

不同耕播方式对秸秆全量还田下 麦茬直播稻生长和产量的影响

卫云飞 李猛 季新 刘娟 王付娟 刘秋员

(信阳市水稻遗传改良与生理生态重点实验室/信阳市优质稻米工程技术研究中心/信阳农林学院农学院, 464000, 河南信阳)

摘要 为提高早直播水稻耕播质量, 实现早直播水稻的高产稳产, 在 2020 和 2021 年探究了秸秆全量还田下双轴旱地旋耕条播 (T1)、单轴旱地旋耕条播 (T2) 和免耕撒播方式 (T3) 对早直播水稻生长和产量的影响。结果表明, 在水稻各主要生育时期, 土壤容重均以 T1 处理最低, T3 处理最高, 而土壤孔隙度则以 T1 处理最高, T3 处理最低。在水稻生长方面, 与 T2 和 T3 处理相比, T1 处理显著改善了水稻的根系氧化力, 促进了分蘖的发生, 同时 T1 处理下地上部关键时期的叶面积指数和干物质积累量 and 主要时期的光合势和群体生长率均提高。在产量及其构成因素方面, 与 T2 和 T3 处理相比, T1 处理的有效穗数和群体颖花量显著增加, 穗粒数略有增加, 但千粒重和结实率无显著差异, 使得 2 年水稻产量均呈现 $T1 > T2 > T3$, 且各处理间差异显著。综上所述, 在秸秆全量还田条件下, 采用双轴旱地旋耕条播方式有利于改善土壤性状, 增加根系活力, 从而促进早直播稻的高产稳产。

关键词 耕播方式; 秸秆还田; 早直播; 产量; 水稻

水稻是我国主要的粮食作物之一, 稻谷产量占我国粮食总产量的 30% 以上^[1]。持续的人口和消费增长表明, 到 2030 年我国将需要增加约 20% 的大米产量才能满足国内需求^[2]。我国水稻种植主要为移栽和直播 2 种方式。相较于移栽方式, 直播方式因其可减少农业用水量^[3]、降低劳动力需求^[4]和稻田碳排放低^[5]等优点而呈现面积逐步扩大之势。其中, 相较于水直播 (需要灌水旋耕、整平、放水沉实和耙除堆积秸秆等过程), 旱直播因其早旋整地后直接播种上水的轻简化特点更受农民喜爱, 其种植面积逐渐增加^[6-7]。但在农耗时间短、秸秆还田量大以及耕播天气不佳等基本情况下^[8-9], 免耕撒播、单轴旱旋条播等传统的旱直播耕播方式均趋于半粗放化或粗放化, 旱直播稻生长早期多处于逆境中, 不仅不利于旱直播稻的早期生长, 且往往导致旱直播稻产量不高且不稳^[10]。因此, 改善并提高旱直播稻的耕播质量, 特别是耕整地质量对旱直播的稳产高产具有重要意义。

为改善并提高旱直播稻的耕播质量, 前人在播期、播量和耕整地方式等方面进行了大量研究。王文霞等^[11]和姚义等^[12]研究表明, 适度早播能够提高

旱直播水稻的产量。吴培等^[13]研究表明, 旱直播稻在直播密度为 180 万株/hm² 的条件下能够获得较好的产量。孙永健等^[14]研究认为, 通过调墒和 2 次旋耕能够较好地改善耕整地质量和旱直播水稻产量。近年来, 随着直播机械的研制, 以双轴旋耕为代表的新型耕整地机械不断发展^[15], 前人对双轴旋耕整地的特征特性进行了研究。李绍平等^[16]研究认为, 双轴旋耕旱整地可通过提高旱直播稻穗粒数和群体颖花量来提高水稻库容, 并促进了旱直播灌浆期的光合物质生产能力, 从而实现了较高的产量。赵凌天等^[17]比较了不同耕播方式对小麦产量和经济效益的影响, 其结果表明双轴分层旋耕条播模式作业效率较高, 出苗率良好, 小麦平均产量可达 9.7t/hm²。但目前关于双轴旋耕在水稻上的效果多基于水稻地上部生长方面, 而在稻麦轮作系统秸秆全量还田条件下, 基于土壤—根系—地上部生长的情况来比较不同耕播方式间的特征特性的研究较少。因此, 本试验系统比较了免耕撒播、单轴旱地旋耕条播和双轴旱地旋耕条播 3 种不同耕播方式下旱直播稻地上和地下特征特性差异, 为旱直播实现高产稳产栽培选择合适的耕播方式提供理论依据

作者简介: 卫云飞, 研究方向为水稻耕作栽培, E-mail: feige9802@126.com

刘秋员为通信作者, 研究方向水稻优质高产高效栽培技术与应用, E-mail: liuqy@xyafu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32201701); 河南省科技攻关计划项目 (222102110129); 信阳市创新应用专项 (20210006); 信阳农林学院科技创新团队 (KJCXTD-202006)

收稿日期: 2023-02-12; 修回日期: 2023-02-27; 网络出版日期: 2023-03-28

和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

试验于 2020 和 2021 年在河南省信阳市平桥区甘岸镇二郎村进行。试验田前茬为小麦(产量约 6.8t/hm²)，土壤类型为黏壤土，0~20cm 土壤含总氮 0.45g/kg、有效磷 23.23mg/kg、有效钾 74.32mg/kg。

供试水稻为迟熟中粳品种南粳 9108。供试旋耕机具为旱地双轴旋耕机(1GM-210)和旱地单轴旋耕机(1GQN-200ZG)。速效尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12.5%)和氯化钾(K₂O 60%)均在当地化肥销售点购买。

1.2 试验设计

试验在同一田块内进行，在小麦秸秆全量还田条件下设计 3 种耕播方式处理，分别为双轴旱地旋耕条播处理(T1)、单轴旱地旋耕条播处理(T2)和免耕撒播处理(T3)。各处理水稻播种量一致，均为 105kg/hm²，2 年播种日期均为 6 月 15 日。其中，T1 和 T2 处理分别选用 1GM-210 型单轴旋耕机械和 1GQN-200ZG 型双轴旋耕机械进行旋耕整地后，采用人工播种的形式进行旱条播，行距均为 30cm；T3 处理在小麦收获且秸秆还田后采用人工撒播的方式进行播种。各处理设 3 个田间重复，各重复面积 300m²(10m×30m)，共计 9 个小区。重复间起埂，并用黑色塑料薄膜覆盖埂体，保证各小区独立排灌。

所有处理的肥料均统一施用，氮肥(N 270kg/hm²)按基肥(30%)、分蘖肥(30%)、促花肥(20%)和保花肥(20%)分次施用，基肥于旋耕整地前 1d 施用，分蘖肥、促花肥和保花肥分别于播种后 20、60 和 75d 施用；磷(P₂O₅ 130kg/hm²)、钾肥(K₂O 270kg/hm²)均于播种前 1d 一次性基施。水分和病虫草害等田间管理按照当地旱直播高产栽培要求实施。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤容重和孔隙度 在水稻分蘖中期(mid-tillering, MT)、拔节期(jointing stage, JT)、抽穗期(heading stage, HT)和成熟期(maturity, MA)，采用环刀法^[18]测定 0~20cm 土层土壤容重，并取 5 个土样在烘箱中烘干至恒重，测定干基容重。土壤孔隙度(%)=93.947-32.995×D，式中，

D 为土壤容重(g/cm³)。

1.3.2 根系氧化力 在分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期测定水稻根系氧化力(root oxidation activity, ROA)。用土壤取样器挖出 3 块土壤(20cm×20cm×20cm)，再使用液压喷雾器小心地从根部去除土壤和碎屑后，按照 Wang 等^[19]描述的方法，通过测定 1-萘胺的氧化程度测定根系氧化力。

1.3.3 茎蘖动态、叶面积和干物重 各小区选定 3 个观察点，T1 和 T2 处理选取连续 1m 的双行作为一个观察点，T3 处理选取 1m×1m 的面积作为一个观察点。在分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期调查茎蘖数，并按照各处理下每米长度的平均茎蘖数(T1 和 T2 处理)和每平方米的平均茎蘖数(T3 处理)，分别取 10cm 长度和 30cm×30cm 的代表性植株，按照比叶重法^[20]测定叶面积，并将各植株全株在 75℃下烘干至恒重后测定整株干物重。根据吴培等^[13]的方法计算光合势和群体生长率。

1.3.4 产量及其构成因素 收获前，各小区选取 3 个调查点调查有效穗数，T1 和 T2 处理每点调查连续 5 行，每行 2m，T3 处理每点调查 1m²(1m×1m)；各小区取 5 个样点，每个样点 20 株，调查穗粒数和结实率。以 1000 粒样本(干种子)称质量，重复 3 次(误差≤0.05g)，计算千粒重。成熟期各小区收获 10m²，晒干后折算产量(含水率 14.5%)。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2013 进行数据整理和图表绘制，运用 SPSS 18.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕播方式对土壤容重与孔隙度的影响

如表 1 所示，随着水稻生育期的推进，稻田土壤容重逐渐增加，土壤孔隙度逐渐降低。相较于水稻拔节期、抽穗期和成熟期，分蘖中期的土壤容重最低，孔隙度最高。不同耕播方式对水稻不同生育时期的土壤容重和孔隙度影响极显著。在水稻各主要生育时期，土壤容重均以 T1 处理最低，T3 处理最高，而土壤孔隙度则以 T1 处理最高，T3 处理最低，2 年规律一致。

2.2 不同耕播方式对根系氧化力的影响

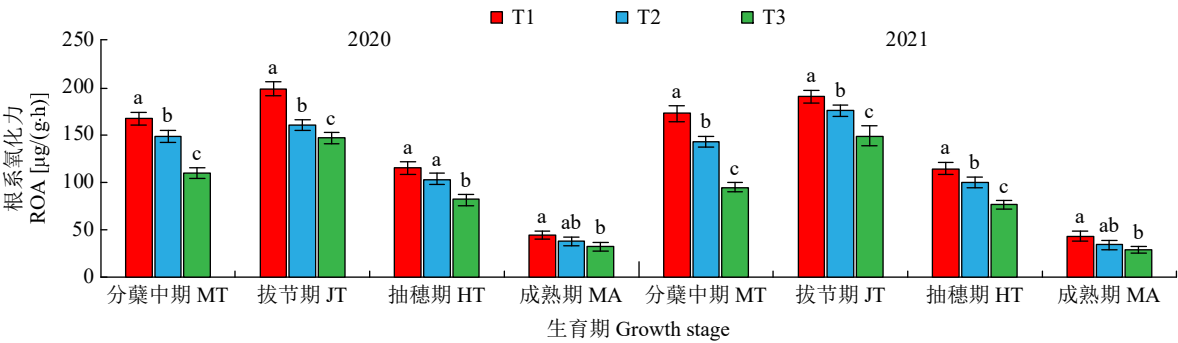
水稻各关键生育时期的根系氧化力如图 1 所示，随着水稻生育时期的推进，水稻根系氧化力呈先增后降的趋势，以拔节期的根系氧化力最高。在

表 1 不同耕播方式对稻田土壤容重和孔隙度的影响
Table 1 Effects of different tillage and sowing methods on bulk density and porosity of paddy soil

年份 Year	处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)				土壤孔隙度 Soil porosity (%)			
		分蘖中期 MT	拔节期 JT	抽穗期 HT	成熟期 MA	分蘖中期 MT	拔节期 JT	抽穗期 HT	成熟期 MA
2020	T1	0.81c	1.08c	1.10c	1.13c	69.2a	59.3a	58.6a	57.5a
	T2	1.01b	1.29b	1.32b	1.37b	62.2b	51.1b	50.4b	48.3b
	T3	1.24a	1.63a	1.58a	1.71a	53.4c	38.7c	40.6c	35.7c
2021	T1	0.87c	1.10c	1.21c	1.22c	67.5a	58.8a	54.8a	54.1a
	T2	1.07b	1.30b	1.35b	1.41b	59.7b	50.7b	49.2b	47.0b
	T3	1.31a	1.49a	1.65a	1.61a	50.8c	43.8c	37.7c	39.4c
年份 Year (Y)		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
处理 Treatment (T)		**	**	**	**	**	**	**	**
Y×T		NS	*	NS	*	NS	*	NS	NS

同一指标内不同小写字母表示 5% 水平差异显著。“*”和“**”分别表示在 5% 和 1% 水平上差异显著；NS 表示差异不显著。下同
Different lowercase letters after data in the same column indicate statistical significance at the 0.05 probability level. “*” and “**” indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. NS indicates no significant difference. The same below

不同耕播方式下，水稻各生育时期的根系氧化力均以 T1 处理最高，且在分蘖中期和拔节期均显著高于 T2 和 T3 处理。相较于 T3 处理，T2 处理在分蘖中期、拔节期和抽穗期的根系氧化力显著增加，但这一显著性差异并未体现于成熟期的根系氧化力中。



不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同
Different letters indicate significance difference at $P < 0.05$. The same below

图 1 不同耕播方式对水稻根系氧化力的影响

Fig.1 Effects of different tillage and sowing methods on root oxidation activity of rice

2.3 不同耕播方式对茎蘖动态的影响

与水稻的根系氧化力相似，拔节期的水稻茎蘖数最高，在水稻各生育时期均以 T1 处理的茎蘖数最高（图 2）。相较于其他处理，在拔节期，T1 的茎蘖数显著增加 5.3%~20.1%；在成熟期，T1 的茎蘖数显著增加 12.2%~17.5%。T2 和 T3 处理相比，尽管 T2 处理在分蘖中期和拔节期的茎蘖数显著高于 T3 处理，但抽穗期和成熟期的茎蘖数在 2 个处理间

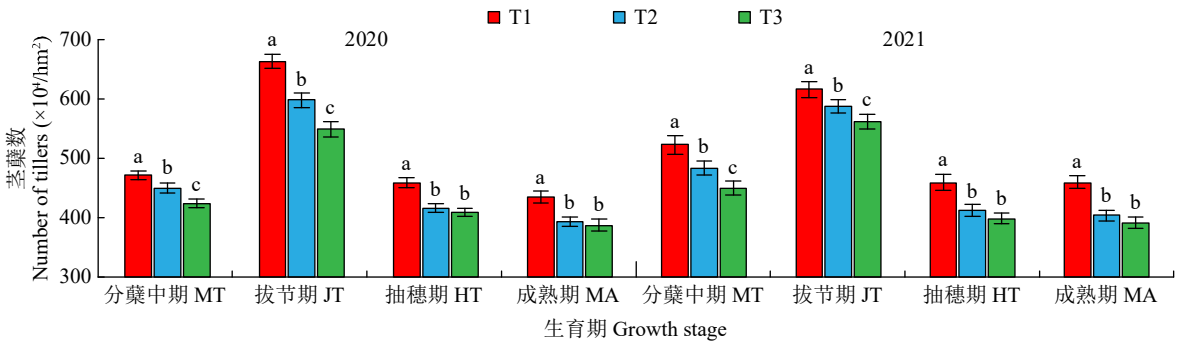


图 2 不同耕播方式对水稻茎蘖数的影响

Fig.2 Effects of different tillage and sowing methods on the number of tillers in rice

无显著差异。

2.4 不同耕播方式对叶面积与光合势的影响

不同耕播方式对水稻叶面积指数 (leaf area index, LAI) 和光合势影响极显著 (表 2)。在水稻生长的各主要时期, 均以 T1 处理的 LAI 和光合势最高, T3 处理的 LAI 和光合势最低, 且 T1 和

T3 处理间差异显著。相较于 T3 处理, T1 处理在成熟期的 LAI 显著提高 19.4%~28.6%, 抽穗期一成熟期的光合势显著提高 15.2%~16.7%。在水稻生长的各主要时期和各主要阶段, 尽管 T2 处理的 LAI 和光合势显著低于 T1 处理, 但相较于 T3 处理, T2 处理的 LAI 和光合势呈增加趋势, 且差异显著。

表 2 不同耕播方式对水稻叶面积指数和光合势的影响

Table 2 Effects of different tillage and sowing methods on leaf area index and photosynthetic potential of rice

年份 Year	处理 Treatment	LAI				光合势 Photosynthetic potential [(m ² ·d)/hm ²]			
		分蘖中期 MT	拔节期 JT	抽穗期 HT	成熟期 MA	播种—分蘖中期 ST-MT	分蘖中期—拔节期 MT-JT	拔节—抽穗期 JT-HT	抽穗期—成熟期 HT-MA
2020	T1	3.3a	4.8a	7.8a	4.3a	66.1a	60.8a	157.5a	302.6a
	T2	3.0b	4.3b	7.2b	3.9b	59.9b	55.5b	145.1b	277.4b
	T3	2.6c	3.8c	6.9b	3.6c	52.1c	48.1c	133.8c	262.5c
2021	T1	3.5a	5.1a	8.1a	4.5a	71.3a	64.2a	163.8a	315.1a
	T2	3.1b	4.2b	7.6b	4.1b	62.6b	55.2b	147.1b	291.5b
	T3	2.5c	3.7c	7.3b	3.5c	48.9c	46.1c	137.5c	269.9c
年份 Year (Y)		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
处理 Treatment (T)		**	**	*	**	**	**	**	**
Y×T		NS	NS	NS	NS	*	*	NS	NS

2.5 不同耕播方式对干物质与群体生长率的影响

不同耕播方式对水稻地上部干重和群体生长率影响显著 (表 3)。在相同的水稻生育时期, 各处理的地上部干重均表现为 T1>T2>T3, 且 T1

和 T3 处理间差异显著。相较于 T3 处理, T1 处理在水稻成熟期的地上部干重显著提高 16.5%~18.8%。各处理的群体生长率在水稻播种—分蘖中期、分蘖中期—拔节期和抽穗期—成熟期均表现为

表 3 不同耕播方式对水稻地上干重和群体生长率的影响

Table 3 Effects of different tillage and sowing methods on shoot dry weight and crop growth rate of rice

年份 Year	处理 Treatment	地上部干重 Above-ground dry weight (t/hm ²)				群体生长率 Crop growth rate [g/(m ² ·d)]			
		分蘖中期 MT	拔节期 JT	抽穗期 HT	成熟期 MA	播种—分蘖中期 ST-MT	分蘖中期—拔节期 MT-JT	拔节—抽穗期 JT-HT	抽穗期—成熟期 HT-MA
2020	T1	2.9a	5.5a	13.1a	22.2a	7.2a	17.7a	30.3a	18.1a
	T2	2.5b	4.9b	12.7ab	20.3b	6.3b	16.0b	31.1a	15.1b
	T3	2.2c	4.4c	12.4b	18.7c	5.3c	15.4b	31.8a	12.6c
2021	T1	2.6a	5.3a	13.3a	21.8a	6.4a	18.3a	31.7b	18.3a
	T2	2.3b	4.7b	12.9ab	20.7b	5.8b	15.8b	32.8ab	15.6b
	T3	2.0c	4.1c	12.6b	19.2c	5.0c	14.1c	34.1a	13.2c
年份 Year (Y)		NS	NS	NS	NS	**	*	NS	NS
处理 Treatment (T)		**	**	*	**	**	**	NS	**
Y×T		NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

T1>T2>T3, 且 T1 和 T3 处理间差异显著。

2.6 不同耕播方式对产量及其构成因素的影响

不同耕播方式对水稻产量影响显著 (表 4)。在 T1、T2 和 T3 处理间, 水稻产量呈现 T1>T2>T3 的趋势, 且各处理间差异显著。相较于 T3 处理, T1 和 T2 处理的产量分别显著提高 24.6%~31.5%和

10.1%~15.4%。在有效穗数、群体颖花量和穗粒数方面, 均以 T1 处理最高, T3 处理最低。相较于 T3 处理, T1 处理的有效穗数和群体颖花量分别提高 12.2%~17.5%和 26.0%~32.5%, 而穗粒数则提高 12.3%~12.8%。不同耕播方式对水稻结实率和千粒重无显著影响。

表 4 不同耕播方式对水稻产量及其构成因素的影响
Table 4 Effects of different tillage and sowing methods on rice yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Panicles number	穗粒数 Spikelets per panicle	群体颖花量 Spikelet number	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm ²)
2020	T1	435.1a	102.2a	44 472.2a	86.0a	28.0a	10.7a
	T2	393.7b	98.2b	38 648.6b	86.7a	27.9a	9.5b
	T3	388.0b	91.0c	35 300.5c	87.2a	28.3a	8.6c
2021	T1	459.9a	95.7a	44 003.4a	87.1a	28.4a	10.9a
	T2	404.4b	93.3a	37 728.4b	87.6a	28.9a	9.6b
	T3	391.5c	84.8b	33 208.7c	87.4a	28.5a	8.3c
年份 Year (Y)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
处理 Treatment (T)		**	**	**	NS	NS	**
Y×T		*	NS	NS	NS	NS	NS

3 讨论

3.1 不同耕播方式对水稻生长的影响

不同耕作方式通过影响秸秆还田的效果从而影响了水稻生长^[21]。本试验中，在水稻茎蘖数方面，3 种耕播方式在不同生育时期均呈现 T1>T2>T3 的趋势。T3 处理下免耕处理增加了地表的秸秆覆盖，撒播条件下部分种子落于麦秸秆或地面突起处，且 T3 处理下土壤容重较高，造成灌水后种子难以发芽或扎根^[22]，从而影响了旱直播稻幼苗的出苗率及其生长早期的茎蘖数。此外，由于水稻生长早期根系多分布于地表浅层^[23]，而 T3 处理下田表较多的秸秆覆盖不仅加剧了秸秆腐解与植株养分竞争^[24]，且秸秆腐解增强了稻田土壤的厌氧环境^[25]，降低了土壤氧化还原电位^[26]，从而抑制了水稻的根系活力和地上部的生长。因此，免耕撒播方式虽极大地简化了耕播环节的农艺措施，并降低了劳动力的需求和耕播成本，但其显著地限制了水稻的生长，不利于旱直播稻的高产稳产。

相较于单轴旱地旋耕条播方式（T2），双轴旱地旋耕条播方式（T1）下水稻的总体生长均较好，如根系氧化力、叶片光合势和群体生长率等。这可能是由于，相较于 T2 方式，T1 方式下双轴旋耕有利于秸秆深埋，这不仅减少了地表的秸秆覆盖，能够使种子与土壤形成良好的接触，促进种子萌发，而且秸秆的深埋还有利于通过减少秸秆与空气的接触，从而抑制其腐解时与水稻生长前期争氮，为水稻前期的生长提供充足的养分。此外，良好的土壤容重与孔隙度有利于水稻生长中后期根系的下扎，有助于根系保持较高的活力^[27]。前人研究表明，采用双轴旋耕和秸秆还田有利于提高土壤中大团

聚体的数量^[28]，降低土壤的容重，增加土壤的孔隙度，改善土壤氧化还原性状^[29]，抑制还原性物质的产生及其对水稻根系的毒害作用^[30]。本试验研究结果也有一致的发现，T1 方式下的土壤容重最低，土壤孔隙度最高，说明采用双轴旱旋耕条播方式为水稻根系的生长创造了良好的生长条件。而良好的根系不仅有助于叶面积的提高和干物质的积累^[31]，且有利于促进抽穗后茎秆中非结构性碳水化合物向籽粒的转运以及提高叶片的光合物质生产能力^[32]，从而实现高产。

3.2 不同耕播方式对水稻产量及其构成因素的影响

一些研究^[26,33]结果表明，秸秆还田实现水稻增产的主要原因在于秸秆还田对水稻生育后期生长的促进作用大于其对水稻生育前期秧苗的毒害作用。在本试验中，秸秆全量还田下双轴旱地旋耕条播方式（T1）、单轴旱旋耕条播（T2）和免耕撒播方式（T3）下 2 年平均产量分别为 10.8、9.55 和 8.45t/hm²。这一结果说明在秸秆全量还田条件下，耕播方式对旱直播稻产量具有显著影响。选择适宜的耕播方式有助于实现秸秆全量还田条件下旱直播稻的高产稳产，而仅仅通过秸秆腐解对水稻生长后期的正向作用并不能实现旱直播稻的高产稳产。在产量构成因素方面，相较于 T2 和 T3 处理，T1 处理在通过较高有效穗数和穗粒数实现较高群体颖花数的基础上，获得了较高的结实率和千粒重。这一结果说明双轴旱地旋耕条播方式不仅通过改善水稻生长前期的逆境促进了分蘖和有效穗数的显著增加，且在水稻生育后期保持了较高的光合物质生产能力。因此，通过适宜的方式缓解水稻生长前期的逆境，促进水稻前期生长才能更好实现秸秆还田条件下旱直播稻的高产稳产。水稻直播由于省

了育秧和插秧 2 大环节, 具有省工、节水、易机械化种植等优点, 是未来水稻轻简化栽培的主要方向之一^[34]。综合本研究结果, 在耕播环节选择双轴旱地旋耕条播方式, 可以缓解还田秸秆的前期不利影响, 改善土壤性状, 提高根系活力, 促进水稻生长, 从而实现旱直播稻高产稳产, 这对促进水稻直播、实现轻简化栽培具有积极的作用。但值得注意的是, 双轴旱地旋耕条播在生产实践中会出现播种过深或过浅、播种量时大时小的状况, 这在一定程度上影响了直播稻的耕播质量。因此, 进一步改善双轴旱地旋耕条播的播种深度控制和应用智能化精确播种系统将有利于双轴旱地旋耕条播质量的改善, 进而为直播稻的高产稳产奠定基础。

4 结论

在本试验条件下, 相较于免耕撒播和单轴旱地旋耕条播方式, 双轴旱地旋耕条播方式能够显著降低土壤容重, 增加土壤孔隙度, 为旱直播水稻根系生长创造良好的土壤环境, 增加其根系氧化力, 并促进水稻叶面积指数和干物质积累的增加, 进而获得较高的产量。因此, 在旱直播稻生产中, 选择双轴旱地双轴旋耕条播方式是实现旱直播高产稳产的有效耕作方式之一。

参考文献

- [1] Zhao H F, Fu Y S, Wang X H, et al. Timing of rice maturity in China is affected more by transplanting date than by climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 215-220.
- [2] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Production Science*, 2008, 12(1): 3-8.
- [3] Bhushan L, Ladha J K, Gupta R K, et al. Saving of water and labor in a rice-wheat system with no-tillage and direct seeding technologies. *Agronomy Journal*, 2007, 99(5): 1288-1296.
- [4] 罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 1-13.
- [5] Tao Y, Chen Q, Peng S B, et al. Lower global warming potential and higher yield of wet direct-seeded rice in central China. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 24.
- [6] Wang W X, Du J, Zhou Y Z, et al. Effects of different mechanical direct seeding methods on grain yield and lodging resistance of early indica rice in South China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(5): 1204-1215.
- [7] 冯延江, 王麒, 赵宏亮, 等. 我国水稻直播技术研究现状及展望. *中国稻米*, 2020, 26(1): 23-27.
- [8] 章清杞, 蔡来龙, 黄荣华, 等. 直播稻栽培技术研究进展. *亚热带农业研究*, 2020, 16(1): 1-7.
- [9] 轧宗杰, 卢树昌, 侯琨. 水稻旱直播栽培发展现状、问题及应用前景. *作物杂志*, 2020(2): 9-15.
- [10] 张洪程, 邢志鹏, 翁文安, 等. 生育约束型直播水稻生育特征与稳产关键技术. *中国农业科学*, 2021, 54(7): 1322-1337.
- [11] 王文霞, 曾研华, 曾勇军, 等. 机械穴直播早籼稻产量和品质形成的播期效应. *江西农业大学学报*, 2017, 39(4): 641-648.
- [12] 姚义, 霍中洋, 张洪程, 等. 播期对麦茬直播粳稻产量及品质的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(15): 3098-3107.
- [13] 吴培, 陈天晔, 袁嘉琦, 等. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响. *中国水稻科学*, 2019, 33(3): 269-281.
- [14] 孙永健, 郑洪帆, 徐徽, 等. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 10-18.
- [15] 戴亿政, 罗锡文, 张明华, 等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 1-8.
- [16] 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. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 1-9.
- [17] 赵凌天, 咸云宇, 刘光明, 等. 不同机械化耕播模式对冬小麦幼苗质量和产量的影响. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 31-38.
- [18] Ferraro D O, Ghersa C M. Quantifying the crop management influence on arable soil condition in the Inland Pampa (Argentina). *Geoderma*, 2007, 141(1): 43-52.
- [19] Wang Z Q, Gu D J, Beebout S S, et al. Effect of irrigation regime on grain yield, water productivity, and methane emissions in dry direct-seeded rice grown in raised beds with wheat straw incorporation. *The Crop Journal*, 2018, 6(5): 495-508.
- [20] 胡群, 夏敏, 张洪程, 等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响. *作物学报*, 2016, 42(11): 1666-1676.
- [21] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟特征及水稻氮素利用的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(11): 1435-1444.
- [22] 王力扬. 超高茬麦田套稻秸秆还田耕作方式的配套技术. *耕作与栽培*, 2003, 3(4): 4-5.
- [23] 刘磊, 宋娜娜, 齐晓丽, 等. 水稻根系特征与氮吸收利用效率关系的研究进展. *作物杂志*, 2022(1): 11-19.
- [24] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526-535.
- [25] Nie T Z, Chen P, Zhang Z X, et al. Effects of irrigation method and rice straw incorporation on CH₄ emissions of paddy fields in Northeast China. *Paddy and Water Environment*, 2020, 18(1): 111-120.
- [26] 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. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 80-85.
- [27] Chu G, Wang Z Q, Zhang H, et al. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food and Energy Security*, 2015, 4(3): 238-254.
- [28] 张佳倩, 李福, 孙峰成, 等. 秸秆还田条件下不同耕作方式对玉米田土壤物理性状的影响. *江西农业大学学报*, 2022, 44(3): 759-772.
- [29] Li S H, Guo L J, Cao C G, et al. Integrated assessment of carbon footprint, energy budget and net ecosystem economic efficiency from rice fields under different tillage modes in central China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126398.
- [30] 李江, 潘艳川, 缴锡云, 等. 加气灌溉对麦秸秆还田后土壤还原性与水稻生长的影响. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 250-259.
- [31] Osaki M, Shinano T, Matsumoto M, et al. A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of field crops. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43(S1): 1079-1084.
- [32] Zhang H, Xue Y G, Wang Z Q, et al. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in

rice. *Crop Science*, 2009, 49(6): 2246-2260.

- [33] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change*

Biology, 2014, 20(5): 1366-1381.

- [34] 轧宗杰, 卢树昌, 侯琨. 水稻旱直播栽培发展现状、问题及应用前景. *作物杂志*, 2020(2): 9-15.

Effects of Different Tillage and Sowing Methods on the Growth and Yield of Direct-Seeding Rice under Full Returning of Straw

Wei Yunfei, Li Meng, Ji Xin, Liu Juan, Wang Fujuan, Liu Qiuyuan

(Xinyang Key Laboratory of Rice Genetic Improvement, Physiology and Ecology/Xinyang High Quality Rice Engineering Technology Research Center/Agriculture College, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract In order to improve the cultivation quality of rice in dry direct-seeding and achieve its high and stable grain yield, the effects of different tillage and sowing methods, dryland biaxial rotary tillage and drilling sowing method (T1), dryland uniaxial rotary tillage and drilling sowing method (T2) and dryland no-tillage and broadcast sowing method (T3), on the growth and yield of dry direct-seeding rice under full straw returning were investigated in 2020 and 2021. The results showed that the soil bulk density was the lowest in T1 and the highest in T3 treatment, while the soil porosity was the highest in T1 and the lowest in T3 treatment. In terms of rice growth, compared with T2 and T3 treatments, T1 significantly improved the root oxidation activity and promoted the occurrence of tillering of rice. At the same time, the leaf area index and dry matter accumulation of the shoot in the main stages and the photosynthetic potential and crop growth rate in the main stages were improved under T1 treatment. In terms of grain yield and its components, compared with T2 and T3 treatments, T1 treatment significantly increased the number of panicles and spikelets, slightly increased spikelets per panicle, but there was no significant difference in 1000-grain weight and seed-setting rate, which made the grain yield of different treatments showed the rule of $T1 > T2 > T3$ in two years, and there were significant differences among all treatments. In summary, under the condition of full straw returning to the paddy field, the dryland biaxial rotary tillage and drilling sowing method was beneficial to soil properties and increase root activity, and promoted the high and stable grain yield of dry direct-seeding rice.

Key words Tillage and sowing method; Straw returned; Dry direct-seeding; Yield; Rice