耕处理提高了 20~40 cm 土层土壤可溶性有机碳含量,深松(耕)结合旋耕与传统旋耕相比可提升土壤固碳能力<sup>[58]</sup>;张玉铭等在华北小麦—玉米轮作农田试验中发现,深耕配合秸秆还田可以补充 20 cm 土层以上的土壤有机碳、氮含量,并在秸秆深埋过程中重构 0~40 cm 土层,显著增加亚耕层各粒级团聚体有机碳、氮含量<sup>[59]</sup>;Al-Kaisi 等的研究结果表明,耕作方式对深层土壤碳的影响很大程度取决于耕作强度而非轮作<sup>[60]</sup>。大多数研究中土壤碳的增益或损失发生在顶层 0~30 cm 处,暂时无依据表明土壤碳会明显易位到更深处。

## 4 深耕深松对作物产量的影响

### 4.1 深耕深松对旱地作物产量的影响

黄淮海平原大量试验表明,深松可以促进玉米各层土壤根系的横向生长和下移,显著增加根干质量,使玉米百粒质量增加,增幅达 2.6%~3.1%<sup>[61-62]</sup>。马阳等研究发现,壤质潮褐土经过深松处理后可以促进玉米干物质和植株全氮量积累,显著提高氮肥利用效率,增加夏玉米和后茬小麦的产量<sup>[63]</sup>;壤质黏潮土深旋松耕 50 cm 后,小麦穗数分别比深松和旋耕处理的多 48.6 万穗/hm<sup>2</sup> 和 70.7 万穗/hm<sup>2</sup>,产量分别提高 8.06% 和 12.18%<sup>[64]</sup>;在云南山原红壤坡地上无灌溉种植玉米,深松 30 cm 利于耕作层干早期水分供给与利用,增大深层根系的容纳量从而达到增产效果<sup>[65-66]</sup>;豫西旱作条件下深松覆盖可以提高小麦生育后期旗叶叶绿素含量

和灌浆中后期的旗叶净光合速率,最终获得较高的籽粒灌浆速率和籽粒产量,达到增产效果<sup>[67]</sup>。

鲁东典型棕壤花生田试验结果表明,深耕处理下植株总镁吸收量总体最高<sup>[68]</sup>;土壤容重降低至 1.31~1.34 g/cm<sup>3</sup> 时更利于花生对锌的吸收积累<sup>[69]</sup>。张鹤等持不同看法,认为单一的深松耕作方式对花生增产效果不显著,但深耕配合秸秆还田可以增加单株饱果数、百果百仁质量以及荚果产量,促使 2017 年和 2018 年花生产量分别增加 17.64% 和 28.12%<sup>[70]</sup>;王秋菊等在瘠薄黑土上试验发现,深耕配施磷肥处理区大豆株高比对照区的大豆株高 2 年平均增加 5.15 cm,每株粒数增加 13.52 粒,大豆总产量增加 9.37%~9.83%<sup>[71]</sup>;黄炳林等研究发现,在黑土地上提前进行深松处理更利于大豆出苗发芽、前期植株生长发育,从而提高大豆叶面积指数,最终实现增产效果<sup>[72]</sup>;安崇霄等以伊犁河谷复播大豆农田为研究对象,得出深松 50 cm 处理效果最佳的结论,深耕可以有效提升植株叶面积指数、叶绿素含量等,从而获得较多的单株荚数、单株粒数<sup>[73-74]</sup>;同样针对伊犁河谷地区,库润祥等研究得出深松是除翻耕覆膜以外使复播大豆获得高产的有效措施,其大豆产量仅次于翻耕覆膜的结论<sup>[75]</sup>。总之,深耕深松的耕作方式可以促进荚果对镁、磷及籽仁对锌的吸收,提升花生含油量、蛋白质含量、蔗糖含量等。

廖青等在贫瘠旱地上研究发现,深耕深松区的甘蔗与常规耕作处理区的相比,根质量增加了 6.50 g,总根数增加 45 条,甘蔗株高增加 12.60 cm,并得出,深耕深松促进了甘蔗后期糖分积累,提高了甘蔗产量<sup>[76]</sup>;童文杰等研究发现,深耕深松通过增加青霉属真菌和紫霉属中紫色紫孢菌这 2 类有益微生物可重建微生物群落结构<sup>[77-78]</sup>;刘棋等研究发现,深耕深松处理促进了烤烟根系下扎,利于烤烟干物质积累,达到了增产增值的效益<sup>[79]</sup>;张锐等以海南热区砖红壤香蕉地试验发现,深松 40~45 cm 结合旋耕处理增加了土体浅层含水率,保水保肥后显著增加了香蕉根系数量<sup>[80]</sup>。针对过往机械易出现牵引阻力大、松土效果差、成本高等问题,学者们针对特定地区土壤类型研制出预破土凿式深松机、精旋起垄一体机等机械<sup>[81-82]</sup>。

### 4.2 深耕深松对水稻产量的影响

我国地大物博,有九大农业区,但当前深耕深松处理试验主要在东北黑土地、砂姜黑土等旱地进

行,作物种类也多涉及小麦、棉花、甘蔗、玉米、大豆等旱地作物,少有关于水稻土深耕深松的试验,可能是因为国内外对保护性耕作的重视或是考虑到深耕深松会破坏稻田蓄水保水的犁底层。但早期对水稻土深耕深松的经验总结可追溯到 1958 年,中国科学院土壤研究所孝感工作组认为,高度发育的潜育层因养分缺乏和氧化还原点位低的原因而不适合根系发育,所以需将水稻田深耕至少 40 cm 才能将 20 ~ 30 cm 土层以下的强度潜育层或浅育层生土熟化<sup>[83]</sup>。在中国农业科学院江苏分院水稻田试验地探究水稻根系对不同土层中放射性磷吸收速度发现,水稻根量 90% 分布在耕层 15 cm 以上,但 10% 下层根系吸收能力更强,因此深耕 26 ~ 30 cm 更利于作物养分供应<sup>[84]</sup>。1985 年,日本学者采用深耕技术改良水田取得增产效果<sup>[85]</sup>。王宝洪等于 1991—1995 年在广西的试验证明,深耕结合有机肥后水稻产量比对照年均增产 11 850 kg/hm<sup>2</sup><sup>[86]</sup>。上海海丰农场用全方位深松犁深松耕 35 ~ 40 cm 后,稻田透水性变好,水稻分蘖性增强,每穴穗干质量提高 33%,稻谷增产 525 kg/hm<sup>2</sup>,增幅为 7.5%<sup>[87]</sup>。

为明确深耕深松是否会因打破水田犁底层造成水稻减产的疑问,大量学者针对水稻田开展试验,但水稻产量结果各不相同。王秋菊等研究发现,用自主研发的深耕犁在黑土型水稻土上深耕 22 ~ 25 cm 后,2 年水稻产量与浅翻耕层 13 ~ 15 cm 的结果相近,但因深耕处理成本高,易造成耕层养分下降、插秧陷车等问题,由此认为,黑土型水田土壤耕作深度为 15 ~ 20 cm 较为适宜<sup>[88-89]</sup>。在东北盐化草甸土深耕后的第 2 年水稻减产 9.96% ~ 11.03%,可能是因为盐化草甸土土壤分散度高,不适合土壤团粒形成<sup>[90]</sup>。但陈佩勤探究砂姜黑土不同耕翻深度对水稻的影响时发现,深耕 20 ~ 30 cm 后水稻个体生长发育和总产量呈现增长趋势<sup>[91]</sup>。不同地区水田深耕结果略有差异,这可能与土壤类型、土壤结构的复杂和特殊有关。鉴于北方旱作区的深耕深松机械及经验不完全适用于南方稻麦轮作区域,中国学者开始针对南方水稻土的深松机械选择、深松扰动过程、深松产生影响等角度进行深入研究<sup>[92-95]</sup>。而针对稻田旱作的耕地,日本学者尝试利用农田水文模型评估每日水分蒸腾速率的变化,从而监测稻田转旱地种玉米后犁底层对水分胁迫垂直分布的影响<sup>[96]</sup>。

## 5 深耕深松与其他技术的集成模式及效果

深耕深松与翻耕、旋耕、耙地、耢地等耕作方式组合会形成各具特色的耕作方式,可有效避免长期采用单一耕作方式造成的土壤板结;深耕深松与其他培肥和土壤调理措施(如秸秆还田、施用有机肥、种植绿肥、施用石灰等)组合集成后能作为耕地质量保护与提升的措施,促进农作物增产增效。秸秆还田具有改善土壤团粒结构、调节土壤有机质含量等优点<sup>[97]</sup>;Liu 等通过田间试验发现,短期深松结合秸秆的耕作方式可以通过显著增加易氧化有机碳与土壤有机碳比率改善耕层深层和表层土壤微生物群落特征,最终提高我国东北地区的作物产量<sup>[98]</sup>;适量的作物残茬与耕层土壤混合后会使土壤中的碳氮比保持在适当的比率<sup>[99]</sup>;闫洪奎等研究发现,深松处理结合秸秆还田可以降低耕层土壤孔隙度和碱解氮、速效钾的含量<sup>[100]</sup>;胡心意等通过田间试验发现,秸秆还田提高了土壤微生物磷脂脂肪酸总含量、细菌和真菌的磷脂脂肪酸含量<sup>[101]</sup>;宫亮等通过 8 年田间定位试验发现,连年深松比隔年深松的作物增产效果好,深松配合施用有机肥后显著增加了玉米产量,但其增产速率随有机肥用量增加而降低<sup>[102]</sup>;龙潜等研究发现,深耕-深松轮耕处理后作物根部发育良好利于吸收养分,因而深层土壤养分含量较高<sup>[103]</sup>。且相比小麦季旋耕的传统耕作方式,深耕-深松轮耕处理产量显著增加;王科等研究发现,“深翻-深施肥-浅旋盖种”模式能使稻麦轮作系统中的稻茬小麦产量增长 10% 左右<sup>[104]</sup>。

## 6 展望

针对土壤板结、耕层变浅等问题,本文梳理归纳深耕深松耕作方式对不同区域不同土类类型的耕地土壤紧实度、容重、土壤水分、孔隙度、土壤团聚体等物理性状以及主要养分指标、土壤微生物数量、土壤酶活性、有机碳含量等生物性状的影响,侧重探讨深耕深松对玉米、小麦等旱地作物以及水稻产量的影响,以期客观评估深耕深松的优缺点,并对未来开展深耕深松耕作方式提出展望。

(1)关于深耕深松耕作方式是否会打破水稻土犁底层从而造成水稻减产、水稻土深耕深松扰动过程机制、耕作方式生产成本经济效益计算等研究应更加深入。

(2)由于地域差异大,农业集约化和机械化程

度不一致,深耕深松耕作前需充分了解耕作区域土壤是否存在障碍层、板结、耕层浅薄等障碍因素,重点考察耕作深度、垄间距、深松后的年份与不同作物产量之间的关系。根据土壤条件和耕作制度等基本情况确定机器选择和适宜的耕作深度,考虑将其他耕作方式及秸秆还田不断与深耕深松组合、集成,从而实现动态调整的试验方案,契合区域耕地土壤情况。

(3)当前研究主要集中在深松(耕)结合单一技术搭配对土壤理化性质和某一作物产量、生长情况的影响,涉及长期实行深松(耕)导致土壤理化性质和作物产量的研究,以及深耕深松搭配耕作技术后产生的差异性研究较少,而长期采用单一耕作方式可能会引起土壤结构或肥力某一方面不协调。可根据全国九大农业区或不同土壤类型设立深耕深松与其他技术集成的示范区,将深耕深松的机器选择、不同深度、耕作方式组合、是否覆盖还田等纳入试验方案中,以期建立可持续发展,可动态调整的科学高效耕作模式。

#### 参考文献:

- [1]刘红梅,李睿颖,高晶晶,等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. 生态环境学报,2020,29(6):1277-1284.
- [2]曾宪楠. 保护性耕作研究进展的文献计量分析[J]. 黑龙江农业科学,2020(6):128-133.
- [3]梁爱珍,张 延,陈学文,等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学,2022,42(8):1325-1335.
- [4]Lou S Y, He J, Li H W, et al. Current knowledge and future directions for improving subsoiling quality and reducing energy consumption in conservation fields [J]. Agriculture, 2021, 11(7):575.
- [5]张向前,杨文飞,徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J]. 生态环境学报,2019,28(12):2464-2472.
- [6]王志穷,王维新,李 霞,等. 保护性耕作条件下深松技术的国内外发展现状[J]. 农机化研究,2016,38(6):253-258.
- [7]尚小龙,曹建斌,王 艳,等. 保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):191-201.
- [8]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,2019,56(6):1370-1380.
- [9]刘淑梅,曲晓燕,张洪生,等. 小麦、玉米轮作制度下耕作方式对夏玉米农田土壤物理性状的影响[J]. 华北农学报,2013,28(6):226-232.
- [10]王玉玲,李 军,柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬玉米轮作土壤生产性能的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(1):107-116.
- [11]Kassam A, Friedrich T, Derpsch R. Global spread of conservation agriculture [J]. International Journal of Environmental Studies, 2019,76(1):29-51.
- [12]Peralta G, Alvarez C R, Taboada M. Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina: a meta-analysis [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211:105022.
- [13]Sasal M C, Boizard H, Andriulo A E, et al. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff [J]. Soil and Tillage Research, 2017,173:33-41.
- [14]张 丽,张中东,郭正宇,等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(1):102-106,117.
- [15]Feiza V, Feizienė D, Sinkevičienė A, et al. Soil water capacity, pore-size distribution and CO<sub>2</sub>e-flux in different soils after long-term no-till management [J]. Zemdirbyste - Agriculture, 2015,102(1):3-14.
- [16]Çelik İ, Günel H, Acar M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate [J]. Soil and Tillage Research, 2019,185:17-28.
- [17]周吉红,王俊英,孟范玉,等. 耕作方式对小麦播种质量、产量和效益的影响[J]. 作物杂志,2022(4):199-204.
- [18]郭仁松,王 亮,崔建平,等. 深松耕作对新疆绿洲棉田土壤特性及产量形成的影响[J]. 西北农业学报,2021,30(12):1804-1811.
- [19]程思贤,刘卫玲,靳英杰,等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(9):1355-1365.
- [20]王 斌,李满有,王欣盼,等. 深松浅旋对半干旱区退化紫花苜蓿人工草地改良效果研究[J]. 草业学报,2022,31(1):107-117.
- [21]于淑婷,赵亚丽,王育红,等. 轮耕模式对黄淮海冬小麦—夏玉米两熟区农田土壤改良效应[J]. 中国农业科学,2017,50(11):2150-2165.
- [22]孔晓民,韩成卫,曾苏明,等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学,2014,22(1):108-113.
- [23]罗锡文,李就好,朱余清,等. 耕作方式对砖红壤物理特性和含水率的影响[J]. 农业机械学报,2006,37(12):62-66.
- [24]李晓龙. 深耕方式对土壤物理性状及春玉米根冠特性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014:30-31.
- [25]郭海斌,冀保毅,王巧锋,等. 深耕与秸秆还田对不同质地土壤物理性状和作物产量的影响[J]. 河南农业大学学报,2014,48(4):505-511.
- [26]赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(13):2489-2503.
- [27]刘 洪,韦本辉,党柯柯,等. 粉垄耕作对甘蔗土壤微生物群落的影响[J]. 热带作物学报,2022,43(3):597-605.
- [28]Ulén B, Aronsson H, Bechmann M, et al. Soil tillage methods to control phosphorus loss and potential side-effects: a Scandinavian review [J]. Soil Use and Management, 2010,26(2):94-107.

- [29] 李锡锋, 许 丽, 张守福, 等. 砂姜黑土麦玉农田土壤团聚体分布及碳氮含量对不同耕作方式的响应[J]. 山东农业科学, 2020, 52(3): 52–59.
- [30] 冀保毅. 深耕与秸秆还田的土壤改良效果及其作物增产效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [31] 侯永坤. 不同耕作模式对土壤理化性质和冬小麦产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 12–13.
- [32] 丁琪洵, 詹雪洁, 张天恩, 等. 宿州市耕地土壤养分时空变化特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 97–105.
- [33] 聂良鹏, 郭利伟, 牛海燕, 等. 轮耕对小麦—玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(3): 468–478.
- [34] 韩 上, 武 际, 李 敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 276–284.
- [35] 唐先亮, 魏甲彬, 周玲红, 等. 耕作方式对稻田土壤微生物量碳氮的动态影响[J]. 作物研究, 2016, 30(3): 282–287.
- [36] 全昊天. 耕作和施肥对砂姜黑土理化性质的影响及微生物响应[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020: 44–45.
- [37] 刘国利, 崔双双, 孙泽强, 等. 深松深度对鲁西南土壤耕层理化性状和作物产量的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(2): 71–78.
- [38] 朱长伟, 龙 潜, 董士刚, 等. 小麦—玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 51–63.
- [39] 沈晓琳, 王丽丽, 汪 洋, 等. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 361–370.
- [40] 郭书亚, 尚 赏, 汤其宁, 等. 不同轮耕方式与生物炭对土壤酶活性、土壤养分及小麦和玉米产量的影响[J]. 作物杂志, 2022(3): 211–217.
- [41] 巴晓博, 隋 鑫, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物—玉米间作对土壤碳氮含量及相关酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 577–587.
- [42] Roldán A, Salinas – García J R, Alguacil M M, et al. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions[J]. Geoderma, 2005, 129(3/4): 178–185.
- [43] Wang Z T, Li Y, Li T, et al. Tillage practices with different soil disturbance shape the rhizosphere bacterial community throughout crop growth[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104501.
- [44] 刘淑梅, 孙 武, 张 瑜, 等. 小麦季不同耕作方式对砂姜黑土玉米农田土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(1): 103–107.
- [45] 杜聪阳, 杨习文, 王 勇, 等. 不同耕作方式及施氮水平对砂姜黑土物理性状、微生物学特性及小麦产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(8): 13–21.
- [46] Pandey D, Agrawal M, Bohra J S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 51–60.
- [47] 龙 潜. 不同轮耕模式对潮土不同土层理化性状及作物产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- [48] 刘红杰, 习向银, 刘朝科, 等. 深翻耕和连作对植烟土壤养分及其生物活性的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 26(2): 298–303.
- [49] 黄炳林, 王孟雪, 金喜军, 等. 不同耕作处理对土壤微生物、酶活性及养分的影响[J]. 作物杂志, 2019(6): 104–113.
- [50] 张博文. 深松对黑土区土壤特性及细菌群落结构影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [51] 岳 衡, 李闪闪, 段雅欣, 等. 深松耕对宁南山区马铃薯田土壤细菌多样性的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(12): 998–1008.
- [52] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 465–473.
- [53] 苑广源, Munyampirwa T, 毛丽萍, 等. 16 年保护性耕作措施对粮草轮作系统土壤碳库及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 252–258, 267.
- [54] Guo L L, Wang X J, Wang S B, et al. Tillage and irrigation effects on carbon emissions and water use of summer maize in North China Plains[J]. Agricultural Water Management, 2019, 223: 105729.
- [55] 韦安培, 丁文超, 胡恒宇, 等. 耕作方式及秸秆还田对土壤性质、微生物碳源代谢及小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 145–152.
- [56] 张 霞, 杜昊辉, 王旭东, 等. 不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2223–2237.
- [57] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155–165.
- [58] 王永慧, 轩清霞, 王丽丽, 等. 不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 876–884.
- [59] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1558–1570.
- [60] Al – Kaisi M M, Kwaw – Mensah D. Quantifying soil carbon change in a long – term tillage and crop rotation study across Iowa landscapes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84(1): 182–202.
- [61] 齐 华, 刘 明, 张卫建, 等. 深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(4): 191–196.
- [62] 高 鹏, 孙继颖, 高聚林, 等. 深松对春玉米田土壤贮水性能及玉米子粒水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(4): 90–96.
- [63] 马 阳, 吴 敏, 王艳群, 等. 不同耕作施肥方式对夏玉米氮素利用及土壤容重的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 171–176.
- [64] 杨 雪, 逢焕成, 李铁冰, 等. 深旋松耕作法对华北缺水区域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.
- [65] 杨群辉, 张 庆, 王应学, 等. 红壤坡地深松耕对土层特性和玉米产量的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(12): 2783–2789.
- [66] 吴广俊, 刘 鹏, 董树亭, 等. 不同深松深度对夏玉米根系时空



- 分布及氮素利用的响应[J]. 山东农业科学, 2016, 48(10): 92-97.
- [67] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 50-54.
- [68] 郑亚萍, 吴正锋, 王春晓, 等. 棕壤花生镁营养特性对不同耕作措施的响应[J]. 核农学报, 2018, 32(12): 2406-2413.
- [69] 孙学武, 沈浦, 刘璇, 等. 花生锌吸收分配特性及对土壤耕作措施的响应特征[J]. 花生学报, 2020, 49(2): 36-42.
- [70] 张鹤, 蒋春姬, 董佳乐, 等. 寒地秸秆还田配套深松对土壤肥力及花生生长和产量的影响[J]. 花生学报, 2020, 49(3): 14-21.
- [71] 王秋菊, 高中超, 张劲松, 等. 深耕培肥改良瘠薄黑土理化性质及提高大豆产量的研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1393-1398.
- [72] 黄炳林, 王孟雪, 金喜军, 等. 不同中耕措施对土壤水分与大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 68-75.
- [73] 安崇霄, 杜孝敬, 符小文, 等. 伊犁河谷复播大豆光合特性、干物质积累和产量对深松与留茬的响应[J]. 新疆农业大学学报, 2019, 42(2): 114-120.
- [74] 安崇霄, 杜孝敬, 徐文修, 等. 周年土壤耕作组合对伊犁河谷冬小麦一夏大豆氮素吸收、利用与产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(2): 225-231.
- [75] 库润祥, 符小文, 张永杰, 等. 复播大豆农田不同耕作方式对土壤物理性质、硝态氮及产量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 145-152.
- [76] 廖青, 韦广泼, 刘斌, 等. 机械化深耕深松栽培对甘蔗生长及产量的影响[J]. 广西农业科学, 2010, 41(6): 542-544.
- [77] 童文杰, 杨敏, 王皓, 等. 耕作方式对山地烟田烤烟根际土壤真菌群落结构的影响[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(1): 56-63.
- [78] 童文杰, 邓小鹏, 徐照丽, 等. 不同耕作深度对土壤物理性状及烤烟根系空间分布特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1464-1472.
- [79] 刘棋, 王津军, 封幸兵, 等. 耕作方式对山地烟田土壤物理性状及烤烟根系空间分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1673-1681.
- [80] 张锐, 梁雨峰, 邢洁洁, 等. 不同耕层结构对海南香蕉地砖红壤物理特性的影响[J]. 农机化研究, 2022, 44(2): 214-218.
- [81] 张涛, 李英, 张晓春, 等. 黏重土壤精旋起垄一体机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 250-258.
- [82] 张喜瑞, 张锐, 汝绍锋, 等. 海南热区香蕉地预破土凿式深松机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 49-55.
- [83] 中国科学院土壤研究所孝感工作组. 湖北孝感县水稻丰产区深耕深翻群众经验总结[J]. 土壤, 1959(2): 11-14.
- [84] 鲁加坤, 吴钧, 王莲池, 等. 从水稻(晚稻)对不同深层土壤中 $P^{32}$ 的吸收试论深耕合宜深度[J]. 原子能科学技术, 1961(2): 111-113.
- [85] 川口桂三郎. 水田土壤学[M]. 汲惠吉, 孙红霞, 孙昌其, 译. 北京: 农业出版社, 1985: 346-349.
- [86] 玉宝洪, 李桂山, 蒙定球. 深耕和增施有机肥对土壤肥力及水稻产量的影响[J]. 土壤肥料, 1997(6): 32-34.
- [87] 曹晓利, 单金凤, 马里超, 等. 深松耕在水稻上增产效果的初步探讨[J]. 上海农业科技, 2001(3): 79-80.
- [88] 王秋菊, 高中超, 张劲松, 等. 黑土稻田连续深耕改善土壤理化性质提高水稻产量大田试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 126-132.
- [89] 吕倩倩, 杨森, 丛聪, 等. 耕作和有机物料还田对黑土区坡耕地田间杂草群落和生物量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 121-127.
- [90] 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.
- [91] 陈佩勤. 不同的耕翻深度对水稻生长的影响[J]. 农业技术与装备, 2021(8): 37-38.
- [92] 张文斌, 孙少华, 李志刚. 苏州地区机械化深松技术试验研究与分析[J]. 农业装备技术, 2012, 38(5): 20-23.
- [93] 丁启朔, 李杨, Belal E A, 等. 基于田间摄像的多参数水稻土深松扰动行为与效应研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 44-55.
- [94] 丁启朔, 任骏, Belal E A, 等. 湿黏水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38-48.
- [95] 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.
- [96] Hamada K, Inoue H, Mochizuki H, et al. Effect of hardpan on the vertical distribution of water stress in a converted paddy field[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 214: 105161.
- [97] Kan Z R, Liu Q Y, Virk A L, et al. Effects of experiment duration on carbon mineralization and accumulation under no-till[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104939.
- [98] Liu X, Peng C, Zhang W J, et al. Subsoiling tillage with straw incorporation improves soil microbial community characteristics in the whole cultivated layers; a one-year study[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105188.
- [99] Celik A, Altikat S. The effect of power harrow on the wheat residue cover and residue incorporation into the tilled soil layer[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105202.
- [100] 闫洪奎, 王欣然. 长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(增刊1): 250-255.
- [101] 胡心意, 傅庆林, 刘琛, 等. 秸秆还田和耕作深度对稻田耕层土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(7): 1202-1210.
- [102] 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.
- [103] 龙潜, 董士刚, 朱长伟, 等. 不同耕作模式对小麦一玉米轮作下潮土养分和作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 167-174, 298.
- [104] 王科, 李浩, 邓劲松, 等. 不同耕作施肥方式对稻茬小麦氮素利用及土壤容重的影响[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(6): 654-660.