

麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻产量和品质的影响

田超, 程爽, 邢志鹏, 胡群, 高辉*, 张洪程*

(1. 扬州大学水稻产业工程技术研究院/江苏省作物栽培生理重点实验室, 扬州 225009;
2. 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州 225009)

摘要: 为探索麦秸秆全量还田条件下实现水稻增产、品质提高的适宜耕整地方式, 于 2021—2022 年开展大田试验, 以迟熟中粳水稻南粳 5718 为材料, 在麦秸秆全量还田和不还田条件下, 设置一体化旱地双轴旋耕整地 (T1)、旱地单轴旋耕+水田单轴旋耕整地 (T2)、水田单轴旋耕整地 (T3) 3 种耕整地方式, 研究麦秸秆还田量与耕整地方式以及两者互作对机插水稻产量和品质特征的影响。结果表明, 与麦秸秆不还田相比, 麦秸秆全量还田下的水稻产量在 T1 方式下增加 4.54%~5.45% ($P<0.05$), 在 T2 和 T3 方式下降低。3 种耕整地方式水稻产量在麦秸秆不还田下表现为 $T2>T1>T3$, 在麦秸秆全量还田下表现为 $T1>T2>T3$, 其中麦秸秆全量还田下 T1 处理较麦秸秆不还田的 T2 处理产量有所提高, 但无显著差异。这一结果可能与麦秸秆全量还田与 T1 处理互作降低了稻田土壤容重、增加了耕作深度和土壤 Eh 有关, 从而促进了水稻有效穗数的增加, 提高了成熟期干物质积累量和收获指数, 实现了水稻产量的增加。麦秸秆全量还田较不还田降低了各耕整地方式下稻米的垩白面积和垩白度, 改善了稻米外观品质; 降低了稻米的直链淀粉含量, 提高了蛋白质含量和食味值; 提高了稻米淀粉峰值黏度和崩解值, 降低了消减值, 改善了稻米的糊化特性, 提高了稻米的适口性。在相同秸秆还田处理下, 3 种耕整地方式水稻垩白度均表现为 $T2>T3>T1$, 米饭食味值均表现为 $T1>T2>T3$ 。秸秆全量还田条件下, T1 相较于 T2、T3 处理食味值分别提高 3.36%~5.90%、7.44%~11.30%。综上所述, 麦秸秆全量还田条件下选用 T1 方式有助于水稻产量、外观品质、营养品质和食味值的协同提高, 这一结论为稻麦两熟地区麦秸秆全量还田结合一体化旱地双轴旋耕整地应用于机插稻提供数据和理论支撑。

关键词: 农业机械; 种植方式; 产量; 品质; 麦秸秆还田

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304052

中图分类号: S511.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-15-0046-11

田超, 程爽, 邢志鹏, 等. 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 46-56. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304052 <http://www.tcsae.org>

TIAN Chao, CHENG Shuang, XING Zhipeng, et al. Effects of wheat straw returning and land preparation on rice yield and quality under mechanical transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(15): 46-56. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202304052 <http://www.tcsae.org>

0 引言

稻麦两熟是中国长江中下游地区主要的种植制度, 作物收获后产生的大量秸秆采用粗糙的秸秆焚烧方式易造成严重的空气污染^[1-2]; 而采用直接还田的方式被认为是实现秸秆资源高效利用的有效途径^[3-4]。据报道, 秸秆还田后不仅可以疏松土壤, 增大土壤孔隙度, 减小土壤容重, 改善土壤水、气、热等条件, 还可以增加有机碳和氮、磷、钾等矿物质营养元素, 提高土壤肥力^[5-6]。目前生产上主要采用旋耕的方式进行作物秸秆还田^[7-8], 但

由于耕整地农具质量不高且与机械动力的融合度低, 常出现秸秆还田深度浅、还田质量差等现象^[9-10]。过量秸秆富集在土壤表层, 不利于作物高质量机插(播), 也易加重土传病害, 同时会产生大量有毒物质, 抑制下茬作物幼苗生长, 造成作物产量不高和品质下降等一系列问题^[9-12]。针对这类问题, 有研究表明采用多次旋耕的秸秆还田方法可以降低秸秆力学强度, 引起秸秆表面崩解形成微观凹坑从而促进秸秆腐解及养分释放^[11-13]; 也有研究提出深翻和浅旋结合的方法, 有助于秸秆深埋还田, 同时可以减少对土壤大团聚体的破坏^[14-15]。前人研究较多探索如何优化秸秆还田效果以及不同还田方式对秸秆分解、养分释放和土壤状态的影响, 在秸秆还田条件下如何通过机械化耕整地方式提高耕整地质量以实现作物产量和品质协同提高方面缺乏系统的比较研究。

机插是稻麦两熟地区水稻生产应用面积最大的种植方式, 配套技术发展较快, 但常见的旋耕(翻耕)机械化整地技术存在机型功能单一、故障率高、耕整质量差等问题, 达不到机插要求的平、净、实, 是限制水稻高质量机插和产量进一步提高的关键。生产上, 耕整地基

收稿日期: 2023-04-09 修订日期: 2023-07-18

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2022338); 江苏省农业科技自主创新项目 (CX[20]1012); 江苏水稻产业技术体系项目 (JATS[2022]485); 江苏省高校优势学科建设工程项目 (RAPD)

作者简介: 田超, 研究方向为水稻机械化轻简化优质高产栽培技术。

Email: 953174509@qq.com

*通信作者: 高辉, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为精准栽培理论与技术、农业信息化技术研究。Email: gaohui@yzu.edu.cn;

张洪程, 教授, 博士生导师, 研究方向为作物优质高产栽培理论与技术研究。Email: hc Zhang@yzu.edu.cn

本流程有 2 种: 早旋耕(或翻耕)灭茬-泡田-整平和泡田-旋耕-整平, 这类耕整地方式一般要进行两次机械作业, 农耗约 5~7 d。在稻麦两熟地区插秧季节强调抢时早栽、平整土地上高质量栽插, 因此缩短农耗时间、实现高质量平整的耕整方式一直是研究的热点。随着农具的发展, 集施肥、旋耕灭茬、播种、镇压平整的一体化作业机在稻麦直播生产上得到越来越广泛的应用, 可实现一次作业完成稻麦高质量“施、耕、播”, 缩短换茬农耗。例如, 扬州大学牵头研制的一体化旱地双轴旋耕平整机可完成浅旋灭茬、旋耕和田块平整等多道工序作业, 实现一体化一次耕整, 提高了耕整质量和效率^[16-18]。这种方式还有一个特点, 即早耕整, 稻田透气性好, 土壤容重小, 利于发根发苗。这类耕整地方式具有解决机插稻田耕整质量不高、换茬农耗时间长、插后僵苗发苗慢的优势, 然而是否能应用于机插稻生产研究较少^[19-21], 同时与生产上常用耕整地方式相比, 机插水稻产量和品质特征如何也缺乏系统的比较研究。因此, 本试验在麦秸秆全量还田下研究耕整地方式对机插水稻产量和品质的影响, 通过分析不同处理水稻关键时期的茎蘖数、叶面积指数和干物质积累量、产量及其构成因素和稻米品质, 评估麦秸秆全量还田结合一体化机一次耕整应用于机插稻的可行性, 以期改善麦秸秆全量还田下机插稻的产量和品质提供理论和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2021—2022 年在江苏省泗洪县石集乡扬州大学创新试验基地(118°27'E, 33°37'N)进行。该地属北亚热带和北温带季风气候区, 四季分明, 光照充足, 雨量丰沛, 全年平均气温 16.5 °C, 年均日照时数 2 206.2 h; 年均降雨量 960.4 mm(水稻生长期间月均温度、日照时数和降雨量见表 1), 土壤质地为黏壤土, 0~20 cm 土壤含有机质为 27.31 g/kg, 总氮 1.89 g/kg, 有效磷 32.34 mg/kg, 速效钾 85.64 mg/kg。试验品种选用代表性迟熟中粳水稻南粳 5718。

表 1 2021—2022 年水稻生长期平均温度、日照时数和降雨量

Table 1 Average temperature, sunshine hours and precipitation during rice growth period in 2021-2022

年份	月份	温度	日照时数	降雨量
Year	Month	Temperature/°C	Sunshine hours/h	Precipitation/mm
2021	5	20.99	177.4	47.5
	6	26.89	163.5	122.6
	7	27.35	110.0	512.7
	8	26.53	118.6	86.9
	9	24.51	162.1	145.9
2022	10	17.14	136.6	100.5
	5	21.49	215.80	2.10
	6	28.36	231.40	91.60
	7	28.64	132.50	295.50
	8	29.21	196.70	152.50
	9	22.05	150.40	5.20
	10	15.46	175.90	74.30

供试农具: 2F-750 撒肥机, 由佐佐木爱克赛路机械(南通)有限公司生产, 配套动力 51.5~69.8 kW, 工作

形式为摆动方式撒肥, 撒肥幅宽为大粒: 8~12 m、小粒: 6~8 m; 2BFMZ-350 旱地双轴旋耕机由扬州慧龙机械科技有限公司生产, 作业动力 161.7 kW, 作业深度约 15~17 cm; 1GS-360 旱地单轴旋耕机由一拖集团有限公司生产, 作业动力 117.6 kW, 作业深度约 12~16 cm; 1JS-280 水田单轴旋耕机和 2ZG-6D(G6) 高速插秧机均由苏州久富农业机械有限公司生产, 其中 1JS-280 水田单轴旋耕机作业动力 117.6 kW, 作业深度约 12~15 cm。

供试肥料: 树脂包衣的缓释复合肥, 释放期 80 d, 缓释氮不低于 15%, 总养分不低于 51%, N:P₂O₅:K₂O=30:8:13, 由山东省茂施生态肥料有限公司提供。

1.2 试验设计

试验以秸秆处理为主区, 耕整地方式为副区。秸秆处理设置秸秆全量还田与秸秆不还田, 2021 年试验田前茬小麦产量约为 7.2 t/hm², 秸秆量为 12.9 t/hm², 2022 年试验田前茬小麦产量约为 8.3 t/hm², 秸秆量为 15.4 t/hm²。秸秆处理设置秸秆不还田(S1)和秸秆全量还田(S2) 2 种方式, 其中秸秆不还田处理的秸秆以人工耙除的方式离田, 秸秆全量还田处理通过旋耕的土壤耕整地方式进行还田。耕整地方式设一体化旱地双轴旋耕整地(T1)、旱地单轴旋耕+水田单轴旋耕整地(T2)、水田单轴旋耕整地(T3) 3 种耕整地方式, 共计 6 个处理。各处理间作埂, 并以人工的方式夯实田块四周。每个处理面积约 4 000 m²(50 m×80 m), 处理内设置 3 个小区, 各小区面积约 200 m²。

T1 处理采用 2BFMZ-350 型一体化旱地双轴旋耕平整机一次作业完成双轴旋耕秸秆还田、镇压平整土地作业, 之后灌水泡田(48 h)至田面土块松散。

T2 处理采用 1GS-360 型旱地单轴旋耕机 1 次作业完成旋耕秸秆还田, 旋耕后对田块进行灌水泡田(24~36 h)至土表全部湿润, 再采用 1JS-280 型水田单轴旋耕机进行 1 次作业以完成旋耕、起浆和平整土地。

T3 处理对田块进行泡田(24~36 h)至土表全部湿润, 再采用 1JS-280 型水田单轴旋耕机作业 2 次, 首次作业以完成旋耕秸秆还田、起浆, 田块落水后再次作业以完成土地旋耕平整作业。

试验的所有处理均在同一块大田进行, 并根据当地小麦收获时间及时进行水稻施肥、耕整地、育秧和机插秧作业。所有处理的肥料于耕整地前采用 2F-750 型撒肥机一次性施肥, 施用肥料为缓释复合肥, 施用量为 900 kg/hm²。施肥后及时进行耕整地作业。育秧工作采用硬质塑料盘进行(58 cm×28 cm), 每盘播量 180 g, 分别于 2021 年 5 月 30 日和 2022 年 5 月 28 日开始育秧。机插秧作业采用 2ZG-6D(G6) 型高速插秧机进行, 每穴 4 苗, 行距 30 cm, 株距 10 cm, 栽插时间分别为 2021 年 6 月 20 日和 2022 年 6 月 19 日。水分、病虫害防治等田间管理按照当地机插秧高产栽培要求实施。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤基础物理性质

2021 年和 2022 年均均在耕作 5 d 后测定 0~20 cm 土壤层的土壤容重、土壤孔隙度以及耕作深度。其中耕作

深度的测量方法为人工使用直尺测量不同处理的土壤耕层厚度。土壤容重测定采用环刀法,即用体积为 192.33 cm^3 (高 5 cm, 底部直径 7 cm) 的环刀,在 0~20 cm 土壤层采集原状土样,重复 3 次,密封带回实验室,先擦干净环刀外的泥土,立即称质量,然后烘干 ($105 \text{ }^\circ\text{C}$),在密闭烘箱中冷却后称质量,最后洗去环刀内壁土壤,晾干后称质量。土壤氧化还原电位用 AZ8651 便携式 PRP 氧化还原电位计测定,在移栽 5 d 后测定,以五点取样法选取各小区中心区域 5 个点进行测定,取平均值。每次将探头插到植株根部周围 8~9 cm 土壤深度,后横移 1 cm,再向下深入 1 cm,保证探头与土壤完全接触,待显示屏读数稳定后保存数据。水稻成熟期在各小区采用 5 点取样法随机选取 5 个点,各取 0~20 cm 土壤,五点同层次土样混合均匀后自然风干,磨细过 0.15 mm 筛取,用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳,之后利用土壤有机碳含量 $\times 1.724$ 计算出土壤有机质含量。土壤容重 (g/cm^3)、土壤总孔隙度 (%) 计算式如下:

$$\text{土壤容重} = (M1 - M0) / V \quad (1)$$

$$\text{土壤总孔隙度} = (1 - \text{土壤容重} / \text{土壤比重}) \times 100\% \quad (2)$$

式中 $M1$ 为土壤和环刀总干质量; $M0$ 为环刀质量; V 为环刀体积 (cm^3); 土壤比重为耕地土壤表土平均密度,以 $2.65 \text{ (g}/\text{cm}^3)$ 计算。

1.3.2 关键时期茎蘖数

各处理的各小区选定 3 个代表性观察点,每个观察点选取连续 20 穴,移栽后分别记录分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期 (收获前 1 d) 的茎蘖数并计算茎蘖成穗率。成熟期有效茎蘖数与拔节期茎蘖数之比即为茎蘖成穗率。

1.3.3 干物质积累量和叶面积指数

分别于分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期在各小区进行连续 20 穴茎蘖数随机调查,计算每穴平均有效穗数,按平均数选取长势一致的代表性植株 3 穴。将所取植株样品进行分样处理后,在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min,再在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒定质量后测定各部位干物质质量。采用方格干重法测定植株叶面积,使用 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 矩形模板,将待测叶片置于模板下,用刀片切除矩形模板外叶片部分裁出与矩形模板大小一致叶片并单独包装烘干后测定干物质质量,根据每穴绿色功能叶干物质重和种植密度计算出叶面积指数。叶面积衰减率 (d^{-1}) 计算式如下:

$$\text{叶面积衰减率} = (B_{LAI} - A_{LAI}) / (t_B - t_A) \quad (3)$$

式中 A_{LAI} 和 B_{LAI} 为前后 2 次测定的叶面积指数, t_A 和 t_B 为前后 2 次测定的时间 (d)。

1.3.4 产量及其构成因素

收获前,在各小区选取 3 个调查点调查有效穗数,每点调查连续 5 行,每行 20 穴,各小区按计算所得平均穗数取 5 个样点 (每穴为一个样点),调查每穗粒数和结实率。以 1 000 粒样本 (干种子) 进行称质量,重复

3 次 (误差 $\leq 0.05 \text{ g}$),以计算千粒质量。成熟期各小区收获 10 m^2 ,晒干后折算实产 (含水率 14.5%)。

1.3.5 稻米品质

水稻收获脱粒晒干后,室内贮藏 3 个月,依据 GB/T 17891-2017《优质稻谷》测定稻米的糙米率、精米率、整精米率并测量整精米的垩白粒率、垩白面积、垩白度、米粒长宽比和精米的直链淀粉含量,其中粒型指标和外观品质指标采用万深 SC-E 大米外观品质检测仪测定。采用瑞典 FOSSTECATOR 公司生产的近红外谷物分析仪 (Infrared 1 241 grain analyzer, 近红外光谱区间波长为 $570 \sim 1 100 \text{ nm}$) 测定精米的蛋白质含量和直链淀粉含量。

1.3.6 食味指标

采用日本佐竹公司生产的 STA1A 米饭食味仪测定米饭外观、硬度、黏度、平衡值的评分和综合食味评分。

1.3.7 稻米黏滞特性

采用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产的 Super3 型 RVA 快速黏度分析仪测定米粉黏滞特性,使用配套软件 TWC 分析。按照 AACC 规程 (1995-61-02) 和 RACI 标准方法,当米粉的含水率为 12% 时,样品量为 3 g,蒸馏水为 25 g。在搅拌测定过程中,罐内温度: $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 保持 1 min,以 $11.84 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度上升到 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ (3.75 min) 并保持 2.5 min,再以 $11.84 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度下降到 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保持 1.4 min。在起始 10 s 内搅拌器转动速度为 960 r/min,之后保持在 160 r/min。RVA 谱特征值包括峰值黏度 (peak viscosity)、热浆黏度 (trough viscosity)、最终黏度 (final viscosity)、崩解值 (breakdown, 峰值黏度-热浆黏度)、消减值 (setback, 最终黏度-峰值黏度) 等。

1.4 数据计算与分析

使用 Microsoft Excel 2003 进行两年数据的统计和表格制作,运用 SPSS 23.0 数据处理软件进行方差分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤基础物理性质

由表 2 可知,秸秆处理、耕整地方式对土壤容重、土壤孔隙度和 Eh 影响极显著 ($P < 0.01$),秸秆处理对土壤有机质含量影响极显著 ($P < 0.01$),耕整地方式对耕作深度影响极显著 ($P < 0.01$)。与秸秆不还田处理相比,相同耕整地方式下,秸秆全量还田显著降低土壤容重,提高土壤孔隙度和有机质含量。T1 条件下,秸秆全量还田较不还田处理土壤容重分别降低了 8.89%~12.55%;土壤孔隙度提高 7.14%~9.77%。在 T1、T2、T3 条件下,秸秆全量还田较不还田处理土壤有机质含量分别提高了 8.74%~9.47%、9.05%~11.48% 和 10.83%~11.39%。在秸秆不还田和秸秆全量还田条件下, T1 的 Eh 分别高于 T2、T3 处理 22.6%~26.6%、34.20%~36.51% 和 32.81%~33.39%、34.70%~35.85%。

表 2 麦秸秆全量还田下耕整地方式对土壤基础性质的影响
Table 2 Effects of full return of wheat straw to the field and land preparation methods on soil basic properties

年份 Year	处理 Treatment	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	孔隙度 Soil porosity/ %	耕作深 Tillage depth/m	Eh/ mV	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)
2021	T1	1.16 ab	56.23 bc	0.20 a	-78.73 a	25.10 bc
	S1 T2	1.19 a	54.96 bc	0.17 b	-101.68 b	23.57 c
	T3	1.22 a	54.15 c	0.17 b	-119.64 c	23.90 c
	T1	1.02 c	61.73 a	0.20 a	-84.78 a	27.48 a
	S2 T2	1.08 bc	59.38 ab	0.18 b	-126.20 cd	26.27 ab
	T3	1.14 ab	56.98 bc	0.17 b	-132.20 d	26.63 ab
2022	T1	1.18 b	55.47 ab	0.18 a	-86.60 a	25.78 bc
	S1 T2	1.25 ab	52.71 bc	0.17 b	-118.00 c	24.65 c
	T3	1.33 a	50.03 c	0.16 b	-136.40 d	24.31 c
	T1	1.07 c	59.43 a	0.18 a	-95.83 b	28.13 a
	S2 T2	1.16 b	56.13 ab	0.17 b	-143.87 e	26.88 ab
	T3	1.21 b	54.40 bc	0.16 b	-146.74 e	26.95 ab
年份 Year (Y)	*	**	**	**	NS	
S	**	**	NS	**	**	
T	**	**	**	**	*	
Y×S	NS	NS	NS	NS	NS	
Y×T	NS	NS	NS	**	NS	
S×T	NS	NS	NS	**	NS	
Y×S×T	NS	NS	NS	**	NS	

注: S 为秸秆处理方式; S1: 秸秆不还田; S2: 秸秆全量还田。T 为耕整地方式; T1: 一体化旱地双轴旋耕整地; T2: 旱地单轴旋耕+水田单轴旋耕整地; T3: 水田单轴旋耕整地。同列数据后不同小写字母表示相同年份数据在 0.05 水平上差异显著。**: 表示在 0.01 水平上显著相关; *: 表示在 0.05 水平上显著相关; NS: 表示在 0.05 水平上无显著性相关 ($P>0.05$)。下同。
Note: S: Straw treatment; S1: Straw is not returned to the field; S2: Full return of wheat straw; T: Tillage method. T1: Integrated dryland double-axis rotary tillage method and land preparation; T2: Single-axis rotary tillage in dryland + Single-axis rotary tillage and land preparation in paddy field; T3: Single axis rotary tillage for paddy field. Different minuscule after the data in the same column indicate that the data in the same year are significantly different at the 0.05 level. **: Indicates significant correlation at 0.01 level; *: Indicates significant correlation at 0.05 level; NS: Indicates no significant correlation at 0.05 level ($P>0.05$). The same as below.

2.2 产量及其构成因素

由表 3 方差分析可知, 耕整地方式对水稻有效穗数、每穗粒数和产量影响极显著 ($P<0.01$), 秸秆处理与耕整地方式互作对有效穗数和产量影响极显著 ($P<0.01$)。与秸秆不还田处理相比, T1 条件下秸秆全量还田处理有效穗数提高 4.63%~5.35%、产量提高 4.54%~5.45%。在秸秆不还田条件下, 耕整地方式处理水稻产量表现为 T2>T1>T3。在秸秆全量还田条件下, T1 处理产量分别高于 T2 和 T3 处理 4.20%~4.50%、12.16%~14.85%。麦秸秆全量还田下 T1 处理较秸秆不还田的 T2 处理有效穗数提高 6.23%~6.60%。

2.3 关键时期茎蘖数

由表 4 方差分析可知, 耕整地方式、秸秆处理与耕整地方式互作对水稻关键时期茎蘖数、茎蘖成穗率影响极显著 ($P<0.01$), 秸秆处理对水稻分蘖中期的茎蘖数影响极显著 ($P<0.01$), 对水稻拔节期的茎蘖数影响显著 ($P<0.05$)。在秸秆全量还田条件下, T1 处理的关键时期茎蘖数显著高于 T2 和 T3 处理, 其高峰苗数具体表现为 T1 处理分蘖高于 T2 和 T3 处理 11.38%~12.19%、12.12%~14.07%, 说明 T1 与秸秆全量还田互作有利于秧苗生长, 促进水稻分蘖。

2.4 叶面积指数

由表 5 可知, 在秸秆全量还田条件下, 相比于 T2、T3 处理, 拔节期、抽穗期和成熟期水稻叶面积指数均为

T1 最高。与不还田处理相比, T1 耕整地方式下秸秆全量还田处理的拔节期叶面积指数提高 10.50%~35.65%; T2 和 T3 耕整地方式下, 秸秆全量还田处理拔节期的叶面积指数分别降低 14.29%~22.49% 和 14.10%~14.53%。这说明适合的耕整地方式与秸秆全量还田互作可有效提高水稻叶面积指数, 促进群体均衡发展。

表 3 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of wheat straw full return to the field, tillage and land preparation on the yield and its components of mechanically inserted rice

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 FP/ ($\times 10^4$ hm ⁻²)	每穗粒数 FGP	结实率 FGR/%	千粒质量 GW/g	产量 Yield/ (t·hm ⁻²)
2021	T1	369.31 b	103.82 bc	97.90 a	30.22 ab	11.02 cd
	S1 T2	363.74 bc	110.32 a	96.01 a	29.91 b	11.32 b
	T3	364.42 bc	104.30 bc	97.51 a	30.11 ab	10.81 d
	T1	386.40 a	102.42 bc	98.21 a	30.30 ab	11.61 a
	S2 T2	358.11 cd	105.16 ab	98.01 a	30.52 a	11.12 bc
	T3	353.11 d	98.72 c	98.41 a	30.41 a	10.11 e
2022	T1	361.22 b	105.77 b	94.75 a	30.22 a	11.43 b
	S1 T2	357.00 b	112.11 a	94.32 a	29.91 abc	11.75 a
	T3	356.76 b	108.52 ab	94.86 a	30.11 ab	11.11 c
	T1	380.55 a	104.19 b	96.01 a	28.72 abc	11.94 a
	S2 T2	354.22 b	107.66 ab	95.10 a	28.47 c	11.47 b
	T3	342.69 c	102.96 b	96.10 a	28.60 bc	10.65 d
Y	NS	NS	NS	*	NS	
S	NS	*	NS	NS	NS	
T	**	**	NS	*	**	
Y×S	NS	NS	NS	NS	NS	
Y×T	NS	NS	NS	NS	NS	
S×T	**	NS	NS	*	**	
Y×S×T	NS	NS	NS	*	NS	

注 (Note): FP: Fertile panicle; FGP: Filled grain number per panicle; FGR: Filled grain rate; GW: 1 000-grain weight.

表 4 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻关键时期茎蘖数的影响

Table 4 Effects of wheat straw full return to the field and tillage and land preparation on the number of tillers in the key period of mechanically inserted rice

年份 Year	处理 Treatment	茎蘖数 No. of stems and tillers/($\times 10^4$ hm ⁻²)				茎蘖成穗率 PTP/%
		分蘖中期 TM	拔节期 JS	抽穗期 HS	成熟期 MS	
2021	T1	528.83 b	555.34 c	390.64 b	369.28 b	66.49 cd
	S1 T2	523.41 b	564.81 b	387.81 b	363.54 bc	64.36 e
	T3	510.79 b	539.11 d	371.84 c	364.33 bc	67.58 bc
	T1	553.48 a	584.92 a	420.98 a	386.31 a	66.06 d
	S2 T2	468.04 c	521.35 e	361.54 cd	358.11 cd	68.68 ab
	T3	456.18 c	512.74 e	354.88 d	354.11 d	69.07 a
2022	T1	495.52 b	535.51 b	376.75 b	361.22 b	67.44 c
	S1 T2	493.29 b	529.95 b	372.18 b	357.00 b	67.37 c
	T3	483.30 b	489.95 d	355.51 c	356.76 b	72.82 a
	T1	544.41 a	565.51 a	417.75 a	380.55 a	67.29 c
	S2 T2	434.39 c	507.72 c	356.63 c	354.22 b	69.78 b
	T3	429.97 c	504.40 c	366.41 bc	342.69 c	67.95 c
Y	*	*	NS	NS	NS	
S	**	*	NS	NS	NS	
T	**	**	**	**	**	
Y×S	NS	**	*	NS	**	
Y×T	NS	NS	NS	NS	NS	
S×T	**	**	**	**	**	
Y×S×T	NS	**	NS	NS	**	

注 (Note): PTP: Percentage of productive tillers. TM: Tillering metaphase; JS: Jointing stage; HS: Heading stage; MS: Maturity stage. Same below.

表 5 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻主要生育时期叶面积指数及叶面积衰减率的影响

Table 5 Effects of wheat straw full return to the field and tillage and land preparation methods on leaf area index and leaf area decay rate of machine-inserted rice at main growth stages

年份 Year	处理 Treatment	叶面积指数 Leaf area index			叶面积衰减率 Decreasing rate of leaf area/ (d ⁻¹)	
		拔节期 JS	抽穗期 HS	成熟期 MS		
2021	S1	T1	3.82 c	6.29 b	4.22 ab	0.041 c
		T2	4.57 a	7.20 a	3.90 bc	0.065 a
		T3	3.92 c	7.01 a	4.03 bc	0.059 ab
	S2	T1	4.22 b	6.93 a	4.47 a	0.049 bc
		T2	3.91 c	6.45 b	3.82 c	0.052 bc
		T3	3.35 d	6.38 b	3.92 bc	0.049 bc
2022	S1	T1	3.47 d	6.78 c	4.13 b	0.052 b
		T2	4.42 b	7.52 b	3.79 c	0.073 a
		T3	3.73 c	7.44 b	3.90 bc	0.069 a
	S2	T1	4.71 a	8.11 a	4.62 a	0.069 a
		T2	3.41 d	6.61 c	3.73 c	0.056 b
		T3	3.19 e	6.11 d	3.78 c	0.046 b
Y		NS	NS	NS	NS	
S		**	**	NS	**	
T		**	**	**	*	
Y×S		NS	NS	NS	NS	
Y×T		**	**	NS	NS	
S×T		**	**	*	**	
Y×S×T		**	**	NS	NS	

2.5 干物质积累量

由表 6 可知, 在秸秆不还田条件下, T2 处理在拔节期、抽穗期和成熟期干物质积累量及抽穗期-成熟期干物质积累量均高于 T1 和 T3 处理。在 T1 条件下, 秸秆全量还田处理较不还田处理在拔节期、抽穗期、成熟期干物质积累量分别提高 17.86%~31.76%、2.99%~4.80%、4.23%~6.09%; 在 T3 条件下, 秸秆全量还田处理较不还田处理在拔节期、抽穗期、成熟期干物质积累量分别降低 8.06%~12.61%、4.44%~5.43%、3.69%~6.53%。

2.6 加工品质和外观品质

由表 7 可知, 在 T1 条件下, 相较于秸秆不还田处理,

秸秆全量还田下稻谷的糙米率、精米率和整精米率有所提高, 但差异不显著。秸秆处理、耕整地方式对稻米垩白率、垩白度、垩白面积影响极显著 ($P<0.01$)。在 T1 条件下, 秸秆全量还田较不还田处理降低垩白面积 19.08%~19.96%, 提高垩白率 10.11%~16.53%; 在 T2 条件下, 秸秆全量还田较不还田处理降低垩白面积 15.68%~20.92%, 提高垩白率 6.75%~10.47%; 在 T3 条件下, 相较于秸秆不还田处理, 秸秆全量还田下稻谷的垩白度和垩白率无显著差异。

表 6 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻主要生育期干物质积累量和收获指数影响

Table 6 Effects of wheat straw return to the field and tillage methods on dry matter accumulation and harvest index of machine-cultivated rice at main growth stages

年份 Year	处理 Treatment	干物质积累量 Dry matter accumulation/(t·hm ⁻²)				收获指数 Harvest index/%	
		拔节期 JS	抽穗期 HS	成熟期 MS	HS-MS		
2021	S1	T1	5.63 d	13.42a	21.34ab	7.92a	44.15a
		T2	6.32ab	13.62a	21.92ab	8.30a	44.12a
		T3	6.22ab	13.53a	21.72ab	8.19a	42.54ab
	S2	T1	6.61a	13.82a	22.23a	8.41a	44.67a
		T2	6.12bc	13.43a	21.62ab	8.19a	43.94a
		T3	5.72cd	12.94b	20.92b	7.98a	41.32b
2022	S1	T1	4.66c	13.48b	21.66bc	8.18a	45.18a
		T2	5.55b	13.65b	22.57ab	8.92a	44.31a
		T3	5.49b	13.64b	22.39ab	8.75a	41.02b
	S2	T1	6.14a	14.13a	22.98a	8.85a	43.29ab
		T2	5.51b	13.55b	22.11abc	8.56a	43.08ab
		T3	4.80c	12.90c	20.93c	8.03a	43.54a
Y		*	NS	NS	NS	NS	
S		NS	NS	NS	NS	NS	
T		**	**	NS	NS	**	
Y×S		NS	NS	NS	NS	NS	
Y×T		NS	NS	NS	NS	NS	
S×T		**	**	**	NS	NS	
Y×S×T		NS	NS	NS	NS	**	

表 7 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻稻米加工、外观品质的影响

Table 7 Effects of the way of returning wheat straw to the field in full amount and plowing and land preparation on the processing and appearance quality of machine-inserted rice

年份 Year	处理 Treatment	糙米率	精米率	整精米率	长宽比	垩白率	垩白度	垩白面积	
		Brown rice rate/%	Milled rice rate/%	Head milled rice rate/%	Length/Width	Chalkiness percentage/%	Chalkiness degree/%	Chalkiness area/%	
2021	S1	T1	84.26 abc	71.42 ab	62.76 a	1.63 b	28.03 d	9.95 c	35.47 b
		T2	83.97bc	69.04c	63.28a	1.65 a	30.57 c	11.75 a	38.47 a
		T3	83.50 c	68.96 c	63.49 a	1.62 b	31.17 bc	10.11 bc	32.47 c
	S2	T1	84.93 a	72.17 a	64.57 a	1.64 ab	32.67 ab	9.38 c	28.70 d
		T2	84.56 ab	70.66 abc	65.31 a	1.66 a	33.77 a	10.96 ab	32.43 c
		T3	83.79 bc	69.73 bc	64.97 a	1.65 a	33.87 a	9.67 c	28.57 d
2022	S1	T1	83.52 ab	72.21 ab	55.25 a	1.63 d	31.79 c	8.05 bc	25.37 b
		T2	83.39 b	69.11 d	57.09 a	1.65 c	34.09 b	10.14 a	29.75 a
		T3	83.08 bc	69.37 cd	57.95 a	1.62 d	35.72 ab	8.32 bc	23.31 bc
	S2	T1	84.34 a	72.97 a	61.39 a	1.67 b	35.01 ab	7.13 d	20.31 d
		T2	83.56 ab	71.04 bc	58.80 a	1.68 a	36.39 a	8.56 b	23.52 bc
		T3	82.43 c	70.80 bcd	58.52 a	1.67 b	36.88 a	7.60 cd	20.61 cd
Y		*	**	NS	**	**	**	**	
S		NS	*	NS	NS	**	**	**	
T		**	**	NS	**	**	**	**	
Y×S		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
Y×T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
S×T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
Y×S×T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

2.7 直链淀粉、蛋白质和食味值及其参数

由表 8 方差分析可知，秸秆还田对稻米直链淀粉、食味值、外观、硬度、黏度、平衡度影响极显著 ($P<0.01$)，对蛋白质影响显著 ($P<0.05$)。耕整地方式对稻米直链淀粉、蛋白质、食味值、外观、硬度影响极显著 ($P<0.01$)，

对黏度、平衡度影响显著 ($P<0.05$)。在 T1 耕整地方式下，秸秆全量还田处理相比于不还田处理食味值提高 5.00%~12.66%。在秸秆不还田和秸秆全量还田条件下，相比于 T3 处理，T1 处理食味值分别提高 6.28%~11.23% 和 7.44%~11.30%。

表 8 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻稻米直链淀粉、蛋白质和食味值及其参数的影响

Table 8 Effects of wheat straw full return to the field and tillage and land preparation on amylose, protein, taste value and its parameters of machine-inserted rice

年份 Year	处理 Treatment	直链淀粉 Amylose content/%	蛋白质 Protein content/%	食味值 Taste value	食味值参数 Taste value parameter				
					外观 Appearance	硬度 Hardness	黏度 Viscosity	平衡度 Balance degree	
2021	S1	T1	13.80 bc	8.67 ab	75.10 bc	7.29 a	6.09 c	7.98 a	7.61 a
		T2	14.40 ab	8.23 b	71.77 cd	7.07 ab	6.14 c	7.74 ab	7.46 ab
		T3	15.43 a	8.47 ab	67.52 d	6.97 ab	6.22 bc	7.69 ab	7.32 abc
	S2	T1	13.17 c	8.97 a	84.61 a	6.56 bc	6.36 bc	7.36 abc	7.10 abc
		T2	13.55 bc	8.43 ab	79.90 ab	6.32 c	6.52 ab	7.12 bc	6.85 bc
		T3	14.17 bc	8.77 ab	76.02 bc	6.13 c	6.74 a	6.92 c	6.69 c
2022	S1	T1	15.10 bc	10.43 a	73.33 ab	7.08 a	6.59 c	7.77 a	7.13 a
		T2	15.70 b	9.80 b	72.33 ab	6.79 ab	6.74 c	7.60 ab	7.02 a
		T3	17.27 a	10.07 ab	69.00 b	6.33 b	6.93 bc	7.49 ab	6.79 ab
	S2	T1	14.27 c	10.60 a	77.00 a	6.63 ab	6.96 bc	7.49 ab	6.76 ab
		T2	15.07 bc	10.10 ab	74.50 ab	6.14 bc	7.24 ab	6.93 bc	6.30 bc
		T3	16.13 b	10.30 ab	71.67 ab	5.70 c	7.45 a	6.43 c	5.93 c
Y		**	**	*	NS	*	*	**	
S		**	*	**	**	**	**	**	
T		**	**	**	**	**	*	*	
Y×S		NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	
Y×T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
S×T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
Y×S×T		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

2.8 RVA 谱特征值

由表 9 可知，在相同耕整地方式下，秸秆全量还田

相比于不还田处理峰值黏度、热浆黏度和最终黏度有所提高，消减值显著降低。

表 9 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻 RVA 谱特征的影响

Table 9 Effects of wheat straw full return to the field and land preparation methods on RVA spectra characteristics of machine-inserted rice

年份 Year	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity	热浆黏度 Through viscosity	崩解值 Break-down	最终黏度 Final viscosity	消减值 Setback	
							(×10 ⁻³ Pa·s)
2021	S1	T1	3 057.05 bc	1 871.28 ab	1 071.47 bc	2 325.44 abc	-529.74 b
		T2	3 171.08 ab	1 938.12 ab	1 143.23 ab	2 398.43 ab	-650.74 d
		T3	2 988.49 c	1 832.76 b	989.37 d	2 141.36 c	-469.73 a
	S2	T1	3 155.33 ab	1 939.99 ab	1 139.47 ab	2 381.12 abc	-559.42 c
		T2	3 230.92 a	1 975.89 a	1 197.48 a	2 498.36 a	-691.57 e
		T3	3 062.43 bc	1 871.96 ab	1 059.96 cd	2 194.96 bc	-523.38 b
2022	S1	T1	2 676.93 b	1 841.29 b	1 056.18 cd	2 315.32 ab	-481.45 b
		T2	2 761.94 ab	1 953.93 a	1 141.41 ab	2 426.91 ab	-535.13 c
		T3	2 546.42 c	1 826.66 b	985.47 d	2 182.60 b	-430.41 a
	S2	T1	2 740.26 ab	1 915.35 ab	1 191.39 a	2 381.17 ab	-569.12 d
		T2	2 850.78 a	1 991.12 a	1 211.89 a	2 500.26 a	-654.22 e
		T3	2 698.73 b	1 819.50 b	1 085.78 bc	2 211.19 b	-537.74 c
Y		**	NS	NS	NS	NS	
S		*	NS	**	*	**	
T		**	**	**	**	**	
Y×S		NS	NS	NS	NS	**	
Y×T		NS	NS	NS	NS	**	
S×T		NS	NS	NS	NS	NS	
Y×S×T		NS	NS	NS	NS	NS	

相较于秸秆不还田，秸秆全量还田下 T1、T2 和 T3 的消减值分别降低 5.60%~18.21%、6.30~22.24% 和 11.43%~24.94%。在秸秆不还田条件下，T2 处理的峰值黏度、崩解值高于 T1 和 T3 处理，消减值低于 T1 和 T3 处理，具体表现为：T2 处理峰值黏度、崩解值分别高于 T3 处理 6.11%~8.46% 和 15.57%~15.83%，T2 处理消减值分别低于 T1 和 T3 处理 11.15%~22.84% 和

24.32%~38.54%。

3 讨论

3.1 麦秸秆全量还田下耕整地方式对机插水稻干物质积累量、产量及其构成因素的影响

目前，关于秸秆还田对水稻产量的影响，前人从秸秆还田的生物量、还田方式和还田年限等方面开展了大

量的研究。结果表明, 相比于秸秆不还田和秸秆全量还田, 适宜的秸秆还田量 ($4\ 500\sim 6\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$) 有助于水稻有效穗数和每穗实粒数的增加, 从而获得高产^[22-23]。在秸秆还田方式方面, 杨竣皓等^[24]通过对免耕、翻耕、旋耕与深耕进行 Meta 分析发现, 相较于旋耕与深耕, 免耕与翻耕有利于发挥秸秆还田增产作用。庞党伟等^[25]研究表明, 在长期浅旋耕进行秸秆还田的耕地上进行深耕有助于改善深层土壤的物理性质, 实现增产。此外, 已有的研究表明^[26], 随着秸秆还田年限的增加, 秸秆还田的增产效果逐渐突出。本试验结果表明, 秸秆全量还田的增产效应因具体耕整地方式的不同而有所差异。在一体化旱地双轴旋耕整地条件下秸秆全量还田能实现增产效果, 但在旱地单轴旋耕+水田单轴旋耕整地和水田单轴旋耕整地条件下均难以实现秸秆还田的显著增产效果, 甚至呈现减产的趋势。这一结果的形成可能是由于 T1 条件下实现田块旱地双轴旋耕和镇压整平一体化作业, 有助于降低土壤扰动、保持土壤大团聚体含量和稳定性形成良好的土壤结构, 从而增加微生物的多样性和土壤对作物生长的适宜性^[27]。此外, $0\sim 20\ \text{cm}$ 土层较低的土壤容重、较大的孔隙度和良好的 Eh 说明土壤透气性较好, 有助于水稻根系深扎, 促进根系对深层土壤中养分的吸收, 平衡植株生长发育和生理活动的营养来源, 从而促进水稻前期分蘖发生, 提高群体质量, 形成高光效群体, 改善“源”“库”关系, 促进水稻灌浆结实, 最终实现高产^[28]。T2 和 T3 耕整地方式下整地均是以单轴旋耕方式进行且旋耕深度低于 T1 处理, 这一结果可能导致秸秆大量聚集于土壤浅表层, 影响掩埋效果, 同时土壤表面充足的氧气有助于秸秆的腐解, 促使秸秆腐解与水稻幼苗争夺氮素^[29-30]。此外, T2 和 T3 耕整地方式下稻田土壤容重大、孔隙度低, 影响土壤水、气、热的流通和贮存, 不利于根系深扎和养分的协调供应, 同时多次旋耕往往导致表层土壤扰动量大, 加速土壤微生物对有机质的消耗, 减少土壤有机质含量进一步影响了土壤的物理性状, 更加不利于水稻秧苗的扎根和返青^[31-33]。因此, 在秸秆全量还田条件下, 采用 T1 耕整地方式是优化秸秆旋耕还田增产效果的有效途径之一。

3.2 麦秸秆全量还田与耕整地方式对机插水稻品质的影响

稻米品质是一个综合性状指标, 它既受水稻自身品种特性的制约, 也受栽培措施的影响。刘月月等^[34]研究表明, 秸秆还田有助于提高东北粳稻的外观品质, 但不利于加工品质的提高。刘世平等^[35]的研究也同样表明, 秸秆还田能降低稻米垩白率和垩白度, 改善了稻米外观品质。汤文光等^[36]研究表明, 相较于冬闲田后种植水稻, 前茬种植作物后将秸秆还田有助于水稻糙米率、整精米率的提高, 但对水稻精米率的影响并不一致。在秸秆还田方式方面, 田慎重等^[7]研究表明, 旋耕-深松配合秸秆还田促进了 $0\sim 20\ \text{cm}$ 土壤团聚体的形成和稳定, 对提升土壤有机碳水平具有积极意义。濮超等^[37]研究表明, 免

耕和翻耕秸秆还田有利于改善土壤质量, 增强表层土壤氮库, 翻耕有利于增加深层土壤全氮及各组分含量。本试验结果表明, 相比于不还田处理, 麦秸全量还田并未显著影响稻米的加工品质, 但显著降低稻米垩白面积和垩白度, 改善了稻米外观品质。这可能是由于秸秆全量还田能在幼穗分化发育期为水稻生长供应缓效养分有利于籽粒中淀粉粒的有序排列, 从而促进外观品质改善。在秸秆全量还田条件下, 相比于 T2、T3 处理, T1 处理的加工品质、外观品质均有所提高, 这可能是由于秸秆全量还田条件下, T1 处理早耕整后田块土壤透气, 降低了土壤容重, 有利于改善土壤质量, 也有可能是因为植株群体特征在抽穗期的显著化差异, 较大的群体导致个体竞争强度大, 降低了单株的养分吸收, 从而降低了水稻垩白, 改善了外观品质^[38-39]。

关于麦秸秆全量还田与耕整地方式对稻米蒸煮食味和营养品质的影响, 李新举等^[40]研究表明, 秸秆主要集中在土壤 $0\sim 10\ \text{cm}$ 内的微生物分解, 且埋深 $5\ \text{cm}$ 效果最好, 当秸秆还田量在 $3\ 000\sim 9\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 还田量越多稻米品质越好。在秸秆全量还田条件下, 陈梦云等^[38]研究表明, 无论以小麦秸秆或稻草进行全量还田试验, 均能提高稻米的营养品质, 降低直链淀粉含量。本试验研究表明, 相较于麦秸秆不还田处理, 麦秸秆全量还田有助于稻米蛋白质含量的提高, 并降低直链淀粉含量。这可能是由于麦秸秆全量还田能改善土壤碳氮比, 促进水稻对氮素的吸收, 从而影响籽粒灌浆期碳氮物质供应, 提高稻米蛋白质含量, 降低直链淀粉含量^[41-44]。在稻米的食味值方面, 本试验的结果表明, 水稻的食味值受秸秆处理和耕整地方式影响显著。在麦秸秆全量还田条件下, T1 处理下的水稻食味值最高。这可能是由于麦秸秆全量还田配合 T1 耕整地方式有利于提高稻米的峰值粘度和崩解值, 降低消减值, 从而改善稻米的糊化特性, 降低米饭的硬度, 提高稻米的适口性。此外, 本试验是在小麦高产水平下进行秸秆全量还田, 秸秆还田量增加或者减少、供试品种、土壤基础养分、当地气候状况以及机器的通过率和适用性是否会影响麦秸秆全量还田与耕整地方式以及两者互作对水稻产量和品质形成的效应, 这方面仍待进一步深入研究。

4 结论

本研究中, 一体化旱地双轴旋耕整地 (T1)、旱地单轴旋耕+水田单轴旋耕整地 (T2)、水田单轴旋耕整地 (T3) 3 种耕整地方式水稻产量在麦秸秆不还田下表现为 $T2>T1>T3$, 在麦秸秆全量还田下表现为 $T1>T2>T3$, 其中麦秸秆全量还田下 T1 处理可实现 $11.61\ \text{t}/\text{hm}^2$ 以上的产量, 较麦秸秆不还田的 T2 处理增产 $1.69\%\sim 2.65\%$ 。分析可知秸秆全量还田与 T1 互作改善土壤质量、降低了土壤容重、增加了土壤孔隙度和 Eh, 促进水稻茎蘖发生, 增加有效穗数 $6.23\%\sim 6.60\%$, 并提高抽穗期至成熟期阶段的干物质积累量, 从而提高水稻产量。在秸秆全量还田条件下, T1 相较于 T2、T3 处理食味值提高

3.36%~5.90% 和 7.44%~11.30%。T1 条件下, 秸秆全量还田较不还田处理分别降低稻米的垩白面积和垩白度 19.08%~19.96% 和 5.71%~11.49%, 改善了稻米的外观品质; 降低直链淀粉含量 4.59%~5.34%, 提高蛋白质含量 1.89%~3.46%, 提高食味值 5.00%~12.66%, 改善了稻米的适口性。综上, 麦秸秆全量还田配合 T1 有助于水稻产量、外观品质、营养品质和食味品质的协同提高。

[参 考 文 献]

- [1] ZHU X X, PENG C L, SI G H, et al. Effects of straw returning on soil chemical properties and microbial community diversity under the rice-crayfish integrated system[J]. *Sustainability*, 2022, 14(20): 13539.
- [2] ZHANG S J, ZHANG G, WANG D J, et al. Abiotic and biotic effects of long-term straw retention on reactive nitrogen runoff losses in a rice-wheat cropping system in the Yangtze Delta region[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 305: 107162.
- [3] 周文涛, 毛燕, 唐志伟, 等. 长期定位试验不同耕作方式与秸秆还田对水稻产量和稻米品质的影响[J]. *中国稻米*, 2021, 27(5): 45-49.
ZHOU Wentao, MAO Yan, TANG Zhiwei, et al. Effects of different tillage methods and straw returning on rice yield and rice quality under long-term location experiment[J]. *China Rice*, 2021, 27(5): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李福建, 徐东忆, 吴鹏, 等. 机械耕作和播种方式对稻茬小麦光合生产和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 41-49.
LI Fujian, XU Dongyi, WU Peng, et al. Effects of mechanical tillage and sowing methods on photosynthetic production and yield of wheat in rice stubble[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王子阳, 陈婉华, 袁伟, 等. 长期秸秆还田与耕作方式对水稻产量及品质的影响[J]. *中国稻米*, 2021, 27(3): 17-20, 29.
WANG Ziyang, CHEN Wanhua, YUAN Wei, et al. Effects of long-term straw returning and tillage ways on yield and quality of rice[J]. *China Rice*, 2021, 27(3): 17-20, 29. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李昊昱, 孟兆良, 庞党伟, 等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(6): 893-903.
LI Haoyu, MENG Zhaoliang, PANG Dangwei, et al. Effect of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 893-903. (in Chinese with English abstract)
- [7] 田慎重, 张玉凤, 边文范, 等. 深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 185-192.
TIAN Shenzhong, ZHANG Yufeng, BIAN Wenfan, et al. Effects of subsoiling and straw return on soil labile organic carbon fractions in continuous rotary tillage cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(2): 185-192. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵黎明, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 耕作与植物生长调节剂对优质粳稻产量及光合特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 93-103.
ZHAO Liming, ZHENG Dianfeng, FENG Naijie, et al. Effects of tillage and plant growth regulators on the yield and photosynthetic characteristics of high-quality japonica rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(15): 93-103. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李绍平, 邢志鹏, 田晋钰, 等. 机械旱直播方式对水稻产量和光合物质生产特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 1-9.
LI Shaoping, XING Zhipeng, TIAN Jinyu, et al. Effects of mechanical dry direct seeding ways on rice yield and photosynthetic material production characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(7): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [10] 管春松, 崔志超, 高庆生, 等. 双轴旋耕碎土试验台设计与分层耕作试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 28-37.
GUAN Chunsong, CUI Zhichao, GAO Qingsheng, et al. Design of biaxial rotary tillage soil test bench and layered tillage test[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 28-37. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李泽媛, 郑军. 我国农作物秸秆还田的研究脉络和趋势探析——基于 CiteSpace 知识图谱[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(9): 16-26.
LI Zeyuan, ZHENG Jun. The research evolution road and trend of straw residues incorporation in China--based on the citespace knowledge map[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(9): 16-26. (in Chinese with English abstract)
- [12] 唐海明, 肖小平, 李超, 等. 不同土壤耕作模式对双季水稻生理特性与产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(5): 740-754.
TANG Haiming, XIAO Xiaoping, LI Chao, et al. Effects of different soil tilage systems on physiological characteristics and yield of double - cropping rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5): 740-754. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王延鹏, 汪小岳, 施印炎, 等. 不同耕作方式下水稻田麦秸降解效果[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15): 239-247.
WANG Yanpeng, WANG Xiaopeng, SHI Yinyan, et al. Decomposition of wheat stalk under different tillages in rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(15): 239-247.

- (in Chinese with English abstract)
- [14] 石梦迪, 于乔乔, 蒋文月, 等. 带旋和全旋耕作对稻茬小麦生长和土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 65-75.
SHI Mengdi, YU Qiaoqiao, JIANG Wenyue, et al. Effects of the strip rotary and full rotary tillage on the wheat growth and soil physicochemical properties in rice stubble[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 65-75. (in Chinese with English abstract)
- [15] 周枫, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 翻耕和不同泡田方式对土壤微生物生物量及其酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 352-357.
ZHOU Feng, LUO Jialin, ZHAO Yahui, et al. Effects of plow tillage and soaking field on soil microbial biomass and enzyme activities under straw returning[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(2): 352-357. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王理想, 奚小波, 单翔, 等. 自平衡双轴旋耕水田平整机设计[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2020, 23(2): 24-28.
WANG Lixiang, XI Xiaobo, SHAN Xiang, et al. Design of compound paddy field soil preparation machine with double-axis rotary and automatic leveling devices[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2020, 23(2): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- [17] 程爽, 李绍平, 田晋钰, 等. 氮肥一次性基施对不同机直播水稻产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 1-10.
CHENG Shuang, LI Shaoping, TIAN Jinyu, et al. Effects of one-time nitrogen basal application on the yield and quality of different direct-seeding rice crops by machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [18] YUAN X D, RAN C, GAO D P, et al. Changes in soil characteristics and rice yield under straw returning in saline sodic soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 68: 5-6.
- [19] 叶龙荣. 籼粳杂交稻浙优 21 在闽北稻区作机插的高产特性及配套栽培技术[J]. 中国稻米, 2023, 29(2): 113-115.
YE Longrong. High -yielding characteristics and cultivation techniques of indica-japonica hybrid rice Zheyou 21 in Northern Fujian[J]. China Rice, 2023, 29(2): 113-115. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙启新, 陈书法, 杨进, 等. 自平衡宽幅双轴旋耕灭茬作业机及其传动系统设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(8): 32-35, 41.
SUN Qixin, CHEN Shufa, YANG Jin, et al. Design of self-balancing wider rotary tillage stubble breaking machine with double shafts and transmission system[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2021, 59(8): 32-35, 41 (in Chinese with English abstract)
- [21] DOU Z, LI Y Y, GUO H L, et al. Effects of mechanically transplanting methods and planting densities on yield and quality of nanjing 2728 under rice-crayfish continuous production system[J]. *Agronomy*, 2021, 11: 488.
- [22] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(1): 56-64.
YAN Fengjun, SUN Yongjian, MA Jun, et al. Effects of wheat straw mulching and nitrogen management on grain yield, rice quality and nitrogen utilization in hybrid rice and different soil fertility conditions[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(1): 56-64. (in Chinese with English abstract)
- [23] 袁玲, 张宣, 杨静, 等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 350-359.
YUAN Ling, ZHANG Xuan, YANG Jing, et al. Effects of different cultivation methods and straw incorporation on grain yield and nutritional quality of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 350-359. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合 (Meta) 分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4415-4429.
YANG Junhao, LUO Yongli, CHEN Jin, et al. Effects of main food yield under straw return in China: A meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4415-4429. (in Chinese with English abstract)
- [25] 庞党伟, 陈金, 唐玉海, 等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(11): 1689-1699.
PANG Dangwei, CHEN Jin, TANG Yuhai, et al. Effects of corn stalk returning methods and nitrogen fertilizer treatment on soil physical and chemical properties and winter wheat yield[J]. Journal of Crops, 2016, 42(11): 1689-1699. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘晓霞, 陶云彬, 章日亮, 等. 秸秆还田对作物产量和土壤肥力的短期效应[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(3): 508-510, 513.
LIU Xiaoxia, TAO Yunbin, ZHANG Riliang, et al. The short-term effect of straw returning to the field on crop yield and soil fertility[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2017, 58(3): 508-510, 513. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(9): 1558-1570.
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, CHEN Suying, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1558-1570. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王瑾瑜, 程文龙, 槐圣昌, 等. 深翻、有机无机肥配施对稻田水分渗漏和氮素淋溶的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(20): 4385-4395.
WANG Jinyu, CHENG Wenlong, HUAI Shengchang, et al.

- Effects of deep plowing and organic-inorganic fertilization on soil water and nitrogen leaching in rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(20): 4385-4395. (in Chinese with English abstract)
- [29] CAO Y S, SUN H F, ZHANG J N, et al. Effects of wheat straw addition on dynamics and fate of nitrogen applied to paddy soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 92-98.
- [30] SHAN Y H, CAI Z C, HAN Y, et al. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C: N ratios[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54(1): 46-56.
- [31] WANG J Z, WANG X J, XU M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(3): 371-381.
- [32] HAO X X, HAN X Z, WANG S Y, et al. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 215: 105221.
- [33] 季红娟, 戴正元, 赵步洪, 等. 小麦秸秆还田对稻米蒸煮食用品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(12): 55-57. JI Hongjuan, DAI Zhengyuan, ZHAO Buhong, et al. The impact of wheat straw returning on the cooking and eating quality of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2013, 41(12): 55-57. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘月月, 郑浣彤, 程兆伟, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对东北粳稻产量及稻米品质的影响[J]. *中国稻米*, 2021, 27(6): 20-27. LIU Yueyue, ZHENG Huantong, CHENG Zhaowei, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on the yield and quality of northeast japonica rice[J]. *China Rice*, 2021, 27(6): 20-27. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘世平, 聂新涛, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(1): 71-76. LIU Shiping, NIE Xintao, DAI Qigen, et al. Effects of interplanting with zero tillage and wheat straw manuring on rice growth and grain quality[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(1): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- [36] 汤文光, 唐海明, 罗尊长, 等. 不同种植模式对稻田土壤重金属含量及晚稻稻米品质的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(8): 1457-1464. TANG Wenguang, TANG Haiming, LUO Zunchang, et al. Impacts of winter planting patterns on soil heavy metal content and grain quality in late rice in double cropping rice area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1457-1464. (in Chinese with English abstract)
- [37] 濮超, 刘鹏, 阚正荣, 等. 耕作方式及秸秆还田对华北平原土壤全氮及其组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 160-166. PU Chao, LIU Peng, KAN Zhengrong, et al. Effects of tillage and straw mulching on soil total nitrogen and its components in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(9): 160-166. (in Chinese with English abstract)
- [38] 陈梦云, 李晓峰, 程金秋, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(12): 1802-1816. CHEN Mengyun, LI Xiaofeng, CHENG Jinqiu, et al. Effects of total straw returning and nitrogen application regime on grain yield and quality in mechanical transplanting japonica rice with good taste quality[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(12): 1802-1816. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李晓峰. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味粳稻产量、养分吸收及品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2017. LI Xiaofeng. Effects of Total Straw Returning and Nitrogen Application on Grain Yield, Nutrient Absorption and Quality of Mechanical Transplanted Japonica rice with Good Taste Quality[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [40] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 135-138. LI Xinju, ZHANG Zhiguo, LI Yixue. Effects of soil depth on decay speed of straw[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 135-138. (in Chinese with English abstract)
- [41] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量、品质及氮肥利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2736-2746. XU Guowei, TAN Guilu, WANG Zhiqin, et al. Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on grain yield and quality and nitrogen use efficiency in direct-seeding rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2736-2746. (in Chinese with English abstract)
- [42] 袁晓娟, 孙知白, 杨永刚, 等. 3种复种模式下秸秆还田对机插杂交籼稻产量形成及品质的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(3): 319-330. YUAN Xiaojuan, SUN Zhibai, YANG Yonggang, et al. Effects of straw returning on yield formation and quality of machine transplanted hybrid indica rice under three multiple cropping patterns[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(3): 319-330. (in Chinese with English abstract)
- [43] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 等. 稻草不同还田方式对双季水稻产量及稻米品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 534-542. ZENG Yanhua, WU Jianfu, PAN Xiaohua, et al. Study on yield and quality of double cropping rice in different straw return approaches[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 534-542. (in Chinese with English abstract)
- [44] 吴晶晶, 张斯梅, 顾东祥, 等. 稻麦周年不同秸秆还田方式对水稻产量及品质的影响[J]. *中国稻米*, 2021, 27(5): 79-83. WU Jingjing, ZHANG Simi, GU Dongxiang, et al. Effects of different straw returning methods on rice yield and quality in rice and wheat rotation system[J]. *China Rice*, 2021, 27(5): 79-83. (in Chinese with English abstract)

Effects of wheat straw returning and land preparation on rice yield and quality under mechanical transplanting

TIAN Chao, CHENG Shuang, XING Zhipeng, HU Qun, GAO Hui^{*}, ZHANG Hongcheng^{**}

(1. *Research Institute of Rice Industry Engineering Technology, Yangzhou University/Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou 225009, China;* 2. *Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, China*)

Abstract: Mechanical transplanting has been the largest planting mode of rice production, particularly in the rice-wheat double cropping area. But the soil preparation of rotary tillage (ploughing) cannot fully meet the requirements of machine planting in recent years, due to the single function, high failure rate, and low tillage quality. Flat, clean and solid can be expected for the high quality of rice planting and yield. The main purpose of this study is to explore the tillage and soil preparation for the high yield and quality of machine-transplanted rice under the total wheat straw returning. The experiment was carried out in the rice growing season of 2021 and 2022. The rice variety was taken as Nanjing 5718. The straw treatment was selected as the main area, whereas, the tillage was as the sub-area. Among them, the yield of previous wheat was about 7.2 and 8.3 t/hm² in the experimental field in 2021 and 2022, respectively, where the amount values of straw were 12.9 and 15.4 t/hm², respectively. Two straw treatments were set: straw without returning to the field (S1) and straw full returning to the field (S2). The straw was removed from the field in the S1 treatment using manual harrowing. The straw was returned to the field in the S2 treatment using rotary tillage. Three tillage modes and land preparation were: integrated dryland biaxial rotary tillage (T1), dryland uniaxial rotary tillage + paddy field uniaxial rotary tillage (T2), and paddy field uniaxial rotary tillage (T3). Some parameters were then determined, including the tiller number, leaf area index, dry matter, grain yield, as well as the processing, appearance and eating quality of rice. The results showed that the rice yield increased by 4.54% to 5.45% ($P < 0.05$) under S2+T1 treatment, compared with the S1, whereas, the rice yield decreased by 1.77% to 2.41% and 4.11% to 6.48% ($P < 0.05$) under T2 and T3, respectively. The rice yield was ranked in the descending order of T2>T1>T3 under the S1 treatment, whereas, the order of T1>T2>T3 was found under the S2 treatment. The rice yield in T1 treatment was depended mainly on the panicles, dry matter accumulation, and harvest index. The total returning of wheat straw was reduced the amylose content, the area and degree of chalkiness for the better appearance quality, protein content, and taste value, compared with the S1. In addition, there was the increase in the peak viscosity and breakdown value of starch, as well as the gelatinization and palatability of rice under the S2. The chalkiness and the taste value were ranked in the descending order of T2>T3>T1, and T1>T2>T3, respectively. The taste value under the T1 increased by 3.36%-5.90%, 7.44%-11.30%, and 1.38%-4.65%, 6.28%-11.23%, respectively, compared with the T2 and T3. In summary, the T1 treatment was greatly contributed to synergistically improve the rice yield, appearance quality, nutritional quality, and taste value of machine-transplanted rice under the total wheat straw return. The finding can provide the data and theoretical support for the integrated single tillage under the full return of wheat straw to the field in the rice wheat double cropping area during mechanical transplanting.

Keywords: agricultural machinery; planting method; yield; quality; returning wheat straw to the field