

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. [Liang Aizhen, Zhang Yan, Chen Xuewen et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(8): 1325-1335.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.08.001

东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究

梁爱珍¹, 张延¹, 陈学文¹, 张士秀¹, 黄丹丹¹, 杨学明², 张晓平¹,
李秀军¹, 田春杰¹, McLaughlin Neil B³, 相洋⁴

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 吉林 长春 130102; 2. Harrow Research and Development Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Harrow, ON N0R 1G0, Canada; 3. Ottawa Research and Development Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Ottawa, ON KA 0C6, Canada;
4. 吉林省农业技术推广总站, 吉林 长春 130033)

摘要: 东北黑土区承担着国家粮食安全“稳压器”的重要责任。然而, 由于长期超负荷开发利用导致黑土日益退化, 黑土资源的永续利用受到严重制约。理论与实践证明, 保护性耕作是保护黑土地、推动黑土地质量和耕作效益绿色增长的发展模式。综述了保护性耕作的基本内涵及其在东北黑土区的发展现状与技术概况, 从保护性耕作在土壤保持、保墒效益、结构改善、固碳培肥和土壤生物多样性增加、节本增效等方面系统评估了东北黑土区实施保护性耕作后的生态与经济效益, 提出黑土区实施保护性耕作存在的问题与未来发展方向, 以促进黑土地保护与利用协调发展、推动保护性耕作高质量跨越式发展。

关键词: 黑土地; 保护性耕作; 土壤有机质; 生态效益

中图分类号: S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)08-1325-11

黑土作为世界公认的最为珍贵和肥沃的土壤资源, 因其性状优良、自然肥力高, 被认为是最适宜作物生长的土壤。中国东北黑土区位于东北地区, 总面积为 109 万 km², 约占全球黑土区总面积的 12%, 主要分布在呼伦贝尔草原、大小兴安岭地区、三江平原、松嫩平原、松辽平原部分地区和长白山地区, 涉及黑龙江省和吉林省全部、辽宁省东北部及内蒙古自治区“东四盟”, 共 246 个县(市、旗)^[1]。东北黑土区既是中国最大的粮食生产基地和商品粮输出基地, 也是保障国家粮食安全的“压舱石”。然而, 长期的不合理耕作和高强度利用导致黑土面临“量减质退”的窘境, 主要表现为黑土层变薄和有机质下降。水利部水土流失动态监测结果显示, 部分地区黑土层厚度已由 20 世纪 50 年代的 60~80 cm 下降到 20~40 cm^[1]。吉林省黑土耕层有机质

含量由垦前的 40~100 g/kg 下降为 20~50 g/kg^[2]。2020 年 7 月 22 日习近平总书记在吉林省考察时特别指出, 一定要保护好黑土地这一“耕地中的大熊猫”。同年 12 月 28 日习近平总书记在中央农村工作会议上再次强调, “要把黑土地保护作为一件大事来抓, 把黑土地用好养好”。如何保护和利用好黑土地已成为当今社会各界重点关注的议题。

理论与实践表明, 保护性耕作通过秸秆还田和减少土壤扰动, 优化土壤结构并促进有机质的形成与稳定, 可保证土壤的生产和生态功能, 是提升黑土地力和实现黑土资源保护性利用的重要保障。2020 年 3 月, 农业农村部与财政部联合印发《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)》, 部署在适宜区域全面推广应用保护性耕作, 促进东北黑土地保护和农业可持续发展。

收稿日期: 2021-08-24; **修订日期:** 2022-02-11

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“黑土粮仓”项目(XDA28080200)、国家自然科学基金项目(41877095, 42101277), 吉林省科技发展计划项目中青年科技创新领军人才及团队项目(20200301022RQ)资助。[Foundation: Strategic Priority Research Program of the CAS (XDA28080200), National Natural Science Foundation of China (41877095, 42101277), Innovation Leadership and Team Program in Sciences and Technologies of Jilin Province (20200301022RQ).]

作者简介: 梁爱珍(1979-), 女, 山西交城人, 博士, 研究员, 主要从事农田土壤管理与碳氮循环等研究。E-mail: liangaizhen@jiga.ac.cn

1 保护性耕作的定义与基本内容

保护性耕作兴起于北美地区,是发达国家可持续农业的主导技术之一。目前,该技术已在美国、加拿大等 70 多个国家推广应用,面积达到 1.8 亿 hm^2 ,占世界耕地总面积的 12.5%^[3]。保护性耕作的概念经历了多个阶段的修正^[4]。20 世纪 80 年代,美国将保护性耕作定义为“为减少土壤侵蚀,任何能保证在播种后地表作物秸秆残茬覆盖率不低于 30% 的耕作和种植管理措施都称为保护性耕作”^[5]。这一定义在国际上被普遍接受。当前,国内对保护性耕作的认识至今没有统一,存在诸多类型的提法。1990 年 10 月全国少耕免耕与覆盖技术学术讨论会上将保护性耕作定义为:“以水土保持为中心,保持适量的地表覆盖物,尽量减少土壤耕作,并用秸秆覆盖地表,减少风蚀和水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力的一项先进农业耕作技术”^[6]。2002 年中国农业部将其定义为“对农田实行免耕、少耕,并用作物秸秆覆盖地表,减少风蚀、水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力的先进农业耕作技术”。中国农业大学高旺盛研究团队提出,保护性耕作技术是指保水保土的耕作措施,通过土壤少耕免耕、农田地表微地形改造及地表覆盖技术,达到农田“少动土”“少裸露”“少污染”以及“适度湿润”和“适度粗糙”的耕层土壤状态,以减少农田土壤侵蚀,保护农田生态环境^[4]。总之,保护性耕作的核心内容就是减少土壤扰动和增加地表覆盖,降低土壤侵蚀的同时蓄水保墒,通过合理的作物搭配、水肥调控等配套技术,实现培肥地力、固碳减排,同时减少作业次数,节约成本投入,效益产出最大化。保护性耕作常见的耕作类型主要包括免耕、垄作、条/带耕、罩作等^[7],其技术关键环节包含免耕播种机播种施肥、秸秆还田处理、深松与表土作业及病虫草害防控^[8]。

2 东北黑土区保护性耕作技术的发展进程

东北地区保护性耕作的试验与研究开始于 20 世纪 60 年代初黑龙江国营农场的免耕种植小麦试验^[9]。随着 20 世纪 70 年代国内相继引进了保护性耕作的更多单项技术(如深松、秸秆覆盖等),东北地区也开始了相应的保护性耕法,并在小范围内推广和试验,如 20 世纪 70 年代末的少耕法(原垄与耙耱播种)^[10],80 年代中后期的免耕少耕,留茬免耕

和旋耕除茬播种,灭茬起垄上播,但基本是秸秆不还田,仅根茬还田^[11]。然而,受当时传统耕作方式禁锢和生态环境保护意识淡薄、农业发展水平、机械化水平、免耕技术等限制,保护性耕作技术并没有得到认可,而逐渐被搁浅。1999 年吉林省农业科学研究院提出玉米宽窄行高留茬交替休闲耕作(或玉米宽窄行留高茬交互种植)技术,采用通用播种机留高茬、灭茬、深秋起垄、镇压。2000 年国家宣布在京、津、晋、冀、辽、蒙 6 个省(市/区)试行保护性耕作,随即 2001 年在辽宁省推广 450 hm^2 ,吉林省也于同年提出计划在中部黑土区建立两处万亩保护性耕作技术示范基地。2001 年 9 月中科院东北地理与农业生态研究所杨学明、张晓平团队在吉林省德惠市建立东北黑土区首个秸秆覆盖还田保护性耕作长期定位试验基地开始科学研究,并率先采用美国购进的牵引式免耕播种机一次性完成秸秆覆盖情况下的免耕播种、施肥、覆土镇压作业,实现了真正意义上的玉米全程机械化秸秆覆盖还田保护性耕作。随着国家对保护性耕作的重视,2002 年以来中国将保护性耕作技术列入农业部示范项目,在“十一五”期末,保护性耕作实施面积超过 6000 万 hm^2 ^[12]。2020 年农业农村部颁布了《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)》^[13]。一系列的政策大大推动了东北黑土地保护与利用工作的开展,保护性耕作技术的示范推广步伐将明显加快,其在农业可持续发展中所起的作用也将日趋重要。

3 东北地区保护性耕作技术概况

东北地区保护性耕作技术研究与推广工作起步较晚,但在国家政策引导、地方政府响应推进和各界农业生产从业人员积极探索下发展迅速。保护性耕作技术因东北黑土区地形、气候、土壤和生产实践等差异,形成 3 种主要保护性耕作技术类型。

3.1 秸秆覆盖还田免耕

秸秆覆盖还田免耕有效解决了土壤风蚀和水蚀日益加剧,春季干旱少雨,作物倒伏、抗灾能力差,土壤有机质下降、土壤肥力降低的问题。秸秆覆盖还田免耕(图 1a)包括秸秆全量覆盖还田免耕、秸秆部分覆盖还田免耕、秸秆高留茬覆盖还田免耕 3 种形式:① 秋季采用玉米联合收获机进行收获与秸秆粉碎全量还田;② 秋季玉米收获粉碎后利用秸秆打捆机、秸秆捡拾抛撒机等农机设备实现秸秆部分覆盖还田;③ 秋季收获时调整联合收获机割台高度或



a 秸秆覆盖还田免耕; b 宽窄行秸秆覆盖还田免耕; c 秸秆覆盖还田浅旋条耕(吉林省榆树市刘臣摄); d 秸秆覆盖条/带耕作

图 1 东北地区保护性耕作技术

Fig.1 Conservation tillage techniques in Northeast China

拆除联合收获机配套还田机的动力来实现高留茬秸秆覆盖还田。3 种类型均在翌年春季利用免耕精量播种机实现播种、施肥、镇压一次作业。

3.2 宽窄行秸秆全量覆盖还田免耕/宽窄行留茬交替休闲种植

宽窄行秸秆全量覆盖还田免耕/宽窄行留茬交替休闲种植有效解决了春秋两季整地土壤失墒较重, 夏季地表径流严重, 降水利用效率低; 实施秸秆还田困难, 土壤风蚀严重, 土地用养失调, 黑土层变薄; 耕作层变浅, 犁底层加厚等问题。主要包括宽窄行秸秆全量覆盖还田免耕和宽窄行高留茬秸秆覆盖还田免耕(图 1b)。采用宽行和窄行相间排列(40 cm/90 cm、42 cm/88 cm、50 cm/80 cm 等)的方式种植玉米。秋季玉米收获后秸秆全量覆盖还田或者高留茬覆盖还田, 次年春天用秸秆归行机将宽行秸秆归理到窄行后用免耕播种机在宽行中间直接免耕播种、施肥、镇压一次作业, 中耕进行宽行深松追肥。隔年苗带轮换、交替休闲。

3.3 秸秆全量覆盖还田条带耕作

秸秆全量覆盖还田条带耕作有效解决了秸秆覆盖免耕推广中部分地区存在的留高茬难、行距小、春季风大、秸秆分布不均、播种质量难控、苗期低温大小苗、增产效果不稳定等问题。主要包括秸秆全量覆盖还田浅旋条耕和秸秆覆盖条/带耕 2 种类型。秸秆全量覆盖还田浅旋条耕(图 1c)是在秋季作物收获后或春季玉米播种前采用浅旋条耕机将秸秆归

行形成秸秆覆盖带和归行后无秸秆覆盖耕作播种带; 秸秆覆盖条/带耕作(strip tillage)(图 1d)适用于低洼冷凉区域, 是美国保护性耕作的一种形式。主要特点是秋季作物收获后秸秆全覆盖基础上, 利用条带耕作机在秋季或春季播种前制出约 25 cm 宽平整疏松的播种带, 秸秆残留物保留在两个播种带之间, 全生育期保持秸秆覆盖, 土壤搅动(松土和耙地)一般不超过垄宽的 $1/3^{[14]}$ 。以上 2 种技术均采用免耕播种机播种、施肥、镇压一次作业。

上述保护性耕作技术因地形、气候、农业生产条件影响正不同程度地被各地应用, 而且根据各地情况还形成了具有地方特色的保护性耕作技术, 如保护性耕作与传统耕作结合起来形成的秸秆覆盖垄作技术、秸秆还田免耕滴灌技术等。总体来看, 秸秆覆盖还田保护性耕作技术自 2000 年以后开始在东北地区试验示范, 历经 20 a 推广地域已遍及黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古, 覆盖黑土、黑钙土、风沙土、盐碱土等土壤类型, 截至 2021 年底黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古实施保护性耕作面积分别达到 2310 万 hm^2 、2875 万 hm^2 、850 万 hm^2 、1116 万 $\text{hm}^2^{[15-18]}$ 。

4 黑土区实施保护性耕作的生态效益和经济效益

保护性耕作是保护黑土地经济有效、现实可行的举措之一。东北黑土区实施保护性耕作技术, 不仅能有效利用作物秸秆, 解决东北秸秆过剩、农民

不得不焚烧秸秆导致环境污染的大难题,而且还能培肥土壤,形成健康的土壤生态环境,具有更高的生态效益。同时保护性耕作最大的优势还在于通过降低成本投入来提高经济效益。

4.1 生态效益

保护性耕作技术的生态效益主要表现在固土效益和改善黑土物理结构、蓄水保墒效益、提升黑土固碳及养分供给能力、减碳效益(CO_2 排放量的下降)和土壤生物多样性增加(维持生态效益的可持续性)5个层面上。

1) 保护性耕作具有明显的固土和改善黑土物理结构的作用。东北黑土区水土流失严重,特别是坡耕地的水土流失,占黑土地水土流失面积的46.39%,黑土层正在以每年0.1~0.5 cm的速度被剥蚀^[1]。遏制“黑土层变薄”已成为保障东北黑土区粮食生产能力的重要手段。大量实验证明,东北黑土区实施保护性耕作后可以有效地防止土壤流失,而且效果因黑土层厚度不同而异,黑土层越薄,防止土壤流失的效果越为显著,最高可减少水土流失80 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[19]。保护性耕作可减少土壤水蚀导致的土壤流失98%以上^[20],土壤风蚀导致的土壤跃移量、沉降量和蠕移量分别降低13.11%、40%和39.41%^[21]。中国科学院海伦水土保持监测研究站多年监测结果显示,免耕覆盖下每年土壤流失厚度不足1 mm,低于裸露土壤和传统耕作方式下的土壤流失厚度(分别为24.02 mm和2.42 mm)^[1]。

保护性耕作对土壤扰动少,土壤物理结构的影响最为直观。较传统耕作耕层(0~20 cm)土壤容重和紧实度分别增加10%~14%和40%~50%^[22],同时促进黑土大团聚体(>2 mm)的形成,降低微团聚体(<0.25 mm)含量^[23],使耕层土壤的结构稳定性得到一定程度的恢复。在黑土区中部以及南部实施秸秆覆盖全量还田保护性耕作后,土壤紧实度的适宜增加有利于作物根系的生长,使其向下扎的更深、更广^[24],增强作物抵御风灾的能力^[25]。在北部的低洼冷凉区域,秸秆覆盖全量还田会加重土壤的滞水黏重,通透性差,垂直下渗较弱,对土壤物理结构的改善效果不如秸秆部分覆盖还田和秸秆混土还田^[26]。总体而言,保护性耕作明显提升了东北黑土区土壤结构的稳定性,增强了土壤对外界扰动的抵抗力和恢复力,为其在蓄水保水、养分循环和生物多样性保护等生态功能方面发挥作用奠定了基础。

2) 保护性耕作明显强化了东北黑土区的土壤

蓄水保墒效益。东北黑土区属于典型的旱作雨养农业区,因此土壤的蓄水保墒能力是决定作物是否丰收的重要因素。土壤的蓄水保墒能力主要与降水的接纳和水分的保持2个方面密切相关。传统耕作下频繁翻耕后裸露于地表的土壤颗粒,不仅易被风刮起来悬浮到大气中形成沙尘暴天气,而且还易在飞溅的雨滴及地表径流作用下流失,造成严重的水土流失。多年黑土区长期定位实验证明,保护性耕作可有效减少土壤水蚀导致的土壤水分流失^[18]、增加雨水蓄存能力,使水分利用率提高7.24%^[27]。这主要是由于保护性耕作一方面通过减少耕作次数使土壤大孔隙(>100 μm)的数量和入渗速率分别增加了9.68%~11.22%和160%以上^[28~30];另一方面通过增加地表残茬的覆盖降低土壤表层的蒸发量,进而可以有效地减轻或阻挡土壤风蚀和水蚀,保持土壤中的水分,从而提高土壤水分和养分的流通能力。保护性耕作对黑土蓄水保墒的积极影响可以贯穿作物整个生育期,使生育期土壤含水量提高15%~25%左右,相当于土壤每年多蓄纳降水60~80 mm,能有效缓解东北地区“十年九春旱”土壤墒情差的问题。

3) 保护性耕作显著提升黑土固碳及养分供给能力。随着黑土层厚度不断变薄,土壤有机质含量急剧下降;与开垦前相比,黑土有机质含量下降了50%~60%,土壤潜在生产力下降了20%以上^[31]。保护性耕作通过增加碳源(秸秆还田)、减少土壤扰动(减少翻耕频率),可以有效减少有机质的矿化分解并提高土壤有机质的含量^[7]。长期定位实验表明^[32],秸秆覆盖全量还田保护性耕作实施5 a后,表层5 cm黑土有机质含量增加10%,15 a后增加50%,若配施化肥耕层(0~20 cm)土壤有机质含量将恢复到历史损失量的1/3^[33]。与传统耕作相比,秸秆覆盖还田免耕15 a黑土有机碳储量提高30%,增加速率最高可达到0.80 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,这一数值高于美国和华北麦玉两熟区免耕土壤固碳速率[0.34和0.56 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$],说明黑土固碳潜力巨大,而传统耕作则导致黑土有机碳储量正以0.52 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的速率继续减少^[32]。张延等^[34]基于15 a的长期定位试验,利用物理、化学及生物分组方法精确定量了保护性耕作增加的土壤有机碳储量在各组分中的分配(图2)。团聚体角度,保护性耕作实施后新增的有机碳储量70%储存在大团聚体中,其中有利于有机碳长期固定的大团聚体内被包裹的微团聚体占明显优势;密度粒径角度,保护性耕作不仅

增加了轻组有机碳组分, 对粘粉粒结合碳的提升也有显著作用, 尤其是粘粒有机碳储量(50%), 从物理分组层面证明了保护性耕作对有机碳固存的积极作用; 化学组分显示, 保护性耕作不仅增加了有利于微生物、植物吸收利用的总活性碳库, 同时也增加了有利于长期固碳的惰性碳库。而保护性耕作下增加的有机碳储量有近 1/2 表现为微生物残体碳储量的增加, 其中真菌比例较高, 是细菌的两倍。化学分组与生物分组佐证了保护性耕作对有机碳长期固定的有效性。

土壤有机质是土壤氮、磷等养分的重要营养库, 也是植物生长所需的速效养分的主要来源。随着保护性耕作年限的增加, 黑土有机质含量逐年递增, 耕层(0~20 cm)土壤氮、磷、钾、速效氮、速效磷、速效钾含量显著增加(增幅在 5%~30% 不等), 有利于土壤养分供应能力的提高, 减少化肥施用量 20% 左右^[35-37]。也有研究认为实施保护性耕作后土壤中的无机氮会被微生物同化固定, 不利于作物对氮素的吸收, 因而需要施用更多的化学氮肥。Liu Siyi 等^[38]使用¹⁵N 同位素成对标记技术研究发现, 长期免耕虽然没有对整个耕层土壤的初级矿化速率产生影响, 但显著降低了铵态氮的微生物同化速率, 因而提高了黑土向作物供应有效氮素的能力。

4) 保护性耕作大幅提升东北黑土区减碳效益。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 是大气碳

库储量的 2 倍多。因此, 土壤有机碳库的微弱变化, 都将引起大气 CO₂ 浓度的显著改变。东北黑土区由于多年来的掠夺式开垦及不合理利用, 造成耕地产生的碳排放越来越多。据估计东北黑土自耕种以来向大气层排放的碳约为 35~435 Tg^[39], 并且碳排放总量呈现逐年增加的趋势(年均增长量为 1.4%~1.8%)^[40], 这对当前绿色低碳的经济发展体系造成了一定程度的负面影响。而保护性耕作一方面通过减少耕作、特别是取消铧式犁翻耕, 可以大幅减少土壤有机质与空气接触的氧化机率, 另一方面通过秸秆还田的方式, 直接添加有机物料, 进而显著增加土壤有机质并减少因传统耕作造成的 CO₂ 向大气中的大量排放。连续实施秸秆覆盖全量还田保护性耕作 10 a 后, CO₂ 的年均排放量比传统耕作降低了 10% 左右^[41]。此外, 保护性耕作比传统耕作具有更高的碳收集潜力, 降低了 50%~80% 的碳足迹(即粮食生产的净碳排放)。根据欧洲能源交易所碳交易价格折合成碳交易成本, 保护性耕作能够提供 1000~2000 元/hm² 的效益。

5) 保护性耕作有助于提高土壤生物多样性、维持生态效益的可持续性。土壤生物作为土壤的重要组成部分, 在维持土壤结构、增加土壤碳汇、抑制病虫害和提升作物产量等农业生态服务功能方面发挥着重要作用。联合国粮食及农业组织(FAO)的《世界土壤宪章》^[42]明确指出: 地球上至少有 1/4 的生物

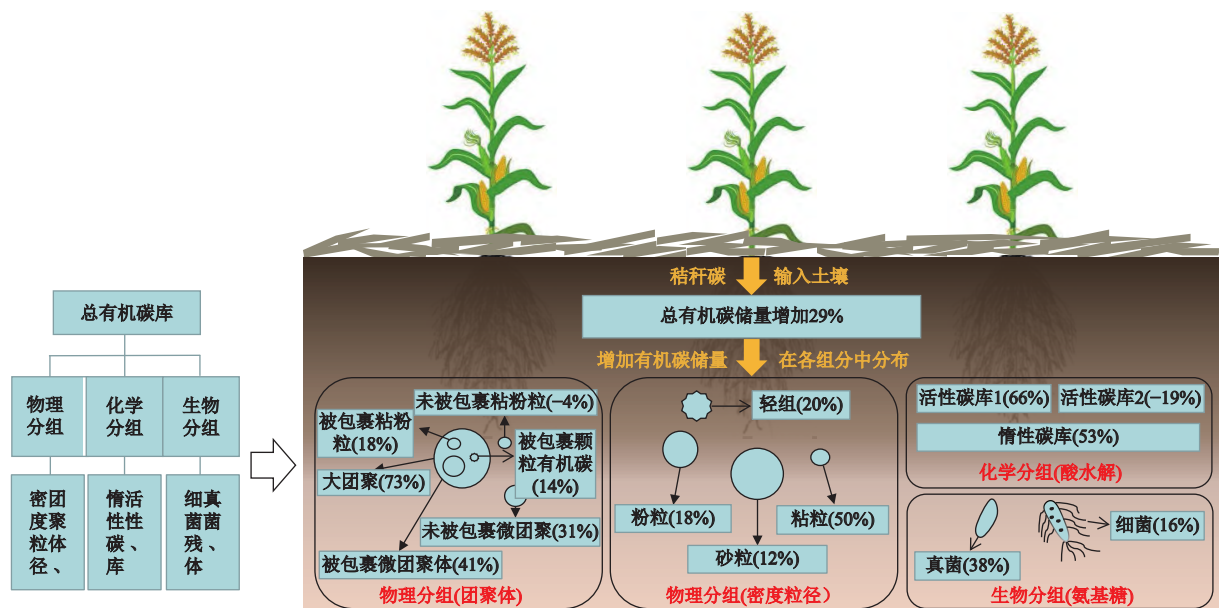


图2 保护性耕作下黑土不同组分有机碳储量变化(0~20 cm)

Fig.2 Changes of soil organic carbon storage in different components of black soil under conservation tillage (0-20 cm)

蕴藏于土壤中, 它们对物质循环、能量流动和粮食生产等生态系统的功能和服务具有重要的作用。

土壤生物种类繁多、数量巨大, 并通过取食作用形成了错综复杂的食物网结构。在健康的土壤中, 食物网中各类生物群落处于相互制衡的动态平衡状态中, 有利于促进土壤养分元素循环, 维持生态系统健康、稳定和可持续性。在东北黑土区长期(> 10 a) 实施保护性耕作后, 不仅改善了食物网过于“简化”的结构, 而且食物网中各生物类群(微生物、线虫、跳虫、螨类及蚯蚓)的多样性也得到了不同程度的提高, 如物种丰富度提高了 10%~20%, 密度增加了 20%~40%, 生物量增加了 40%~60% 等^[43]。以有“土壤生态系统工程师”美誉的蚯蚓为例, 全量秸秆覆盖还田免耕实施 5 a, 黑土中蚯蚓数量从每平方米几乎没有(0.7 条)增加到 10 条左右, 个体质量从每条 0.15 g 增加到 1.55 g^[44]。此外, 保护性耕作促进了杂食-捕食线虫及 c~p 值较高(≥ 3)的食微线虫功能群丰度的增加^[45]。杂食-捕食线虫丰度的增加是抑制保护性耕作下秸秆输入引发土传病的重要原因。因而, 保护性耕作实施后玉米感染土壤病原体的机率较传统耕作并没有增加。保护性耕作实施 14 a 后黑土杂食-捕食线虫 c~p 值较高(≥ 3), 说明土壤生物出现明显富集, 土壤生态系统更为稳定^[46]。因此, 保护性耕作在提高土壤生物多样性、物种丰度和生物量等方面具有积极促进效应。

保护性耕作提高了土壤生物多样性, 促进了生物胶结物质和生物孔隙的形成, 有利于土壤团聚体的形成及稳定性的增强^[47], 进而构建良好的黑土结构。Zhang 等^[48] 研究明确了土壤微生物及其代谢产物是促进土壤团聚体形成的主要因素, 改变了以往普遍认为土壤有机质是主导土壤结构形成的观点。其中, 丛枝状菌根真菌生物量的增加及其代谢产物球囊霉素含量的增加是促进保护性耕作下大团聚体(> 0.25 mm)形成的重要原因; 基于 CT(Computed Tomography)扫描技术, 确定了保护性耕作下蚯蚓活动引起的土壤大孔隙的变化范围, 蚯蚓活动仅增加土壤大孔隙(>100 μm)而非次大孔隙(30~100 μm)的体积^[49], 而且保护性耕作下蚯蚓活动通过增加大孔隙体积提高了土壤入渗速率和饱和导水率, 确保了亚表层土壤可以获得优先流, 保证地上作物的生长。

保护性耕作改变了土壤生物功能群群落结构, 进而影响碳在土壤中的稳定过程。通过定位试验和土壤食物网模型构建发现, 实施保护性耕作 10 a 食

物网长度增加, 能量流从以低级营养类群为主导转变为从低级营养类群有效地传递到顶级捕食者的能量流^[50], 显著提高了黑土生物对碳的利用效率^[44]。此外, 保护性耕作还改变了不同粒径团聚体中微生物的分布及其与线虫的相互作用强度, 使更多的基质碳被保存在活性碳库中, 促进了有机碳的积累^[48,49]。定位监测数据还显示, 保护性耕作对黑土生物积极影响效应贯穿于整个作物生育期^[48], 表征土壤生物在群落水平和生态功能水平多样性的增加可能是东北黑土区保护性耕作有利于土壤生物稳定有机碳的重要原因之一(图 3)。总之, 保护性耕作下耕层 0~20 cm 黑土生物类群个体数量的增加以及食物链长度的增长, 在加速秸秆的腐解速率、提升土壤有机碳的形成和固定, 及增强作物遭受极端天气的抵抗力和恢复力^[50] 等方面都产生了深刻的影响, 有利于形成良性循环的土壤生态过程, 维持东北黑土区农田生态系统的健康发展。

4.2 经济效益

东北黑土区实施保护性耕作可以比传统耕作获得更高的经济效益, 实现农业增收, 这主要体现在稳定作物产量和节约生产成本两方面。保护性耕作对作物产量的影响历来是一个有争议的话题, 这主要源于保护性耕作的实施效果因气候条件、地形、土壤类型等因素而异。众多研究表明, 保护性耕作可以不同程度地增加作物产量, 但在部分地区存在减产情况也是不争的事实。保护性耕作减少了土壤扰动, 一定程度上造成了土壤板结、水分流动不畅, 造成作物难以吸收利用土壤养分, 而秸秆覆盖地表又会降低土壤温度影响春播和出苗^[51], 进而导致减产。其中, 保护性耕作在东北地区减产几率较小(13.6%), 而在西北、青藏地区减产几率高达 36.6%^[52]。通过东北黑土区长期定位试验以及对吉林省实施保护性耕作技术 50 个合作社和家庭农场的现场调研^[53], 发现保护性耕作可以获得与传统耕作相似或稍高的作物产量(增产 0~6%)^[54], 但在极端气候条件下, 保护性耕作展现出了较强的抗灾优势, 可以实现作物稳产。2012 年在“布拉万”台风袭击下, 保护性耕作实施田块玉米倒伏率明显低于传统耕作, 玉米产量较传统耕作高 16.2% 左右^[24]; 在 2015 年极端干旱年份, 秸秆覆盖还田免耕下 7~8 月农田黑土含水量比传统耕作高 40%, 整个生育期作物生长不受夏秋季干旱胁迫, 作物产量较传统耕作高 47.4%, 而传统耕作土壤含水量则接近萎蔫系

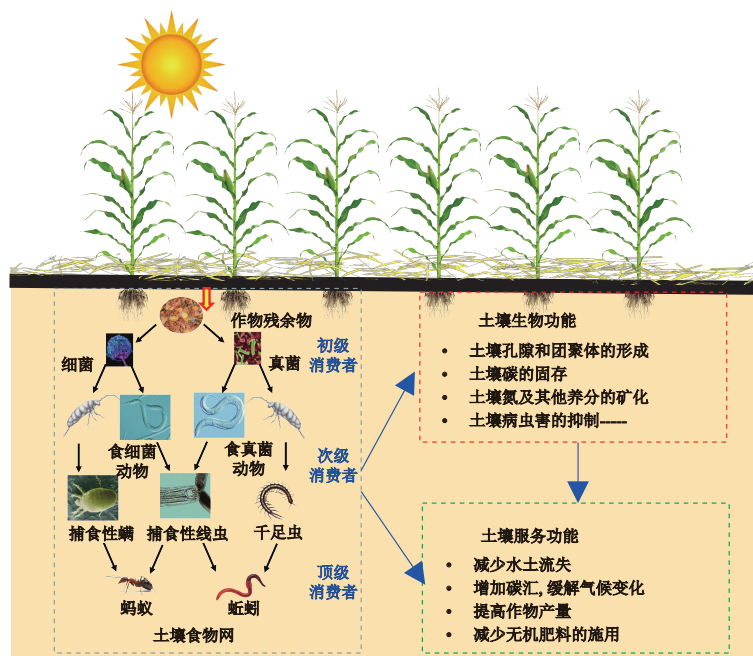


图3 保护性耕作下土壤食物网结构及其生态服务功能

Fig.3 Soil food web structure and its ecological service function under conservation tillage

数, 导致玉米严重减产^[53]。此外, 保护性耕作较传统耕作极大地降低了田间操作强度和频率(减少50%~60%的田间作业次数), 从而显著降低了燃料和人工费用(降低幅度约为50%)。以吉林省为例, 保护性耕作每公顷节约成本1000~1500元^[55]。

实践证明, 保护性耕作在蓄水保墒、培肥地力、减少侵蚀、保护环境、节本增效、增加农民收入等方面表现出了其他耕作方式不可替代的作用, 产生了良好的经济效益和生态效益, 对推动农业现代化建设, 实现农业可持续发展, 增加农民收入, 建设节约型社会, 加快乡村振兴起到了极大的促进作用。

5 存在的问题与展望

5.1 保护性耕作技术应用存在的问题

东北地区保护性耕作技术推广工作正在如火如荼的进行中, 尽管当前取得了长足发展, 加快推广此项技术的时机、条件也已基本成熟, 但仍存在一些不容忽视的问题。

1) 传统耕作观念根深蒂固, 严重束缚保护性耕作技术的推行。东北黑土区100多年的农业发展历程, 农民形成了传统的种植习惯和生产方式。保护性耕作在作物栽培制度、种植管理措施和耕作技术等方面发生了一系列变化, 农民对于这种新的农业生产方式认可度不高, 一方面是因为这

种秸秆覆盖地表的“懒汉”耕作方式与传统耕作区别大, 农民接受度低, 而且秸秆覆盖地表导致春季地温低, 且免耕播种机通过性差, 影响春播和出苗; 加之农民受教育程度偏低, 对生态文明建设认识还不到位, 生态保护意识和可持续发展观意识淡薄, 对新技术、新政策的认知和理解能力较差, 导致新技术被接受度低, 推行缓慢, 严重制约了保护性耕作技术的发展。

2) 保护性耕作技术的应用区域尚不明确。当前, 众多民众对保护性耕作的内涵认识尚不清晰, 容易混淆其关键技术环节, 从而导致操作不当、应用区域不明确, 影响了保护性耕作的实施效果。保护性耕作的应用需要依据地形、气候、土壤条件等因素, 因地制宜地采用适合的耕作类型及其配套的技术措施。如干旱风沙土区适合以固土(降低风蚀)培肥、蓄水保墒为主的秸秆全覆盖免耕技术; 低洼冷凉区域, 地形以平川和山坡地两种类型为主, 适宜以固土(降低水土流失)培肥、增温散墒为主攻方向的技术, 如秸秆覆盖条带耕作、秸秆覆盖垄作技术等; 中部地势平坦, 水热条件适中, 以肥沃耕作层培育技术为主, 如宽窄行秸秆全覆盖还田免耕、秸秆覆盖条带耕作等。

3) 保护性耕作配套农机具不完善, 农机农艺技术融合不紧密。东北地区保护性耕作实施过程中免

耕播种机是关键机具,目前免耕播种机的性能和数量基本上能够满足生产所需,但整体来看免耕播种机还存在通用性能差、播种质量不佳、出苗整齐度低,尤其在秸秆覆盖条件下作业时,还不能很好地满足保护性耕作技术要求,仍然是制约保护性耕作技术发展的瓶颈。另外,虽然针对保护性耕作技术研究多年,但缺乏区域发展总体战略指导和对技术适宜性的科学评价,导致农民跟风现象严重。保护性耕作配套农艺技术有待完善,虽然秸秆覆盖、免耕播种施肥、深松等保护性耕作核心技术和装备的研究较为深入,但病虫草害防控、轮作模式等配套农艺技术融合研究相对滞后,研发力度还不够,难以彻底满足不同区域农户不同作业模式的要求,一定程度上影响了保护性耕作的实施效果,制约了保护性耕作技术的推广应用。

4) 土地分散经营,制约保护性耕作技术大面积推广。现阶段,东北黑土区农业生产实行家庭联产承包责任制,除黑龙江农垦的国营农场外,土地分散经营、耕地流转水平低。例如:吉林省耕地流转面积 140 万 hm^2 ,占耕地面积的 24%,低于全国土地流转率(35%),而且呈现出流转规模小、时间短、不规范的特点。土地流转过程中工商企业也参与其中,出现了“非粮化”的问题。土地分散经营、耕地流转水平低,严重阻碍保护性耕作技术的应用和农业机械化的实现,还会增加生产成本,限制集约化规模发展,是当前困扰黑土地保护的一大难题。这也是阻碍黑土区农业生产由传统农业向现代农业转变一大顽石。

5) 保护性耕作技术的理论研究尚缺乏系统性。保护性耕作技术的应用效果因黑土区气候特征和地理环境要素不同而存在差异。当前尚缺乏整个黑土区不同区域科学规范的保护性耕作试验示范平台,缺乏统一的监测标准和监测方法,严重影响了保护性耕作实施效果的科学性和系统性,也缺乏保护性耕作区域适宜性的评价体系和方法,导致保护性耕作技术的推广缺少了重要的科技支撑。

5.2 展望

理论与实践证明,保护性耕作是一项能够实现作物稳产高产与生态环境保护双赢的可持续发展农业技术,是一项当前与未来利益兼顾、利国利民的革命性耕作措施。随着国家对东北黑土地保护与利用的重视以及东北农业发展新时代的到来,黑土区传统农业必将逐步向科技化、生态化和市场化农业

转变。保护性耕作技术承载着农业可持续发展的重任,必将在未来智慧农业、高效农业、现代农业发展中发挥其不可或缺的重要作用。

参考文献(References):

- [1] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[R]. 2021. [Chinese Academy of Sciences. Northeast black soil White Paper (2020). 2021.]
- [2] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009, 1: 17-19. [Liu Xingtu, Yan Baixing. Soil erosion and food security in black soil region of Northeast China. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 1: 17-19.]
- [3] Xiao Liangang, Kuhn Nikolaus J, Zhao Rongqin et al. Net effects of conservation agriculture principles on sustainable land use: A synthesis[J]. Global Change Biology, 2021, 27: 6321-6330.
- [4] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702-2708. [Gao Wangsheng. Development trends and basic principles of conservation tillage. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702-2708.]
- [5] Conservation Tillage Information Center (CTIC), M. R. National crop residue management survey [EB/OL]. West Lafayette: Conservation Technology Information Center. <https://www.ctic.org/CRM/>, 2004.
- [6] 中国耕作制度研究会. 中国少耕免耕和覆盖技术研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. [Written by the China Farming System Research Association. Research on less tillage and coverage technology in China. Beijing: Science and Technology of China Press, 1991.]
- [7] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 335-340. [Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun et al. Conservation tillage systems in North America and their significance for China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 335-340.]
- [8] 刘文政, 李问盈, 郑侃, 等. 我国保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2017, 7: 256-262. [Liu Wenzheng, Li Wenying, Zheng Kan et al. The current research status of conservation tillage technology. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 7: 256-262.]
- [9] 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43-48. [Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenying. Development of conservation farming. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43-48.]
- [10] 何其镜, 胡庆浩, 杨士昭. 少耕法机械化的试验研究——原垄与耙耨播种试验报告[J]. 吉林农业科学, 1982, 7(1): 75-85. [He Qijing, Hu Qinghao, Yang Shizhao. Experimental study on mechanization of reduced tillage-original ridge and rake Chasowing test report. Jilin Agricultural Science, 1982, 7(1): 75-85.]
- [11] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 东北黑土区玉米保护性耕作技术模

- 式研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 86-88. [Liu Wuren, Zheng Jinyu, Luo Yang et al. Study on technique model of conservative tillage in maize in Northeast of China. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(6): 86-88.]
- [12] 农业部, 国家发展改革委, 财政部, 等. 东北黑土地保护规划纲要(2017-2030年)[EB/OL]. 2017-06-15. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm. [Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance et al. Outline of Northeast black soil protection plan (2017-2030). 2017-06-15. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.]
- [13] 农业农村部, 财政部. 东北黑土地保护性耕作行动计划(2020-2025年)[EB/OL]. 2020-02-25. http://www.gov.cn/xinwen/2020-03/18/content_5492780.htm. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Finance. Action plan for conservation tillage of black soil in Northeast China (2020-2025). 2020-02-25. http://www.gov.cn/xinwen/2020-03/18/content_5492780.htm.]
- [14] 石东峰, 米国华. 玉米秸秆覆盖条耕技术及其应用[J]. 土壤与作物, 2018, 7(3): 349-355. [Shi Dongfeng, Mi Guohua. Straw mulching strip - till technology and its application in corn production. Soils and Crops, 2018, 7(3): 349-355.]
- [15] 刘伟林. 黑龙江扎实做好黑土耕地保护利用[EB/OL]. 农民日报. <http://nynct.hl.jg.gov.cn/nynct/c100013/202111/b40775d70f164c3dbac2625ee789c5a.shtml>, 2021-11-10. [Liu Weilin. Solid black soil of cultivated land protection and utilization in Heilongjiang Province. Farmers' Daily. <http://nynct.hl.jg.gov.cn/nynct/c100013/202111/b40775d70f164c3dbac2625ee789c5a.shtml>, 2021-11-10.]
- [16] 闫虹瑾. 吉林省保护性耕作面积增幅居全国首位[EB/OL]. 中华人民共和国农业和农村事务部. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202206/t20220627_6403437.htm, 2021-07-15. [Yan Hongjin. The increase of conservation tillage area in Jilin Province ranks first in China. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202206/t20220627_6403437.htm, 2021-07-15.]
- [17] 农牧厅种植业管理处. 内蒙古自治区粮食产量达768.06亿斤, 再创历史新高[EB/OL]. http://nmt.nmg.gov.cn/xw/nmyw/202112/t20211208_1970962.html, 2021-12-08. [The grain output of Inner Mongolia Autonomous Region reached 76.806 billion jin, hitting a new record. Hall plantation agriculture and animal husbandry management service. http://www.ln.gov.cn/ywdt/tjdt/202112/t20211222_4476118.html, 2021-12-22.]
- [18] 辽宁省农业农村厅. 亩产955斤, 辽宁粮食单产水平创新高[EB/OL]. http://www.ln.gov.cn/ywdt/tjdt/202112/t20211222_4476118.html, 2021-12-22. [Department of Agriculture and Rural Affairs of Liaoning Province. http://nmt.nmg.gov.cn/xw/nmyw/202112/t20211208_1970962.html, 2021-12-08.]
- [19] Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun et al. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of Northeast China: RothC model simulations[J]. Environmental Management, 2003, 32(4): 459-465.
- [20] 张兴义, 陈强, 陈渊, 等. 东北北部冷凉区免耕土壤的特性及作物效应[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2271-2277. [Zhang Xingyi, Chen Qiang, Chen Yuan et al. Characteristics of soil and no-tillage effect in northern Northeast China. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2271-2277.]
- [21] 杨润城. 海伦黑土农田风蚀监测研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. [Yang Runcheng. Study on wind erosion monitoring of Helen black soil farmland. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.]
- [22] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 439-444. [Chen Xuewen, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 439-444.]
- [23] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3767-3775. [Fan Ruqin, Liang Aizhen, Yang Xueming et al. Effects of tillage on soil aggregates in black soils in Northeast China. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3767-3775.]
- [24] 槐圣昌. 耕作方式与秸秆还田对东北黑土物理性质和玉米根系生长的影响[D]. 北京: 农业资源与农业区划研究所研究生院, 2020. [Huai Shengchang. Effects of tillage methods and straw returning on physical properties of Northeast black soil and maize root growth. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]
- [25] Liang Aizhen, Zhai Zhengli, McLaughlin Neil et al. Lodging in corn varies with tillage and crop rotation: A case study after typhoon bolaven pummeling over the black soil zone in Northeast China[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2017, 54(3): 539-545.
- [26] 赵家煦. 东北黑土区秸秆还田深度对土壤水分动态及土壤酶、微生物C、N的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. [Zhao Jia-xu. Effects of different location of strew incorporation on soil water dynamics, soil enzymes, microbial C and N. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.]
- [27] Liu L, Zhang L, Liu J et al. Soil water and temperature characteristics under different straw mulching and tillage measures in the black soil region of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 76(3): 256-262.
- [28] Chen Xuewen, Shi Xiuhuan, Liang Aizhen et al. Least limiting water range and soil pore-size distribution related to soil organic carbon dynamics following zero and conventional tillage of a black soil in Northeast China[J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 153(2): 270-281.
- [29] Chen Xuewen, Chang Liang, Liang Aizhen et al. Earthworm positively influences large macropores under extreme drought and conservation tillage in a Chinese Mollisol[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2018, 16(1): 663-675.
- [30] Fan Ruqin, Zhang Xiaoping, Yang Xueming et al. Effects of tillage management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(3): 312-320.
- [31] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学,

- 2018, 38(7): 1032-1041. [Han Xiaozeng, Li Na. Research progress of black soil in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032-1041.]
- [32] Zhang Yan, Li Xiujun, Gregorich Edward et al. No-tillage with continuous maize cropping enhances soil aggregation and organic carbon storage in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 204-211.
- [33] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 用RothC-26.3模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1318-1324. [Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun et al. RothC-26.3 model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of corn in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1318-1324.]
- [34] 张延. 秸秆还田下耕作措施对农田黑土有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2019. [Zhang Yan, Effects of tillage management with residue return on soil organic carbon fractions and stability. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2019.]
- [35] 胡国庆, 刘肖, 何红波, 等. 免耕覆盖还田下玉米秸秆氮素的去向研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 963-971. [Hu Guoqing, Liu Xiao, He Hongbo et al. Fate of nitrogen contained in maize stalk mulch in no-tillage system. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 963-971.]
- [36] 李保国, 王贵满. 东北地区的保护性耕作技术——梨树模式[M]. 北京: 科学技术文献出版, 2019. [Li Baoguo, Wang Guiman. Conservation tillage techniques in Northeast China. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2019.]
- [37] 霍海南, 李杰, 袁磊, 等. 秸秆还田量对培肥农田黑土氮素初级转化速率的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4109-4116. [Huo Hainan, Li Jie, Yuan Lei et al. Effects of different straw returning amount on the potential gross nitrogen transformation rates of fertilized Mollisol. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4109-4116.]
- [38] Liu Siyi, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen et al. Ridge tillage is likely better than no tillage for 14-year field experiment in black soils: Insights from a ^{15}N -tracing study[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179: 38-46.
- [39] 方华军, 杨学明, 张晓平. 东北黑土有机碳储量及其对大气 CO_2 的贡献[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 9-20. [Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping. Organic carbon stock of black soils in Northeast China and its contribution to atmospheric CO_2 . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 9-20.]
- [40] 周思宇. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020. [Zhou Siyu. Study on carbon emission accounting and driving factors of cultivated land use in Northeast China. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.]
- [41] Jia Shuxia, Zhang Xiaoping, Chen Xuewen et al. Long-term conservation tillage influences the soil microbial community and its contribution to soil CO_2 emissions in a Mollisol in Northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 1-12.
- [42] Food and Agriculture Organization of the United Nations. World soil charter. [EB/OL]. 2015-06-08. <https://www.fao.org/3/i4965e/I4965E.pdf>.
- [43] Zhang Shixiu, Li Qi, Lü Ying et al. Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 149: 46-52.
- [44] 郭亚飞. 保护性耕作下蚯蚓在土壤结构形成和有机碳周转过程中的作用[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2018. [Guo Yafei. Impacts of earthworm on soil structure formation and soil organic carbon turnover under conservation tillage. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [45] Zhang Shixiu, Cui Shuyan, McLaughlin Neil et al. Tillage effects outweigh seasonal effects on soil nematode community structure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 192: 233-239.
- [46] Zhang Shixiu, McLaughlin Neil, Cui Shuyan et al. Effects of long-term tillage on carbon partitioning of nematode metabolism in a black soil of Northeast China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 138: 207-212.
- [47] Zhang Shixiu, Li Qi, Zhang Xiaoping et al. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 196-202.
- [48] Zhang Shixiu, Li Qi, Lü Ying et al. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147-156.
- [49] Liang Aizhen, Zhang Yan, Zhang Xiaoping et al. Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined non-destructive measurements and phospholipid fatty acid analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 94-101.
- [50] Jia Shuxia, Liang Aizhen, Zhang Shixiu et al. Effect of tillage system on soil CO_2 flux, soil microbial community and maize (*Zea mays* L.) yield[J]. *Geoderma*, 2021, 384: 114813.
- [51] Lal R, Griffin M, Aht J et al. Managing soil carbon[J]. *Science*, 2004, 304(16): 393.
- [52] 谢瑞芝, 李少昆, 金亚征, 等. 中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 397-404. [Xie Ruizhi, Li Shaokun, Jin Yazheng et al. Analysis of yield effects in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 397-404.]
- [53] 蔡红光, 刘剑钊, 梁尧, 等. 玉米秸秆全量条带覆盖还田节本增效耕种技术模式生产实证及效益分析[J]. *玉米科学*, 2022, 30(1): 115-122. [Cai Hongguang, Liu Jianzhao, Liang Yao et al. Demonstration and effect analysis on integrated cultivation mode of maize straw stripe mulching and low input management. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 115-122.]
- [54] Zhang Shixiu, Chen Xuewen, Jia Shuxia et al. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize

yield in the black soil of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 84-90.
[55] Fan Ruqin, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen et al. Tillage and ro-

tation effects on crop yield and profitability on a black soil in Northeast China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 463-470.

Development and Effects of Conservation Tillage in the Black Soil Region of Northeast China

Liang Aizhen¹, Zhang Yan¹, Chen Xuewen¹, Zhang Shixiu¹, Huang Dandan¹, Yang Xueming²,
Zhang Xiaoping¹, Li Xiujun¹, Tian Chunjie¹, McLaughlin Neil B³, Xiang Yang⁴

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China; 2. Harrow Research and Development Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Harrow, ON N0R 1G0, Canada; 3. Ottawa Research and Development Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Ottawa, ON K1A 0C6, Canada; 4. Jilin Agricultural Technology Extension Station, Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: The black soil region in Northeast China bears the great responsibility of food security of the nation. However, long-term intensive utilization and lack of soil fertility maintenance and improvement measures in region resulted in severe soil degradation, which greatly constrained the sustainable utilization of black soil resources. Conservation tillage is defined as any form of tillage that minimizes soil disturbance and at least 30% of the soil surface covered with residues to reduce soil erosion. It can promote the soil health and green farming, and then to strengthen the base of sustainable agriculture in Black soil region, which has been proved by theory and practice. This article summarizes the connotation of conservation tillage technology, its development status and technical overview in the black soil region of Northeast China. Currently, there are three major types of conservation tillage including no-tillage with residue covered, no-tillage with residue covered and wide-narrow row spacing, strip-tillage with residue covered. The ecological and economic benefits of this region from the implementation of conservation tillage were systematically evaluated, which include soil and water conservation, soil structure and soil fertility improvement, carbon sequestration, soil biodiversity increase and cost saving. Conservation tillage has the potential to prevent soil loss from wind and water erosion, increase soil organic matter, sequester carbon and reduce soil CO₂ emission to mitigate the global warming; it also can improve soil structure, significantly increase soil biodiversity and functional redundancy. Conservation tillage has no significant impacts on crop yields, but under extreme weather events it has the ability to resist drought and flood for the stable or higher crop yield in Northeast China. The problems and future development directions regarding the implementation of conservation tillage in this region were discussed. It will be beneficial for black soil protection and utilization, and to promote high-quality and leap development of conservation tillage in Northeast China.

Key words: black soil; conservation tillage; soil organic matter; ecological benefit