

种植方式和施肥对水稻根系形态、抗倒伏特性与产量的影响

沈智达¹ 马世浩¹ 黄思远¹ 张洋洋¹ 廖世鹏¹ 李小坤^{1,2,*}

(¹ 华中农业大学 资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室/华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; ² 华中农业大学 双水双绿研究院, 武汉 430070; *通信联系人, email: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn)

Effects of Planting Methods and Fertilization on Root Morphology Lodging Resistance and Yield in Rice

SHEN Zhida¹, MA Shihao¹, HUANG Siyuan¹, ZHANG Yangyang¹, LIAO Shipeng¹, LI Xiaokun^{1,2,*}

[¹ College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River) Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; ² Shuangshui and Shuangliu Research Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; *Corresponding author, email: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn]

Abstract: 【Objective】To clarify the effects of rice planting methods and fertilization on root morphology, growth and development, and yield formation, and to provide a theoretical basis for rice cultivation and scientific fertilization. 【Method】A two-factor experimental design was employed to investigate the effects of planting method (direct seeding and transplanting) and fertilization (no fertilization and fertilization) on root distribution, root morphology, root vigor, and lodging resistance in rice. The hybrid rice Heliangyou 332 (HLY332) and conventional rice Huanghuazhan (HHZ) were used as experimental materials. 【Result】(1) Compared with no fertilization, fertilization significantly increased yield by 15.3% and 15.0% under direct seeding and transplanting conditions for HLY332, and by 18.6% and 22.1% for HHZ, respectively. No significant yield difference was detected between planting methods for either variety. (2) In direct-seeded rice, roots were mainly distributed in the 0–5 cm soil layer. The average root biomass proportion in the 0–5 cm layer under no-fertilizer and fertilizer treatments was 50.1% and 56.8% for HLY332, and 63.5% and 67.0% for HHZ, respectively. In contrast, transplanted rice concentrated roots in the 5–10 cm layer, with proportions of 42.9% and 41.9% for HLY332, and 53.2% and 49.1% for HHZ, respectively. Fertilization increased total root biomass by 46.9% and 45.9% under direct seeding and transplanting for HLY332, and by 64.9% and 56.9% for HHZ, compared to no fertilization. Root bleeding intensity was significantly enhanced by fertilization, with increases of 113.3% and 110.6% for HLY332, and 46.1% and 60.8% for HHZ under direct seeding and transplanting, respectively. (3) Compared with direct seeding, transplanting significantly improved bending resistance. Bending resistance was increased by 23.9% and 15.2% in HLY332 under no-fertilizer and fertilized conditions, and by 12.5% and 17.0% in HHZ, respectively. Fertilization also enhanced bending resistance, with increases of 25.5% and 16.8% for HLY332 under direct seeding and transplanting, and 23.7% and 28.6% for HHZ under transplanting, relative to no fertilization. 【Conclusion】The distinct vertical distribution of roots in the soil profile is a key trait differentiating direct-seeded and transplanted rice. Under the conditions of this study, fertilization significantly improved root morphology and increased grain yield in both planting methods, with no significant yield difference between direct seeding and transplanting. Therefore, integrating direct seeding with scientific fertilization represents a viable approach to meet the growing demand for light and simplified cultivation in rice production.

Key words: planting method; fertilizer application; root system characteristics; yield

摘 要: 【目的】明确种植方式和施肥对水稻根系形态、生长发育及产量形成的影响, 为水稻的种植及科学施肥提供理论依据。【方法】以杂交稻和两优 332(HLY332)和常规稻黄华占(HHZ)为材料, 采用双因素试验设计, 即种

收稿日期: 2024-10-31; 修改稿收到日期: 2024-11-28。

基金项目: 湖北省现代农业水稻产业技术体系项目 (2023HBSTX4-01); 湖北省重点研发计划资助项目 (2022BBA0048); 湖北洪山实验室重大项目 (2121hsz002)。

植方式(直播和移栽)和施肥(不施肥和施肥),研究水稻的根系分布、根系形态、根系活力和抗倒伏能力等对种植方式和施肥的响应。【结果】1)与不施肥处理相比,HLY332 在直播和移栽条件下,施肥处理的产量分别提高了 15.3%和 15.0%;HHZ 分别提高了 18.6%和 22.1%。HLY332 和 HHZ 在不同种植方式下的产量均无显著差异。2)直播的根系主要分布在 0~5 cm 的土层,直播条件下,HLY332 不施肥和施肥处理在 0~5 cm 土层的平均根系生物量占比分别为 50.1%和 56.8%,HHZ 分别为 63.5%和 67.0%;而移栽水稻的根系则主要分布在 5~10 cm 的土层,HLY332 不施肥和施肥处理在 5~10 cm 土层的平均根系生物量占比分别为 42.9%和 41.9%,HHZ 分别为 53.2%和 49.1%。与不施肥处理相比,HLY332 直播和移栽条件下,施肥处理的根系生物量分别增加了 46.9%和 45.9%;HHZ 分别增加了 64.9%和 56.9%。与不施肥处理相比,HLY332 直播和移栽条件下,施肥处理的根伤流强度分别增加了 113.3%和 110.6%;HHZ 分别增加了 46.1%和 60.8%。3)相比于直播,移栽时水稻具有较强的抗折力,与直播处理相比,HLY332 不施肥和施肥条件下,移栽处理的抗折力分别增加了 23.9%和 15.2%;HHZ 分别增加了 12.5%和 17.0%。与不施肥处理相比,HLY332 直播和移栽条件下,施肥处理的抗折力分别增加了 25.5%和 16.8%;HHZ 分别增加了 23.7%和 28.6%。【结论】水稻根系在土层中的分布不同是直播和移栽水稻根系性状差异的显著特征。在本研究条件下,直播或移栽的种植方式下,施肥均能够显著改善根系形态,提高水稻产量,且直播和移栽之间无显著差异。因此,在当前人们对轻简化种植迫切需求的形势下,采用直播种植方式和科学施肥技术相结合是可行的。

关键词: 种植方式; 施肥; 根系特性; 产量

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要粮食作物之一,稳定提高水稻单产对保障国家粮食安全和提高人民生活水平具有极其重要的作用^[1]。长期以来,移栽水稻为保障粮食安全做出了重要贡献^[2]。但近年来,随着社会经济的发展,移栽水稻的生产力和可持续性受到了气候变化、水资源危机、劳动力成本和生产成本增加的威胁,收益率越来越低^[3]。直播水稻由于其轻简化的特点受到农民的青睐,在各地不推自广,种植面积逐年增加。在正常的年景下,直播水稻的单产水平能够接近甚至超过其他种植方式^[4]。但是直播水稻抵御灾害的能力较差,产量具有很大的不稳定性^[5]。施肥是提高水稻产量的有效方式之一,通过合理的施肥优化水稻根系形态结构,能够增强根系吸收能力和养分利用效率,从而提高水稻的产量水平^[6-7],因此明确水稻根系特性对种植方式和施肥响应的影响,对于实现水稻的高产稳产具有重要意义。根系承载着众多生理生化功能,如吸收养分和水分、固定植株和合成运输物质等,同时根系与地上部农艺性状息息相关^[8-11]。矿质养分是植物生长和发育的基础,施肥是保障作物健壮生长、获得高产的重要栽培措施^[12],肥水管理对水稻个体发育、群体建成、产量及品质提高有重要影响^[13],合理施肥可有效促进水稻生长发育,从而增加产量^[14]。由于直播水稻根系分布浅的特点,根倒伏在直播水稻中很常见,这是影响直播水稻产量稳定性最主要原因之一^[15],因此良好的根系构型对防止直播水稻倒伏至关重要。水稻根系的生长、发育、分布和活性除了具有品种本身的特性外,还受种植方式和施肥等栽培措施的影响^[16]。前人关于不同种植方式对水

稻生长发育、光合生产、产量形成等的影响已有很多研究^[9-14]。许炜等^[17]研究了不同播种和施肥方式下水稻分蘖特征和产量状况,结果表明机械直播水稻和 4 次施肥下的直播水稻的分蘖成穗率高,干物质积累量大,可获得较高的产量;李杰等^[9]研究发现,不同种植方式水稻干物质和光合物质生产有各自特征,与机插秧和直播水稻比较,手插秧前期物质积累量适宜,中后期物质积累量显著高。目前,有关水稻根系的研究主要集中在根系形态、分布及其生理功能对水稻生长、产量和抗逆性的影响,以及根际微生物与管理措施的相互作用,而忽视了水稻的根系特性对种植方式的响应特点。此外,合理的施肥可以优化水稻根系形态结构,能够增强根系吸收能力和养分利用效率,从而提高水稻的产量水平。因此,种植方式和施肥对水稻根系特性的影响需要进一步研究。本研究以杂交稻和两优 332 和常规稻黄华占为材料,采用田间试验研究不同水稻品种根系分布、形态、活力和抗倒伏能力等对种植方式和施肥的响应,以期为水稻栽培、科学施肥及可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

田间试验于 2021 年 6 月~10 月在湖北省武穴市梅川镇从政村(30°06'46"N, 115°36'9"E)进行。该区年平均降水量为 1278.7~1442.6 mm,年平均温度为 16.8℃。供试土壤类型为花岗片麻岩发育的水稻土,0~20 cm 耕层土壤理化性质如下: pH 为 5.03,铵态

氮含量 4.52 mg/kg, 有效磷含量 7.44 mg/kg, 速效钾含量 81.13 mg/kg, 有机质含量 16.42 g/kg。供试水稻品种为和两优 332(杂交稻)和黄华占(常规稻)。

1.2 试验设计

试验设置 4 个处理: 1)直播不施肥(DCK); 2)直播施肥(DF); 3)移栽不施肥(TCK); 4)移栽施肥(TF)。施肥处理氮磷钾肥的用量分别为 180 kg/hm²(以纯氮计)、90 kg/hm² (P₂O₅)、120 kg/hm² (K₂O)。供试肥料为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)。直播水稻氮肥分 3 次(基肥 30%, 断乳肥 40%, 分蘖肥 30%)施用; 磷肥分两次(基肥 50%, 断乳肥 50%)施用; 钾肥分两次(基肥 60%, 断乳肥 40%)施用。移栽水稻氮肥分 3 次(基肥 60%, 分蘖肥 20%, 穗肥 20%)施用; 磷肥全作基肥; 钾肥 70%作基肥, 30%作穗肥。所有处理设 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积为 20 m²。两个品种均采用当地农技部门推荐的最佳播种量和密度, 和两优 332 移栽密度为 24×10⁴ 株/hm², 播种量为 37.5 kg/hm²; 黄华占的移栽密度为 22.5×10⁴ 株/hm², 播种量为 75 kg/hm²。直播水稻 6 月 5 日人工直播, 9 月 26 收获。移栽水稻 6 月 5 日人工播种, 6 月 27 日人工移栽(行距 26.8 cm, 株距 16.5 cm), 10 月 3 日收获。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 根系分布

齐穗期在每个小区选取 3 穴(直播处理 0.36 m² 样方)长势均匀的植株。以每株水稻的根为中心, 采用圆柱体根系取样器(直径和高均为 20 cm)将整株水稻连根取出。至上而下将根系土柱切割为 0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm 和 15–20 cm 四个层次, 分别置尼龙网袋中冲洗干净, 烘干后测定各层次根系的干质量。

1.3.2 根系形态

齐穗期在每个小区选取 3 穴(直播处理 0.36 m² 样方)长势均匀的植株。以每株水稻的根为中心, 采用圆柱体根系取样器(直径和高均为 20 cm)将整株水稻连根取出, 先在水中浸泡 1–2 d, 再用农用压缩喷雾器冲洗干净。用 Win RHIO(Regent Instruments, Canada)根系分析系统测量根系形态, 测定指标包括根长、根直径、根体积和根表面积等。扫描完成后, 于 105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 下烘至恒重后, 测量根系生物量。

1.3.3 根伤流强度

分别于开花后 0、7、14、21、28 d, 按照每小区茎蘖数的平均值选取 3 穴(直播处理 0.36 m² 样方)

长势均匀的植株, 于 18:00 在茎秆离地面约 12 cm 处(在测定前排干田间水)剪去其上部植株, 然后将预先称重的脱脂棉包裹在茎的剪口处, 包上塑料薄膜, 于第 2 天早上 8:00 取回带有伤流液的脱脂棉并称重, 计算伤流强度。

1.3.4 抗倒伏特性

齐穗期在每个小区随机选取 3 穴(直播处理 0.36 m² 样方)植株的主茎, 测定株高、重心高度、基部茎壁厚度和茎秆粗度。用 YYD-1 型茎秆强度测量仪(浙江杭州托普仪器有限公司)测定基部第 2 节间中部茎秆抗折力, 该节间基部至穗顶长度及鲜质量, 计算弯曲力矩和倒伏指数^[13]。

1.3.5 产量和产量构成因子

成熟期直播处理每小区取三个 0.36 m² 的调查区, 移栽处理随机调查 80 穴, 计算有效穗数。在计产区域之外, 随机取连续数株(合计 30 个单茎以上)作为计产样本, 考查每穗粒数、实粒数、空壳数、千粒重等产量构成因素, 计算结实率。在计产区域, 选取 10 m² 区域实收计产, 于每个小区脱粒的籽粒中取 1 kg 水稻籽粒样品装入牛皮纸信封放入烘箱中 105 °C 下杀青 30 min 后, 降温至 60 °C 烘干至恒重, 用于计算籽粒含水率。根据籽粒鲜重和含水率换算成含水率为 14.0 % 的标准产量。

1.3.6 相关参数的计算

弯曲力矩=基部节间至穗顶长度(cm)×该节间基部至穗顶鲜质量(g);

倒伏指数=弯曲力矩/抗折力×10。

1.4 统计与数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行计算处理, 利用 SPSS 26.0 软件进行统计分析, 并基于 Duncan 多重比较处理间的均值差异。采用软件 Origin 2021 进行制图。

2 结果与分析

2.1 产量及产量构成因子

和两优 332(HLY332)和黄华占(HHZ)在不同种植方式下的产量均无显著差异。HLY332 在直播和移栽条件下, 施肥处理的产量分别提高了 15.3%和 15.0%; HHZ 分别提高了 18.6%和 22.1%。种植方式×施肥在 HLY332 的千粒重上存在互作效应, 其余的互作效应均不显著。与不施肥处理相比, HLY332 直播条件下, 施肥处理的单位面积有效穗数、结实率和千粒重分别提高了 16.1%、4.3%和 3.5%, 移栽条件下, 施肥处理的单位面积有效穗数

表 1 施肥和种植方式对水稻产量及产量构成因子的影响

Table 1. Effects of fertilization and planting methods on rice yield and yield components

品种 Variety	种植方式 Planting practices	处理 Treatment	穗数 Number of panicles ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
HLY332	直播	DCK	248.9 $\pm$ 10.2 b	219.1 $\pm$ 7.8 a	80.0 $\pm$ 1.0 c	22.8 $\pm$ 0.6 b	10.8 $\pm$ 0.1 b
	Direct-seeding	DF	288.9 $\pm$ 7.7 a	240.7 $\pm$ 17.5 a	83.5 $\pm$ 2.4 b	23.6 $\pm$ 0.4 a	12.4 $\pm$ 0.5 a
	移栽	TCK	190.4 $\pm$ 21.6 c	236.6 $\pm$ 22.6 a	86.7 $\pm$ 0.9 a	24.1 $\pm$ 0.2 a	11.0 $\pm$ 0.7 b
	Transplanting	TF	241.6 $\pm$ 34.1 b	259.6 $\pm$ 48.8 a	87.8 $\pm$ 0.8 a	24.1 $\pm$ 0.3 a	12.7 $\pm$ 1.1 a
方差分析(<i>F</i> 值) ANOVA analysis (<i>F</i> value)							
种植方式 Planting method(P)			18.7**	1.2ns	37.9**	14.7*	0.4 ns
施肥 Fertilization(F)			13.9*	1.9ns	2.4ns	3.3ns	16.8*
种植方式 $\times$ 施肥(P $\times$ F)			0.2ns	0.0ns	7.3ns	2.7*	0.0ns
HHZ	直播	DCK	303.8 $\pm$ 14.9 b	107.8 $\pm$ 6.8 c	89.9 $\pm$ 0.6 b	20.0 $\pm$ 0.3 a	7.7 $\pm$ 0.2 b
	Direct-seeding	DF	405.0 $\pm$ 11.3 a	120.1 $\pm$ 5.5 c	93.4 $\pm$ 1.1 a	20.7 $\pm$ 0.1 a	9.1 $\pm$ 0.2 a
	移栽	TCK	272.2 $\pm$ 12.0 c	142.1 $\pm$ 9.3 b	93.3 $\pm$ 1.8 a	20.6 $\pm$ 1.4 a	7.6 $\pm$ 0.3 b
	Transplanting	TF	323.7 $\pm$ 6.2 b	156.3 $\pm$ 7.7 a	93.3 $\pm$ 0.7 a	20.3 $\pm$ 0.2 a	9.3 $\pm$ 0.3 a
方差分析(<i>F</i> 值) ANOVA analysis (<i>F</i> value)							
种植方式 Planting method (P)			72.08**	67.1**	4.3ns	0.1ns	0.0ns
施肥 Fertilization (F)			132.07**	0.1ns	6.4ns	0.2ns	105.1**
种植方式 $\times$ 施肥 P $\times$ F			14.02ns	9.5ns	4.3ns	1.4ns	0.7ns

DCK、DF、TCK 和 TF 分别为直播不施肥、直播施肥、移栽不施肥和移栽施肥。表中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$)；同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著。方差分析中，*，**表示 5%、1%水平效果显著，ns 表示无显著效果。

DCK, DF, TCK and TF are direct-seeding without fertilizer, direct-seeding with fertilizer, transplanting without fertilizer and transplanting with fertilizer, respectively. Data in the table are means $\pm$ standard deviation ($n=3$); Different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments (Duncan). In the ANOVA analysis, * and ** indicate significant effects at the 5% and 1% levels respectively, and ns indicate no significant effect.

增加了 26.9%。与不施肥处理相比，HHZ 直播条件下，施肥处理的单位面积有效穗数和结实率分别增加了 33.3%和 3.9%，移栽条件下，施肥处理的单位面积有效穗数和每穗粒数分别增加了 18.9%和 10.0%。与移栽处理相比，HLY332 在不施肥和施肥条件下，直播处理的单位面积有效穗数分别增加了 30.7%和 19.6%，HHZ 分别增加了 11.6%和 25.1%。与直播处理相比，HHZ 在不施肥和施肥条件下，移栽处理的每穗粒数分别增加了 31.8%和 30.1%。

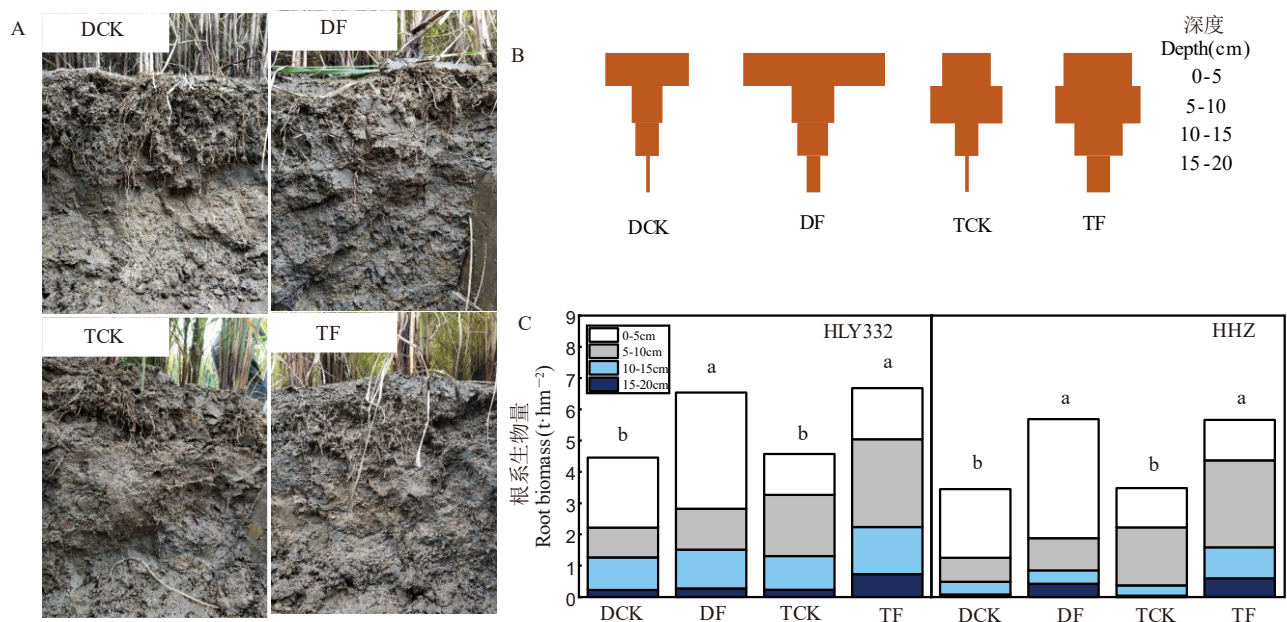
2.2 根系分布和根系生物量

田间原位观测发现(图 1-A)，与移栽水稻相比，直播水稻茎基部入土浅，根系主要分布在浅土层，纵向根少；此外，田间透光条件较差，基部节间细长、柔弱。无论是移栽稻还是直播水稻，施肥均可以显著增加根系密度。由图 1-B 可以直观看出各土层根系的占比。直播的根系主要分布在 0~5 cm 的土层，在直播条件下，HLY332 不施肥和施肥处理在 0~5 cm 土层的平均根系生物量占比分别为 50.1%和 56.8%，HHZ 分别为 63.5%和 67.0%；而移栽水稻的根系则主要分布在 5~10 cm 的土层，HLY332 不施肥和施肥处理在 5~10 cm 土层的平均根系生物量占比分别为 42.9%和 41.9%，HHZ 分别为 53.2%

和 49.1%。图 1-C 是水稻 0~20 cm 的根系生物量，施肥可以显著增加根系生物量，与不施肥处理相比，HLY332 在直播和移栽条件下，施肥处理的根系生物量分别增加了 46.9%和 45.9%；HHZ 分别增加了 64.9%和 56.9%。

2.3 根系形态

施肥和种植方式对根系形态特征均有显著影响，与不施肥处理相比，HLY332 在直播条件下，施肥处理的总根长、根表面积、平均根直径和根系总体积分别增加了 25.7%、20.5%、46.8%和 88.0%，在移栽条件下分别增加了 65.8%、125.5%、114.8%和 168.4%；与不施肥处理相比，HHZ 在直播条件下，施肥处理的总根长、根表面积、平均根直径和根系总体积分别增加了 113.0%、73.1%、127.6%和 60.0%，在移栽条件下分别增加了 44.0%、47.4%、61.5%和 79.4%。与直播处理相比，HLY332 在不施肥条件下，移栽处理的总根长和平均根直径分别增加了 24.2%和 36.6%，在施肥条件下移栽处理的总根长、根表面积、平均根直径和根系总体积分别增加了 78.6%、90.7%、92.2%和 104.1%。与直播处理相比，HHZ 不施肥条件下，移栽处理的总根长和根表面积分别增加了 181.7%和 79.3%，在施肥条件下



A 图为水稻根系剖面; B 图为根系分布; C 图为 0–20 cm 耕层根系生物量。DCK、DF、TCK 和 TF 分别为直播不施肥、直播施肥、移栽不施肥和移栽施肥 ($n=3$); 柱上不同小写字母表示不同处理间 0–20 cm 根系生物量差异显著。HLY332: 和两优 332; HHZ: 黄华占。

A, Rice root profiles; B, Schematic diagram of root distribution; C, Root biomass in the 0–20 cm tillage layer. DCK, DF, TCK and TF are direct-seeding without fertilizer, direct-seeding with fertilizer, transplanting without fertilizer and transplanting with fertilizer, respectively($n=3$); Different lowercase letters on the columns indicate significant differences (Duncan) in root biomass from 0–20 cm between treatments. HLY332, Heliangyou 332; HHZ, Huanghuazhan.

图 1 施肥和种植方式对水稻根系分布和根系生物量的影响

Fig. 1. Effects of fertilization and planting methods on root distribution and root biomass of rice

移栽处理的总根长增加了 37.7%。种植方式×施肥在 HLY332 的总根长、根表面积、平均根直径和根系总体积上存在互作效应, HHZ 的互作效应均不显著。

2.4 根伤流强度

与不施肥处理相比, HLY332 直播和移栽条件下, 施肥处理的根伤流强度分别增加了 113.3%和 110.6%; HHZ 分别增加了 46.1%和 60.8%; 直播和移栽对比, 直播水稻的根伤流强度在开花后不断降低, 而移栽处理在开花后呈先增加后降低的趋势。相比于直播, 移栽时水稻在生育后期更能保持较强的根系活力, 与直播处理相比, HLY332 在不施肥和施肥条件下, 移栽处理的根伤流强度分别增加了 29.2%和 27.2%; HHZ 分别增加了 28.7%和 42.7%。种植方式×施肥对 HLY332 和 HHZ 的根伤流强度互作效应均不显著。

2.5 不同生育期根冠比

根冠比是表征植株地下与地上部分是否协调的指标, 各处理根冠比均随着生育期的推进逐渐减小。在穗分化期和齐穗期施肥对直播水稻和移栽水稻的根冠比均无显著影响, HLY332 和 HHZ 在不同种植方式下的根冠比均无显著差异。在成熟期施肥

显著增加水稻根冠比, HLY332 直播和移栽条件下, 施肥处理的水稻根冠比分别增加了 21.9%和 28.3%; HHZ 分别增加了 42.8%和 18.4%。种植方式×施肥对 HLY332 和 HHZ 根冠比的互作效应均不显著。

2.6 抗倒伏特性

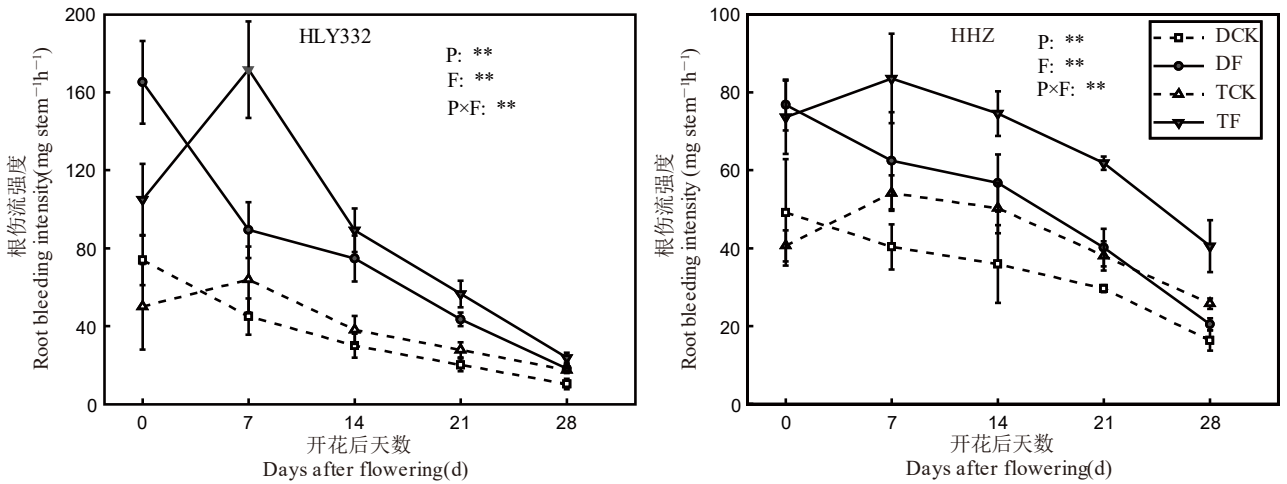
施肥可以显著提高水稻抗折力, 而倒伏指数显著降低, 与不施肥处理相比, HLY332 在直播和移栽条件下, 施肥处理的抗折力分别增加了 25.5%和 16.8%; HHZ 分别增加了 23.7%和 28.6%。与不施肥处理相比, HLY332 在直播和移栽条件下, 施肥处理的倒伏指数分别降低了 68.9%和 57.7%; HHZ 分别降低了 48.3%和 39.2%。相比于直播, 移栽时水稻具有较强的抗折力和较低的倒伏指数, 与直播处理相比, HLY332 在不施肥和施肥条件下, 移栽处理的抗折力分别增加了 23.9%和 15.2%; HHZ 分别增加了 12.5%和 17.0%。与直播处理相比, HLY332 在不施肥和施肥条件下, 移栽处理的倒伏指数分别降低了 44.0%和 34.5%; HHZ 分别降低了 12.5%和 17.0%。施肥和种植方式对水稻重心高度、茎秆直径和茎壁厚度均无显著的影响, 种植方式×施肥对 HLY332 和 HHZ 重心高度、茎秆直径、茎壁厚度、抗折力和倒伏指数的互作效应均不显著。

表 2 施肥和种植方式对水稻根系形态的影响

Table 2. Effects of fertilization and planting methods on rice root morphology						
品种	种植方式	处理	总根长	根表面积	平均根直径	根系总体积
Variety	Planting method	Treatment	Total root length(m)	Root surface area(dm ²)	Root diameter(mm)	Root volume(cm ³)
HLY332	直播	DCK	14.9±0.8 c	21.4±2.2 c	7.8±0.2 c	182.0±33.6 c
	Direct-seeding	DF	18.7±2.4 b	25.8±2.4 b	11.4±0.5 b	342.2±57.5 b
	移栽	TCK	21.2±2.4 b	21.8±1.6 c	11.8±1.7 b	238.2±29.4 c
	Transplanting	TF	35.2±1.9 a	49.1±1.8 a	25.2±3.1 a	639.4±25.8 a
	方差分析(F 值) ANOVA analysis (F value)					
	种植方式 Planting method (P)		105.7**	102.1**	75.9**	62.7**
	施肥 Fertilization (F)		64.3**	183.9**	70.1**	156.2**
	种植方式×施肥 P×F		20.9*	96.2**	23.2*	29.1**
	直播	DCK	9.2±1.6 c	14.7±1.1 c	5.6±0.7 b	174.9±28.5 b
	Direct-seeding	DF	19.6±2.2 b	25.4±2.2 ab	12.7±1.4 a	279.8±21.9 a
HHZ	移栽	TCK	18.7±2.7 b	20.2±4.1 b	6.9±0.9 b	176.5±37.8 b
	Transplanting	TF	26.9±5.7 a	29.7±3.0 a	11.2±1.5 a	316.7±24.6 a
	方差分析(F 值) ANOVA analysis (F value)					
	种植方式 Planting method(P)		17.6**	8.7*	0.0ns	1.3ns
	施肥 Fertilization (F)		21.4**	37.9**	69.1**	53.9**
	种植方式×施肥 P×F		0.3ns	0.1ns	4.4ns	1.1ns

DCK、DF、TCK 和 TF 分别为直播不施肥、直播施肥、移栽不施肥和移栽施肥。表中数据为平均值±标准差 (n=3); 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(Duncan)。*、**分别表示在 5%、1%水平效果显著, ns 表示无显著效果。

DCK, DF, TCK and TF are direct-seeding without fertilizer, direct-seeding with fertilizer, transplanting without fertilizer and transplanting with fertilizer, respectively. Data in the table are means ± standard deviation (n=3); Different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments (Duncan). In the ANOVA analysis, * and ** indicate significant effects at the 5% and 1% levels respectively, and ns indicate no significant effect.



DCK、DF、TCK 和 TF 分别为直播不施肥、直播施肥、移栽不施肥和移栽施肥。图中 P 和 F 分别表示种植方式和施肥 (n=3); **表示在 0.01 水平差异显著, ns 表示差异不显著(Duncan)。

DCK, DF, TCK and TF are direct-seeding without fertilizer, direct-seeding with fertilizer, transplanting without fertilizer and transplanting with fertilizer, respectively. P and F indicate planting method and fertilization, respectively(n=3); ** indicate significant difference at the 0.01 level, and ns indicates no significant difference(Duncan).

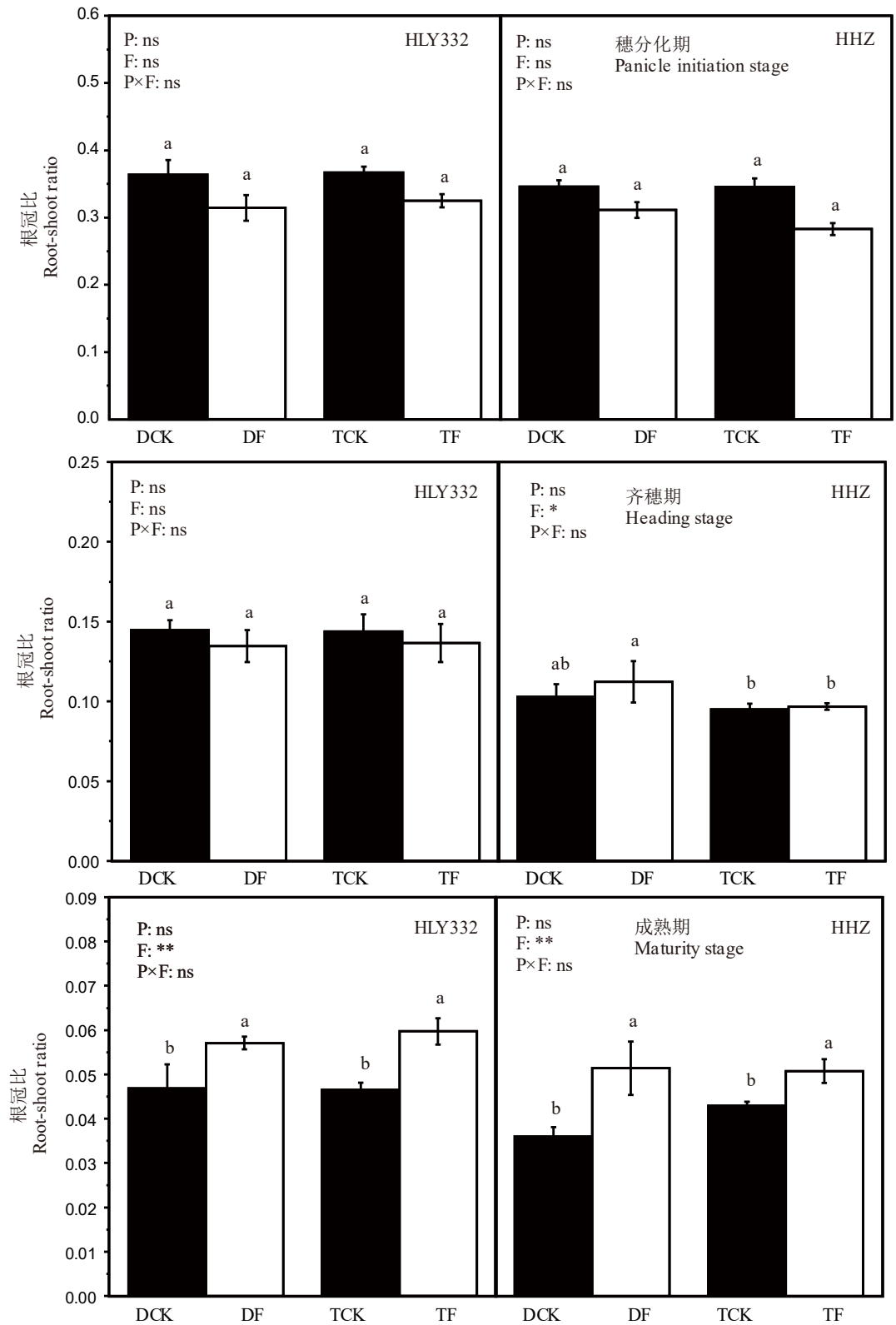
图 2 施肥和种植方式对水稻根系伤流强度的影响

Fig. 2. Effects of fertilization and planting methods on root bleeding intensity

2.7 根系指标与产量的相关分析

相关分析表明, HLY332 和 HHZ 的产量均与根系生物量、根伤流强度、总根长、根表面积、根体

积和倒伏指数显著正相关, 与根冠比和抗折力负相关。在促进根系深扎的基础上, 提高根系质量和活力, 延缓根系衰老速度, 对提高水稻产量水平具有



DCK、DF、TCK 和 TF 分别为直播不施肥、直播施肥、移栽不施肥和移栽施肥 ($n=3$)。柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著(Duncan)。图中 P 和 F 分别表示种植方式和施肥; *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平差异显著, ns 表示差异不显著。

DCK, DF, TCK and TF are direct-seeding without fertilizer, direct-seeding with fertilizer, transplanting without fertilizer and transplanting with fertilizer, respectively($n=3$). Different lowercase letters on the columns indicate significant differences between treatments (Duncan). P and F in the figure indicate planting method and fertilization, respectively; * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 levels, respectively, and ns indicates no significant difference.

图 3 施肥和种植方式对不同生育期水稻根冠比的影响

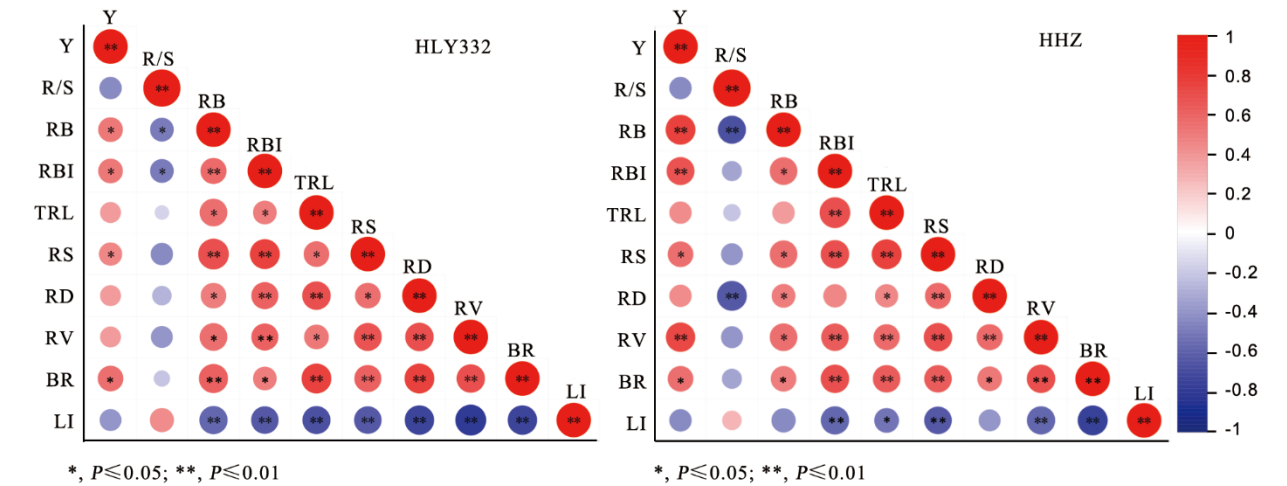
Fig. 3. Effects of fertilization and planting methods on the root-shoot ratio of rice at different growth stages

表 3 施肥和种植方式对水稻抗倒伏特性的影响

Table 3. Effects of fertilization and planting method on rice resistance to lodging							
品种 Variety	种植方式 Planting method	处理 Treatment	重心高度 Height of center of gravity(cm)	茎秆直径 Stem diameter (mm)	茎壁厚度 Thickness of stem wall(mm)	抗折力 Bending resistance(N)	倒伏指数 Lodging index
HLY332	直播	DCK	53.3±2.3 a	6.6±0.5 a	1.3±0.3 a	13.0±1.3 c	222.8±16.3 a
	Direct-seeding	DF	54.0±3.6 a	6.6±0.9 a	1.6±0.9 a	16.3±1.1 b	131.9±5.9 b
	移栽	TCK	53.0±2.0 a	6.6±0.2 a	1.6±0.6 a	16.1±0.3 b	154.7±19.3 b
	Transplanting	TF	54.0±2.0 a	6.9±0.8 a	1.4±0.4 a	18.8±0.7 a	98.1±12.9 c
	方差分析(F 值) ANOVA analysis (F value)						
	种植方式 Planting method (P)		0.0ns	0.1ns	0.1ns	15.3*	37.1**
	施肥 Fertilization (F)		0.3ns	0.2ns	0.0ns	24.0*	77.1**
	种植方式×施肥 P×F		0.0ns	0.2ns	0.3ns	0.6ns	4.2ns
	直播	DCK	47.4±2.1 a	4.6±0.6 b	1.3±0.1 a	14.3±0.4 c	168.5±12.3 a
	Direct-seeding	DF	51.5±4.2 a	5.8±0.7 ab	1.2±0.2 a	17.7±1.0 b	113.6±5.1 b
HHZ	移栽	TCK	49.0±1.9 a	5.6±0.8 ab	1.5±0.2 a	16.1±1.3 b	111.5±10.2 b
	Transplanting	TF	50.4±2.7 a	6.4±0.6 a	1.3±0.2 a	20.7±0.8 a	80.2±4.6 c
	方差分析(F 值) ANOVA analysis (F value)						
	种植方式 Planting method (P)		0.0ns	4.7ns	1.3ns	20.6*	80.5**
	施肥 Fertilization (F)		2.6ns	6.7*	3.8ns	56.9*	73.3**
	种植方式×施肥 P×F		0.6ns	0.2ns	0.0ns	1.3ns	5.4ns

DCK、DF、TCK 和 TF 分别为直播不施肥、直播施肥、移栽不施肥和移栽施肥 (n=3)。表中数据为平均值±标准差 (n=3); 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(Duncan)。方差分析中, *、**表示在 5%、1%水平效果显著, ns 表示无显著效果。

DCK, DF, TCK and TF are direct-seeding without fertilizer, direct-seeding with fertilizer, transplanting without fertilizer and transplanting with fertilizer, respectively(n=3). Data in the table are means ± standard deviation (n=3); Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments (Duncan). In the ANOVA analysis, * and ** indicate significant effects at the 5% and 1% levels respectively, and ns indicate no significant effect.



Y: 产量; R/S: 根冠比; RB: 根系生物量; RBI: 根伤流强度; TRL: 总根长; RS: 根表面积; RD: 根直径; RV: 根体积; BR: 抗折力; LI: 倒伏指数。*、**表示 5%、1%水平效果显著(Duncan)。

Y, Yield; R/S, Root-shoot ratio; RB, Root biomass; RBI, Root bleeding intensity; TRL, Total root length; RS, Root surface area; RD, Root diameter; RV, Root volume; BR, Bending resistance; LI, Lodging index. * and ** indicate significant effects at the 5% and 1% levels, respectively (Duncan).

图 4 根系指标与产量的相关分析

Fig. 4. Correlation analysis of root system indicators and yield

重要的作用。

3 讨论

3.1 不同种植方式下水稻根系生长发育特征及其对施肥的响应差异

根系与地上部的相互依赖关系确保了根系有足够的碳水化合物的供应,以促进根系活力,活跃

的根系活动保证了营养、水分和植物激素的充足供应,从而提高了作物生产力^[18]。水稻根系在土层中的分布不同是不同种植方式下水稻根系性状差异最显著特征之一。在本研究条件下,直播水稻的根系主要分布在 0~5 cm 的土层, HLY332 不施肥和施肥处理在 0~5 cm 土层的平均根系生物量占比分别为 50.1%和 56.8%, HHZ 分别为 63.5%和 67.0%;而移栽水稻的根系则主要分布在 5~10 cm 的土层,

HLY332 不施肥和施肥处理在 5~10 cm 土层的平均根系生物量占比分别为 42.9%和 41.9%, HHZ 分别为 53.2%和 49.1%。这可能与直播种子入土浅, 根系横向生长增加, 多分布在土壤浅层有关^[19]。关于不同种植方式对水稻根系形态特征影响, 李杰等研究表明^[9], 拔节前直播水稻根系性状优于移栽稻, 抽穗后则表现为相反的趋势。在本研究中移栽处理各根系形态指标的平均值均显著大于直播处理。与移栽相比, 直播水稻的密度大, 群体茎蘖数多, 个体空间占有量小, 加剧了根系生长对资源的竞争, 导致根长和根系活力小^[20]。此外, 直播水稻在开花期叶片衰老率较高, 叶片氮含量较低, 导致开花后光合作用降低和干物质积累减少, 从而减少碳水化合物分配到根系并抑制根系生长^[21]。研究表明, 深层土壤根量、根系分布是水稻抗倒伏能力的主要决定因素^[22]。不同水稻品种的根系性状不同, 并且受到施肥和栽培方式的显著影响^[19]。但是, 施肥均可显著改善根系形态。施肥对于根系的改善可能归因于提高了地上部光合同化速率, 使碳水化合物更快地转移到根系^[23]。根系进入土壤的最大深度主要由基因型决定, 不同品种的根系发育往往不同, 如早熟品种比晚熟品种产生的总根长更短^[24]。在本研究条件下, 与 HHZ 相比, HLY332 对施肥的响应程度较大, 具有更大的根长、根体积、根系直径和根表面积。根系长度的增加可能有助于养分的吸收, 进而提高养分利用效率和产量^[25-26]。这也是 HLY332 的平均产量高于 HHZ 的原因之一。因此, 在水稻生产中, 应注意通过栽培措施的调控, 促进根系深扎, 同时要注意维持抽穗后的根系活力, 延缓其后期衰老消亡速度, 确保根系能够吸收供应地上部生长和籽粒灌浆所需的养分和水分。

3.2 不同种植方式和施肥对水稻产量的影响

水稻的产量水平取决于各产量构成因子在不同环境和栽培方式下的表现。单位面积有效穗数是一个重要变量, 受基因型和环境交互作用的影响很大^[4]。本研究结果表明, 有效穗数和每穗粒数对种植方式的响应存在显著差异。直播处理下每平方米有效穗数显著增加, 证明了先前的研究^[27], 即充足的有效穗数是直播水稻高产最重要的属性。直播水稻每穗粒数、结实率和千粒重均小于移栽稻。这可能是由于直播水稻的高播种率使得单位面积植株数量多, 最终导致更多的穗数, 而每穗粒数和植株数负相关^[28], 因此在有效穗数较高的情况下, 直播水稻的每穗粒数显著小于移栽稻。由此可见, 在保证有效穗数的基础上增加每穗粒数, 促进大穗的形

成, 应该是直播水稻获取高产的关键所在。而移栽稻的高产策略应该在保证大穗的基础上, 攻取足穗。无论是直播还是移栽, 施肥均可显著提高 HLY332 和 HHZ 产量, 并且两种种植方式之间差异不显著, 说明在合理施肥的情况下, 直播水稻可以获得与移栽相当的产量, 这与前人的研究结果一致^[29-30]。在农民对于轻简化种植需求迫切增加的形势下, 直播水稻是一种有前途的替代种植方式。但是直播水稻在不合理的管理措施, 以及恶劣的气候条件下更容易造成产量损失。因此, 通过优化水肥管理措施来提高水稻抗逆能力对于改善直播水稻产量是必要的。试验地点土壤 pH 和有效磷偏低, 调优土壤 pH 值、增施磷肥可以改善水稻根系特征, 从而提高水稻产量。有研究表明, 在酸性土壤中施用镁石灰石和生物炭已被证明可以缓解酸性胁迫, 提高养分有效性, 从而增加水稻根系生物量^[31]; 在缺磷土壤中施磷肥可以增加水稻根系的生物量和根表面积, 进而提升对磷的吸收效率, 增加水稻产量^[32]。直播作为一种轻简化栽培方式具备推广潜力, 但从稳产的角度来看, 采用机插秧更符合优良栽培实践的要求。移栽技术在苗期管理、水肥利用及整体田间管理上表现出更高的稳定性, 是实现水稻稳产高产的有效途径。因此, 在水稻栽培中, 应结合实际需求, 优先考虑机插秧等移栽技术, 以保障生产稳定性和作物增产潜力。值得一提的是, 由于实验条件的限制, 本设置的施肥处理和采用的品种有限, 后续应该使用更多的品种, 针对直播水稻的养分管理开展进一步研究。

4 结论

水稻的根系特性和产量水平对种植方式和施肥的响应存在显著差异。在本研究条件下, 水稻根系在土层中的分布不同是直播和移栽两种种植方式下水稻根系性状差异最显著的特征之一。直播水稻的根系主要分布在 0~5 cm 的土层, 而移栽水稻的根系则主要分布在 5~10 cm 的土层。无论是直播还是移栽, 施肥均可显著提高水稻产量, 并且两种种植方式之间无显著差异。综上, 在人们对轻简化种植迫切需求的形势下, 采用直播种植方式和科学施肥技术相结合是可行的。

参考文献:

- [1] Hou W F, Khan M R, Zhang J L, Lu J W, Ren T, Cong R H, Li X K. Nitrogen rate and plant density interaction

- enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 269: 183-192.
- [2] Kumar V, Ladha J K. Direct seeding of rice[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2011: 297-413.
 - [3] Sagare D B, Abbai R, Jain A, Jayadevappa P K, Dixit S, Singh A K, Challa V, Alam S, Singh U M, Yadav S, Sandhu N, Kabade P G, Singh V K, Kumar A. More and more of less and less: Is genomics-based breeding of dry direct-seeded rice (DDSR) varieties the need of hour?[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2020, 18(11): 2173-2186.
 - [4] Wang W Q, Peng S B, Liu H Y, Tao Y, Huang J L, Cui K H, Nie L X. The possibility of replacing puddled transplanted flooded rice with dry seeded rice in Central China: A review [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 310-320.
 - [5] Ishfaq M, Akbar N, Anjum S A, Anwar-Ijl-Haq M. Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(11): 2656-2673.
 - [6] Li L, Tian H, Zhang M H, Fan P S, Ashraf U, Liu H D, Chen X F, Duan M Y, Tang X R, Wang Z M, Zhang Z, Pan S G. Deep placement of nitrogen fertilizer increases rice yield and nitrogen use efficiency with fewer greenhouse gas emissions in a mechanical direct-seeded cropping system [J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(6): 1386-1396.
 - [7] Li L, Wu T Y, Li Y S, Hu X, Wang Z X, Liu J F, Qin W, Ashraf U. Deep fertilization improves rice productivity and reduces ammonia emissions from rice fields in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2022, 289: 108704.
 - [8] 代贵金, 岩石真嗣, 三木孝昭, 华泽田, 王彦荣. 不同耕作与施肥方法对水稻根系生长分布和活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(3): 274-278.
Dai G J, Yan S, San M, Hua Z T, Wang Y R. Effects of root distribution, growth and vigor of *japonica* rice with different cultivations and fertilizations[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(3): 274-278. (in Chinese with English abstract)
 - [9] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 高产栽培条件下种植方式对超级稻根系形态生理特征的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2208-2220.
Li J, Zhang H C, Chang Y, Gong J L, Hu Y J, Long H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Influence of planting methods on root system morphological and physiological characteristics of super rice under high-yielding cultivation condition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2208-2220. (in Chinese with English abstract)
 - [10] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 常勇, 吴桂成, 郭振华, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 稻麦两熟地区不同栽培方式超级稻分蘖特性及其与群体生产力的关系[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 309-320.
Li J, Zhang H C, Gong J L, Chang Y, Wu G C, Guo Z H, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Tillering characteristics and its relationships with population productivity of super rice under different cultivation methods in rice-wheat cropping areas[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 309-320. (in Chinese with English abstract)
 - [11] 雷小龙, 刘利, 荀文, 马荣朝, 任万军. 种植方式对杂交籼稻植株抗倒伏特性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1814-1825.
Lei X L, Liu L, Gou W, Ma R C, Ren W J. Effects of planting methods on culm lodging resistance of *indica* hybrid rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(10): 1814-1825. (in Chinese with English abstract)
 - [12] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 李春俭, 陈新平. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 42(6): 687-694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, Li C J, Chen X P. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 42(6): 687-694. (in Chinese with English abstract)
 - [13] 张洋洋, 鲁剑巍, 王友珠, 王振, 李小坤, 任涛, 丛日环. 钾肥施用方式对直播和移栽水稻产量和钾肥利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2016(1): 110-114.
Zhang Y Y, Lu J W, Wang Y Z, Wang Z, Li X K, Ren T, Cong R H. Effects of potassium fertilizer application method on yield and potassium apparent efficiency of direct-sowing rice and transplanting rice[J]. *Crops*, 2016(1): 110-114. (in Chinese with English abstract)
 - [14] 肖小军, 彭小松, 刘小三, 叶川, 贺晓鹏, 李亚贞, 郑伟, 余跑兰, 黄天宝. 施氮量和直播量对超级杂交稻五丰优 T025 产量及养分利用率的影响[J]. 杂交水稻, 2016, 31(3): 58-63.
Xiao X J, Peng X S, Liu X S, Ye C, He X P, Li Y Z, Zheng W, Yu P L, Huang T B. Effects of nitrogen rate and direct-seeding rate on yield and nutrient use efficiency of super hybrid rice Wufengyou T025[J]. *Hybrid Rice*, 2016, 31(3): 58-63. (in Chinese with English abstract)
 - [15] Farooq M, Siddique K H M, Rehman H, Aziz T, Lee D J, Wahid A. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111(2): 87-98.
 - [16] 程建平, 罗锡文, 樊启洲, 张集文, 吴建平, 王在满, 臧英. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(1): 1-5.
Cheng J P, Luo X W, Fan Q Z, Zhang J W, Wu J P, Wang Z M, Zang Y. Influence of different planting methods on growth and development characteristics and yield of

- rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [17] 许炜, 孙志贵, 田贺培, 张运波, 卢碧林. 播种和施肥方式对直播稻分蘖特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(3): 1-9.
- Xu W, Sun Z G, Tian H P, Zhang Y B, Lu B L. Effects of sowing and fertilization on tiller characteristics and yield of direct-seeded rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018, 37(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [18] Chen S, Cai S G, Chen X, Zhang G P. Genotypic differences in growth and physiological responses to transplanting and direct seeding cultivation in rice[J]. *Rice Science*, 2009, 16(2): 143-150.
- [19] Xu G W, Lu D K, Wang H Z, Li Y. Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 385-394.
- [20] Liu H, Hussain S, Zheng M, Peng S, Huang J, Cui K, Nie L. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(1): 285-294.
- [21] Chu G, Chen T, Wang Z, Yang J, Zhang J. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice[J]. *Field Crops Research*, 2014, 162: 108-119.
- [22] Yoshida S, Yoshida S, Yoshida T, Yoshida Y. Fundamentals of rice crop science[J]. International Rice Research Institute, 1981, 269.
- [23] Dingkuhn M, Schnier H F, De Datta S K, Dorffling K, Javellana C. Relationships between ripening-phase productivity and crop duration, canopy photosynthesis and senescence in transplanted and direct-seeded lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 1991, 26(3/4): 327-345.
- [24] Inukai Y, Ashikari M, Kitano H. Function of the root system and molecular mechanism of crown root formation in rice [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004, 45:17.
- [25] Gowda V R P, Henry A, Yamauchi A, Shashidhar H E, Serraj R. Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(1): 1-13.
- [26] Liu K, He A, Ye C, Liu S, Lu J, Gao M, Fan Y, Lu B, Tian X, Zhang Y. Root morphological traits and spatial distribution under different nitrogen treatments and their relationship with grain yield in super hybrid rice[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 131.
- [27] Kato Y, Okami M. Root growth dynamics and stomatal behaviour of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions[J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(1): 9-17.
- [28] Fageria N K, Carvalho M C S, dos Santos F C. Root growth of upland rice genotypes as influenced by nitrogen fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(1): 95-106.
- [29] Xu L, Li X, Wang X, Xiong D, Wang F. Comparing the grain yields of direct-seeded and transplanted rice: A meta-analysis[J]. *Agronomy*, 2019, 9(11): 767.
- [30] Xu L, Yuan S, Wang X, Chen Z, Li X, Cao J, Wang F, Huang J, Peng S. Comparison of yield performance between direct-seeded and transplanted double-season rice using ultrashort-duration varieties in Central China[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(2): 515-523.
- [31] Abdul Halim N S, Abdullah R, Karsani S A, Osman N, Ali Panhwar Q, Ishak C F. Influence of soil amendments on the growth and yield of rice in acidic soil[J]. *Agronomy*, 2018, 8(9): 165.
- [32] Mori A, Fukuda T, Vejchasarn P, Nestler J, Pariasca-Tanaka J, Wissuwa M. The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(4): 1179-1189.