



范围,刘剑钊,袁静超,张畅,闫金垚,程松,任军,梁尧,蔡红光.吉林省黑土地玉米连作全耕层培肥技术构建与实证研究[J].中国农业大学学报,2025,30(12):112-118.

FAN Wei, LIU Jianzhao, YUAN Jingchao, ZHANG Chang, YAN Jinyao, CHENG Song, REN Jun, LIANG Yao, CAI Hongguang. Construction of whole plough layer fertilization technology for continuous maize cropping system and its application in Jilin Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 112-118.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.10

吉林省黑土地玉米连作全耕层培肥技术构建与实证研究

范围^{1,2} 刘剑钊^{1,2} 袁静超^{1,2} 张畅^{1,2} 闫金垚^{1,2} 程松^{1,2} 任军^{1,2}
梁尧^{1*} 蔡红光^{2*}

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心),农业资源与环境研究所,长春 130033;

2. 农业农村部黑土地保护与利用重点实验室,长春 130033)

摘要 吉林省作为我国重要的玉米主产区,面临黑土土壤肥力退化,耕层结构失调及玉米单产提升受限等问题。为实现黑土保护、地力保育与玉米高产高效协同发展,基于长期田间生产实证,系统梳理了玉米连作体系全耕层培肥技术在理论内涵、关键技术及应用实践等方面的研究进展,并对未来发展前景作出展望。结果表明:针对该区域土壤物理结构劣化与养分不均衡等障碍,通过突破传统培肥层次的限制,构建了以“土壤结构、耕层深度、有机碳量、水肥保供”四要素协同提升为核心的全耕层培肥理论框架,建立了玉米秸秆分类深还、化肥减量深施等关键技术。在此基础上优化集成区域玉米丰产栽培技术,形成区域性玉米高产高效耕种技术模式。实践验证表明,该技术模式可实现0—40 cm黑土耕层有机质含量提升5.4%~8.5%,化肥利用率提高13.7%~16.8%,玉米增产9.5%~15.0%,有效促进了地力提升与资源高效利用。未来应进一步深化全耕层培肥机理研究,拓宽技术使用范围,推进多场景集成应用,为黑土地可持续利用提供科技支撑。

关键词 全耕层培肥;秸秆还田;化肥减量增效;黑土地保护

中图分类号 S156

文章编号 1007-4333(2025)12-0112-07

文献标志码 A

Construction of whole plough layer fertilization technology for continuous maize cropping system and its application in Jilin Province

FAN Wei^{1,2}, LIU Jianzhao^{1,2}, YUAN Jingchao^{1,2}, ZHANG Chang^{1,2}, YAN Jinyao^{1,2},
CHENG Song^{1,2}, REN Jun^{1,2}, LIANG Yao^{1*}, CAI Hongguang^{2*}

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences (Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun, 130033, China;

2. Key Laboratory of Black Soil Conservation and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun, 130033, China)

Abstract As a major maize-producing region in China, Jilin Province has faced challenges including the degradation of black soil fertility, disruption of plough-layer structure, and constraints on improving maize yield. To promote the coordinated development of black soil conservation, soil fertility enhancement, and high-yield,

收稿日期: 2025-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1501100);吉林省自然科学基金面上项目(20230101228JC);国家现代农业产业技术体系(CARS-07-G-6);吉林省农业科技创新工程(CXGC2021RCB005)

第一作者: 范围(ORCID:0000-0003-0012-118X),副研究员,主要从事玉米秸秆等农业废弃物培肥技术研究,E-mail:isfanwei@foxmail.com

通讯作者: 梁尧(ORCID:0009-0004-1640-6387),研究员,主要从事有机肥培肥对土壤质量与作物产量的影响过程研究,E-mail:liangyaosmart@163.com

蔡红光(ORCID:0000-0001-8521-0290),研究员,主要从事黑土全耕层培肥与养分资源高效利用技术研究,E-mail:caihongguang1981@163.com

high-efficiency maize production, this study draws on long-term field experiments to review the progress of whole-plough-layer fertilization technology in continuous maize cropping systems. It summarizes its theoretical basis, key techniques, and practical applications, and provides prospects for future development. The results show that, in response to obstacles such as deteriorating soil physical structure and nutrient imbalance, a theoretical framework for whole-plough-layer fertilization has been established by moving beyond conventional fertilization depths. This framework emphasizes the synergistic improvement of soil structure, plough-layer depth, the quantity and quality of organic carbon, and water-fertilizer supply capacity. Key technologies have been developed, including categorized deep incorporation of maize straw and deep placement of reduced-rate chemical fertilizers. Integrated with regional high-yield cultivation practices, these advances form a maize production model characterized by high yield and high efficiency. Field validation indicates that this model increases soil organic matter content in the 0-40 cm layer by 5.4% to 8.5%, enhances fertilizer use efficiency by 13.7% to 16.8%, and raises maize yield by 9.5% to 15.0%, effectively improving soil productivity and resource-use efficiency. Future efforts should focus on deepening the mechanistic understanding of whole-plough-layer fertilization, expanding the application scope of the technology, and promoting its integration into diverse production scenarios to support the sustainable use of black soil resources.

Keywords whole-plough-layer fertilization; straw return to soil; chemical fertilizer reduction and efficiency improvement; black soil conservation

吉林省位于中国东北地区中部,黑土地总面积达 15.46 万 km²,约占全省总面积的 83.3%^[1],该区域地形以中西部平缓冲积平原和东部丘陵台地过渡带为主。玉米作为吉林省第一大粮食作物,其种植面积占全省农作物播种面积的 77%,产量占全省粮食总产量的 81%^[2]。2024 年,吉林省粮食总产量达到了 426.6 亿 kg,其中玉米单产达 8.5 t/hm²,高出全国平均水平 30%。吉林省的黑土地开发相对较晚,土壤初始有机质含量高达 3%~6%^[3]。然而,长期高强度开发利用导致黑土肥力退化问题日益凸显。近年遥感监测数据显示,吉林省黑土层厚度已由开垦初期的 60~100 cm 锐减至 20 cm 左右,犁底层厚度普遍增加 32%~48%^[4]。土壤有机质含量以每年 0.1%~0.3% 的速度递减,部分地区已低于 2.5%。同时,土壤容重由 1.0~1.2 g/cm³ 上升至 1.45 g/cm³ 以上,持水能力下降 20%~30%,严重制约作物根系发育^[5-6]。有研究预测,若退化趋势持续,至 2035 年该区域玉米产能可能下降 15%~20%^[7]。因此,开展因地制宜的土壤培肥技术研究,对吉林省黑土地保护与可持续利用具有重要的意义。

2023 年,国家启动新一轮“千亿斤粮食”产能提升行动,吉林省率先提出“千亿斤粮食”产能建设工程,计划于 2030 年粮食产量突破千亿斤^[8]。在此背景下,如何实现黑土地力与产能协同提升,成为黑土地可持续利用的重要科学问题。王立春等^[4]研

究指出,增加密度是提高玉米单产的重要途径,当耕层厚度<30 cm 时,玉米根长密度在>20—40 cm 土层中减少 63%,亚耕层(>20—40 cm)养分贡献率不足 40%。Liang 等^[9]研究进一步表明,传统以 12 cm 左右浅旋为主的耕作技术难以满足密植群体的水养需求,而增加秸秆等有机物料的施用深度,可以有效提高土壤固碳量及固碳效率,促进土壤肥力改善。因此,亟需突破传统耕层土壤培肥方式,通过构建耕层深厚、结构合理、功能协调的“全耕层”,实现土壤增碳提质、扩库增容与水养保供等多重目标,从而消除黑土地肥力退化限制、满足玉米密植群体增产需求。目前,关于吉林省黑土区玉米连作体系全耕层培肥技术方面的研究鲜见报道。本研究通过长期田间生产实证,从理论内涵、关键技术、场景应用及未来展望等方面系统阐述玉米连作体系全耕层培肥技术的研究进展,以期为区域黑土地保护与地力产能提升提供科技支撑。

1 全耕层培肥技术的理论基础

1.1 全耕层培肥理论内涵

著名土壤学家陈恩凤^[10]从适宜耕深和有机培肥角度,阐明了土壤“体型”与“体质”是土壤肥力的实质。吉林农业大学姜岩^[11]则提出了东北地区以玉米根茬为主体的未腐解有机物培肥土壤技术。众多学者围绕黑土耕层构造、有机无机复合体、有机质结构与功能特征、微生物驱动过程等方面展开

系统研究,提出了“行间松-苗带紧”合理耕层构造、“兼顾活性与稳定性有机质”的有机培肥、肥沃耕层构建等理论与技术^[1,4-5],推动黑土地耕层培育知识体系的不断完善。随着玉米产量水平的逐步提高,笔者团队系统分析吉林省不同生态区玉米高产田(12~15 t/hm²)与中低产田(<9 t/hm²)在0—100 cm土壤结构与养分含量的长期监测数据,发现二者土壤肥力水平差异主要表现在0—40 cm土层。研究表明,高产玉米群体90%以上的根系分布于0—40 cm土层。为缓解密植群体根系在水平方向上的“拥挤效应”,其在垂直方向上不断拓展生长空间以获取充足的水养供应。当种植密度由4万/hm²增至7万/hm²,消除>20—40 cm土层障碍可满足群体生长需求^[12]。由此可见,仅0—20 cm耕层培肥已难以满足密植高产群体根系的水养需求,加之黑土地耕层表现出的“变薄、变瘦、变硬”的退化特征,进一步制约了玉米生长与产量的提升。因此,亟需突破传统培肥层次限制,从土壤结构、耕层深度、有机碳量质、肥水保供四要素协同提升的角

度,同步培育耕层(0—20 cm)与亚耕层(>20—40 cm)肥力,构建结构合理、耕层深厚、碳固质稳、肥水协调的0—40 cm全耕层。这既是区域问题导向下土壤培肥理论的重要发展,也符合以地力提升与产能高效为目标的实际生产需求。

1.2 全耕层培肥多维度评价指标体系

基于长期田间生产实证与定位试验数据的系统整合与筛选,研究构建了涵盖土壤(物理、化学、生物)和作物(玉米根系、产量)共19项指标的全耕层培肥评价指标体系。其中物理指标聚焦土壤结构优化,将土壤容重与>0.25 mm团聚体作为关键参数,试验证实当孔隙度达60%时作物根系发育最佳;化学指标通过养分平衡分析,发现有机碳>25 g/kg与有效磷>50 mg/kg可显著提升养分利用效率;生物性状主要涉及酶活性与微生物量等动态指标,试验数据显示这些指标与土壤健康度呈显著正相关;根系指标通过根长密度与根际养分含量评价密植群体根系生长状况;产量指标则以籽粒产量与生物产量作为标准(表1)。

表1 吉林省黑土区全耕层培肥评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for whole plough layer fertilization in Jilin Province

类别 Category	指标 Indicators	评价指标 Evaluation index
土壤 Soil	物理 Physical	容重, g/cm ³ ; >0.25 mm 团聚体; 孔隙度, %
	化学 Chemical	pH; 有机碳, g/kg; 全氮, g/kg; 全磷, g/kg; 全钾, g/kg; 碱解氮, mg/kg; 有效磷, mg/kg; 速效钾, mg/kg
	生物 Biological	微生物量碳, mg/kg; α-葡萄糖苷酶, nmol/(g·h); 细菌数量, ×10 ⁷ CFU/g
作物 Crop	根系 Root System	根长密度, cm/cm ³ ; 根际有机碳, g/kg; 根际全氮, g/kg
	产量 Yield	籽粒产量, kg/hm ² ; 生物产量, kg/hm ²

1.3 全耕层培肥技术途径

连续14年全耕层培肥定位试验结果表明,通过机械深翻将秸秆8 t/(hm²·年)输入亚耕层,外源碳可与腐殖酸-水铁矿复合物(HA-Fe)结合,促进矿物结合态有机碳(MAOC)的形成,并通过“物理包裹-矿物结合-微生物代谢”三重机制提升碳稳定性^[13]。Lal等^[14]研究表明,将外源碳投入到深层土壤减缓有机碳矿化,可实现土壤碳的

长期储存。亚耕层土壤(>20—40 cm)因具备更高的矿物结合态碳比例和更低的有机质矿化速率,其碳封存潜力相当于表层土壤的3~5倍。全耕层培肥还缓解了玉米密植群体根系横向拥挤效应,促进根系纵向延伸,根系穿透阻力降低39.8%,根长增加47.8%,同步实现年均固碳速率2.59 t/(hm²·年)与产量增长13.2%。因此,通过创建“行间松-苗带紧”的耕层构造,实现耕层

松紧兼备结构优化,有助于蓄水保墒、固定根系,促进肥水运移;通过加深耕层打破犁底层,实现扩库增容,为密植群体根系拓展生长空间;通过增施外源碳提升土壤有机质含量与质量,改善土

壤团粒结构,特别是发挥深层土壤的固碳提质作用;通过养分精准供应,减少淋溶损失,实现化肥减量与资源高效利用。最终,形成“四要素”协同作用的全耕层培肥体系(图 1)。

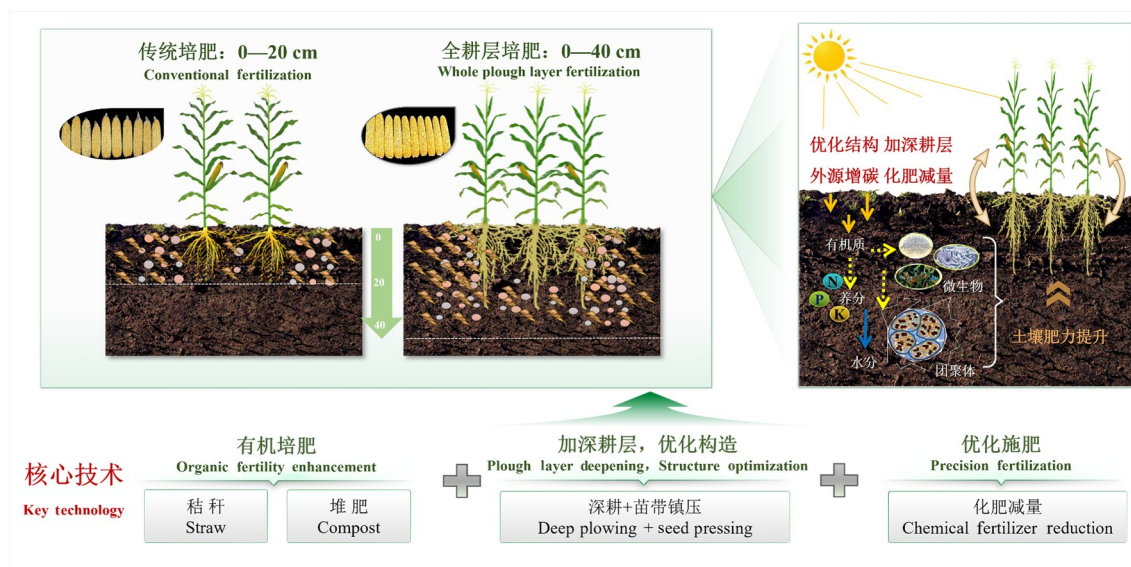


图 1 全耕层培肥技术途径

Fig. 1 Technology approach for whole plough layer fertilization

2 玉米秸秆分类深还全耕层培肥关键技术

2.1 秸秆全量深翻还田技术

秸秆全量深翻还田技术以“机收粉碎-深翻还田-联合整地-播后重镇压”为主要环节,秸秆粉碎长度 ≤ 20 cm,翻耕深度以 30~35 cm 为宜,镇压强度为 500~700 g/cm²。通过将深翻犁犁体由传统铧式优化为栅栏式,调整犁幅并增配前置小犁,有效降低了机械入土阻力,使全量秸秆翻埋至 20 cm 土层以下,秸秆地表残留率 $\leq 2\%$ 。至翌年 9 月,秸秆腐解率可达 90% 以上,实现了深层增碳^[15]。在 2011—2015 年,该技术使耕层实际深度增加至 35 cm,全耕层蓄水能力提高 9.6%;0—20 和 >20—40 cm 土层的土壤容重分别降低 11.0% 和 6.6%,有机质含量分别增加 9.5% 和 20.1%,速效氮含量分别增加 16.1% 和 12.2%^[16]。

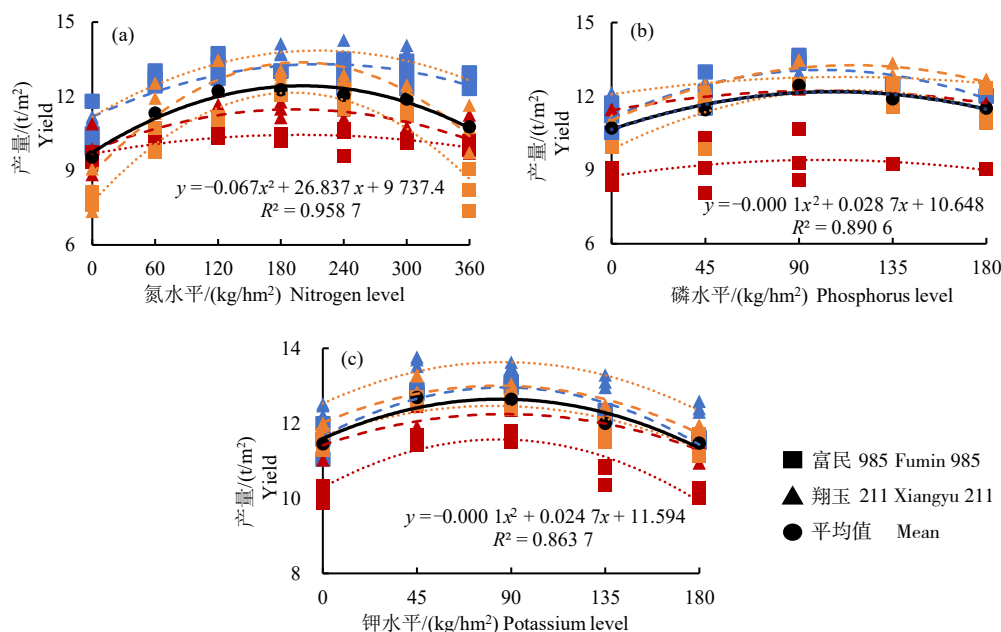
2.2 秸秆堆肥深耕还田技术

秸秆堆肥深耕还田技术以“春季冻融前均匀撒施-适时旋耕-灭茬起垄-中耕深松”为主要环节。玉米秸秆堆肥采用快速好氧发酵工艺制备,通过优化控制条件,使堆肥发酵启动速度提升 15% 以上,堆

肥周期缩短至 40 d。堆肥施用量为 1.0~1.5 m³/667 m²,撒肥均匀性变异系数 $\leq 30\%$,旋耕深度为 15~20 cm,深松深度以 ≥ 25 cm 为宜。2021—2023 年,0—20 cm 土壤容重平均降低 6.5%,有机质含量平均增加 9.6%,活性有机质含量平均增加 13.3%,速效氮含量平均增加 13.0%,速效磷含量平均增加 37.0%,有效提升了耕层土壤肥力水平,玉米产量提高 18.6%^[17]。

2.3 化肥减量深追技术

针对高产密植群体(9~12 t/hm²)的养分需求,将传统经验型秸秆全量还田下的氮、磷、钾用量调减至 155~167、59~71、55~65 kg/hm²(图 2)。速效氮肥按基追比 4:6 分次施用,或采用速效氮肥与控释氮肥 1:1 比例一次性基施^[18]。与常规施肥相比,该技术使开花后 >20—40 cm 土层土壤硝态氮含量增加 30.5%,有效满足玉米生育后期的养分需求,籽粒氮、磷、钾养分累积量增加 11.2%~29.5%,化肥用量减少 12.4%~17.4%,氮肥利用率提高 14.1%~19.9%,玉米增产 5.6%~10.1%^[19]。实现了全耕层土壤养分供应与高产群体养分需求精准匹配。



数据结果来源于文献[19]。

The data are from the study by [19].

图2 全耕层培肥技术条件下氮(a)、磷(b)和钾(c)适宜用量曲线

Fig. 2 Optimal N (a), P (b) and K (c) application curves under whole plough layer fertilization

3 全耕层培肥技术应用

基于吉林省不同区域生产生态特征,以全耕层培肥技术为核心,结合栽培、植保、农机等配套技术,构建了区域性玉米高产高效耕种技术模式。在湿润冷凉区,通过集成垄上精播密植、化控防倒促熟、病虫联合防控等技术,有效解决了春季土壤地温偏低、湿度大、质地粘重等问题。技术实施三年后,示范区耕层土壤有机质含量较秸秆离田对照增加了21.2%,玉米产量提升10.9%~32.0%,2023—2024年累计推广面积达2万hm²。在半湿润区,集成区域良种优选、密植化控防倒、籽粒机械收获等技术,缓解了土壤有机质含量低、耕层浅、土壤蓄水能力不足等问题。其中,农安县靠山镇在雨养条件下实现玉米单产达到1186.1kg/667m²的高产纪录,氮肥偏生产力高达50.2kg/kg。与对照相比,耕层0—20cm土壤的气相、有机质、全磷、碱解氮、速效磷和微生物量氮的含量分别提高83.9%、6.56%、40.7%、32.6%、156%和43.5%,土壤容重降低13.6%;亚耕层土壤气相、有机质、速效磷和微生物量氮的含量分别提高11.1%、3.08%、18.1%和66.1%^[19]。在半干旱区,集成抗旱品种促熟、平播补水保苗、水肥一体化等技术,有效应对了该区

域存在的土壤风蚀严重、降雨不足、有机质含量低、耕层浅,以及养分失衡等问题。与普通农田相比,0—20cm土壤容重降低13.6%,有机质与速效氮含量提高8.8%和30.7%;>20—40cm土壤容重降低8.9%,有机质与速效氮含量分别提高6.1%和22.6%,水分利用效率达40%以上^[20]。

近年来,全耕层培肥技术在吉林省主要玉米产区的130余家规模经营主体及7个黑土地保护利用试点县进行了大面积示范与推广。技术应用后,耕层土壤有机质含量平均增加2%~5%,化肥用量节约8%~13%,玉米平均增产8.8%^[21-22],实现了地力提升、玉米高产与资源高效利用的协调发展。

4 展望

吉林省地处我国黑土粮仓中心,肩负着保障国家粮食安全重任。以玉米连作为主的种植制度保障了区域粮食供给的稳步提升,是符合国家粮食安全战略的必然选择。在玉米连作高强度利用背景下,多维度挖潜黑土地生产力是进一步提升玉米产能的关键前提。本研究提出的全耕层培肥理论与技术,有效缓解了黑土地土壤结构与功能衰退、玉米单产提升难及水肥资源利用效率低等问题。未来研究应围绕原理深化、技术扩展与多场景应用等

方面,持续推进黑土地全耕层培肥技术(模式)的升级。具体而言:一是深入阐释全耕层培肥中“耕层深度、土壤结构、有机碳量质、水肥保供”四个核心要素间的协同关系,揭示其联动过程与共效机制;二是适当外延与扩展全耕层培肥关键技术,结合区域资源禀赋特征,将秸秆覆盖少免耕、秸秆碎混(粉耙)等技术纳入全耕层培肥技术体系,实施年际间“一翻两免”或“翻耙结合”等模式,以满足区域性生产需求;三是面向现代化大农业需求,推进多要素融合与工程化应用,以黑土地全耕层培肥技术为核心,精准配套高产品种培育、密植丰产栽培、现代农机装备、生物绿色防控等技术,集成创新黑土地土壤-作物系统生产力协同提升工程化技术体系,为东北玉米大面积单产提升提供科技支撑。

参考文献 References

- [1] 窦森, 郭聘. 吉林省土壤类型分布与黑土地保护[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 449-456
Dou S, Guo D. Soil type distribution and black soil land protection in Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 449-456 (in Chinese)
- [2] 吉林省统计局. 吉林省国民经济和社会发展统计公报[R]. 长春: 吉林省统计局, 2024
Jilin Provincial Bureau of Statistics. Statistical bulletin on national economic and social development of Jilin Province [R]. *Changchun: Jilin Provincial Bureau of Statistics*, 2024 (in Chinese)
- [3] 栾英颖, 郑德春, 张国君. 吉林省黑土资源现状及治理对策[J]. 东北农业科学, 2018, 43(5): 41-42
Luan Y Y, Zheng D C, Zhang G J. Current status of black soil resources in Jilin Province and countermeasures for protection[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2018, 43(5): 41-42 (in Chinese)
- [4] 王立春, 王永军, 边少锋, 蔡红光, 任军, 郑金玉, 朱平. 吉林省玉米高产高效绿色发展的理论与实践[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 383-392
Wang L C, Wang Y J, Bian S F, Cai H G, Ren J, Zheng J Y, Zhu P. Theory and practice for high yield, high efficiency and green development of maize in Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 383-392 (in Chinese)
- [5] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 王凤菊. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2996-3002
Han X Z, Zou W X, Wang F X, Wang F J. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2996-3002 (in Chinese)
- [6] 袁静超, 蔡红光, 刘剑钊, 张洪喜, 梁尧, 程松, 刘松涛, 李德忠, 任军. 吉林省玉米化肥投入现状与影响因素分析[J]. 玉米科学, 2021, 29(4): 161-168
Yuan J C, Cai H G, Liu J Z, Zhang H X, Liang Y, Cheng S, Liu S T, Li D Z, Ren J. Analysis on the current status and influencing factors of fertilizer application in maize in Jilin Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(4): 161-168 (in Chinese)
- [7] 梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用, 齐力维护国家粮食安全: 用好养好黑土地的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 557-564
Liang A Z, Li L J, Zhu H. Protection and utilization of black land and making concerted and unremitting efforts for safeguarding food security promoted by sci-tech innovation: Countermeasures in conservation and rational utilization of black land[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(5): 557-564 (in Chinese)
- [8] 王海跃. 吉林: 全力备春耕“千亿斤粮食”产能建设正当时[EB/OL]. (2024-04-14). [2025-05-07]. <http://jl.people.com.cn/n2/2024/0414/c349771-40809581.html>
Wang H Y. Jilin: Spring farming preparations in full swing, advancing the 50-million-ton grain production capacity project[EB/OL]. (2024-04-14). [2025-05-07]. <http://jl.people.com.cn/n2/2024/0414/c349771-40809581.html> (in Chinese)
- [9] Liang Y, Al-Kaisi M, Yuan J C, Liu J Z, Zhang H X, Wang L C, Cai H G, Ren J. Effect of chemical fertilizer and straw-derived organic amendments on continuous maize yield, soil carbon sequestration and soil quality in a Chinese Mollisol[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 314: 107403
- [10] 张玉龙, 王秋兵, 汪景宽. 继承老一辈优良传统推动土壤科学创新发展: 纪念陈恩凤教授诞辰 110 周年[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1261-1266
Zhang Y L, Wang Q B, Wang J K. Inherit and carry forward the fine traditions of the elder generation and promote the innovation of soil science: To commemorate the 110th birthday of professor Chen en-Feng[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6): 1261-1266 (in Chinese)
- [11] 姜岩, 田淑珍, 赵兰坡, 窦森. 试论非腐解态有机物的培肥作用[J]. 土壤通报, 1988, 19(4): 147-150
Jiang Y, Tian S Z, Zhao L P, Dou S. Discussion on the fertilization effect of non-decomposed organic matter[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1988, 19(4): 147-150 (in Chinese)
- [12] 米国华, 陈范骏, 吴秋平, 赖宁薇, 袁力行, 张福锁. 玉米高效吸收氮素的理想根构型[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(12): 1112-1116
Mi G H, Chen F J, Wu Q P, Lai N W, Yuan L X, Zhang F S. Ideotype root architecture for efficient nitrogen acquisition by maize in intensive cropping systems[J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53: 1369-1373
- [13] Yuan Y H, Liang Y, Cai H G, Yuan J C, Li C L, Liu H, Zhang C, Wang L C, Zhang J J. Soil organic carbon accumulation mechanisms in soil amended with straw and biochar: Entombing effect or biochemical protection?[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 33
- [14] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [15] 马国成, 蔡红光, 范围, 梁尧, 刘剑钊, 赵洪祥, 袁静超, 刘培兴, 边少锋, 王立春, 任军. 黑土区玉米秸秆全量直接还田技术区域适应性探讨[J]. 玉米科学, 2022, 30(6): 1-6
Ma G C, Cai H G, Fan W, Liang Y, Liu J Z, Zhao H X, Yuan J C, Liu P X, Bian S F, Wang L C, Ren J. Technical features and regional adaptability of direct and whole maize straw manuring in black soil region[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(6): 1-6 (in Chinese)
- [16] 梁尧, 蔡红光, 闫孝贡, 刘剑钊, 袁静超, 张洪喜, 任军, 王立春. 玉米秸秆不同还田方式对黑土肥力特征的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 107-113
Liang Y, Cai H G, Yan X G, Liu J Z, Yuan J C, Zhang H X, Ren J, Wang L C. Effect of different maize straw-returning modes on the fertility of black soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6): 107-113 (in Chinese)
- [17] 刘春光, 马襄鸿, 岳玉兰, 武俊男, 耿玉辉, 王立春, 程正海. 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢关键酶、产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(1): 149-155
Liu C G, Ma X H, Yue Y L, Wu J N, Geng Y H, Wang L C, Cheng Z H. Effects of pig manure straw compost instead of chemical fertilizer on key

- enzymes of carbon metabolism, yield, and quality of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(1): 149-155 (in Chinese)
- [18] 冯国忠,王寅,焉莉,米国华,高强. 土壤类型和施氮量对连作春玉米产量及氮素平衡的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 444-455
- Feng G Z, Wang Y, Yan L, Mi G H, Gao Q. Effect of soil type and nitrogen application rate on yield of monocropping spring maize and nitrogen balance in crop field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 444-455 (in Chinese)
- [19] 袁静超,刘剑钊,梁尧,张洪喜,刘松涛,蔡红光,任军. 东北中部春玉米超高产群体养分管理模式的研究与验证[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1669-1680
- Yuan J C, Liu J Z, Liang Y, Zhang H X, Liu S T, Cai H G, Ren J. Study and demonstration of superhigh yield nutrient managemnt for maize production in the middle area of Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1669-1680 (in Chinese)
- [20] 侯云鹏,孔丽丽,蔡红光,刘慧涛,高玉山,王永军,王立春. 东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3559-3572
- Hou Y P, Kong L L, Cai H G, Liu H T, Gao Y S, Wang Y J, Wang L C. The accumulation and distribution characteristics on dry matter and nutrients of high-yielding maize under drip irrigation and fertilization conditions in semi-arid region of northeastern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20): 3559-3572 (in Chinese)
- [21] 蔡红光,梁尧,刘慧涛,刘剑钊,秦裕波,刘方明,袁静超,张洪喜,任军,王立春. 东北地区玉米秸秆全量深翻还田耕种技术研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 123-129
- Cai H G, Liang Y, Liu H T, Liu J Z, Qin Y B, Liu F M, Yuan J C, Zhang H X, Ren J, Wang L C. Research on full maize straw returning with deep ploughing mode in the Northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5): 123-129 (in Chinese)
- [22] 刘剑钊,袁静超,梁尧,贺宇,张水梅,史海鹏,蔡红光,任军. 玉米秸秆全量深翻还田地力提升技术模式实证及效益分析[J]. 作物杂志, 2021, (2): 135-139
- Liu J Z, Yuan J C, Liang Y, He Y, Zhang S M, Shi H P, Cai H G, Ren J. Analysis of field verification and benefit on full maize straw returning with deep plowing mode[J]. *Crops*, 2021, (2): 135-139 (in Chinese)

责任编辑: 梁芷健



第一作者简介: 范围, 博士, 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)农业资源与环境研究所副研究员。从事黑土全耕层培肥技术研究, 聚焦利用秸秆、畜禽粪便等农业废弃物还田培肥土壤。近年来先后主持国家重点研发计划子课题、吉林省自然科学基金等省部级科研项目6项, 获得吉林省科技进步二等奖2项、国家授权专利1项, 在 *Nature Climate Change*、*Ecosystem Health and Sustainability*、《土壤学报》等国内外高水平学术期刊发表论文20余篇。



通讯作者简介: 梁尧, 博士, 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)农业资源与环境研究所研究员, 吉林省高层次D类人才。主要从事有机培肥对土壤质量与作物产量的影响过程与机制相关研究。近5年, 主持及参加省部级项目/课题10项, 发表论文30余篇, 作为第一完成人获吉林省科技进步二等奖1项, 作为主要完成人获吉林省科技进步一等奖2项、吉林省标准创新贡献奖一等奖1项。主持和参与编制国家、行业及地方标准5项。



通讯作者简介: 蔡红光, 博士, 现任农业农村部黑土地保护与利用重点实验室(吉林)主任、农业农村部神农青年英才、吉林省黑土工程研究中心主任、研究员。从事黑土全耕层培肥与养分资源高效利用研究10余年。先后主持完成国家自然科学基金、国家重点研发计划课题、吉林省重大科研攻关项目等20余项。近五年, 获吉林省科技进步一等奖2项, 全国农牧渔业丰收奖农业技术推广成果奖一等奖1项、吉林省农业技术推广一等奖1项, 发表论文50余篇, 获专利及软件著作权12件, 制定行业及地方标准5套。创建了黑土地玉米连作秸秆还田全耕层培肥技术体系, 整体达到国际先进水平。提出的黑土地全耕层培肥理论, 改变了国内外同类研究关于土壤培肥层次的认知, 关于秸秆还田后土壤有机碳物理化学保护机制、当代玉米高产群体理想根构型及适应性特征研究达到国际领先水平。