

DOI: 10.11766/trxb202509190460

CSTR: 32215.14.trxb202509190460

袁先福, 英长乐, 孙乐, 任涛涛, 赵鸿儒, 王丹, 汪善文, 汪建飞, 焦加国. 不同秸秆还田模式对土壤养分、土壤微生物及后茬麦苗生长的影响[J]. 土壤学报, 2026, 63 (6): 2053–2067.

YUAN Xianfu, JIA Changle, SUN Le, REN Taotao, ZHAO Hongru, WANG Dan, WANG Shanwen, WANG Jianfei, JIAO Jianguo. Reduced Rice Straw Returning to the Field Indirectly Promotes Wheat Seedling Growth by Enhancing Soil Microbial Activity to Increase Soil Available Nutrient Content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (6): 2053–2067.

不同秸秆还田模式对土壤养分、土壤微生物及后茬麦苗生长的影响*

袁先福^{1, 3}, 英长乐¹, 孙乐¹, 任涛涛¹, 赵鸿儒¹, 王丹¹, 汪善文¹,
汪建飞^{1, 2†}, 焦加国³

(1. 安徽科技学院资源与环境学院, 安徽滁州 233100; 2. 安徽省农业废弃物肥料化利用与耕地质量提升工程研究中心, 安徽蚌埠 233400; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 211800)

摘 要: 探究农作物秸秆还田对土壤和作物生长的影响, 是调控土壤养分和作物生长的重要途径。本研究在两地同步设置秸秆不还田 (CK)、减量还田 (留低茬离田深旋还田 1/3FSX、留高茬离田深旋还田 2/3FSX)、全量还田 (深旋还田 FSX、深翻还田 FS) 处理, 探究不同秸秆还田处理对小麦苗期生长及土壤特性的影响。结果表明, 与 CK 相比, 各试验点秸秆减量还田均能显著提高小麦苗期株高、茎粗和根长, 其中 1/3FSX 株高和茎粗显著高于其他处理, 同时秸秆还田对小麦发芽率均有显著抑制作用, 且 FS 抑制效应最大; 与 CK 相比, 各秸秆还田均显著提高了土壤速效养分含量, 秸秆减量深旋还田秸秆腐解率均显著提高, 且 1/3FSX 土壤秸秆腐解率和速效钾含量显著高于其他处理; 与 CK 相比, 各试验点秸秆还田均提升了土壤微生物丰度, 秸秆减量还田细菌和放线菌丰度显著高于其他处理, 且 1/3FSX 对土壤真菌、细菌、放线菌丰度提升幅度更高。此外, 各试验点小麦苗期生物量与土壤速效养分含量、土壤微生物丰度均显著正相关, 土壤速效养分对小麦生物量变异度有主要的解释作用, 而微生物主要影响土壤速效养分, 且土壤真菌和放线菌共同促进土壤速效钾含量提升, 进而促进小麦生物量提高。秸秆减量深旋还田可通过改善土壤孔隙度, 促进真菌和放线菌丰度显著提升和秸秆高效腐解, 快速活化速效钾, 进而更显著促进麦苗生物量提升, 且 1/3FSX 效果更佳。

关键词: 秸秆还田; 还田量; 还田方式; 土壤养分; 微生物丰度; 小麦生物量

中图分类号: S19 文献标志码: A

Reduced Rice Straw Returning to the Field Indirectly Promotes Wheat Seedling Growth by Enhancing Soil Microbial Activity to Increase Soil

* 国家重点研发计划子课题 (2022YFD2301402-3)、安徽博士后科研项目 (2025B1050) 和稻-麦 (油) 周年种植农机农艺融合创新技术 (881715) 资助 Supported by the Sub-project of the National Key R & D Program of China (No. 2022YFD2301402-3), Anhui Postdoctoral Scientific Research Program Foundation (No. 2025B1050), Innovative Technology for the Integration of Agricultural Machinery and Agronomy in Annual Rice-Wheat (Rapeseed) Cropping Systems (No. 881715)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangjf@ahstu.edu.cn

作者简介: 袁先福 (1990—), 男, 安徽安庆人, 博士后, 主要从事农业废弃物资源化利用。E-mail: yuanxf@ahstu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-19; 收到修改稿日期: 2026-04-10; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-24

Available Nutrient Content

YUAN Xianfu^{1,3}, JIA Changle¹, SUN Le¹, REN Taotao¹, ZHAO Hongru¹, WANG Dan¹, WANG Shanwen¹, WANG Jianfei^{1,2}, JIAO Jiaguo^{3†}

(1. College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Chuzhou, Anhui 233100, China; 2. Anhui Province Agricultural Waste Fertilizer Utilization and Cultivated Land Quality Improvement Engineering Research Center, Bengbu, Anhui 233400, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: 【Objective】 This study was designed to explore the effects of crop straw returning on soil and crop growth is an important approach to regulating soil nutrients and crop growth. 【Method】 In this study, treatments including no straw returning (CK), reduced straw returning (1/3 straw returning with low stubble retention, straw removal, and deep rotary tillage (1/3FSX); 2/3 straw returning with high stubble retention, straw removal, and deep rotary tillage (2/3FSX)), and full straw returning (full straw returning with deep rotary tillage (FSX); full straw returning with deep plowing (FS)) were simultaneously set up in two locations. The effects of different straw returning treatments on wheat seedling growth and soil properties were investigated. 【Result】 Compared with CK, reduced straw returning at all experimental sites significantly increased the plant height, stem diameter, and root length of wheat seedlings. Among these treatments, the plant height and stem diameter under 1/3FSX were significantly higher than those under other treatments. Meanwhile, straw returning significantly inhibited the wheat germination rate, with the strongest inhibitory effect observed in the FS treatment. Compared with CK, all straw returning treatments significantly increased the soil available nutrient content and the straw decomposition rate under reduced straw returning with deep rotary tillage was significantly higher. Also the soil straw decomposition rate and available potassium content under 1/3FSX were significantly higher than those under other treatments. Compared with CK, straw returning at all experimental sites increased soil microbial abundance. The abundances of bacteria and actinomycetes under reduced straw returning were significantly higher than those under other treatments, and 1/3FSX showed a greater increase in the abundances of soil fungi, bacteria, and actinomycetes. Furthermore, the wheat seedling biomass at all experimental sites was significantly positively correlated with soil available nutrient content and soil microbial abundance. Soil available nutrients exerted the main explanatory effect on the variation in wheat biomass, while microorganisms mainly affected soil available nutrients. Specifically, soil fungi and actinomycetes jointly promoted the increase in soil available potassium content, thereby promoting the improvement of wheat biomass. 【Conclusion】 Reduced straw returning with deep rotary tillage can improve soil porosity, promote the abundances of fungi and actinomycetes, enhance efficient straw decomposition, and rapidly activate available potassium, thereby promoting a more significant increase in wheat biomass. Among all treatments, 1/3FSX exhibits the best effect.

Key words: Returning straw to field; Returning amount; Returning method; Soil nutrients; Microbial abundance; Wheat biomass

在现代集约化农业的可持续发展和提高土壤肥力的背景下,构建合理的农作物秸秆还田方式体系,在优化土壤物理结构、提高土壤养分含量和微生物功能多样性、促进作物生长、改善作物产量等方面的促进作用已被广泛验证^[1]。目前,秸秆还田已成为长江中下游粮食主产区重要的秸秆综合利用模式,这种基于农业生产可持续的选择虽能快速实现资源利用,但受限于中国耕地资源空间分布的差异,耕层土壤周期翻转深度不足及周年秸秆还田量过载,衍生出秸秆分解不完全、土壤物理结构破坏、化学养分失衡、微生物功能退化,进而影响小麦发

芽和前期生长等问题^[2]。因此需要制定高效的秸秆还田措施,探究适宜的秸秆还田量,构建适宜不同地区且可简单快速推广的秸秆还田模式,这对于促进作物高产高效、农业生态平衡和绿色可持续发展具有重要意义。

冬小麦苗期是奠定生长趋势和籽粒产量的重要阶段,这一阶段土壤条件对冬小麦整个生育周期的生长至关重要^[3]。上茬作物秸秆作为土壤养分再循环利用的关键载体,是否还田以及还田措施的差异直接影响秸秆养分的释放和下茬作物的苗期的生长状态^[4]。基于区域气候条件、土壤条件和耕作需求

的差异性,我国不同农业种植区均在探索地域化秸秆还田技术方式。农业农村部建议,在西部风沙干旱区域及易春旱的岗地采用秸秆覆盖还田条带耕作技术,而在土壤质地黏重、通透性差的田块则宜采用碎混还田技术。在东北黑土区以及西北旱作区,由于其周年单种植模式以及土壤脆弱性,给秸秆腐解留足了充裕的腐解时间,因此这些地区主要以秸秆覆盖还田技术为主,并探究秸秆还田对土壤提氮保墒的影响^[5]。在水热条件优越的江淮稻-麦轮作区,主要采用不同秸秆粒径分级(直接浅旋耕或粉碎)和深埋还田,探究对土壤氮磷等养分保蓄以及固碳减排风险管控,其中秸秆深埋在不同地区均取得了当季种植较理想的效果^[6]。同时,安徽稻-麦轮作地区秸秆综合利用效率达 90%以上,高质量秸秆部分离田制作饲料和工业品成为了秸秆利用的重要方向,因此,探究秸秆减量还田对当前安徽地区农业生产有重要的意义^[7]。当前安徽省秸秆还田相关研究多聚焦于单一措施模式,该模式下秸秆腐解率低,且多年过量还田会破坏土壤结构,显著抑制下茬作物苗期生长;同时还存在秸秆还田量与增产增效效应不匹配的问题——过量还田易因秸秆高碳氮比(C/N)引发微生物与作物争氮,抑制作物苗期氮吸收,进而降低养分利用效率^[8]。针对这些问题,其核心症结在于未能充分解析并协调秸秆还田后土壤微生物-养分-作物间的互作关系。

本研究基于农田实际生产模式和现有的秸秆还田模式,结合水稻秸秆稻谷比参数和现有机械化收割模式^[9],即收获时秸秆留高茬离田(留茬高度在 40 cm 左右,地上秸秆离田,秸秆离田量在 1/3 左右),留低茬离田(留茬高度在 15 cm 左右,地表散落秸秆离田,秸秆离田量在 2/3 左右)两种秸秆减量还田方式,秸秆全量旋耕(秸秆不离田,直接旋耕)或翻埋(秸秆不离田,直接翻埋)还田方式。因此,在不同地区(马鞍山当涂、合肥庐江)同时进行了田间试验,构建了秸秆不同梯度还田量与不同还田措施,进行系统性对比研究。试验具体设置了秸秆直接还田处理组(秸秆留低茬离田深旋还田(1/3FSX)、秸秆留高茬离田深旋还田(2/3FSX)、秸秆全量深旋还田(FSX)),与现有高效秸秆深翻还田技术(FS)以及秸秆不还田(CK)进行对照。基于此,从还田量与还田模式角度探讨秸秆还田适宜方法,分析作物生物量、土壤理化性质、微生物

丰度、秸秆腐解效率及其之间的关系,为明晰秸秆还田调控稻-麦周年轮作体系下苗期作物生长机制提供理论依据,对优化长江中下游地区稻麦两熟制农田的土壤生态服务功能、实现秸秆资源科学配置与高效利用具有重要指导价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验设置两个田间试验区域,分别位于马鞍山当涂盛农农场(31°22'N, 118°43'E)以及合肥庐江圆梦农场(31°15'N, 117°17'E)。试验点自 2021 年 11 月开始至 2024 年 10 月,均进行稻-麦周年种植与作物秸秆还田试验,已完成 3 周年的秸秆还田试验;2021 年 11 月至 2023 年 10 月,进行秸秆不还田、秸秆全量粉碎浅埋还田、秸秆全量粉碎深埋还田、秸秆全量粉碎浅旋还田和秸秆全量粉碎深旋还田试验;2023 年 11 月至 2024 年 10 月进行本研究试验,试验处理为秸秆不还田、秸秆粉碎深埋、秸秆粉碎深旋以及秸秆减量(1/3, 2/3)粉碎深旋还田试验(试验田块均为原秸秆还田田块)。当涂盛农农场(DT)供试土壤为水稻土,水稻品种为南粳 46,水稻碳氮比为 61:1;庐江圆梦农场(LJ)供试土壤为黄棕壤,水稻品种为隆两优华占,水稻碳氮比为 72:1。当涂和庐江地区土壤犁底层平均值分别为 29.2 cm 和 31.3 cm,其 0~30 cm 耕地土壤基本性质见表 1。

1.2 试验设计

试验采用多因素随机区组设计,自 2023 年冬小麦播种开始,2024 年冬小麦苗期结束。供试品种为扬辐麦 12,播种密度为 375 kg·hm⁻²,试验点各处理的单个小区长 13 m 宽 10 m,每个处理三个小区,随机排列。底肥为 15-15-15 复合肥 450 kg·hm⁻²,苗期追施尿素 150 kg·hm⁻²。试验设计,共设 5 个处理,处理详细说明见表 2,各处理施肥管理模式均相同。

1.3 秸秆腐解率测定

采用网袋法测定各处理秸秆腐解率,按照 1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS 处理实际秸秆还田量,在各小区播种后依次在尼龙网兜(20×30 cm)中装入 5 g、10 g、15 g、15 g 的风干水稻秸秆,小区处理间秸秆粉碎颗粒大小均相同,且埋入深度与田间实际处理相一致。收获前,统一测定各处理秸秆腐解率。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 The basic properties of the tested soil

地区 Region	土壤类型 Soil type	pH	碱解氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	质地 Texture
当涂 Dangtu (DT)	灰潮土 ^①	6.64	34.38	15.43	131.51	30.12	壤质黏土
庐江 Lujiang (LJ)	黄褐土 ^②	6.71	32.56	15.22	133.78	12.75	黏壤

注：AN：碱解氮；AP：有效磷；AK：速效钾；SOM：有机质。Note：AN：Alkali-hydrolyzable nitrogen；AP：Available phosphorus；AK：Available potassium；SOM：Soil organic matter. ①Gray fluvo-aquic soil；②Yellow-brown soil.

表 2 试验处理

Table 2 Experimental Treatments

处理 Treatments	操作说明 Operating explanation	秸秆还田量 Straw incorporation rate/ (t·hm ⁻²)
CK	秸秆全部离田后浅旋耕，平整土地	0
1/3FSX	秸秆留茬离田，秸秆粉碎至 5~10 cm，深旋还田，旋耕至 0~30 cm 土层，平整土地	3.05
2/3FSX	秸秆留高茬离田，颗粒粉碎至 5~10 cm，深旋还田，旋耕至 0~30 cm 土层，平整土地	6.10
FSX	秸秆全量还田，颗粒粉碎至小于 5~10 cm，深旋还田，旋耕至 0~30 cm 土层，平整土地	9.15
FS	秸秆全量还田，颗粒粉碎至小于 5~10 cm，深翻还田，深埋至耕层 30 cm 处，平整土地	9.15

1.4 样品采集与制备

在 2023 年 3 月小麦苗期时，采用五点取样法对每个小区 0~30 cm 原状土壤进行样品采集，混合后均分为两份。一份剔除动植物残体等杂质后置于室内自然风干，研磨，过 20 目筛，室温保存，用于测定土壤养分含量；一份新鲜土样过 1 mm 筛放-80 ℃冰箱备用。

1.5 样品试验处理及小麦生物量测定

土壤有机质（SOM）含量采用重铬酸钾滴定法^[10]测定；土壤碱解氮（AN）含量采用碱解扩散法^[10]测定；土壤有效磷（AP）含量采用 NH₄F-HCl 浸提—钼酸铵比色法^[10]测定；土壤速效钾（AK）含量采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度计法^[10]测定；土壤 pH 采用饱和浸提法^[10]测定；土壤容重（BD）测定严格遵循环刀法^[10]，使用标准环刀采集原状土样。秸秆腐解率的测定，试验处理组（1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS）样品经采样铲取出后，经去离子水反复冲洗去除附着土壤后 105 ℃烘干（持续 48 h），称

重计算。

在冬小麦三叶一心期（播种后 20±2 d）开展田间取样，在各小区（1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS、CK）采用五点取样法进行采集。使用卷尺测量小麦植株样品的株高（H）以及根长（RL），用游标卡尺测定小麦植株样品的茎粗（D），对每个处理数据测量五次计算平均值。同时，运用对角线法在小区内选定 5 个采样点，每点划定 1.2 m×1 m 范围内，调查小麦的发芽率（RGA）。

1.6 土壤真菌、细菌和放线菌基因拷贝数测定

土壤总 DNA 采用荷兰 Qiagen 公司 DNeasy PowerSoil Pro Kit 试剂盒参照说明书提取，SYBR Green 购自 Takara 试剂公司，八连管购自美国 Axygen 公司。采用 ABI Realtime PCR-7500 定量 PCR 仪测定真菌、细菌和放线菌基因拷贝数。真菌引物选择 ITS1 和 5.8S（ITS1：5'-TCCGTAGGTGAA CCTGCGG-3'；5.8S：5'-CGCTGCGTTCTT- CATCG-3'）。细菌引物选择 357 和 518（357：5'-TACGGGAGG

CAGCAG-3' ; 518 : 5'-ATTACCGCGGCTGCTG G-3')。放线菌引物选择 243F 和 1387R (243F 5'-GGATGAGCCCGCGGCCTATCAG-3' ; 1387R 5'-GGGCGGWGTGTACAAGGC-3')。RT-qPCR 反应程序为: 95 ℃ 30 s, 95 ℃ 5 s, 60 ℃ 34 s, 步骤 2-3 设定为 30 循环, 溶解曲线为 95 ℃ 15 s, 60 ℃ 1 min, 95 ℃ 15 s. 反应体系为 20 μL: 10 μL SYBR Premix (2 ×), 上下游引物各为 0.4 μL, Rox (II) (50 ×) 0.4 μL, DNA 模板 2 μL, ddH₂O 6.8 μL。1.7 数据处理

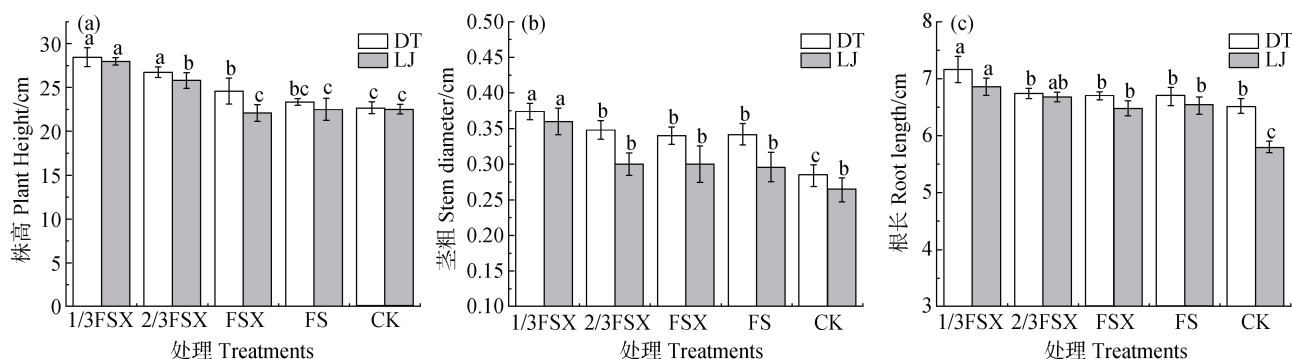
数据采用 Microsoft Excel 2022 和 IBM SPSS Statistics 22 进行数据处理与统计分析, 采用多因素方差分析 (Two-ways ANOVA) 结合邓肯 (Duncan) 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$ 为差异显著), 结果以平均值±标准差表示, 在 R (R 4.6) 语言中利用程序包 “vegan”、 “rfPermute”、 “semPlot” 建立变差分解模型 (VPA)、随机森林模型 (Random Forest) 和路径分析模型 (Path Analysis)^[11-12]。采用 Origin

2024 绘制柱形。

2 结 果

2.1 不同还田量条件下秸秆还田对小麦苗期生物量指标的影响

由图 1a 可知, 与 CK 相比, 当涂 (DT) 和庐江 (LJ) 地区的秸秆减量还田 (1/3FSX、2/3FSX) 小麦苗期株高显著提升, 且各处理间存在显著性差异, 其中 1/3FSX 株高显著高于其他处理, FS 与 CK 处理株高无显著差异, 当涂 (DT) FSX 株高显著提高, 庐江 (LJ) 地区的 FSX 无显著性差异。由图 1b 可知, 与 CK 相比, 其中庐江地区 2/3FSX、FSX、FS 茎粗均显著提升, 但庐江地区小麦茎粗无显著差异, 两个试验地区 1/3FSX 小麦苗期茎粗均显著提升。由图 1c 可知, 与 CK 相比, DT 地区 1/3FSX 小麦苗期根长存在显著提升, LJ 地区 1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS 根长均显著性提升, 其中 1/3FSX 根长显著高于 FSX、FS。



注: 误差线为标准误差, 图中标注的小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。Note: Error bars represent standard errors (SE). The lowercase letters marked in the figure indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$). The same below.

图 1 不同秸秆还田量条件下秸秆还田对小麦苗期株高 (H, a)、茎粗 (D, b) 和根长 (L, c) 的影响

Fig.1 Effects of straw return with different amounts of straw return on plant height (H, a), stem diameter (D, b) and root length (L, c) of wheat at the seedling stage

2.2 不同还田量条件下秸秆还田对小麦发芽率和秸秆腐解率的影响

由图 2a 可知, 与 CK 相比, 两个地区的 FSX、FS 小麦 RGA 显著降低, 而减量秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX) 无显著性降低。由图 2b 可知, 与 FS 和 FSX 相比, DT 和 LJ 地区的秸秆减量还田 (1/3FSX、2/3FSX) 小麦苗期秸秆腐解率均显著提高, 其中 1/3FSX 腐解率显著高于其它处理, FSX 与 FS 处理之间秸秆腐解率无显著性差异。

2.3 不同还田量条件下秸秆还田对土壤理化性质的影响

由图 3a 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤碱解氮均显著性提升, 秸秆深旋处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX) 碱解显著高于 FS 处理, 其中 1/3FSX 对碱解氮的提升效应最优, 2/3FSX 与 1/3FSX 之间碱解氮含量无显著性差异, 同时碱解氮含量变化趋势为 $CK < FS < FSX \leq 2/3FSX \leq 1/3FSX$ 。由图

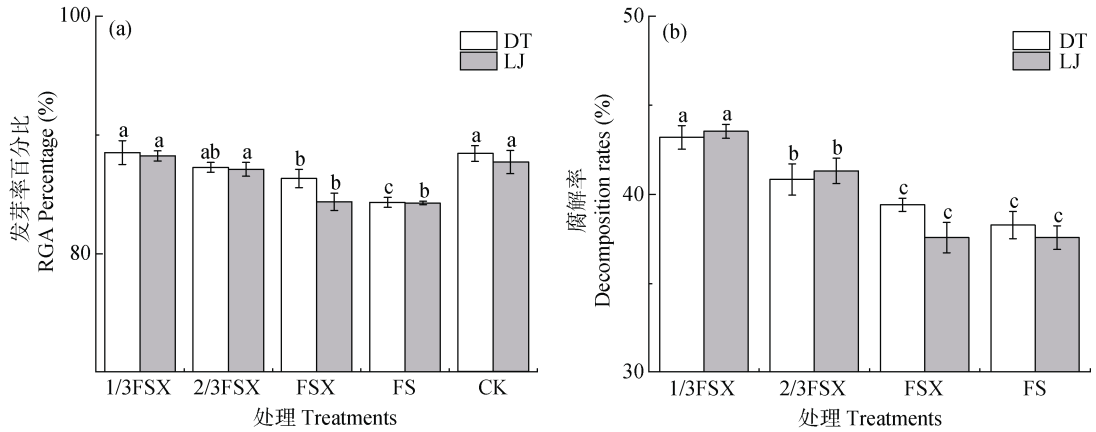


图 2 不同秸秆还田量条件下秸秆还田对小麦苗期发芽率 (RGA, a) 和秸秆腐解率 (b) 的影响

Fig. 2 Effects of straw return with different amounts of straw return on the germination rate (RGA, a) of wheat at the seedling stage and the straw decomposition rate (b)

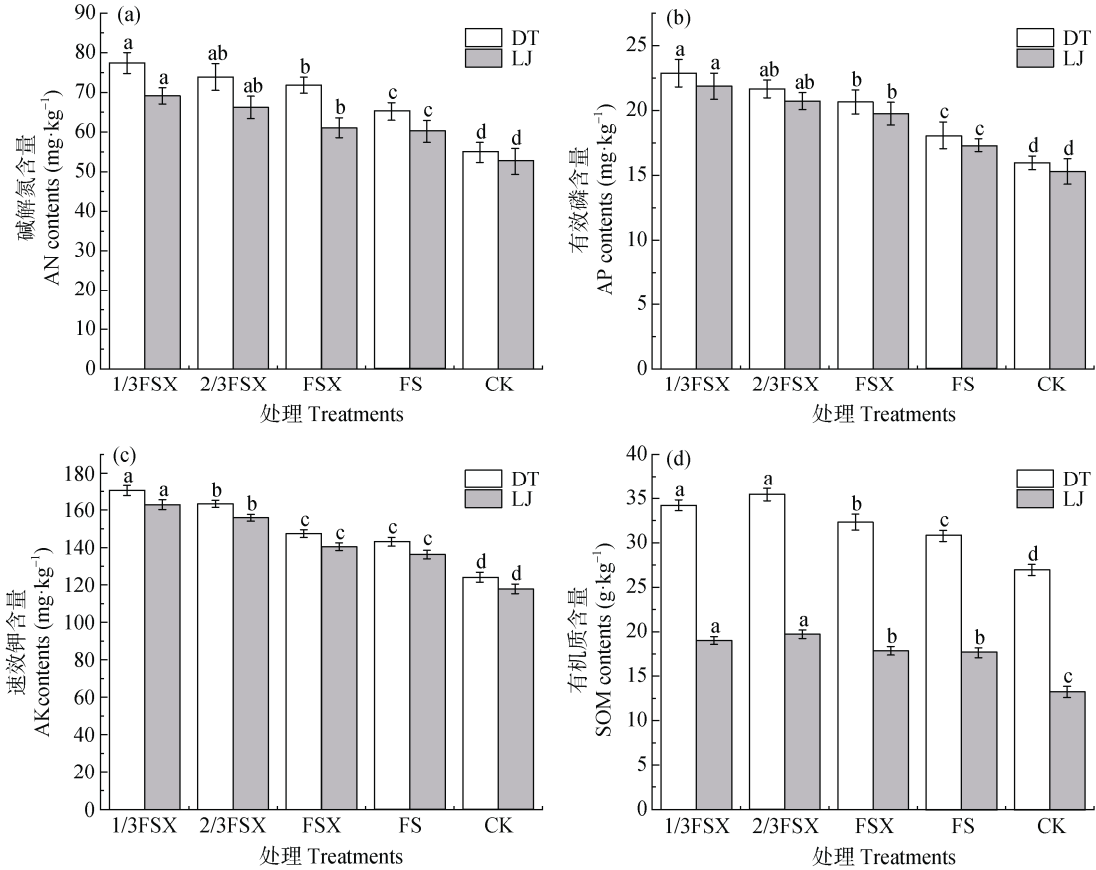


图 3 不同秸秆还田量条件下秸秆还田对小麦苗期土壤碱解氮 (AN, a)、有效磷 (AP, b)、速效钾 (AK, c) 和土壤有机质 (SOM, d) 的影响

Fig. 3 Effects of straw return with different amounts of straw return on soil alkali-hydrolyzable nitrogen (AN, a), available phosphorus (AP, b), available potassium (AK, c) and soil organic matter (SOM, d) during the wheat seedling stage

3b 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤有效磷含量显著提升, 秸秆深旋处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX) 有效磷显著高于 FS 处理, 且 1/3FSX 处理有

效磷含量显著高于 FSX 处理, 而 2/3FSX 与 1/3FSX 之间有效磷含量无显著性差异, 1/3FSX 与 FSX 之间有效磷含量无显著性差异, 有效磷含量变化趋势为 $CK < FS < FSX \leq 2/3FSX \leq 1/3FSX$ 。由图 3c 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤速效钾含量均显著提升, 其中秸秆减量深旋还田 (1/3FSX、2/3FSX) 提升幅度显著高于其它处理, 且 1/3FSX 速效钾含量显著高于其他处理, 整体速效钾含量变化趋势为 $CK < FS \leq FSX < 2/3FSX < 1/3FSX$ 。由图 3d 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤有机质含量均显著性提升, 其中秸秆减量深旋还田

(1/3FSX、2/3FSX) 效果最优, 且 1/3FSX 和 2/3FSX 处理间速效钾含量无显著差异。

由图 4a 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤容重均显著降低, FS 土壤容重显著高于秸秆深旋处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX), 1/3FSX 容重显著高于 2/3FSX 和 FSX, 而 2/3FSX 和 FSX 处理间土壤容重无显著差异。由图 4b 可知, 与 CK 相比, 两个试验点 FS 小麦苗期土壤酸碱度 (pH) 均显著性降低, DT 试验点秸秆深旋处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX) 土壤 pH 未显著降低, LJ 地区秸秆深旋处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX) 土壤酸碱度均显著下降, 且秸秆深旋处理间无显著差异。

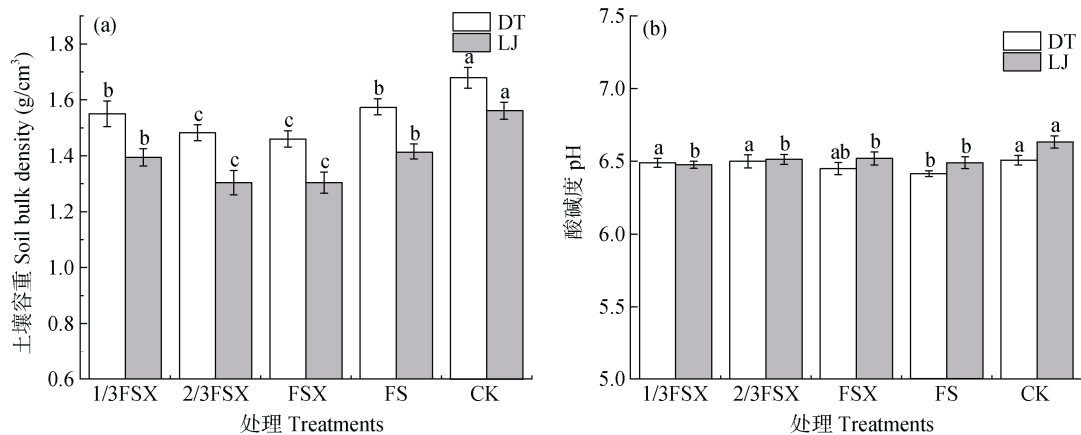


图 4 不同秸秆还田量条件下秸秆还田对小麦苗期土壤容重 (BD, a) 和酸碱度 (pH, b) 的影响

Fig. 4 Effects of straw return with different amounts of straw return on soil bulk density (BD, a) and soil pH (pH, b) during the wheat seedling stage

2.4 不同秸秆还田模式对土壤微生物丰度的影响

由图 5a 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤真菌丰度 (基因拷贝数) 均显著性提高, 其中 1/3FSX 土壤真菌丰度 (可培养和基因拷贝数) 显著高于其他处理, 且 2/3FSX 和 FSX 土壤真菌丰度 (基因拷贝数) 显著高于 FS 处理。由图 5b 可知, 与 CK 相比, 两个地区的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 土壤细菌丰度 (基因拷贝数) 均存在显著性提升, 且秸秆减量还田 (1/3FSX 和 2/3FSX) 土壤放线菌丰度显著高于其他处理, DT 地区 1/3FSX 提升效果显著高于其他处理, LJ 地区 1/3FSX 和 2/3FSX 之间无显著差异, 但其提升幅度均显著优于其他处理。由图 5c 可知, 与 CK 相比, 两个地区

的秸秆还田处理 (1/3FSX、2/3FSX、FSX、FS) 小麦苗期土壤放线菌丰度 (基因拷贝数) 均显著提升, 且秸秆减量还田 (1/3FSX 和 2/3FSX) 土壤放线菌丰度显著高于其他处理, 其中 1/3FSX 真菌提升效应最优, 且 DT 地区 1/3FSX 显著高于 2/3FSX, LJ 地区 1/3FSX 土壤放线菌丰度 (基因拷贝数) 与 2/3FSX 无显著差异。

2.5 小麦苗期生物量与土壤理化性质、微生物间的相关性

由图 6a 可知, DT 地区的土壤速效养分 (AN、AP、AK、SOM) 含量与小麦苗期生物量指标 (H、D、RL) 呈显著正相关关系, DT 土壤中微生物丰度 (真菌 F、细菌 B、放线菌 A) 与小麦苗期生物量指标呈显著正相关关系, DT 地区的土壤速效养分

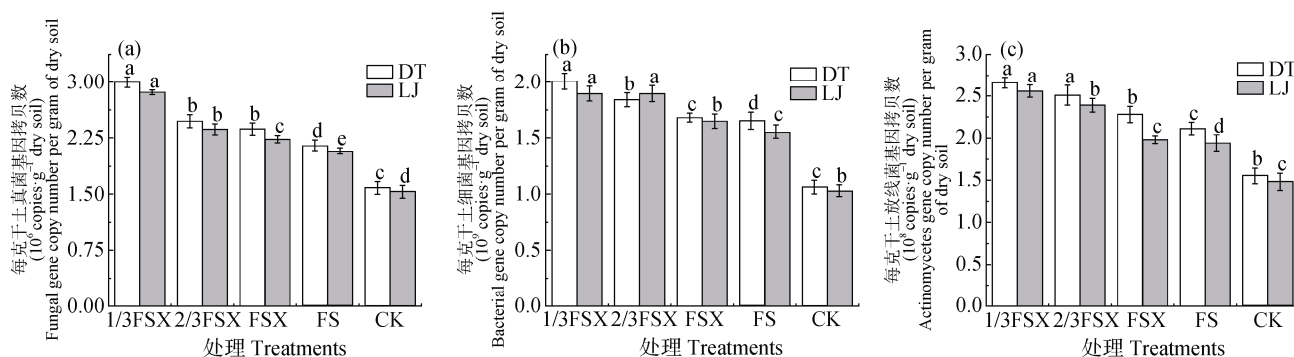


图 5 不同秸秆还田量条件下秸秆还田对小麦苗期土壤真菌丰度 (a)、细菌丰度 (b) 和放线菌丰度 (c) 的影响

Fig. 5 Effects of straw return with different amounts of straw return on soil fungi abundance (a), bacteria abundance (b) and actinomycetes abundance (c) during the wheat seedling stage

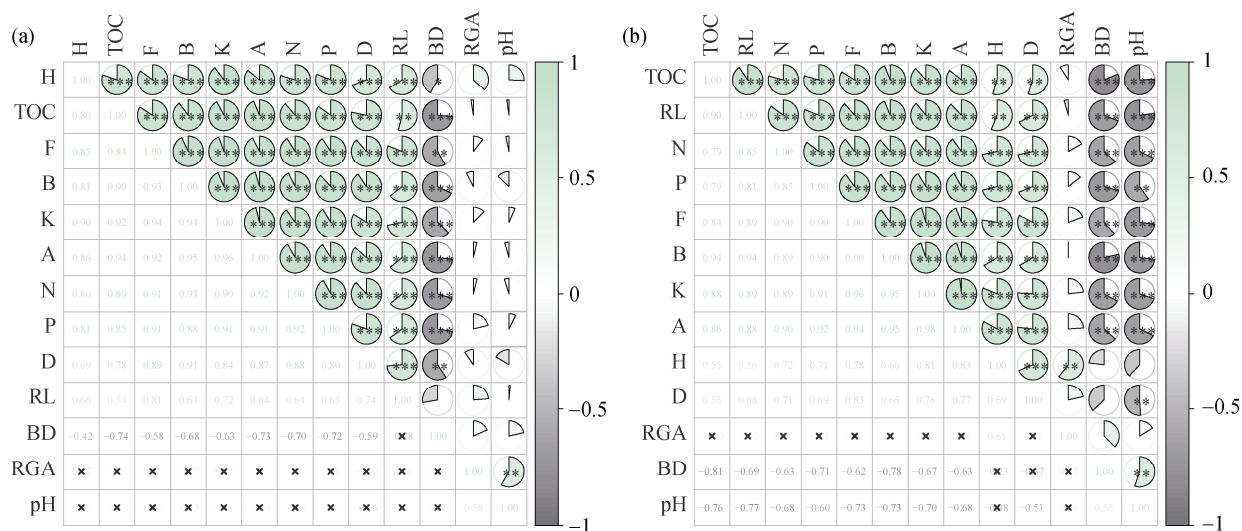


图 6 当涂 (DT) 地区 (a) 和庐江 (LJ) 地区 (b) 小麦苗期生物量与土壤理化性质、微生物间的相关性

Fig. 6 Correlation analysis between wheat seedling biomass and soil physio-chemical properties and microorganisms in Dangtu (DT) region (a) and Lujiang (LJ) region (b)

(AN、AP、AK、TOC) 含量与微生物丰度 (真菌 F、细菌 B、放线菌 A) 呈显著正相关关系, 小麦发芽率 RGA 与土壤酸碱度 pH 呈显著正相关, 而土壤容重与酸碱度无显著性关系。由图 6b 可知, LJ 地区的土壤速效养分 (AN、AP、AK、TOC) 与小麦苗期生物量指标 (H、D、RL) 呈显著正相关关系, LJ 土壤中微生物丰度 (真菌 F、细菌 B、放线菌 A) 与小麦苗期生物量指标呈显著正相关关系, LJ 地区的土壤速效养分 (AN、AP、AK、TOC) 含量与微生物丰度 (真菌 F、细菌 B、放线菌 A) 呈显著正相关, 土壤容重 BD 与土壤酸碱度 pH 呈显著正相关关系, 而小麦发芽率 RGA 与酸碱度无显著性关系。

2.6 小麦苗期生物量与土壤理化性质、微生物间的变差分解分析 (VPA)

由图 7a VPA 分析可知, 当涂 (DT) 地区土壤理化单独对于小麦生物量变异解释的贡献度达到 46%, 微生物单独对于小麦生物量变异解释的贡献度仅为 1%, 且两者共同影响小麦生长的贡献度占比仅占 0.08%。由图 7b 可知, 庐江 (LJ) 地区的土壤理化单独对于小麦生物量变异解释的贡献度达到 44%, 微生物单独对于小麦生物量变异解释的贡献度仅为 5%, 两者共同影响小麦生长的贡献度仅为 6%。

2.7 小麦生物性状主要影响因素的随机森林模型分析

由图 8a、图 8b 随机森林预测分析可知, 当涂

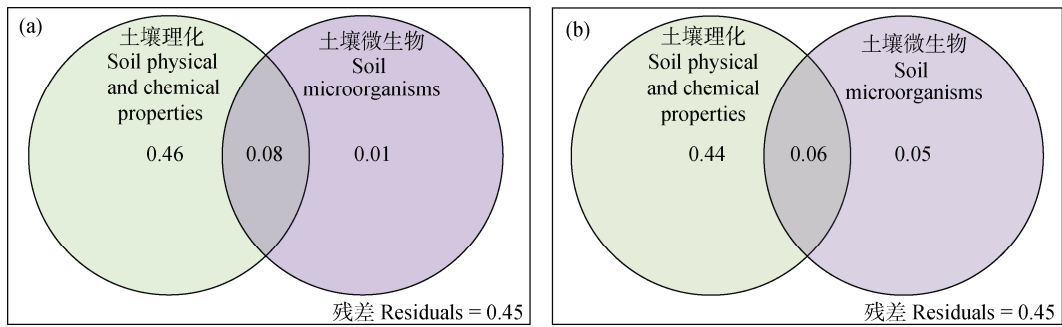


图 7 当涂 (DT) 地区 (a) 和庐江 (LJ) 地区 (b) 小麦生物量与土壤理化性质及微生物的变差分解分析 (VPA)
Fig. 7 Variance partitioning analysis (VPA) of the wheat biomass with soil physio-chemical properties and microorganisms in Dangtu (DT) region (a) and Lujiang (LJ) region (b)

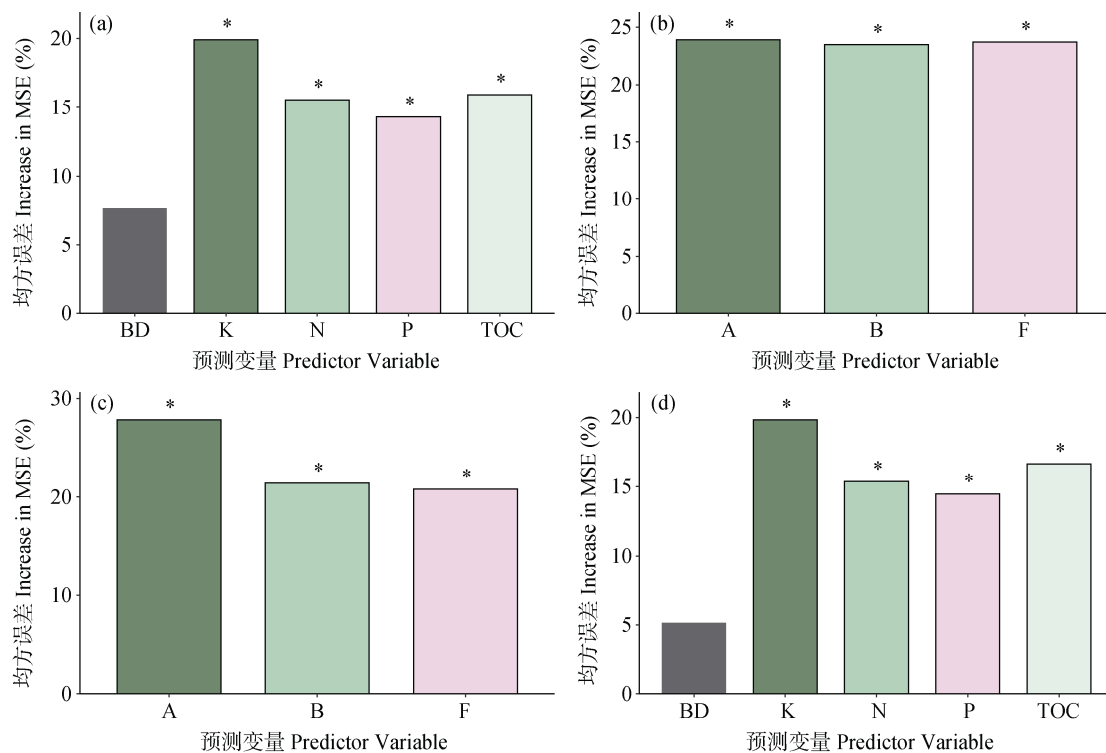


图 8 当涂 (a) 和庐江 (b) 土壤养分对生物量的解释度, 当涂 (c) 和庐江 (d) 可培养微生物丰度对土壤养分的解释度
Fig. 8 Explanatory power of soil nutrients for biomass in Dangtu (a) and Lujiang (b), Explanatory power of culturable microbial abundance for soil nutrients in Dangtu (c) and Lujiang (d)

和庐江地区的土壤养分对生物量变异的解释度大小的排序均为速效钾 (AK) > 有机质 (TOC) > 碱解氮 (AN) > 有效磷 (AP), 且均有显著性, 而 BD 无显著性; 由图 8c、图 8d 可知, 当涂和庐江地区的微生物种群对生物量变异的解释度大小排序均为放线菌 (B) > 细菌 (A) > 真菌 (F), 且均具有显著性。

2.8 小麦生物性状、土壤微生物和养分的路径分析

由图 9a 和图 9b 知, 首先两个模型拟合优度指数 (GFI) 均为 0.99, 模型拟合的解释方差 R^2 分别

为 0.85 和 0.86, 由此可知这两个模型较好地拟合了这些关键因子之间的路径关系; 同时两个试验点土壤总真菌显著促进了细菌丰度的提升, 土壤真菌和细菌又显著促进了放线菌丰度的提升; 而且, 两个试验点真菌和放线菌均显著促进了土壤中速效钾含量的提升, 其中庐江地区真菌显著促进了有效磷含量的提升, 放线菌显著促进了土壤碱解氮和有机质含量的提升, 而庐江地区细菌显著促进了土壤速效钾含量的提升; 此外, 两个试验点土壤速效钾均显

著促进了小麦苗期生物量指标的提升,其中庐江地区土壤碱解氮对其小麦生物量也有显著的促进作用。

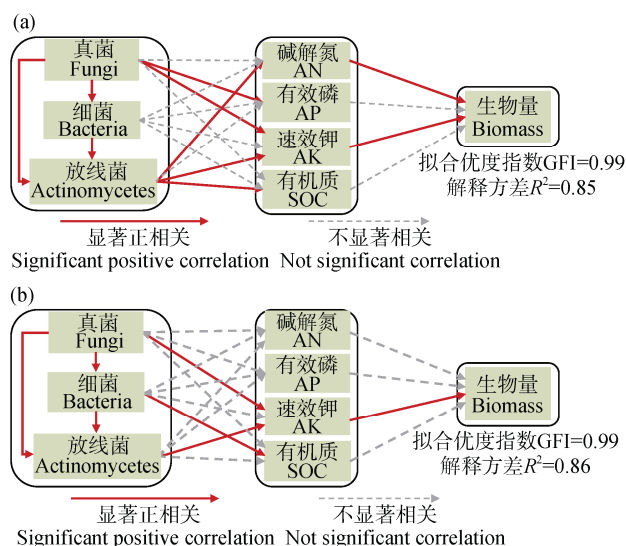


图9 当涂 (DT) 地区 (a) 和庐江 (LJ) 地区 (b) 生物量与土壤微生物和养分的路径分析

Fig. 9 Path analysis of biomass, soil microorganisms and nutrients in Dangtu (DT) region (a) and Lujiang (LJ) region (b)

3 讨 论

3.1 秸秆梯度还田量与不同还田方式下对小麦苗期生物量的影响因素

构建高效的农技农艺融合措施是提高小麦苗期作物生长和产量提升的重要驱动因子^[13]。已有研究表明,适宜的秸秆还田方式可以提高作物苗期的株高、茎粗和根长^[14]。本研究中当涂、庐江地区的秸秆减量还田(留茬离田深旋还田 1/3FSX、秸秆留高茬离田深旋还田 2/3FSX)均能显著提高作物的株高、茎粗、根长。秸秆减量深旋还田使适宜的秸秆还田量均匀分散于土壤中,合理降低土壤容重,改善土壤的物理结构和通透性,为小麦根系生长提供了更适宜的物理环境^[15],故秸秆减量深旋还田效果优于秸秆全量还田(粉碎深翻还田 FS, 秸秆粉碎深埋还田 FSX);同时,1/3FSX 促生效果优于 2/3FSX,其原因可能在于 1/3FSX 的秸秆量更少,有利于现有的土壤微生物在适宜的环境条件下分解纤维素等,快速将秸秆分解,并转化成氮、磷、钾等无机营养元素,同时代谢产生的有机酸又进一步促进秸秆中

矿物质溶解,加速秸秆养分释放^[16];相反,秸秆留高茬深旋还田其秸秆量相对较多,秸秆在土壤中分解中可能会存在一定的缺氧环境,抑制了部分好氧微生物的活性,同时水稻秸秆碳氮比偏高,微生物在分解秸秆的过程中,会优先固持土壤氮素用于自身生长,导致秸秆中养分释放速率较慢^[17]。此外,秸秆全量深旋还田和秸秆全量深翻还田虽然对小麦苗期的促生效果弱于秸秆减量深旋还田,但当涂地区对小麦的株高、茎粗以及庐江地区对小麦的根长促进效果优于秸秆不还田。研究表明,秸秆长期还田能有效提高土壤养分含量,促进作物生长;同时,秸秆深翻全量还田导致土壤表层秸秆量偏多,影响苗期作物根系与土壤充分接触,且过量秸秆腐解可能导致 C/N 比例失衡、酶活下降、ATP 生成减少,抑制部分微生物活性^[15-16];此外,深翻还田模式加深秸秆还田深度,可能使大部分秸秆翻埋至底层,一方面由于底层秸秆腐解后期氧气不足,不利于秸秆后期的好氧分解,且长期的秸秆在耕作底层分解,生成的土壤养分残留在 20~30 cm 土层^[18],不利于作物苗期秸秆腐解养分的吸收,但本研究试验田秸秆全量深翻还田可提高 10~30 cm 土层养分含量并降低 10~30 cm 土壤容重(见附件 S1),从而为成熟期产量的提供必要的基础^[19]。本研究中,不同秸秆还田方式均显著降低下茬小麦发芽率,但不同还田方式对小麦发芽的降低作用存在显著差异,秸秆全量还田(FS 和 FSX)小麦发芽率最低,且当涂地区 FSX 小麦发芽率高于 FS 处理(提高 2%),而秸秆减量深旋还田随着秸秆还田的降低,发芽率不断升高。一方面,对于秸秆全量粉碎深旋还田,土壤表层(0~10 cm)秸秆含量较多,但旋耕促进了大颗粒秸秆进一步粉碎,减小了其对土壤表层结构的影响^[20],而对于秸秆深翻还田,受限于当地翻埋机械的操作精度以及大颗粒秸秆秸秆较多的限制,秸秆深埋还田后也仍有一部分秸秆留在表层,这些残留秸秆可能降低了小麦种子与表层土壤的接触面积,也降低了小麦直播后的发芽率^[21];同时,深埋处理中大量秸秆堆积在 30 cm 土壤层,可能形成一层致密的隔水层,阻断了土壤下层水分向上迁移,从而降低土壤表层土壤含水量,最终降低小麦的发芽率^[22]。另一方面,大量前茬作物秸秆腐解过程中可能产生的酚酸类化感物质对小麦的 POD 酶活性及叶绿素的产生形成抑制,而这些因素可能抑制了

秸秆全量还田处理的小麦发芽率^[23]。因此，秸秆还田后可适量增加小麦种子的播种量以保证出苗率不降低。

3.2 秸秆梯度还田量与不同还田方式下对土壤理化性质的影响因素

由于秸秆中含有各种矿质营养元素，故秸秆直接还田成为了目前最简单有效的土壤培肥方式^[1]。秸秆矿化腐解生长的氮磷钾等营养元素可作为植物生长所必须的大量元素，生成的有机质可作为土壤活性物质，秸秆还田后土壤化学养分和有机质含量能直接反映秸秆还田的效果^[16]。本研究结果表明，在秸秆粉碎旋翻、深旋还田均能显著提高土壤有机质及氮磷钾速效养分含量。这与人研究秸秆还田促进土壤养分含量提升的结果相一致，即秸秆腐解后释放大养养分，促进了土壤养分含量的增加^[24]。同时，本试验中秸秆减量还田（1/3FSX、2/3FSX）对土壤速效钾和有机质含量提升效果优于秸秆全量还田（FS 和 FSX）和秸秆不还田，其中 1/3FSX 对小麦苗期土壤氮、磷、钾和有机质含量均能显著提升，且提升效果最佳。这可能是由于较低含量的秸秆深旋处理后，适宜于土壤现有的条件对其进行分解，而且 1/3FSX 由于其秸秆还田量更低，使其秸秆颗粒能完全与土壤接触，有利于土壤中的土著微生物高效定殖在作物秸秆中，从而促使微生物活动增加，加速了秸秆的腐解，最终使秸秆在腐解过程中向土壤释放更多矿物质养分和有机碳，从而提高土壤速效养分和有机质含量，而 2/3FSX 和全量处理（FS 和 FSX）秸秆量较多，超过了土壤前期的瞬时腐解能力，可能局部形成缺氧微环境，抑制好氧微生物活性，养分释放稍慢^[25]；同时，在适宜的秸秆还田量条件下，微生物快速将大颗粒秸秆分解成小颗粒秸秆后，还可使秸秆细小颗粒表面富集较多的阴离子、阳离子交换位点，这些位点通过吸附铁离子、铝离子，干扰铁铝氧化物对磷元素的固持，影响无机磷的形态，促进土壤本身磷元素的释放和难溶性磷的活化，最终增加土壤有效磷含量^[26]；此外，秸秆还田后的腐解液可通过释放酚酸类化感物质产生脲酶，刺激解钾菌数量，催化尿素分解同时活化土壤中的矿物钾盐向水溶性钾盐转化，提高土壤碱解氮和速效钾含量^[16, 27]。由此可知，秸秆还田可促土壤养分含量有效提升，同时秸秆减量还田，能加

速秸秆腐解速度，快速释放土壤养分。

此外，本试验中秸秆减量还田（1/3FSX、2/3FSX）能显著促进秸秆腐解率的提升，其中 1/3FSX 腐解效率最高，而秸秆 FSX、FS 之间腐解率无明显差异。相关研究表明，秸秆腐解主要靠微生物的作用，而微生物分解作物秸秆需要合适的碳氮（25~30:1），秸秆分解初期微生物为满足自身对氮素的需求，会从土壤中吸收原有的氮素养分，造成微生物分解反应和苗期作物根系养分吸收竞争氮素养分，而且还田量过高会导致土壤硝化能力过载，进而造成土壤 C/N 失衡，土壤没有足够的氮素供微生物繁殖生长，从而导致秸秆腐解速率降低^[28]。此外，秸秆还田均降低了土壤容重，增加了土壤的孔隙度。机械化操作易造成农田土壤板结，而在合理秸秆还田量范围内，有利于降低土壤孔隙度，促进秸秆在好氧微生物的作用下高效分解；同时，1/3FSX 和 FS 对土壤容重影响最小，这是由于秸秆留低茬深旋还田处理中秸秆颗粒较少，同时 FS 将前茬大部分秸秆转移至深层土壤，对土壤表层的容重影响也较小，导致表层秸秆量趋同秸秆留低茬深旋还田^[29]。因此，降低当季秸秆还田量有利于微生物对秸秆的快速腐解，改善土壤结构。

3.3 秸秆梯度还田量与不同还田方式下对土壤微生物的影响因素

土壤微生物是土壤物质循环和植物营养供给的核心驱动力，其在参与土壤物质降解和合成，维持土壤结构稳定和健康状态至关重要^[30]。农作物种植后秸秆还田为微生物瞬时提供了适宜的物质营养，有利于微生物繁殖和活性的增强^[31]。本研究发现，秸秆深旋还田和深埋还田均对土壤中真菌、细菌、放线菌的数量有提升作用。大部分真菌是异养型微生物，须不断从外界吸收养分来满足生长和代谢需求，秸秆为其提供了大量的养分^[32]。同时，秸秆中含有大量木质纤维素，已有研究发现，放线菌所产纤维素酶活性较高，且纤维素降解菌主要集中于芽孢杆菌属（*Bacillus* sp.）、假单胞菌属（*Pseudomonas* sp.）等^[33]，因此，细菌和放线菌活动也更加频繁。更重要的是，1/3FSX 与 2/3FSX 均能提升细菌和放线菌的丰度，秸秆减量深旋还田避免了秸秆深翻还田和深旋还田土层缺氧限制，使微生物（尤其是好氧的细菌、放线菌）能持续获取秸秆碳源；更重

要的是, 1/3FSX 对各微生物(真菌、细菌和放线菌)丰度均能显著提升, 且提升幅度最大, 这可能是由于在该秸秆还田量下, 土壤孔隙度被控制在适宜的范围, C/N 比更接近于 30:1, 微生物无需固氮即可增殖, 有利于微生物丰度及活性的提升, 进而快速促进秸秆的降解, 1/3FSX 秸秆还田量下, 即使 C/N 比增加, 土壤中氮素足以支持足够的微生物活动。由此可知, 秸秆还田能有效促进土壤中微生物活性的增加, 而适宜的秸秆还田量有利于微生物加速秸秆的降解。

3.4 秸秆还田后生物量与土壤理化性质、微生物的关系

农田生态系统中, 作物生长、土壤理化性质和微生物群落组成, 三者相互作用, 能显著影响系统功能与可持续性^[34]。本研究中通过不同地区的生物量、土壤理化以及微生物的关系进行分析, 发现生物量与土壤理化和土壤微生物数量均展现了显著的相关性, 而变差分解分析(VPA)揭示土壤理化是促使作物生物量增长的主要驱动因子, 对作物生物量的促进作用展现了绝对优势, 而微生物对生物量的解释度较小。前人的大量研究表明微生物对作物生长有着同样重要的作用^[35], 本试验随机森林预测模型表明, 土壤养分(N/P/K/TOC)对作物生物量的变化有着显著的影响, 而土壤微生物对土壤养分的增加也有着显著作用。由此可推测, 秸秆还田后

富集的土壤微生物可能无法直接促进作物生长, 而可能是通过直接促进秸秆降解, 释放秸秆中的养分, 从而间接促进作物生物量的提升; 同时, 路径分析模型也表明, 真菌细菌显著促进了放线菌丰度的提升, 且真菌和放线菌显著促进了速效钾含量提升, 进而促进作物的生长; 更重要的是, 秸秆减量还田(1/3FSX、2/3FSX)对土壤微生物和土壤养分的提升效应均遵循“微生物→速效养分→生物量”的路径模型, 且 1/3FSX 路径效率更高。已有研究表明, 细菌能快速腐解秸秆中糖类、淀粉类易分解物质, 而土壤真菌和放线菌类微生物对秸秆中难腐解的纤维素和木质素降解发挥了主要作用, 且土壤真菌和放线菌相互协作, 有效促进了秸秆中养分的释放^[36], 因此, 本研究中土壤放线菌和真菌丰度的提升对秸秆中养分的释放(包括钾元素)可能发挥了重要作用; 同时, 土壤中钾元素不参与小麦细胞大分子物质的组建, 但钾元素能显著激活酶活性, 调节生理过程, 提升冬季小麦根系活力, 增强抗逆性^[37]; 而且真菌或放线菌中解钾类微生物可提高可溶性蛋白含量, 促进种子萌发和幼苗生长, 同时它可以通过分泌有机酸等物质来溶解含钾矿物质, 给作物提供养分^[38], 因此, 在秸秆腐解初期, 真菌或放线菌类微生物可能直接或间接促进了土壤钾素营养的提升, 提高冬季小麦根际健康和抗逆性, 进而促进小麦苗期的快速生长(图 10)。

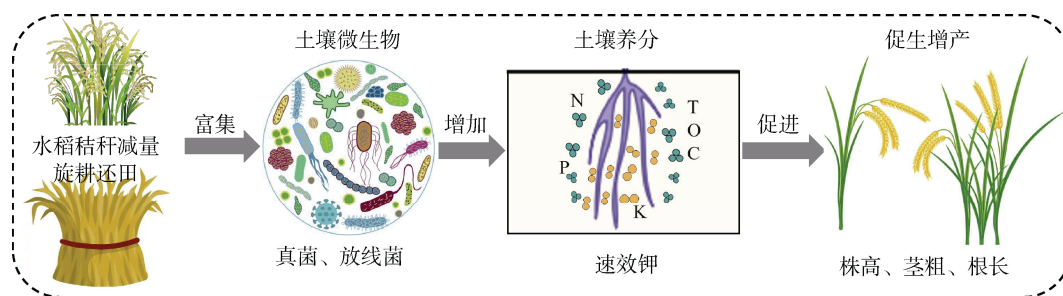


图 10 水稻秸秆减量还田促进小麦生长的作用机制

Fig.10 The mechanism of action by which reduced-rate returning of rice straw to the field promotes wheat growth

4 结 论

本研究通过两个试验点秸秆还田定位试验, 发现秸秆不同秸秆还田模式均能显著改善土壤理化性质和微生物特性, 促进小麦苗期生长。其中, 秸秆留低茬离田深旋还田处理秸秆(1/3FSX)对小麦苗

期株高、茎粗和根长提升效应显著高于其他处理; 同时, 秸秆减量深旋还田(1/3FSX 和 2/3FSX)秸秆腐解更高, 土壤速效养分、有机质含量和微生物丰度提升幅度更大, 而全量粉碎深旋、深翻处理土壤结构、养分和微生物提升效应较低, 对小麦苗期生长提升效应更弱; 更重要的是, 秸秆减量还田

(1/3FSX 和 2/3FSX)可能是通过土壤细菌和真菌丰度提升以驱动放线菌活性增加,协同促进秸秆高效腐解,进而提高土壤养分中钾含量养分释放,最终促进作物生长,且 1/3FSX 效果更佳。因此,针对稻-麦周年种植模式,秸秆全量粉碎深旋和深埋有利于作物苗期生长,但减少当季水稻秸秆还田量,对下季小麦季秸秆腐解、土壤养分提升和苗期生长效果更优。

参考文献 (References)

- [1] Chen H R, Wang X Y, Xiang Y L, et al. Effects of different straw incorporation methods on soil quality and its effect evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(6): 1651—1664. [陈绘融, 王小燕, 向依玲, 等. 不同秸秆还田方式对土壤质量的影响及其效应评价[J]. *土壤学报*, 2025, 62(6): 1651—1664.]
- [2] Dong Y L, Li Z F, Wang R L, et al. Study on the problems and countermeasures of returning wheat and corn stalks into the soil in north China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(5): 159—163. [董印丽, 李振峰, 王若伦, 等. 华北地区小麦、玉米两季秸秆还田存在问题及对策研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(5): 159—163.]
- [3] Cai H M, Wu Y, Yu M, et al. Effects of long term straw returning to field on seedling growth quality of winter wheat in lime concretion black soil area[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(10): 1266—1272. [蔡洪梅, 吴宇, 于敏, 等. 长期秸秆全量还田对砂姜黑土区冬小麦幼苗生长质量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(10): 1266—1272.]
- [4] Hu W C, Wang B, Wu X D et al. Effects of maize straw returning to field on growth, yield and quality of next maize[J]. *Soils*, 2025, 57(3): 524—529. [胡卫丛, 王蓓, 吴旭东, 等. 秸秆还田对下茬玉米生长、产量和品质的影响[J]. *土壤*, 2025, 57(3): 524—529.]
- [5] Song F, Liu M, Qi Z J, et al. Straw returning and reducing nitrogen application rates maintain maize yields and reduce gaseous nitrogen emissions from black soil maize fields[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 203: 105637.
- [6] Zhu L Q, Xia X J, Hu Q Y, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 6—10. [朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 6—10.]
- [7] Chai R S, Cheng Q P, Chen X, et al. Spatio-temporal variations of wheat, rice and maize straw in major grain-producing counties of Anhui Province and utilization potential of straw nutrient returning to field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 234—247. [柴如山, 程启鹏, 陈翔, 等. 安徽省县域麦稻玉米秸秆时空分异特征与还田养分输入量测算[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 234—247.]
- [8] Zhou F, Xu L, Liu X, et al. Preceding crop straw return methods influence the disease severity of wheat crown rot[J]. *Phytopathology*, 2025, 115(7): 783—793.
- [9] Hu Z J. Application and key technology analysis of rice harvesters[J]. *World Tropical Agriculture Information*, 2025(6): 96—98. [胡宗军. 水稻收割机使用及关键技术分析[J]. *世界热带农业信息*, 2025(6): 96—98.]
- [10] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [11] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomforest[J]. *R News*, 2002, 2(3): 18—22.
- [12] Li D D, Xu L Y. Analysis of influencing factors of chinese farmers' willingness to recycle straw based on structural equation model—A case study of key counties for comprehensive straw utilization in Jiangsu Province[J]. *Pure Mathematics*, 2023, 13(7): 1976—1987. [李丁丁, 徐陆艳. 基于结构方程模型的中国农户秸秆回收利用意愿的影响因素分析——以江苏省秸秆综合利用重点县为例[J]. *理论数学*, 2023, 13(7): 1976—1987.]
- [13] Guo W, Zhou Y P, Chen M Q, et al. Effects of combined application of straw and organic-inorganic fertilizers on key microorganisms and wheat yield in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 1134—1146. [郭伟, 周云鹏, 陈美淇, 等. 秸秆与有机无机肥配施对潮土关键微生物及小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 1134—1146.]
- [14] Han X, Shi L, Xue Y G, et al. Effects of different straw returning and tillage methods on strong roots and stalks of wheat under wide and narrow row planting[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(10): 2265—2276.
- [15] Xie S X, Liu X L, Liu C, et al. Effects of different straw returning methods on soil aggregate stability and organic carbon content in cold and arid regions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(6): 1—10. [谢世兴, 刘雪玲, 刘晨, 等. 寒旱区不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性和有机碳组分含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(6): 1—10.]
- [16] Li W, Cheng Y X, Sun Y, et al. Effects of different straw returning amount on aquaculture water, soil nutrients, and enzyme activity in rice crayfish fields during spring[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(1): 83—91. [李威, 成永旭, 孙颖, 等. 不同秸秆还田量对春季稻田水质、土壤养分及酶活性

- 的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(1): 83—91.]
- [17] Ma X Y. Effects of straw incorporation on biological nitrogen fixation activity and diazotrophic community in paddy soil[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2024. [马馨怡. 秸秆还田对稻田土壤生物固氮活性及固氮微生物群落的影响[D]. 大连: 大连交通大学, 2024.]
- [18] Wang Z T, Ling J, Liu Z X, et al. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 663—674. [王治统, 凌俊, 刘子熙, 等. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(4): 663—674.]
- [19] Ling J, Zhou J, Wu G, et al. Deep-injected straw incorporation enhances subsoil quality and wheat productivity[J]. Plant and Soil, 2024, 499: 207—220.
- [20] Bai X D, He J P, Zhao H C, et al. Effect of spring maize straw returning model in northwest hebei province on soil aggregation stability[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(21): 58—62. [白雪冬, 和江鹏, 赵海超, 等. 冀西北旱作春玉米秸秆还田模式对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(21): 58—62.]
- [21] Qin Y M, Zhang K, Liu M, et al. Effects of different tillage measures and straw returning methods on soil physicochemical characteristics and corn yield[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(6): 55—63. [秦永梅, 张鲲, 刘敏, 等. 不同耕作与秸秆还田方式对土壤理化特性及玉米产量的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(6): 55—63.]
- [22] Qiao T C, Zhao X L, Zhang L F, et al. Effects of maize stalk decomposing liquid on seedling rhizosphere soil enzyme activity and root activity[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(2): 383—390. [乔天长, 赵先龙, 张丽芳, 等. 玉米秸秆腐解液对苗期根际土壤酶活性及根系活力的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(2): 383—390.]
- [23] Li J, Zhao X L, Qiao T C, et al. Physiological effects of straw decomposition solution on maize seedlings and detection of phenolic acid allelopathic components[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(9): 1799—1805. [李晶, 赵先龙, 乔天长, 等. 秸秆腐解液对玉米幼苗的生理效应及酚酸类化感成分的检测[J]. 核农学报, 2015, 29(9): 1799—1805.]
- [24] Dong L L, Wang H H, Lu C Y, et al. Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition[J]. The Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1143—1150.
- [25] Ma Y J, Li X, Zhai Y F, et al. Effects of straw returning methods and nitrogen application rates on soil organic carbon fractions and enzyme activities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(12): 2397—2410. [马玉洁, 李旭, 翟英芳, 等. 秸秆还田方式和施氮量对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(12): 2397—2410.]
- [26] Caiji Z M. Impact of biochar on availability of phosphorus in different soil types[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. [才吉卓玛. 生物炭对不同类型土壤中磷有效性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.]
- [27] Jiang M, Wang X, Zhang R H, et al. Effects of biochar on contents of different forms of potassium in soil and preliminary study on its mechanism[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(6): 1433—1441. [姜敏, 汪霄, 张润花, 等. 生物炭对土壤不同形态钾素含量的影响及机制初探[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1433—1441.]
- [28] Guan F Y, Liu C, Fu Q L, et al. Effects of straw addition on rice yield, soil carbon and nitrogen, and microbial community[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 223—230. [管方圆, 刘琛, 傅庆林, 等. 添加秸秆对水稻产量和土壤碳氮及微生物群落的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 223—230.]
- [29] Ding T Y, Guo Z C, Wang Y K, et al. The Spatial distribution of particulate organic matter within aggregates of shajiang black soil under various straw return practices based on X-ray CT technology and machine learning[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 375—387. [丁天宇, 郭自春, 王玥凯, 等. 不同秸秆还田方式下砂姜黑土团聚体内颗粒有机质的空间分布特征——基于X射线CT技术和机器学习[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 375—387.]
- [30] Wang M Q, Liu Y S, Huang Y L, et al. Research progress on effects of straw incorporation on soil micro-ecological environment[J]. Microbiology China, 2022, 49(2): 807—816. [王美琦, 刘银双, 黄亚丽, 等. 秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 807—816.]
- [31] Li H Y, Wang Z J, Fan M Y, et al. Effects of continuous straw returning on nutrients of soda saline-alkaline paddy soil and fungal community[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2): 15—23. [李红宇, 王志君, 范名字, 等. 秸秆连续还田对苏打盐碱水稻土养分及真菌群落的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 15—23.]
- [32] Li P, Li Y C, Shi J L, et al. Rice straw return of different decomposition days altered soil fungal community structure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4309—4317. [李鹏, 李永春, 史加亮, 等. 水稻秸秆还田时间对土壤真菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4309—4317.]
- [33] Ma J N, Han C Y, Zhao X Q, et al. Research progress on using cellulosedegrading bacteria to improve straw returning efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(6): 1033—1045. [马嘉宁, 韩

- 传洋, 赵小庆, 等. 利用纤维素降解菌提高秸秆还田效率的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33 (6): 1033—1045.]
- [34] Sun C H, Chen L Y, Chen J, et al. Effect of microbial preparation on the degradation and number of microbiology of the straw[J]. Journal of Microbiology, 2023, 43 (4): 84—89. [孙翠焕, 陈丽媛, 陈杰, 等. 微生物菌剂对秸秆降解及秸秆中微生物变化规律的影响[J]. 微生物学杂志, 2023, 43 (4): 84—89.]
- [35] Li Z Q, Liu P Y, Zhang Y, et al. Effects of inoculant application at different stages on tomato growth, quality and expression of related enzyme genes[J]. Northern Horticulture, 2023 (4): 1—8. [李正青, 刘朋宇, 张颖, 等. 不同时期施用菌剂对番茄生长、品质及相关酶基因表达[J]. 北方园艺, 2023 (4): 1—8.]
- [36] Gai X, Chen B, Xiong S, et al. Impacts of different types of straw returning on soil physicochemical properties, microbial community structure, and pepper quality[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1620502.
- [37] Su W, Liu J, Wang B, et al. Research progress on the HAK function of plant high affinity potassium ion transporter[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36 (8): 144—152. [苏文, 刘敬, 王冰, 等. 植物高亲和钾离子转运蛋白 HAK 功能研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36 (8): 144—152.]
- [38] Liang H B, Zhao L, Zhou Y P, et al. Effects of rhizosphere growth-promoting bacteria on soil improvement, crop yield and quality in saline-alkali land—A meta-analysis[J]. Soils, 2022, 54 (6): 1257—1264. [梁洪榜, 赵丽, 周云鹏, 等. 盐碱地应用根际促生菌对土壤改良、作物产量与品质的影响——基于 Meta 分析[J]. 土壤, 2022, 54 (6): 1257—1264.]

(责任编辑: 陈德明)