

王希全, 王培欣, 钱春荣, 逢焕成. 秸秆颗粒化还田的研究进展[J]. 土壤学报, 2026,

WANG Xiquan, WANG Peixin, QIAN Chunrong, PANG Huancheng. Research Progress of Pelletized Straw Incorporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

秸秆颗粒化还田的研究进展*

王希全^{1,2}, 王培欣¹, 钱春荣³, 逢焕成^{2†}

(1. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019; 2. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所), 北京 100081; 3. 黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所, 哈尔滨 150023)

摘要: 秸秆还田是中国现代农业土壤培肥的永恒主题与难题。针对传统秸秆还田方式存在的秸秆腐解慢、有机质提升难、减产风险大等典型不足, 团队历时 14 年提出并研发了秸秆颗粒化还田技术, 为我国节约集约用地提供全新解决方案。综述秸秆颗粒化还田研究进展, 旨在为其高质量发展提供理论支撑和技术参考。本文首先回顾了秸秆颗粒化还田概念的提出——将秸秆二次粉碎并挤压成粒, 同步解决秸秆腐解和还田难题; 然后, 基于实践总结其还田量大幅提高、土壤有机碳快速提升、作物产量稳定增加等十大优势, 提出了三个科学问题——促腐过程机制、碳周转机理和增碳阈值, 并展望了秸秆颗粒化还田在集约农业、有机农业、中低产田和后备耕地中的应用潜力; 最后, 针对其大范围且规模化应用短板, 提出两项保障措施——秸秆粉碎造粒一体机的优化与推广、秸秆颗粒交易平台的建立与发展。总之, 秸秆颗粒化还田可实现土壤肥力与作物产量的同步提升, 助力国家实现“两藏”战略和“双碳”目标。

关键词: 秸秆还田; 秸秆腐解; 土壤有机碳; 作物产量

中图分类号: S36

文献标志码: A

Research Progress of Pelletized Straw Incorporation

WANG Xiquan^{1,2}, WANG Peixin¹, QIAN Chunrong³, PANG Huancheng^{2†}

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Crop Cultivation and Farming, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150023, China)

Abstract: Straw incorporation poses a persistent challenge while remaining fundamental to soil fertility management in modern Chinese agriculture. However, traditional straw incorporation methods are characterized by slow decomposition, inefficient soil organic matter enhancement, and significant yield reduction. To combat these drawbacks, we proposed and developed straw pelletization technology as a novel alternative for efficient straw utilization over 14 years, providing a novel solution for land conservation and intensive utilization. This review synthesized the research progress in straw pelletization and incorporation, with the aim of providing a theoretical foundation and technical guidance for its high-quality development. This review commenced with a retrospective

* 国家重点研发计划项目(2023YFD1500902)和国家自然科学基金项目(32172126, 32560514)共同资助
Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500902), and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 32172126, 32560514)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: panghuancheng@caas.cn

作者简介: 王希全(1989-), 男, 甘肃景泰人, 博士, 副教授, 主要从事秸秆还田与土壤培肥研究。

E-mail: wangxiquan@imau.edu.cn

收稿日期: 2025-10-10; 收到修改稿日期: 2025-12-23; 网络首发日期(www.cnki.net):

analysis of the conceptual foundation of straw pelletization and incorporation, which involves secondary crushing and pelletizing of straw to simultaneously tackle decomposition and field incorporation challenges. Subsequently, based on previous practices, the study delineated ten major advantages, such as markedly increased incorporation rates, rapid soil organic carbon sequestration, and stable yield improvements. It also identifies three salient scientific questions, the mechanism of accelerated decomposition, carbon turnover processes, and carbon sequestration thresholds, while envisioning the application potential of pelletized straw returning in intensive agriculture, organic agriculture, medium- and low-yield fields, and reserve croplands. Finally, to bridge the gap in large-scale and widespread adoption, two essential supporting measures were proposed: the optimization and widespread deployment of integrated straw crushing and pelletizing machinery, and the establishment and development of a straw pellet trading platform. In summary, straw pelletization and incorporation enable the simultaneous improvement of soil fertility and crop yield, thereby supporting the national strategies of the Two Stores (storing grain in the land and through technology) and the Dual Carbon (Carbon Peak and Carbon Neutrality).

Key words: Straw incorporation; Straw decomposition; Soil organic carbon; Crop yield

随着粮食产量增加, 中国每年产生 7.4 亿吨秸秆, 这是农业生产的后续问题^[1]。生产上广泛采用的秸秆覆盖还田和浅旋还田, 在冷凉干旱区域大多存在秸秆腐解慢、土壤消纳能力差等问题, 致使剩余秸秆处于“还不下、不让烧、无处放”的尴尬处境。此外, 传统秸秆还田方式也存在亚表层土壤有机质提升难和减产风险大的典型不足^[2-3]。为解决上述问题, 本文提出了秸秆颗粒化还田的思路, 并自 2011 年以来持续 14 年开展秸秆颗粒化还田研究, 在东北黑土、华北潮土等区域广泛应用^[4-5], 荣获 2021 年度“科创中国”农业“卡脖子”技术榜, 入选“2022 年中国农业科学院 10 项重大产品创制、重大技术突破和重大智库报告”, 为秸秆高效还田提供全新解决方案。在此过程中, 农业管理者、科研人员、经营主体等对秸秆颗粒化还田也提出了建设性意见和建议, 为此, 综述秸秆颗粒化还田的研究进展, 为其高质量发展提供理论支撑和技术参考。

1 秸秆颗粒化还田概念的提出

针对秸秆颗粒化还田, 本文提出了以下科学问题: 一是能否通过机械将秸秆二次粉碎, 由粗变细、由长变短、由硬变软, 解决我国东北等地区由于干旱、低温限制微生物活性导致的秸秆分解慢的问题? 二是能否将“细、短、软”的秸秆通过机械挤压同步制成颗粒, 提高秸秆还田的质量和灵活性? 三是能否利用秸秆颗粒腐解快、密度高的优势实现高量还田, 进而快速培肥土壤?

首先, 要解决秸秆腐解慢这一“卡脖子”难题。秸秆颗粒化过程可以破除秸秆的原始组织结构和外表面的角质层, 其还田后遇水膨胀, 使难分解物质与土壤的接触面增加; 另外, 提高秸秆粉碎程度有利于土壤微生物的附着和定殖, 从而显著提高秸秆腐解速率^[6-7]。需要说明的是, 联合收割机收获时同步粉碎秸秆长度为 6~10 cm, 常规秸秆切碎还田机二次粉碎秸秆长度为 3~5 cm, 而秸秆颗粒化可粉碎秸秆至 0.4 cm, 即粉碎程度提高 7.5 倍~25 倍。

其次, 要同步解决粉碎秸秆还田难这一制约农民积极性的问题。粉碎秸秆具有密度低、体积大的典型特征, 这导致其收运储难、还田难。秸秆颗粒化过程包括秸秆粉碎和压缩造粒两个环节, 秸秆密度显著增加至 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 为常规粉碎秸秆的 5.7 倍、常规二次粉碎秸秆的 3.2 倍^[4]。秸秆颗粒化后体积大幅下降, 就地还田质量高, 不影响其他农事作业; 此外, 其收集、运输、抛洒、还田操作难度大幅降低, 方便其离田或异地还田。

最后, 要解决土壤快速培肥这一社会普遍关注的问题。有机物料投入是有机质提升的第一要素, 而传统秸秆还田方式多为全量还田, 按 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算, 土壤有机质增加一个百分点

需要 20 年^[8]。秸秆颗粒化后可实现高量还田，结合其快速腐解的优势，理论上可实现土壤快速培肥。

2 秸秆颗粒化还田的突出优势

针对传统秸秆覆盖还田、浅旋还田技术存在的弊端，团队围绕“秸秆有效处理—机艺配套还田”进行研究。近年来，创建了秸秆颗粒“常量/高量”两种还田量技术、“一次性/连年”两种还田制技术、“浅旋/深埋”两种还田深度技术，并在山东、辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古、四川、甘肃等地，对粮食、经济、果蔬等作物进行研究与应用。结果表明，秸秆颗粒化还田可实现“双养（养地、养作物）”，破解了传统秸秆还田后土壤培肥与作物增产难以协调的难题（图 1），具有以下突出优势。

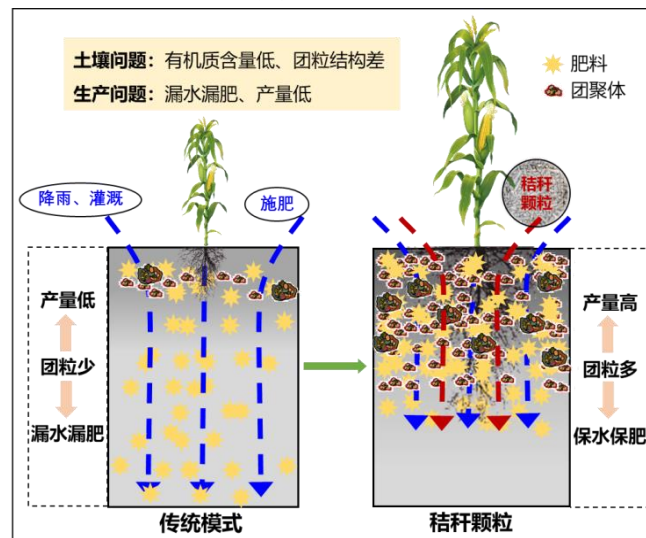


图 1 秸秆颗粒化还田—团聚体构建—作物增产协同关系

Fig. 1 Pelletized straw incorporation – soil aggregate formation – crop yield enhancement synergism

2.1 土壤消纳秸秆能力大幅提高

土壤对秸秆的消纳能力定义为土壤在一定条件下分解、转化和固定秸秆有机碳的能力，本文以土壤有机碳含量随秸秆还田量增加而线性增加为依据确定秸秆消纳量。土壤对传统粉碎秸秆的消纳量为 $9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[9]，而土壤对秸秆颗粒的消纳量高达 $150 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[10]。

2.2 秸秆腐解速率明显提升

秸秆颗粒化后还田可显著提升秸秆的腐解速率。在室温 22°C 、土壤含水量 25% 条件下培养 60 天，秸秆颗粒平均腐解速率较常规粉碎秸秆（3~5 cm）提高 32%；培养 300 天后，其累积腐解率达 81%，较粉碎秸秆高出 9 个百分点。可较常规粉碎秸秆提前 30 天腐解过半，提前 14 天完全腐解^[7]。

2.3 秸秆养分释放速率明显提升

秸秆颗粒化还田可显著提升秸秆养分释放速率，前 60 天尤为明显。前 30 天钾素释放速率为粉碎秸秆的 1.5 倍；第 30~60 天氮素和磷素释放速率分别为粉碎秸秆的 2.5 倍和 1.8 倍。秸秆氮、磷、钾养分释放过半所需时间较粉碎秸秆可分别提前 30 天、125 天和 15 天，较粉碎秸秆提前 9 天释放全部养分^[7]。

2.4 土壤有机碳快速增加

秸秆碳含量高，其还田是增加土壤有机碳最现实的途径。秸秆颗粒化还田前 30 天，碳素释放速率为粉碎秸秆的 1.8 倍，秸秆碳素释放过半时间可提前 25 天；300 天后秸秆颗粒碳累积释放率达 96%，较粉碎秸秆高 11 个百分点^[7]。基于上述优势，常规秸秆还田（ $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$

2) 的中国东北黑土 0~40 cm 土壤有机碳每年仅增加 $0.27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而秸秆颗粒 $75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 连续三年还田, 土壤有机碳由 $16.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提升至 $20.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 每年增加 $1.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是常规秸秆还田的 5.8 倍^[5]。

2.5 土壤物理结构明显改善

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 对土壤生态和生产功能至关重要^[11]。针对沙地这种典型团粒结构障碍土壤, 0~20 cm 土壤大团聚体 ($>2000 \mu\text{m}$) 比例仅为 0.48%, 而秸秆颗粒 $75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 旋耕还田一年后, 大团聚体 ($>2000 \mu\text{m}$) 分别为秸秆不还田的 4.8 倍和 9.8 倍^[10]。

2.6 土壤持水能力明显提升

土壤团粒结构改善可以大幅提高土壤持水能力^[12]。针对沙地这种典型漏水漏肥土壤 (持水量仅为 4.2%~8.5%), 秸秆颗粒 $75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 旋耕还田可使 0~20 cm 土壤持水量分别增加 57%~106% 和 112%~181%, 大田生产条件下土壤含水量也明显提升^[10]。

2.7 土壤酸碱性有效改善

随着秸秆还田量增加, 土壤酸化的风险进一步加大^[13]。然而, 秸秆颗粒单次还田后 1~3 年, 还田量由 $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加至 $75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 并未降低土壤 pH^[14], 东北黑土区秸秆颗粒 $75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 连续三年还田土壤 pH 也未显著降低^[4]。相对于常规粉碎秸秆 (还田量 $6\sim15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 土壤 pH 在秸秆颗粒化还田后 1~2 年降低, 但在 3~4 年后增加^[14-15]。

2.8 土壤微生物群落结构明显优化

相对于细菌而言, 真菌在利用复杂化合物方面具有明显优势^[16]。秸秆形态对土壤微生物群落结构具有明显影响^[15], 秸秆还田后 1~3 年, 常规粉碎秸秆还田真菌与细菌比值逐渐降低, 而秸秆颗粒还田该比值逐渐上升; 此外, 相对于粉碎秸秆, 秸秆颗粒 $75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还田可显著提高革兰氏阳性菌和阴性菌的比值^[14], 腐殖化程度较高^[17-18]。

2.9 土壤呼吸速率显著提高

土壤呼吸是表征土壤质量的重要指标, 可为植物提供光合作用原料二氧化碳。相对于常规粉碎秸秆, 秸秆颗粒在温室条件下还田后 300 天内土壤呼吸速率提高 18%^[7], 大田条件下华北平原冬小麦土壤呼吸速率增加 15%, 但对下茬玉米影响不显著, 且土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 降低 10%^[19], 表明其土壤有机质分解对温度变化的响应不敏感^[20]。

2.10 作物产量稳定提高

长期来看, 秸秆还田可以培肥土壤, 通常增加作物产量^[21]; 然而短期秸秆还田后, 土壤常“跑风漏墒”, 作物易“吊苗悬根”, 影响出苗保苗率, 造成倒伏减产^[22]。秸秆颗粒具有密度大、体积小的优势, 其还田后不影响播种, 实现“苗齐苗匀”; 而其腐解快又能为作物生长提供养分, 实现“苗壮穗大”。秸秆颗粒“易离田、好运输”, 其复配化肥、微生物肥可大幅提高作物产量 (表 1)。此外, 虽然秸秆颗粒还田的成本有一定增加, 但净收益亦随还田年限稳步提升。在还田后第三年, 秸秆颗粒高量还田的净收益较秸秆不还田提高 4.3%, 较秸秆粉碎还田提高 10.2%^[4]。

表 1 秸秆颗粒化还田增产效果

Table 1 The yield increase achieved by pelletized straw incorporation

还田方式	土壤类型及	技术措施	作物类型	增产比例			备注及参考文献
Straw return method	熟制 Soil types and cropping regime	Agronomic measures	Crop types	Yield increase ratio /%			Notes and references
				第一 年 1st	第二 年 2ed	第三 年 3rd	
耕地-相对常 规粉碎秸秆 还田 Relative to chopped straw incorporation in cultivated lan d	华北潮土, 一年两熟	一次性常量浅旋 15 cm (6 t·hm ⁻²)	冬小麦	10.8	1.2	2.0	还田时间: 第一年冬小麦播前 [5,23]
			夏玉米	3.4	2.3	-0.4	
		一次性常量深埋 40 cm (12 t·hm ⁻²)	冬小麦	2.6	0.7		
			夏玉米	-0.2	0.4		
		一次性高量深埋 40 cm (36 t·hm ⁻²)	冬小麦	10.6	2.3		
			夏玉米	1.4	1.7		
	东北黑土, 一年一熟	连年高量深埋 20 cm (75 t·hm ⁻²)	春玉米	4.7	13.3	28	还田时间: 每年玉米收获后 [4], 第五、六年分别增产 9.8% 和 25.2% ^[24]
耕地-相对秸 秆不还田 Relative to non-straw incorporation in cultivated lan d	华北潮土, 一年两熟	一次性常量浅旋 15 cm (6 t·hm ⁻²)	冬小麦	9.8	5.7	6.7	还田时间: 第一年冬小麦播前 [5,23]
			夏玉米	9.5	8.0	4.9	
		一次性常量深埋 40 cm (12 t·hm ⁻²)	冬小麦	1.1	6.4		
			夏玉米	4.7	4.0		
		一次性高量深埋 40 cm (36 t·hm ⁻²)	冬小麦	4.6	10.9		
			夏玉米	11.4	8.9		
	东北黑土, 一年一熟	连年高量深埋 20 cm (75 t·hm ⁻²)	春玉米	-3.1	5.4	7.4	还田时间: 每年玉米收获后 [4], 第五、六年分别增产 9.7% 和 10.1% ^[24]
后备耕地-相 对秸秆不还 田 Relative to non-straw incorporation in potential cropland	科尔沁沙地, 一年一熟	高量深翻 40 cm (75 t·hm ⁻²)	饲用玉米	150			水肥管理: 滴管水肥一体化 ^[10]
		秸秆颗粒 (34.3 t·hm ⁻²) + 黏土 (22.9 t·hm ⁻²) 混合浆覆盖	狼尾草	485			
	川西北沙地, 一年一熟	秸秆颗粒复合微生物肥, 隔年常量还田 35 cm (6.75 t·hm ⁻²)	烤烟	95	24	21	肥料成分: 每吨秸秆颗粒添加 NH ₄ ⁺ -N 5.5 kg、NO ₃ ⁻ -N 2.0 kg、 P ₂ O ₅ 7.5 kg、K ₂ O 6.0 kg 和促 腐菌剂 3 kg ^[25-26]
		秸秆颗粒复合微生物肥, 高量浅旋 10 cm (18 t·hm ⁻²)	黑麦草	202			肥料成分: 秸秆颗粒 908 g·kg ⁻¹ 、 枯草芽孢杆菌 2 g·kg ⁻¹ , 聚 丙烯酰胺 3 g·kg ⁻¹ 、尿素 13 g·kg ⁻¹ 、过磷酸钙 50 g·kg ⁻¹ 、硫 酸钾 24 g·kg ⁻¹ ^[28]

3 秸秆颗粒化还田研究展望

秸秆颗粒化还田在增产、促腐和增碳方面的效果已初见端倪,未来从秸秆角度仍需进一步探究其腐解过程及其主控因子,从土壤角度仍需进一步研究碳周转及其调控机制和土壤增碳动态及其阈值,这对理解秸秆颗粒化还田优势及因地制宜构建技术模式具有重要意义。

3.1 秸秆腐解过程及其调控机制

关于秸秆颗粒化还田促腐机理,前期科学假设集中于秸秆粉碎程度和表皮角质层破碎。然而,在相同粉碎程度、高量还田且与土壤混合均匀的条件下,秸秆颗粒促腐增碳效果明显优于粉碎秸秆^[29]。秸秆颗粒化还田后形成明显的“秸秆颗粒-土壤”界面,遇水膨胀后与土壤密切接触且形成含水量高、孔隙度大、通气性强等界面特征,是秸秆腐解过程中养分和碳周转的热点区域,其中土壤微生物起到了核心驱动作用^[30-31]。秸秆还田后,具有腐解功能的土壤微生物迅速富集在秸秆界面,介导秸秆源碳进入土壤^[32-33]。土壤微生物随秸秆腐解过程发生群落演替和空间分异。在秸秆分解初期,r-策略微生物更易利用易降解、富氮的有机物,k-策略微生物则更倾向于利用难降解的有机物;在秸秆分解后期,与细菌相比,真菌更适应高C/N环境,逐渐成为优势类群^[34]。然而,目前秸秆颗粒-土壤界面微生物的作用机制尚不清楚,深入探究界面过程微生物群落结构分异特征,明确酶活性热点区域范围,筛选秸秆颗粒化还田的关键微生物类群(图2),对阐明秸秆颗粒高量还田的促腐机制有重要意义。

3.2 土壤碳周转及其固碳机理

前期研究结果表明,高量且等量还田条件下,秸秆颗粒较粉碎秸秆土壤增碳量高^[4,29]。除秸秆颗粒腐解快使得土壤碳输入较多外,也可能与激发效应、微生物碳泵等相关。秸秆颗粒腐解后,大分子碳及养分固持到秸秆颗粒周边土壤中,而小分子碳及养分随雨水向周边扩散,形成典型的土壤剖面特征,而由碳组分引起的土壤微生物种类分异也是解释土壤固碳的关键^[35]。本文初步假定,随着土壤与秸秆颗粒距离的增加,微生物残体对土壤碳的贡献逐步由真菌主导转变为细菌主导,由此导致土壤固碳量及其稳定性出现典型差异(图2)。此外,外源碳输入与激发强度存在非线性关系^[36],即随着碳输入增加,激发强度先增加^[37],再饱和^[38],后减弱^[39]。土壤与秸秆颗粒的距离不同使得土壤碳组分及其数量出现明显差异,进而导致激发强度发生变化^[40]。本文初步假定秸秆颗粒附近的土壤降低了激发强度,而秸秆颗粒较远的土壤增加了激发强度。土壤整体激发效应降低,使得颗粒化还田增碳效应强于粉碎秸秆还田。

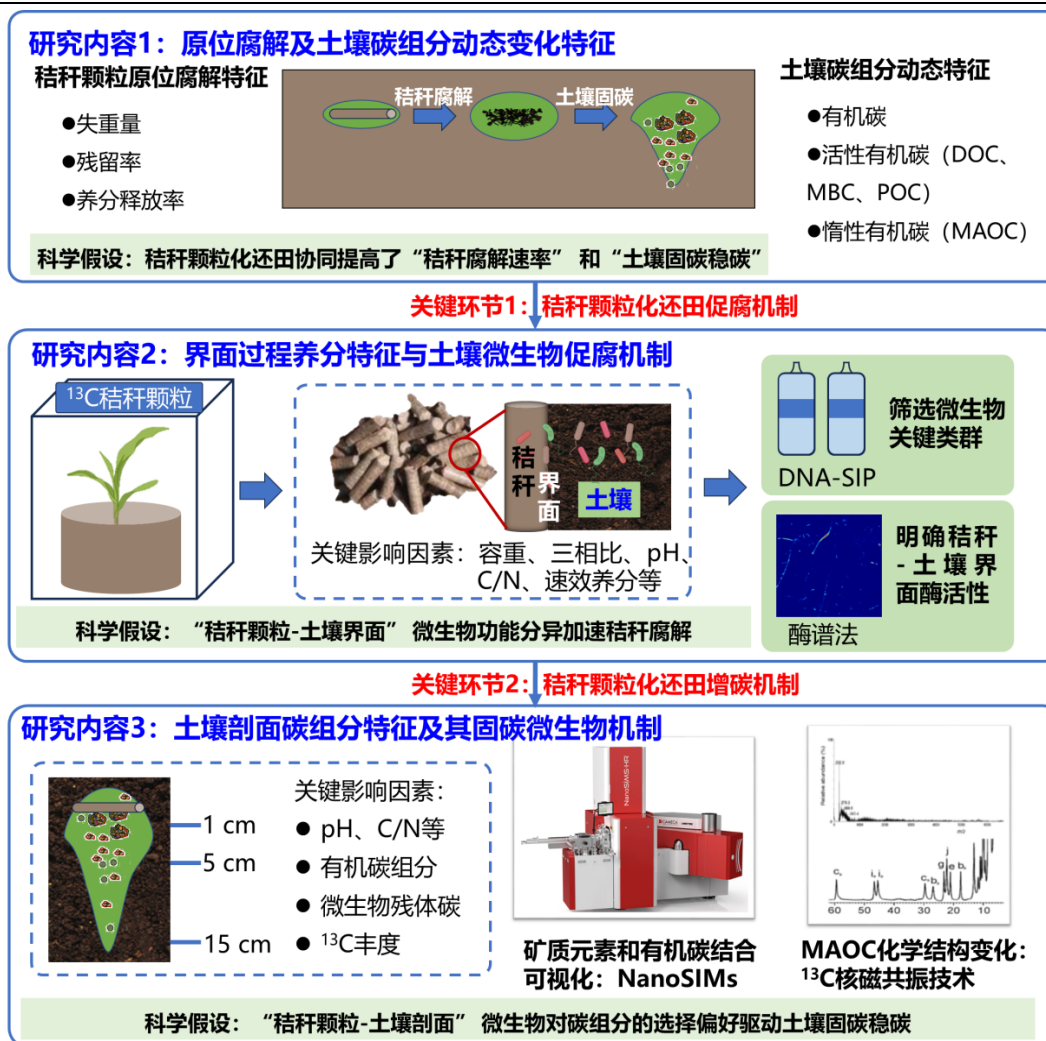


图2 秸秆颗粒化还田促腐增碳机理研究思路

Fig. 2 Towards the mechanisms of straw pelletization in promoting decomposition and increasing soil carbon sequestration

3.3 土壤增碳动态及其阈值

通过改变秸秆形态来增加秸秆还田量是快速提高土壤有机碳的可行方式。当秸秆还田量低于土壤消纳量时,秸秆还田量是土壤碳的控制因素,秸秆还田量与土壤有机碳呈线性正相关^[41-42];当秸秆还田量进一步增加时,秸秆腐解速率变成土壤有机碳的限制因子,土壤有机碳含量基本保持稳定^[4]。但北方地区传统秸秆还田方式土壤消纳量仅为 $7.5\sim 9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[43-44],根据前期研究结果估算,土壤有机质提高1个百分点需要25~50年(按目前秸秆还田量 $7.5\sim 15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),难以快速提高土壤肥力。秸秆颗粒具有密度大、体积小特点,其在土壤的消纳量高达 $150\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。但是秸秆颗粒单次高量还田不能实现土壤有机碳含量持续提升,即相对于秸秆不还田,秸秆颗粒高量还田后1~2年内土壤有机碳含量增加,第3年后开始下降^[45]。上述研究结果表明,即使采用秸秆颗粒高量还田技术,短期内土壤有机质能够得以提高,但难以长期固持稳定,更难以持续提升。只有秸秆颗粒高量连年还田,才能快速、持续地提高土壤有机碳(图3)。若按每年 $45\sim 75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还田量估算,耕层土壤有机质含量提高1个百分点需要5~7年即可实现。东北黑土研究结果也证实,秸秆颗粒连续三年 $75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 深埋还田可使0~40 cm土壤有机质含量由 $27.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提升至 $36.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,三年提高 $8.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[4]。然而,秸秆还田土壤的固碳速率随还田年限的增加而显著减小^[46],增碳量也与土壤类型、还田量、气候条件等密切相关,仍需进一步中长期观测。

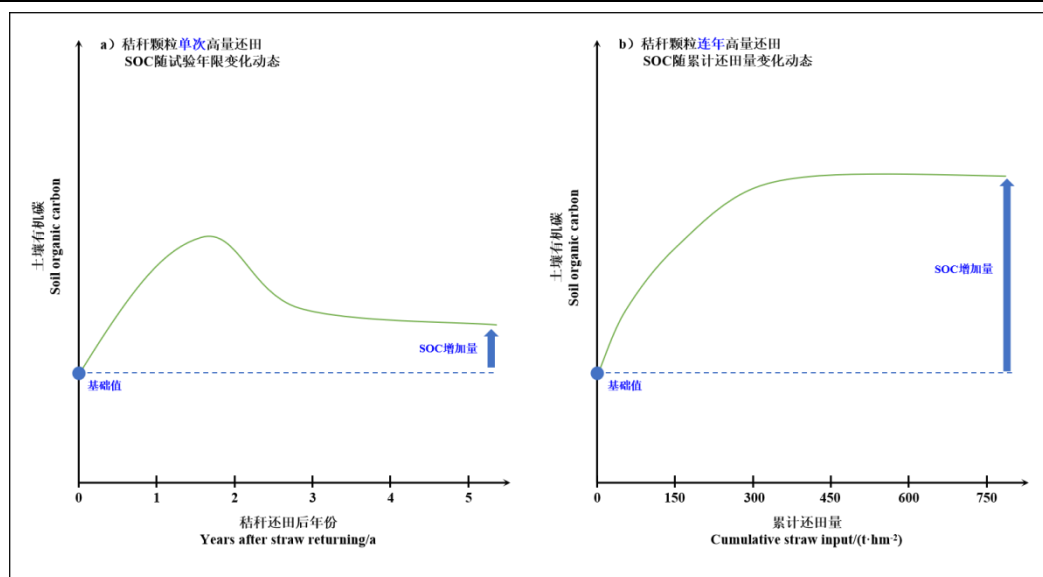


图3 秸秆颗粒单次/连年高量还田土壤有机碳特征曲线

Fig. 3 Soil organic carbon dynamics: Single vs. consecutive annual application of high-dosage pelletized straw

4 秸秆颗粒化还田应用展望

相对于传统秸秆还田方式,秸秆颗粒化还田具有“可高量、可异地、灵活性高”的典型优势,未来在集约农业中可通过创新秸秆还田制度实现耕地利用与保护的协同,在有机农业中通过研制秸秆颗粒产品实现产量与品质的同步提高,在中低产田和后备耕地中通过“把秸秆还到最需要的地方”,实现土壤培肥与作物增产的协调统一。

4.1 集约农业产量地力同步提高中的应用

集约农业对国家粮食安全贡献巨大,但集约型可持续农业才是未来发展方向^[47]。当前中国农业正处于绿色转型期,而农业管理(如土壤耕作)强度增加通常会降低土壤多功能性^[48]。针对东北黑土、华北潮土等粮食主产区,前期研究已经证明,秸秆颗粒化还田可实现“还一年,管三年”(表1),下一步需降低土壤管理强度,建立“轮耕轮还制”,如秸秆颗粒化后少部分耕地深翻/浅旋还田,大部分耕地少耕/免耕播种。此外,禾本科与豆科作物秸秆联合还田可以同步提高土壤固碳速率和碳氮含量^[49-50],未来可基于秸秆颗粒化还田构建“豆禾秸秆联合还田制”,助力农业集约化可持续发展。

4.2 有机农业产量品质协同提升中的应用

我国乡村振兴中食品安全是第一战略任务,其对策方案为建设全域有机农业,但存在安全有机肥源不足、高产优质难协同的问题^[51]。前期研究表明,相对于粉碎秸秆 75 t·hm⁻² 连年还田,东北黑土区秸秆颗粒化还田第三年,作物产量增加了 28% (表 1), 土壤钙、锰、镍、铜、锌含量均显著提高;此外,籽粒铁、锰、镁含量分别增加了 35%、12%、6%,籽粒必需氨基酸和非必需氨基酸分别提高了 26%和 22%^[52]。未来,基于秸秆颗粒化还田技术的有机农业栽培管理体系有望补齐有机肥短板,实现作物产量、土壤肥力与籽粒品质的协同提升。

4.3 中低产田改良中的应用

中国中低产田占耕地总面积的七成,增产潜力巨大^[53]。秸秆颗粒高量还田,可使瘠薄、风沙、结构障碍等土壤快速增碳培肥,也可使盐碱土壤“肥大吃盐、有盐无害”^[54]。此外,秸秆颗粒替代粉碎秸秆布设隔层或深还,可同步实现“水盐调控和亚表层培肥”的协调统一。

[55]. 未来, 针对不同障碍土壤的作物养分需求, 可在不同秸秆养分构成基础上外源添加土壤调理剂、大中微量元素、微生物菌剂等, 形成基于秸秆颗粒的有机-无机-微生物复合专用肥, 不仅有利于秸秆颗粒的提质增效, 也有望构建中低产田轻简化高效栽培体系。

4.4 后备耕地开发中的应用

我国后备耕地资源丰富, 但其土壤肥力较低导致开发后低产低效^[56]。针对沙地特征, 秸秆颗粒、秸秆颗粒-黏土混合浆、秸秆颗粒-化肥-微生物复合肥等均可以使作物产量成倍增加(表 1)。未来可针对不同后备耕地类型, 以秸秆颗粒为基础原料, 研发新产品、新技术, 实现后备耕地的有效开发。

5 秸秆颗粒化还田保障措施

秸秆颗粒化还田具有广阔的应用前景, 但其大范围推广与规模化应用仍需机械优化与推广、秸秆颗粒交易平台的建立与发展等保障措施。

5.1 秸秆粉碎造粒一体机的优化与推广

秸秆颗粒化经历了工厂化和田间一体化两个阶段。2015 年, 团队制订了工厂化生产秸秆颗粒的工艺流程: 秸秆收集打捆→秸秆粉碎→原料配料→搅拌混合→造粒→筛分烘干→成品定量包装→产品施用, 具有生产稳定、不受天气等因素影响的优势。但是, 秸秆离田处理通常需要秸秆归行、打捆、运输等多道工序, 机具多次进地压实土壤; 此外, 秸秆“收、运、储”体系不完备, 导致秸秆离田成本较高、火灾风险大。每吨秸秆处理成本: “收、运、储”环节 230 元, 加工环节 225 元, 总成本 455 元。2018 年以来, 团队研制了田间自走式、牵引式、对辊式秸秆捡拾颗粒制作一体机, 可以一次作业完成田间秸秆捡拾和颗粒制作, 大幅减少机具进地次数, 在减缓土壤压实的同时, 大幅降低作业油耗和成本, 每吨秸秆处理成本(油耗+人工+机械损耗) 80 元左右。总体而言, 秸秆颗粒如何经济、轻简、高效生产是我国秸秆颗粒化还田的关键, 其关键设备是田间秸秆捡拾颗粒制作一体机。但目前一体机田间作业对象仍以玉米为主, 未来针对不同耕地类型(水田、旱地等)和秸秆特性(含水量、粉碎难度), 需进一步改造升级, 优化关键组件并推广应用, 实现全类型(木本、草本等)、全区域(东北、华北等)秸秆资源化利用。

5.2 秸秆颗粒交易平台的建立与发展

用市场化、规模化、数字化的视角去看待秸秆资源是秸秆颗粒产业化发展的必然要求。这本质上要求进一步建立秸秆颗粒交易平台, 连接秸秆颗粒供应者和需求者, 实现跨用户、跨区域的秸秆资源高效利用。一是目前秸秆焚烧与供给不足并存, 未来可基于数字化平台实现秸秆底数清晰可查, 通过提供交易信息服务提高秸秆利用价值; 二是秸秆颗粒产业化应用不足, 平台可及时发布基于秸秆颗粒的最新技术及产品信息, 通过多方力量促进产业健康有序发展; 三是通过秸秆颗粒化还田落实国家“两藏”战略和实现“双碳”目标, 实现土壤碳储量和作物产量的同步提高^[1,57]。

参考文献 (References)

- [1] Zhao X, Li R C, Liu W X, et al. Estimation of crop residue production and its contribution to carbon neutrality in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 203: 107450.
- [2] Kan Z R, Li Z Z, Amelung W, et al. Soil carbon accrual and crop production enhanced by sustainable subsoil management[J]. Nature Geoscience, 2025, 18(7): 631-638.
- [3] Pittelkow C M, Liang X Q, Linquist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. Nature, 2015, 517(7534): 365-368.
- [4] Wang X Q, Lü G Y, Zhang Y, et al. Annual burying of straw after pelletizing: A novel and feasible

way to improve soil fertility and productivity in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 230: 105699.

[5] Cong P, Li Y Y, Gao Z J, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1): 148-156. [丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 148-156.]

[6] Ji X F, Jiang J, Wang Y G, et al. Small straw addition enhances straw decomposition and carbon stabilized in soil aggregates over time[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 238: 106022.

[7] Wang J, Zhang L, Pang H C, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 177-183. [王婧, 张莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 177-183.]

[8] Zhang S X, Zhang W J, Shen R F, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1389-1393. [张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1389-1393.]

[9] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.

[10] Zhang Y, Zhao J, Wang H Y, et al. Pelletized straw incorporation in sandy soil increases soil aggregate stability, soil carbon, and nitrogen stocks[J]. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7079.

[11] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643. [刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627-643.]

[12] Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, et al. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(1): 104-136.

[13] Liang F, Li B Z, Vogt R D, et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: 107176.

[14] Cong P, Wang J, Dong J X, et al. Effects and analysis of straw returning on subsoil microbial community structure in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(1): 109-118. [丛萍, 王婧, 董建新, 等. 秸秆还田对黑土亚表层微生物群落结构的影响特征及原因分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 109-118.]

[15] Cong P, Wang J, Li Y Y, et al. Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104735.

[16] Wang C Q, Kuzyakov Y. Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources[J]. *The ISME Journal*, 2024, 18(1): wrac073.

[17] Fanin N, Kardol P, Farrell M, et al. The ratio of Gram-positive to Gram-negative bacterial PLFA markers as an indicator of carbon availability in organic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 128: 111-114.

[18] Cong P, Pang H C, Wang J, et al. Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 811-823. [丛萍, 逢焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 811-823.]

[19] Zhang L, Wang J, Pang H C, et al. Effects of short-term granulated straw incorporation on grain yield and soil respiration in a winter wheat-summer maize cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied*

Ecology, 2018, 29(2): 565-572. [张莉, 王婧, 逢焕成, 等. 短期秸秆颗粒还田对小麦-玉米系统作物产量与土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 565-572.]

[20] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.

[21] Liu J, Fang L C, Qiu T Y, et al. Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: A global meta-analysis[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2023, 43(6): 78.

[22] Zhao X, Liu S L, Pu C, et al. Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 84: 67-75.

[23] Zhang L, Li Y Y, Pang H C, et al. Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(2): 160-168. [张莉, 李玉义, 逢焕成, 等. 玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 160-168.]

[24] Cheng M, Zhang Y T, Lv G Y, et al. A high amount of straw pellets returning delays maize leaf senescence, improves dry matter accumulation and distribution, and yield increase in Northeast China[J]. Agronomy, 2025, 15(3): 711.

[25] Dong J X, Wang P, Cong P, et al. Granulated straw incorporation with rotary tillage increases the content of soil organic carbon fractions and available nutrients and shifts bacterial communities in East China[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1520760.

[26] Dong J X. Study on the mechanism of tobacco planting soil quality improvement by tillage management and returning granulated straw[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. [董建新. 耕作方式和秸秆颗粒化还田对植烟土壤质量提升机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.]

[27] Zhang Y, Zhang R M, Zhang P C, et al. Effects of spraying straw particles and clay mixed slurry to form crust on sand and carbon fixation in Horqin sandy land[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(8): 1-10. [张延, 张瑞民, 张鹏程, 等. 喷施秸秆颗粒和黏土混合浆形成结皮对科尔沁沙地固沙固碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(8): 1-10.]

[28] Zhang X L, Kong F L, Liu X L, et al. Effects of different biomass amendments on soil organic carbon characteristics in alpine desertification grassland of Northwest Sichuan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1732-1743. [张晓丽, 孔凡磊, 刘晓林, 等. 生物质改良剂对川西北地区高寒草地沙化土壤有机碳特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(11): 1732-1743.]

[29] Wang Y Q, Zhang L, Wang X B, et al. Effects of different amounts of straw pellets returning on soil enzyme activities in facility soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(12): 30-39. [王永庆, 张莉, 王鑫博, 等. 秸秆颗粒不同量还田对设施土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(12): 30-39.]

[30] Vidal A, Klöffel T, Guigue J, et al. Visualizing the transfer of organic matter from decaying plant residues to soil mineral surfaces controlled by microorganisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 160: 108347.

[31] Wang B R, An S S, Liang C, et al. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 162: 108422.

[32] Wang X, Dai W W, Filley T R, et al. Aboveground litter addition for five years changes the chemical composition of soil organic matter in a temperate deciduous forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 161: 108381.

[33] Feng X J, Dai G H, Liu T, et al. Understanding the mechanisms and potential pathways of soil carbon sequestration from the biogeochemistry perspective[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2024, 54(11): 3421-3432.

[冯晓娟, 戴国华, 刘婷, 等. 从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(11): 3421-3432.]

[34] Ren G C, Zhang X F, Xin X L, et al. Soil organic carbon and nitrogen fractions as affected by straw and nitrogen management on the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 342: 108248.

[35] Fu Y Y, Luo Y, Qi J J, et al. Shift of microbial taxa and metabolisms relying on carbon sources of rhizodeposits and straw of *Zea mays* L[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 198: 109578.

[36] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: Critical review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 45(2): 115-131.

[37] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 837-843.

[38] Paterson E, Sim A. Soil-specific response functions of organic matter mineralization to the availability of labile carbon[J]. Global Change Biology, 2013, 19(5): 1562-1571.

[39] Qiao N, Schaefer D, Blagodatskaya E, et al. Labile carbon retention compensates for CO₂ released by priming in forest soils[J]. Global Change Biology, 2014, 20(6): 1943-1954.

[40] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1381-1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381-1392.]

[41] Cong P, Li Y Y, Wang J, et al. Increasing straw incorporation rates improves subsoil fertility and crop yield in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(14): 1976-1990.

[42] Cui H X, Luo Y L, Chen J, et al. Straw return strategies to improve soil properties and crop productivity in a winter wheat-summer maize cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2022, 133: 126436.

[43] Wang S, Huang X L, Zhang Y, et al. The effect of corn straw return on corn production in Northeast China: An integrated regional evaluation with meta-analysis and system dynamics[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 167: 105402.

[44] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase: A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112391.

[45] Zhang L, Wang J, Pang H C, et al. Effects of pelletized straw on soil nutrient properties in relation to crop yield[J]. Soil Use and Management, 2018, 34(4): 479-489.

[46] Ma Z Y, Ma W L. Effects of straw returning on soil organic carbon in China's cropland—A meta-analysis[J]. Soils, 2023, 55(1): 205-210. [马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. 土壤, 2023, 55(1): 205-210.]

[47] Liu X H. Sustainable intensification: A historical perspective on China's farming system[J]. Farming System, 2023, 1(1): 100001.

[48] van Rijssel S Q, Koorneef G J, Ciska Veen G F, et al. Conventional and organic farms with more intensive management have lower soil functionality[J]. Science, 2025, 388(6745): 410-415.

[49] Wang M M, Liu C N, Zhang Y, et al. Straw returning in cooperation with legume-based cover crops: A potential path to promote both soil organic carbon and total nitrogen[J]. Land Degradation & Development, 2025, <https://doi.org/10.1002/ldr.70143>.

[50] Zhou G P, Li G L, Liang H, et al. Green manure coupled with straw returning increases soil organic

carbon *via* decreased priming effect and enhanced microbial carbon pump[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(5): e70232.

[51] Hu Y G, Wang X F, Gao Y H. Outlook on rural development in China and the world in the 21st Century: Practice and theoretical understanding of holistic organic agriculture in Lingqiu[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 28-38. [胡跃高, 王小芬, 高游慧. 展望 21 世纪中国与世界的乡村发展前景——灵丘全域有机农业实践与理论认识[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(6): 28-38.]

[52] Wang P X, Wang X Q, Zong R, et al. Annual burying of pelletized straw benefits grain amino acid by increasing soil mineral elements: A case study in Northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2024, 314: 109458.

[53] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Bulletin on the Quality Grades of National Cultivated Land in 2019[J]. *China Agricultural Comprehensive Development*, 2020(6): 6-12. [农业农村部. 2019 年全国耕地质量等级情况公报[J]. *中国农业综合开发*, 2020(6): 6-12.]

[54] Lei S H, Jia X X, Zhao C L, et al. A review of saline-alkali soil improvements in China: Efforts and their impacts on soil properties[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 317: 109617.

[55] Zhang H Y, Pang H C, Lu C, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 114-122. [张宏媛, 逢焕成, 卢闯, 等. CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 114-122.]

[56] Song D L, Ding W C, Zhou W. Temporal and spatial changes and sustainable utilization strategies of cultivated land reserve resources in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(8): 1437-1446. [宋大利, 丁文成, 周卫. 我国主要耕地后备资源时空变化特征及可持续利用战略[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(8): 1437-1446.]

[57] Lin B J, Cheng J, Duan H X, et al. Optimizing straw and nitrogen fertilizer resources for low-carbon sustainable agriculture[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 209: 107743.

(责任编辑: 檀满枝)