

# “稻稻肥”模式下秸秆还田与耕作方式对晚稻产量及品质的影响

陈富贵<sup>1</sup>, 熊瑞<sup>2</sup>, 何静<sup>1</sup>, 周文涛<sup>1</sup>, 张玮<sup>1</sup>, 傅志强<sup>1\*</sup>

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南袁创超级稻技术有限公司, 湖南长沙 410000)

**摘要:** 探讨“稻稻肥”模式下秸秆还田与耕作方式对晚稻产量及其构成因素、稻米外观品质、加工品质和淀粉黏滞性 (RVA 谱) 特征值的影响, 以期为南方双季稻区高产优质栽培提供依据。基于 2017 年开始的长期定位试验, 采用裂区设计, 主区为紫云英+早、晚稻秸秆还田 (S) 与冬季空闲+早、晚稻秸秆不还田 (D), 副区为早稻旋耕晚稻旋耕 (RR)、早稻旋耕晚稻翻耕 (RT) 和早稻旋耕晚稻免耕 (RN)。2021—2022 年测定晚稻产量及其构成因素、稻米外观品质 (垩白粒率、垩白度)、加工品质 (糙米率、精米率、整精米率) 和淀粉黏滞性 (RVA 谱) 特征值。结果表明, 秸秆还田处理下, 2 a 平均产量较不还田处理提高 12.70% ~ 14.90%, 这主要得益于千粒重、每穗实粒数、结实率的提高; 同时, 秸秆还田处理改善了稻米外观品质 (降低垩白粒率、垩白度)、加工品质 (提高糙米率、精米率、整精米率) 和蒸煮食味品质 (提高最高黏度和崩解值, 降低消减值)。秸秆还田条件下, 早稻旋耕晚稻翻耕 (SRT) 处理在产量及稻米品质指标上综合表现较优, 其垩白度 2 a 均为最低 (分别为 1.32%、0.84%), 且具有最高的最高黏度和崩解值 (2 a 平均值分别为 3 496.34、1 461.34 cP), 以及最低的消减值 (2 a 平均值为 -462.83 cP)。综上所述, 在“稻稻肥”模式下, 秸秆还田配合早稻旋耕晚稻翻耕 (SRT) 能协同提高晚稻产量, 并优化稻米的外观、加工和蒸煮食味品质, 可作为该区域适宜的栽培模式。

**关键词:** 秸秆还田; 耕作方式; 稻米品质; 产量; 紫云英

**中图分类号:** S511.04; S318 **文献标识码:** B **文章编号:** 1005-3956(2026)01-0063-08

**DOI:** 10.16267/j.cnki.1005-3956.20241201.264

水稻作为一种重要的粮食作物, 在全球广泛种植, 世界上有近 50% 的人口以水稻作为主要粮食来源<sup>[1]</sup>。近年来, 绿肥配合水稻秸秆还田已成为稻田土壤改良的重要举措之一<sup>[2]</sup>。水稻秸秆是一种宝贵的生物质资源, 含有丰富的氮、磷、钾等营养元素, 其还田可以增加土壤肥力, 提高水稻产量<sup>[3]</sup>。紫云英因其固氮、活磷、富钾的特性, 长期翻压还田能够提高水稻土壤有机碳活性, 增加土壤养分, 为水稻高产稳产提供保障<sup>[4-5]</sup>。有研究指出, 紫云英与水稻秸秆协同还田能有效改善土壤碳氮比, 提高微生物活性, 有利于晚稻养分积累, 增加水稻产量<sup>[6-8]</sup>。耕作方式通过影响土壤质量和环境改变土壤微生物群落分布和养分组成, 进而影响水稻生长和产量<sup>[9]</sup>。例如, 徐尚起等<sup>[10]</sup>通过大田试验研究证实, 与旋耕处理相比, 翻耕处理更利于增加双季稻产量。李华兴等<sup>[11]</sup>的研究表明, 土壤免耕降低了水稻产量。而黄佑岗等<sup>[12]</sup>研究认为, 旋耕与翻耕处理对杂交水稻的产量无明显影响。朱利群等<sup>[13]</sup>则指出, 水稻产量受土壤耕作方式和秸秆还田等多种因素共同影响。此外, 有研究表明, 翻耕和秸秆还田的互作会提高水稻产量<sup>[14]</sup>。郭海斌<sup>[15]</sup>同

样发现土壤耕作和秸秆还田有利于提高微生物群体数量和土壤中的酶活性, 进而提高作物产量。

通过对稻谷口粮消费特征进行研究, 陈静等<sup>[16]</sup>发现, 人们对优质稻米的需求越来越大。已有研究表明, 稻米品质主要受自身遗传基因决定, 但是秸秆还田、耕作方式等环境因子也会对稻米品质产生重要影响<sup>[17-20]</sup>。紫云英和水稻秸秆联合还田有助于提高稻米品质<sup>[21]</sup>。有研究发现, 翻耕+秸秆还田能提高整精米率, 降低垩白粒率和垩白度<sup>[22]</sup>。周文涛等<sup>[23]</sup>也发现秸秆还田和早稻旋耕晚稻翻耕的互作提高了稻米的最高黏度和崩解值等。然而, 针对绿肥和水稻秸秆联合还田与不同耕作方式对水稻生长发育和稻米品质的影响, 前人的研究多聚焦于单一耕作方式或短期效果, 对多因素协同作用的长期效应研究较少。因此, 本试验以“紫云英—双季稻”种植模式为基

收稿日期: 2024-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2300305); 湖南省自然科学基金面上项目 (2021JJ30319)

作者简介: 陈富贵 (2000—), 男, 重庆开州人, 硕士。电话: 17830783903; E-mail: cfg920193722@163.com。

\* 通信作者。电话: 15084728868; E-mail: zqf\_cis@126.com。

础, 开展长期定位试验, 旨在探究在“稻稻肥”模式下秸秆还田与不同土壤耕作方式 (旋耕、翻耕和免耕) 对晚稻产量及其构成因素和稻米品质的影响, 以确定最合适的栽培模式, 为南方双季稻区晚稻高产、稳产和优质提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点设在湖南省浏阳市沿溪镇湖南农业大学浏阳基地, 该试验区域属于亚热带季风湿润气候, 水热资源丰富, 年平均气温 17 °C 左右, 年均日照时数 1 516.70 h, 年降雨量 1 680 mm, 无霜期 226 d。试验前耕层土壤理化性质: pH 值 6.56, 含有机质 24.79 g/kg、全氮 1.48 g/kg、全磷 0.52 g/kg、全钾 5.86 g/kg、速效钾 96.74 mg/kg、有效磷 62.02 mg/kg、碱解氮 153.71 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验地以紫云英 + 双季稻为基础, 于 2017 年开展定位试验。采用裂区试验, 以秸秆处理方

式为主区, 设紫云英 + 早、晚稻秸秆还田 (S, 后简称为秸秆还田) 和冬季空闲 + 早、晚稻秸秆不还田 (D, 后简称为秸秆不还田) 2 种方式; 以耕作方式为副区, 设早稻旋耕晚稻旋耕 (RR)、早稻旋耕晚稻翻耕 (RT) 和早稻旋耕晚稻免耕 (RN) 3 种耕作方式。共 6 个处理: 秸秆还田 + 早稻旋耕晚稻旋耕 (SRR)、秸秆还田 + 早稻旋耕晚稻翻耕 (SRT)、秸秆还田 + 早稻旋耕晚稻免耕 (SRN)、秸秆不还田 + 早稻旋耕晚稻旋耕 (DRR)、秸秆不还田 + 早稻旋耕晚稻翻耕 (DRT)、秸秆不还田 + 早稻旋耕晚稻免耕 (DRN)。翻耕与旋耕处理采用秸秆粉碎全量还田方式, 免耕处理则采用秸秆覆盖还田方式。每个大区面积为 105 m<sup>2</sup> (15 m × 7 m), 不设重复。旋耕处理使用旋耕机耕作, 耕作深度为 8 ~ 12 cm; 翻耕处理先采用铧式犁耕作 (耕作深度为 20 ~ 35 cm), 随后采用旋耕机打平稻田; 免耕处理在水稻移栽前放水泡田 3 ~ 7 d。2021—2022 年秸秆还田量如表 1 所示。

表 1 2021—2022 年试验田秸秆还田量

Table 1 Amount of straw returning in the experimental field from 2021 to 2022

年份 / 年	处理	t/hm <sup>2</sup>		
		紫云英还田量	早稻秸秆还田量	晚稻秸秆还田量
2021	SRR	7.94	6.50	8.70
	SRT	7.94	6.95	9.02
	SRN	7.94	5.84	7.62
2022	SRR	7.32	6.92	8.16
	SRT	7.32	6.81	8.66
	SRN	7.32	7.14	8.33

供试早稻品种为常规稻中嘉早 17, 晚稻品种为杂交稻泰优 390。2021 年, 早稻于 3 月 22 日播种, 7 月 12 日收获; 晚稻于 6 月 26 日播种, 10 月 19 日收获。2022 年, 早稻于 3 月 23 日播种, 7 月 17 日收获; 晚稻于 6 月 26 日播种, 10 月 20 日收获。早稻移栽密度为 25.00 万穴 /hm<sup>2</sup>, 每穴 4 苗; 晚稻移栽密度为 23.00 万穴 /hm<sup>2</sup>, 每穴 2 苗。各小区施肥、灌溉等田间管理方式一致。早稻施用尿素 120 kg/hm<sup>2</sup>、过磷酸钙 60 kg/hm<sup>2</sup>、氯化钾 120 kg/hm<sup>2</sup>; 晚稻施用尿素 150 kg/hm<sup>2</sup>、过磷酸钙 90 kg/hm<sup>2</sup>、氯化钾 120 kg/hm<sup>2</sup>; 氮肥和钾肥均以基肥、分蘖肥 8:2 的比例分 2 次施用, 磷肥作基肥一次性施用<sup>[24]</sup>。早、晚稻生长期间的水分管理均为前期浅水灌溉, 分蘖、分蘖盛期晒

田和后期干湿交替, 病、虫、草害防治按当地高产标准进行。

### 1.3 测试项目与方法

#### 1.3.1 产量测定

水稻成熟期, 在每个大区内按照 S 型 5 点取样法取 5 个 1 m<sup>2</sup> 的水稻样品用于测产, 利用 5T-70 型自净自排式脱粒机 (唐迪牌) 脱粒后测定稻谷重量及含水量, 按照 13.5% 标准含水量折算稻谷实际产量。每个大区连续调查 30 穴水稻的有效穗数并求平均数, 按平均数取 6 穴植株用于考种, 将水稻植株根、茎、叶、穗分离, 穗脱粒风干后测定实粒数、空瘪粒数、千粒重以及结实率。

#### 1.3.2 稻米外观和加工品质测定

依据国家《优质稻谷》标准 (GB/T 17891—2017,

下同)，测定垩白度、垩白粒率、糙米率、精米率、整精米率等指标。稻米外观品质（垩白粒率和垩白度）测定：选取晚稻精米样品3份，每份10g，称量时精确至0.01g，采用种子外观品质分析仪测定。稻米加工品质（糙米率、精米率和整精米率）测定：从去除杂质的晚稻稻谷样品中，选取试样3份，每份50g，称量时精确至0.01g；用砉谷机脱壳出糙，将糙米称重后计算糙米率；将糙米用精米机碾磨，去除糠层得到精米，将精米称重后计算精米率；整精米率采用种子外观品质分析仪扫描测定。

### 1.3.3 稻米淀粉黏滞性（RVA 谱）特征值测定

将晚稻精米碾成粉末状，过100目筛，随后称取3份米粉样品，每份3g，并与25g蒸馏水混合，称量时精确至0.01g。采用快速黏度分析仪测定稻米米粉最终黏度、最高黏度、热浆黏度、消减值、崩解值、糊化时间和糊化温度等RVA谱特征值。

### 1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2021进行数据整理和绘制图表，利用SPSS 26.0进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田与耕作方式对晚稻产量及其构成因素的影响

由表2可知，从产量来看，年份对产量

影响显著，秸秆还田和耕作方式处理对产量影响极显著。除2021年SRN处理的产量低于DRR处理外，秸秆还田条件下不同耕作方式处理的产量均高于秸秆不还田处理；2a秸秆还田处理的平均产量较秸秆不还田处理提高12.70%~14.90%。秸秆还田条件下，SRR和SRT处理较SRN处理的平均产量分别提高9.63%、9.37%；其中2021年SRR处理与SRN处理差异显著，2022年SRT处理与SRN处理差异显著。秸秆不还田条件下，2a均以DRR处理的产量最高；2021年DRT处理的产量最低，且与DRR处理差异显著；2022年DRN处理的产量最低，且显著低于DRR和DRT处理。

从产量构成因素来看，年份对千粒重、结实率和有效穗数影响极显著；秸秆还田对产量构成因素影响均极显著；耕作方式仅对有效穗数影响极显著；年份与耕作方式互作对有效穗数影响显著。在同一年份，秸秆还田（S）处理的千粒重、每穗实粒数、结实率均高于秸秆不还田（D）对应处理，而有效穗数低于秸秆不还田对应处理。2a秸秆还田处理的千粒重、每穗实粒数、结实率分别较秸秆不还田处理提高0.95%~5.24%、23.33%~28.27%、5.61%~6.71%，有效穗数较秸秆不还田处理降低13.43%~13.89%。

表2 秸秆还田与耕作方式对晚稻产量及其构成因素的影响

年份/年	处理	千粒重/g	每穗实粒数/粒	结实率/%	有效穗数/(万·hm <sup>2</sup> )	产量/(t·hm <sup>2</sup> )
2021	SRR	22.71 ± 0.40a	109.57 ± 3.40abc	67.15 ± 2.10a	450.65 ± 25.04c	8.50 ± 0.60a
	SRT	22.34 ± 0.43a	120.38 ± 9.31a	67.80 ± 4.61a	484.06 ± 28.91bc	8.13 ± 0.76ab
	SRN	22.77 ± 0.40a	117.82 ± 20.84ab	64.92 ± 3.11ab	392.21 ± 14.41d	7.20 ± 0.36bcd
	DRR	22.65 ± 0.23a	90.30 ± 9.15cd	61.39 ± 2.43b	506.09 ± 38.74b	7.57 ± 0.85abc
	DRT	22.24 ± 0.62a	96.75 ± 8.94bcd	64.66 ± 1.86ab	567.57 ± 28.87a	6.40 ± 0.44d
	DRN	22.29 ± 0.40a	84.08 ± 14.12d	63.21 ± 2.39ab	467.37 ± 14.46bc	6.77 ± 0.38cd
2022	SRR	22.10 ± 0.66a	111.39 ± 7.30a	80.09 ± 1.99a	399.27 ± 35.19b	8.23 ± 0.25ab
	SRT	21.98 ± 0.10a	115.99 ± 7.05a	79.88 ± 2.67a	393.86 ± 19.62b	8.56 ± 0.17a
	SRN	21.20 ± 1.15ab	98.49 ± 5.88ab	77.61 ± 2.11a	429.98 ± 47.95ab	8.06 ± 0.10bc
	DRR	20.94 ± 0.81ab	87.05 ± 5.05b	74.45 ± 3.27a	468.43 ± 47.85ab	7.72 ± 0.24cd
	DRT	20.04 ± 0.36b	91.30 ± 3.36b	74.12 ± 3.05a	506.78 ± 39.88a	7.39 ± 0.32d
	DRN	21.05 ± 1.15ab	85.88 ± 22.05b	74.07 ± 6.61a	437.66 ± 69.10ab	6.94 ± 0.17e
F 值						
	年份 (Y)	35.69**	1.60	117.00**	9.61**	6.84*
	秸秆还田 (S)	9.13**	36.86**	15.10**	29.14**	43.41**
	耕作方式 (T)	1.13	1.66	0.77	6.83**	8.75**

续表

年份 / 年	处理	千粒重 / g	每穗实粒数 / 粒	结实率 / %	有效穗数 / (万 · hm <sup>2</sup> )	产量 / (t · hm <sup>2</sup> )
	Y × S	4.09	0.43	0.43	0.11	0.12
	Y × T	0.08	0.69	0.35	3.45*	2.38
	S × T	1.11	0.25	0.66	1.77	2.50
	Y × S × T	2.39	1.16	0.14	1.45	1.74

注: 同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*, \*\* 分别表示因子效应在 0.05、0.01 水平上影响显著。下同。

## 2.2 秸秆还田与耕作方式对晚稻稻米外观品质的影响

由表 3 可知, 年份、秸秆还田对垩白粒率和垩白度影响极显著; 耕作方式、年份与耕作方式互作对垩白粒率影响极显著, 对垩白度影响显著; 年份与秸秆还田互作对垩白粒率影响显著; 秸秆还田与耕作方式互作对垩白粒率影响极显著。同一年份秸秆还田处理的平均垩白粒率和垩白度均低于秸秆不还田处理, 2 a 趋势一致, 说明秸秆还田能改善稻米外观品质。从垩白粒率来看, 秸秆还田条件下表现为  $SRR < SRT < SRN$ , 其中 SRR 处理与 SRN 处理差异显著; 秸秆不还田条件下表现为  $DRR < DRN < DRT$ 。从垩白度来看, 秸秆还田条件下, 均以 SRT 处理的垩白度最低 (1.32% 和 0.84%), 该处理 2021 年分别较 SRR 和 SRN 处理显著降低 61.74%、降低 45.45%, 2022 年分别较 SRR 和 SRN 处理降低 40.00%、35.88%; 秸秆不还田条件下, 2 a 不同耕作方式间的垩白度差异均不显著。

## 2.3 秸秆还田与耕作方式对晚稻稻米加工品质的影响

由表 4 可知, 年份对整精米率影响极显著; 秸秆还田对精米率影响极显著, 对整精米率影响显著; 年份、秸秆还田与耕作方式三者互作对精米率影响显著。同一年份秸秆还田处理的平均糙米率、精米率和整精米率均高于秸秆不还田处理。在秸秆还田条件下, 2 a 相同耕作方式处理的精米率和整精米率均高于秸秆不还田条件下的对应处理; 相同年份免耕处理的糙米率、精米率和整精米率高于旋耕和翻耕处理。2021—2022 年, 各处理的糙米率和整精米率差异不显著, 但秸秆还田明显提高了精米率, 如 2021 年 SRN 处理的精米率较 DRN 处理显著提高 19.25%, 2022 年 SRR 处理的精米率较 DRR 处理显著提高 4.68%。

## 2.4 秸秆还田与耕作方式对晚稻稻米淀粉黏滞性 (RVA 谱) 特征值的影响

由表 5 可知, 年份对稻米所有 RVA 谱特征

表 3 秸秆还田与耕作方式对晚稻稻米外观品质的影响

Table 3 Effects of straw returning and tillage methods on the grain appearance quality of late rice

年份 / 年	处理	垩白粒率 / %	垩白度 / %
2021	SRR	4.68 ± 0.08c	3.45 ± 1.41ab
	SRT	5.37 ± 0.54c	1.32 ± 0.08c
	SRN	9.97 ± 2.96ab	2.42 ± 0.36bc
	DRR	7.01 ± 2.06bc	4.33 ± 1.35a
	DRT	12.52 ± 2.05a	3.54 ± 0.56ab
2022	DRN	11.74 ± 0.31a	3.04 ± 0.22ab
	SRR	4.06 ± 0.06d	1.40 ± 0.47ab
	SRT	4.63 ± 0.86cd	0.84 ± 0.10b
	SRN	5.34 ± 0.60bc	1.31 ± 0.26ab
	DRR	5.02 ± 0.96bcd	1.46 ± 0.56ab
F 值	DRT	6.98 ± 0.75a	1.81 ± 0.50a
	DRN	6.01 ± 0.17ab	1.53 ± 0.13ab
年份 (Y)		55.01**	54.97**
秸秆还田 (S)		34.45**	14.27**
耕作方式 (T)		17.83**	4.62*
Y × S		7.92*	3.56
Y × T		6.70**	3.70*
S × T		6.64**	3.06
Y × S × T		1.90	0.31

值影响均极显著; 秸秆还田对最高黏度、消减值和崩解值影响极显著; 耕作方式仅对消减值影响极显著; 年份与秸秆还田互作对最终黏度、最高黏度和热浆黏度影响显著。同一年份秸秆还田处理的平均最高黏度和崩解值均高于秸秆不还田处理, 而消减值低于秸秆不还田处理。从最高黏度和崩解值来看, 2 a 秸秆还田下不同耕作方式年度间变化趋势一致, 均以 SRT 处理最高 (2 a 平均值分别为 3 496.34、1 461.34 cP), 表现为  $SRT > SRR > SRN$ ; 秸秆不还田条件下, 不同耕作方式间无明显规律。从消减值来看, 2 a 秸秆还田条件下, 均以 SRT 处理最低 (2 a 平均为 -462.83 cP), 较 SRR 处理的显著降低 24.03% ~

28.29%；秸秆不还田条件下，不同耕作方式间差异不显著。最终黏度、热浆黏度、糊化时间、糊化温度在秸秆还田或秸秆不还田条件下，不同耕作方式间均差异不显著。

表 4 秸秆还田与耕作方式对晚稻稻米加工品质的影响

Table 4 Effects of straw returning and tillage methods on the grain processing quality of late rice

年份 / 年	处理	糙米率 / %	精米率 / %	整精米率 / %
2021	SRR	71.47 ± 0.50a	60.28 ± 0.65ab	53.39 ± 3.59a
	SRT	74.99 ± 1.80a	62.94 ± 1.14a	55.82 ± 2.14a
	SRN	75.33 ± 2.37a	64.99 ± 1.50a	58.76 ± 1.22a
	DRR	75.39 ± 1.73a	59.59 ± 5.49ab	51.66 ± 6.45a
	DRT	69.55 ± 5.22a	58.73 ± 4.70ab	51.12 ± 7.50a
	DRN	69.91 ± 8.18a	54.50 ± 3.96b	49.96 ± 2.65a
2022	SRR	70.08 ± 1.06a	61.79 ± 1.61a	50.06 ± 2.97a
	SRT	71.13 ± 1.94a	61.32 ± 1.04ab	49.81 ± 2.93a
	SRN	71.49 ± 0.65a	61.89 ± 0.75a	50.20 ± 1.49a
	DRR	72.22 ± 1.25a	59.03 ± 0.56b	48.07 ± 5.52a
	DRT	71.37 ± 1.19a	58.87 ± 1.90b	48.98 ± 1.60a
	DRN	68.95 ± 6.10a	60.68 ± 1.75ab	45.34 ± 4.70a
<i>F</i> 值				
	年份 (Y)	2.56	0.23	12.08**
	秸秆还田 (S)	1.00	17.16**	7.93*
	耕作方式 (T)	0.18	0.06	0.07
	Y × S	0.91	2.90	0.86
	Y × T	0.14	0.57	0.50
	S × T	3.27	1.87	1.27
	Y × S × T	0.84	3.61*	0.26

表 5 秸秆还田与耕作方式对晚稻稻米淀粉黏滞性 (RVA 谱) 特征值的影响

Table 5 Effects of straw returning and tillage methods on the starch viscosity (RVA profile) characteristics values of late rice grains

年份 / 年	处理	最终黏度 / cP	最高黏度 / cP	热浆黏度 / cP	消减值 / cP	崩解值 / cP	糊化时间 / min	糊化温度 / °C
2021	SRR	3 331.00a	3 728.00a	2 032.00b	-397.00ab	1 696.00a	5.84a	84.20b
	SRT	3 348.67a	3 858.00a	2 108.33ab	-509.33c	1 749.67a	5.80a	84.77ab
	SRN	3 283.67a	3 724.67a	2 153.67ab	-441.00bc	1 571.00a	5.89a	85.05ab
	DRR	3 360.33a	3 731.00a	2 212.67a	-370.67ab	1 518.33a	5.82a	84.97ab
	DRT	3 409.33a	3 820.67a	2 217.33a	-411.33ab	1 603.33 a	5.96a	85.30a
	DRN	3 275.33a	3 620.00a	2 113.33ab	-344.67a	1 506.67a	5.93a	85.27a
2022	SRR	2 728.67a	3 064.33a	1 964.00a	-335.67ab	1 100.33ab	6.29a	81.00a
	SRT	2 718.33a	3 134.67a	1 961.67a	-416.33c	1 173.00a	6.33a	81.30a
	SRN	2 563.00ab	2 924.00ab	1 915.33a	-361.00bc	1 008.67abc	6.62a	81.82a
	DRR	2 467.67b	2 745.33b	1 906.67a	-277.67a	838.67c	6.69a	81.27a
	DRT	2 417.00b	2 737.67b	1 706.00a	-320.67ab	1 031.67abc	6.71a	81.63a
	DRN	2 461.67b	2 747.33b	1 880.33a	-285.67a	867.00bc	6.13a	81.22a
<i>F</i> 值								
	年份 (Y)	208.82**	216.27**	39.98**	34.52**	136.40**	43.68**	449.41**
	秸秆还田 (S)	3.27	8.75**	0.17	30.68**	9.03**	0.77	2.28
	耕作方式 (T)	0.91	1.90	0.20	9.86**	2.95	0.14	3.09
	Y × S	5.36*	4.67*	6.31*	0.01	0.25	0.05	2.28
	Y × T	0.12	0.15	1.11	0.23	0.13	0.48	0.11
	S × T	0.16	0.13	1.04	1.52	0.44	2.90	1.78
	Y × S × T	0.56	0.54	1.88	0.33	0.08	2.67	0.28

### 3 讨论

#### 3.1 “稻稻肥”模式下秸秆还田与耕作方式对水稻产量及其构成因素的影响

研究表明, 冬种紫云英+水稻秸秆还田处理的水稻产量明显高于冬季空闲+水稻秸秆不还田处理<sup>[25-27]</sup>。本研究发现, 在对应耕作方式下, 2 a 秸秆还田处理的产量比秸秆不还田处理高 12.70% ~ 14.90%。其可能原因, 一方面是联合还田物料投入量大, 紫云英和水稻秸秆为水稻提供充足的养分, 进而提高了水稻产量<sup>[28]</sup>; 另一方面是秸秆还田处理可以提高土壤微生物群落结构多样性, 提高了参与秸秆腐解的相关酶活性, 加速了秸秆的腐解速率, 使得土壤更快、更多地释放养分供植物吸收利用, 从而增加作物产量<sup>[29-30]</sup>。2021年秸秆还田条件下免耕处理 (SRN) 的产量低于部分秸秆不还田 (如 DRR) 处理, 这与前人的研究结果不一致<sup>[31]</sup>。该差异可能与植株生长发育有关, 秸秆还田条件下免耕处理的有效穗数较少, 进而影响水稻产量; 同时, 长期免耕提高了土壤容重, 土壤孔隙变小, 导致土壤中养分输送受到限制, 进一步降低了水稻产量<sup>[32]</sup>。2021—2022年的秸秆不还田+早稻旋耕晚稻免耕 (DRN) 处理的水稻产量处于较低的水平, 一方面是由于冬季空闲和秸秆不还田处理缺乏碳输入, 土壤有机质含量低、养分有效性不均匀, 致使水稻生长后期缺乏养分<sup>[33]</sup>; 另一方面是长期免耕处理会提高土壤紧实度和土壤容重, 导致土壤板结, 影响水稻根系向下生长并汲取养分, 进而降低水稻产量<sup>[34]</sup>。本试验结果表明, 在秸秆还田条件下, 旋耕与翻耕处理的水稻产量均高于免耕处理, 这是因为旋耕与翻耕处理使秸秆深入土层, 增加了土壤有机质, 改善了土壤结构和肥力水平。汤军等<sup>[35]</sup>研究表明, 与浅旋耕处理相比, 翻耕处理对机插秧条件下双季水稻产量并无显著影响。唐海明等<sup>[36]</sup>研究也认为, 秸秆还田条件下翻耕与旋耕处理之间的晚稻产量差异不显著。本研究表明, 在秸秆还田条件下, 旋耕与翻耕处理间的水稻产量差异不显著, 与上述研究结果相似。同时, 本试验发现秸秆还田处理对水稻生长发育的影响表现为抑制了有效穗数的增加, 但提高了千粒重、每穗实粒数和结实率。这主要是因为秸秆还田早期会阻碍水稻幼苗生长, 并与水稻争

氮, 抑制晚稻分蘖的发生<sup>[37-38]</sup>。随着秸秆腐解及养分释放, 抑制作用逐步转为促进作用, 从而利于晚稻中后期的生长<sup>[39-40]</sup>。

#### 3.2 “稻稻肥”模式下秸秆还田与耕作方式对稻米品质的影响

稻米品质决定稻米价值, 其形成机理受到秸秆还田和耕作方式等环境因素的影响<sup>[17-20]</sup>。本试验表明, 秸秆还田处理对稻米加工、外观以及蒸煮食味品质均有改善作用, 这与前人的研究结果相似<sup>[41-43]</sup>, 其可能与秸秆还田处理影响籽粒灌浆的碳氮物质供应和灌浆动态等因素有关。不同品质指标受耕作方式的影响程度各异, 本研究中, 秸秆还田条件下, 翻耕处理较免耕处理更有利于降低垩白粒率和垩白度, 这与易镇邪等<sup>[44]</sup>研究结果相同; 秸秆不还田条件下, 旋耕处理更有利于降低稻米垩白粒率, 这可能是因为旋耕处理有利于水稻根系的生长, 使得灌浆前期源库比较高, 进而降低稻米垩白粒率<sup>[45]</sup>。本试验结果表明, 旋耕处理 (RR) 下稻米的垩白粒率相对于免耕处理 (RN) 有所降低, 且年份与耕作方式互作对垩白粒率的影响极显著, 说明旋耕处理有利于改善稻米外观品质, 但年份间可能存在较大差异; 另外, 秸秆还田条件下, 翻耕处理的垩白度较旋耕和免耕处理均有所降低, 这是因为翻耕处理打破了耕作层和犁底层, 同时秸秆还田有利于水稻植株稳定生长, 进而降低了稻米垩白度<sup>[46]</sup>。本研究中, 秸秆还田条件下免耕处理的糙米率、精米率和整精米率高于旋耕和翻耕处理, 说明免耕处理更有利于提高稻米加工品质, 这与前人研究结果相同<sup>[18]</sup>。这可能是因为免耕处理在秸秆还田条件下的叶片叶绿素含量高, 光合能力强, 能更好地协调源库关系<sup>[47]</sup>。在稻米淀粉黏滞性 (RVA 谱) 特征值方面, 较大的崩解值、最高黏度与较小的消减值、糊化时间的稻米具有更好的蒸煮食味品质<sup>[48-49]</sup>。本试验结果表明, 秸秆还田条件下, 与旋耕和免耕处理相比, 翻耕处理更有利于提高最高黏度和崩解值、降低消减值, 这可能是因为翻耕处理下, 秸秆均匀分布在耕作层, 有足够的养分可供水稻植株吸收, 进而通过调节籽粒内源激素含量及相关酶活性, 最终改善稻米蒸煮食味品质<sup>[50-51]</sup>。

### 4 结论

本研究表明, 在“稻稻肥”模式下, 秸

秆还田处理能提高晚稻产量，并改善稻米的加工品质、外观品质及蒸煮食味品质。在不同耕作方式中，秸秆还田配合早稻旋耕晚稻翻耕（SRT）处理在提升产量、降低垩白粒率和垩白度、提高最高黏度与崩解值、降低消减值方面表现较好，有利于实现晚稻的高产稳产与品质优化。综合来看，SRT处理是适用于南方双季稻区的一种高产优质栽培模式。

### 参考文献：

- [1] Zhao W X, Chou J M, Li J N, et al. Impacts of extreme climate events on future rice yields in global major rice-producing regions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19 (8) : 4437.
- [2] 左琴, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作方式对黄壤区水稻产量和养分吸收及土壤养分含量的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54 (4) : 881-888.
- [3] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26 (9) : 30-41.
- [4] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (12) : 2115-2126.
- [5] 胡中泽, 衣政伟, 王安, 等. 紫云英不同时期还田部分替代化肥对氨挥发及水稻产量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37 (5) : 1160-1166.
- [6] Ansari M A, Choudhury B U, Layek J, et al. Green manuring and crop residue management: effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: 105318.
- [7] 王吕, 崔月贞, 吴玉红, 等. 绿肥秸秆协同还田下氮肥减量的增产和培肥短期效应[J]. *作物学报*, 2022, 48 (4) : 952-961.
- [8] 刘颖颖, 卜容燕, 唐杉, 等. 连续秸秆-紫云英协同还田对双季稻产量、养分积累及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (6) : 1008-1016.
- [9] Gura I, Mkeni P N S, Du Preez C C, et al. Dataset on the interaction effects of tillage, crop rotations and residue management on overall soil quality[J]. *Data in Brief*, 2022, 43: 108456.
- [10] 徐尚起, 张明园, 孙国峰, 等. 应用耕作指数评价耕作措施对双季稻田土壤质量的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44 (19) : 3999-4006.
- [11] 李华兴, 卢维盛, 刘远金, 等. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12 (4) : 553-556.
- [12] 黄佑岗, 冯跃华, 许桂玲, 等. 不同耕作方式对杂交籼稻生长特性和产量形成的影响[J]. *中国稻米*, 2017, 23 (4) : 139-143.
- [13] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42 (1) : 81-85.
- [14] 孙国峰, 陈留根, 刘红江, 等. 连续翻耕秸秆粉碎还田土壤物理性状及水稻产量[J]. *中国稻米*, 2017, 23 (4) : 99-101, 106.
- [15] 郭海斌. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米一年两熟农田土壤生物性状和作物生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [16] 陈静, 唐振闯, 程广燕. 我国稻谷口粮消费特征及其趋势预测[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41 (4) : 108-116.
- [17] 刘丽华, 秦猛, 翟玲霞, 等. 秸秆还田形态和还田量对水稻氮素积累与转运及产量品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41 (3) : 218-228.
- [18] 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.
- [19] Wu T D, Li C, Xing X, et al. Straw return and organic fertilizers instead of chemical fertilizers on growth, yield and quality of rice[J]. *Earth Science Informatics*, 2022, 15 (3) : 1363-1369.
- [20] Singh H, Buttar G S, Brar A S, et al. Crop establishment method and irrigation schedule effect on water productivity, quality, economics and energetics of aerobic direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Paddy and Water Environment*, 2017, 15 (1) : 101-109.
- [21] 周影, 王琳, 魏启舜, 等. 紫云英联合稻秸还田下化肥减量对水稻生长、产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (1) : 149-154.
- [22] 刘世平. 稻麦两熟制不同耕作栽培方式对农田生态环境和周年生产力的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
- [23] 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.
- [24] 熊瑞, 张玮, 钟康裕, 等. 秸秆还田与轮耕对双季稻土壤物理特性及碳氮含量的影响[J]. *河南农业科学*, 2023, 52 (5) : 81-90.
- [25] Zhou X, Liao Y L, Lu Y H, et al. Management of rice straw with relay cropping of Chinese milk vetch improved double-rice cropping system production in Southern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19 (8) : 2103-2115.
- [26] Yang L, Zhou X, Liao Y L, et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake[J]. *Crop Science*, 2019, 59 (2) : 749-759.
- [27] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (23) : 157-163.
- [28] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34 (13) : 3779-3787.
- [29] Ma Q Y, Li J W, Aamer M, et al. Increasing methane (CH<sub>4</sub>) emissions and altering rhizosphere microbial diversity in paddy soil by combining Chinese milk vetch and rice straw[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9653.
- [30] 周国朋. 紫云英-稻草共同还田的协同效应及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [31] 李国齐, 吴汉. 免耕与秸秆还田对直播稻产量及水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40 (9) : 945-951.
- [32] 陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 等. 耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45 (3) : 1702-1712.
- [33] 王幸, 邢兴华, 徐泽俊, 等. 耕作方式和秸秆还田对黄淮海夏大豆产量和土壤理化性状的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39 (6) : 834-841.
- [34] Brennan J, Hackett R, McCabe T, et al. The effect of tillage system and residue management on grain yield and nitrogen use

- efficiency in winter wheat in a cool Atlantic climate[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 54: 61-69.
- [35] 汤军, 黄山, 谭雪明, 等. 不同耕作方式对机插双季水稻产量的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36 (5): 996-1001.
- [36] 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.
- [37] 金鑫, 蔡林运, 李刚华, 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013 (5): 80-85.
- [38] 杨思存, 霍琳, 王建成. 秸秆还田的生化他感效应研究初报 [J]. *西北农业学报*, 2005, 14 (1): 52-56.
- [39] 陈新红, 叶玉秀, 许仁良, 等. 小麦秸秆还田量对水稻产量和品质的影响 [J]. *作物杂志*, 2009 (1): 54-57.
- [40] 张洪熙, 赵步洪, 杜永林, 等. 小麦秸秆还田条件下轻简栽培水稻的生长特性 [J]. *中国水稻科学*, 2008, 22 (6): 603-609.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 秦猛, 崔士泽, 何孝东, 等. 秸秆膨化还田对水稻产量、品质及土壤养分的影响 [J]. *作物杂志*, 2022 (6): 159-166.
- [44] 易镇邪, 朱伟文, 周文新, 等. 土壤耕作方式对湘南晚稻产量形成、米质与水分利用效率的影响 [J]. *作物研究*, 2018, 32 (2): 97-101.
- [45] 陶龙兴, 王熹, 廖西元, 等. 灌浆期气温与源库强度对稻米品质的影响及其生理分析 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (4): 647-652.
- [46] 董爱玲. 稻油免耕复种对土壤理化性状和水稻生长特性的影响 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [47] 吴建富, 潘晓华, 石庆华. 免耕抛栽对水稻产量及其源库特性的影响 [J]. *作物学报*, 2009, 35 (1): 162-172.
- [48] 胡培松, 翟虎渠, 唐绍清, 等. 利用 RVA 快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究 [J]. *作物学报*, 2004, 30 (6): 519-524.
- [49] 胡中娥, 李健, 李吉, 等. 不同籼稻品种杂交一代 RVA 谱特征值与食味品质相关性研究 [J]. *中国粮油学报*, 2022, 37 (8): 44-48.
- [50] 周天阳. 栽培措施对超级稻产量和品质的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [51] 熊溢伟. 氮肥对不同的水稻品种根系形态生理与产量的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2015.

## Effects of Straw Returning and Tillage Methods on Late Rice Yield and Quality Under the "Rice-Rice-Fertilizer" Mode

Chen Fugui<sup>1</sup>, Xiong Rui<sup>2</sup>, He Jing<sup>1</sup>, Zhou Wentao<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>, Fu Zhiqiang<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Yuan Chuang Super Rice Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of straw returning and tillage methods on the yield and yield components of late rice and rice grain appearance quality, processing quality, and starch viscosity (RVA profile) characteristics values under the "rice-rice-fertilizer" mode, aiming to provide references for high-yield and high-quality cultivation in the double-cropping paddy area of southern China. On the basis of the long-term positioning experiment started in 2017, a split-plot design was adopted. The main plots were straw returning with Chinese milk vetch + double rice (S) and no straw returning following winter fallow + double rice (D), and the sub-plots were early rice rotary tillage + late rice rotary tillage (RR), early rice rotary tillage + late rice plowing (RT), and early rice rotary tillage + late rice no tillage (RN). The yield and yield components of late rice, as well as the rice grain appearance quality (chalky grain rate and chalkiness degree), processing quality (brown rice rate, milled rice rate, and head rice rate), and starch viscosity (RVA profile) characteristic values were determined from 2021 to 2022. The results showed that compared with that under no straw returning, the two-year average yield of rice increased by 12.70%~14.90% under straw returning, which was mainly due to the increases in 1 000-grain weight, number of filled grains per panicle, and seed setting rate. Moreover, straw returning improved the appearance quality (reducing the chalky grain rate and chalkiness degree), processing quality (increasing the brown rice rate, milled rice rate, and head rice rate), and cooking and eating quality (increasing the maximum viscosity and breakdown viscosity and reducing the setback viscosity) of rice grains. The straw returning combined with early rice rotary tillage + late rice plowing (SRT) treatment had better comprehensive performance in yield and grain quality indexes. This treatment had the lowest chalkiness degree in both years (1.32% and 0.84% respectively), the highest maximum viscosity and breakdown viscosity (two-year average values of 3 496.34 cP and 1 461.34 cP, respectively), and the lowest setback viscosity (two-year average value of -462.83 cP). In summary, under the "rice-rice-fertilizer" mode, the SRT treatment can synergistically improve the yield of late rice and optimize the appearance, processing, and cooking and eating quality of rice grains, serving as a suitable cultivation mode in this area.

**Key words:** straw returning; tillage methods; grain quality; yield; Chinese milk vetch