

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.42012

种植方式与施氮量对杂交籼稻养分吸收特性及根系活力的影响

王 成** 马杨明** 王春雨 李志欣 罗健升 彭政岚 刘儒宏基
黄兴海 曹 云 彭政菠 马 均*

四川农业大学水稻研究所 / 农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川温江 611130

摘 要: 为探明不同种植方式与施氮量对杂交籼稻养分吸收特性、产量及根系活力的影响, 以杂交籼稻 F 优 498 为试验材料, 采用二因素裂区设计, 主区为 3 种植方式(毯苗机插、湿润精量穴直播和人工移栽), 副区为 4 个施氮量(0 kg hm⁻²、90 kg hm⁻²、135 kg hm⁻² 和 180 kg hm⁻²), 探究 F 优 498 在不同处理下对养分积累、根系活力、产量及其构成因子的影响。结果表明, 水稻抽穗期及成熟期的氮积累量均为人工移栽>机插>直播, 拔节期磷积累总量和抽穗期钾积累总量均为人工移栽最大, 拔节前直播稻的氮、磷和钾积累速率最高, 分别比机插和人工移栽高 40.68%~63.64%和 19.42%~71.43%, 不同种植方式下均在拔节至抽穗期养分积累速率达到最大; 人工移栽和机插方式下水稻产量差异不显著, 直播与人工移栽相比, 减产 8.09%~15.00%, 人工移栽的水稻千粒重、穗粒数和结实率均高于机插和直播, 但有效穗数显著降低, 分别比机插和直播低 15.99%~41.77%和 23.19%~29.60%, 施氮后产量的显著提高是由于提高了单位面积有效穗数和每穗粒数; 各种种植方式的地上部和根系干物重分别在成熟期和抽穗期达到最大, 就不同施氮量而言, 施氮处理的群体根系干物重显著高于不施氮处理; 水稻抽穗后单茎和群体伤流强度降低, 机插的单茎及群体根系活力显著高于人工移栽和直播。机插稻施氮量在中低氮水平(90~135 kg hm⁻²)较适宜, 直播稻和人工移栽稻施氮量在中高氮水平(135~180 kg hm⁻²)较适宜。

关键词: 水稻; 施氮量; 种植方式; 养分吸收特性; 根系

Effects of cropping practices and nitrogen application on nutrient uptake characteristics and root vigor of hybrid *indica* rice

WANG Cheng**, MA Yang-Ming**, WANG Chun-Yu, LI Zhi-Xin, LUO Jian-Sheng, PENG Zheng-Lan, LIU Ru-Hong-Ji, HUANG Xing-Hai, CAO Yun, PENG Zheng-Bo, and MA Jun*

Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University / Southwest Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Tillage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wenjiang 611130, Sichuan, China

Abstract: To explore the effects of different planting methods and nitrogen application rates on nutrient absorption characteristics, root activity, and yield of hybrid *indica* rice, F You 498 was used as the experimental material in a two-factor split-plot design. The main plot consisted of carpet seedling machine transplanting, wet precision hole direct seeding, and manual transplanting, while the sub-plot included four nitrogen application rates (0 kg hm⁻², 90 kg hm⁻², 135 kg hm⁻², and 180 kg hm⁻²). The effects on nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation, root activity, yield, and yield components of hybrid *indica* rice under different treatments were studied. The results showed that the total nitrogen accumulation at the heading and maturity stages was highest in manually transplanted rice, followed by mechanical transplanting, and then direct seeding. The total phosphorus accumulation at the jointing stage and potassium accumulation at the heading stage were also highest in manually transplanted rice. The nutrient

本研究由国家重点研发计划重点专项(2016YFDO300506), 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B13), 四川省教育厅重点项目(16ZA0044)和四川省学术和技术带头人培养支持经费资助。

This study was supported by the National Key Research and Key Development Program (2016YFDO300506), the National Key Technologies R & D Program of China (2013BAD07B13), the Key Projects of Sichuan Provincial Department of Education (16ZA0044), and the Sichuan Academic and Technical Leaders Training Support Funding.

* 通信作者(Corresponding author): 马均, E-mail: majunp2002@163.com

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 王成, E-mail: 15608025707@163.com; 马杨明, E-mail: 18581562114@163.com

Received (收稿日期): 2024-02-29; Accepted (接受日期): 2024-08-15; Published online (网络出版日期): 2024-09-03.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240902.1351.012>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

accumulation rate of nitrogen, phosphorus, and potassium before jointing was highest in direct-seeded rice, being 40.68%–63.64% and 19.42%–71.43% higher than in mechanical and manual transplanting, respectively. The nutrient accumulation rate peaked from jointing to heading stage under different planting methods. There was no significant difference in rice yield between manual and mechanical transplanting. However, compared to manual transplanting, direct seeding reduced rice yield by 8.09%–15.00%. The 1000-grain weight, grain number per panicle, and seed setting rate of manually transplanted rice were higher than those of mechanical transplanting and direct seeding, but the effective panicle number was significantly reduced, being 15.99%–41.77% and 23.19%–29.60% lower than those of mechanical transplanting and direct seeding, respectively. The dry matter accumulation of shoots and roots reached its maximum at the maturity and heading stages, respectively. Under manual transplanting conditions, the dry weight of shoots and roots at maturity was greater than that of mechanical transplanting and direct seeding. As the growth process advanced, the bleeding intensity of single stems and populations after heading gradually decreased, and the root activity of single stems and populations in mechanical transplanting was significantly higher than in manual transplanting and direct seeding. The optimal nitrogen application rate for machine-transplanted rice was in the middle to low range (90–135 kg hm⁻²), while for direct-seeded and manually transplanted rice, it was in the middle to high range (135–180 kg hm⁻²).

Keywords: rice; nitrogen application; cropping practices; nutrient uptake characteristics; root system

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国重要的粮食作物, 为全球粮食安全做出了巨大贡献^[1], 因此水稻生长发育过程中所需的养分尤为重要。氮、磷和钾作为水稻必需的大量元素, 施肥是水稻从农田土壤获取营养元素的重要途径。大量研究表明, 投入化肥可有效提高粮食产出^[2]。在过去七十多年中, 我国水稻产量接近翻了一番, 主要归功于肥料对作物增产的显著效果, 而在实际生产中, 农民常常过量施用肥料以期获得作物高产, 致使我国肥料利用率较一些发达国家低 10%~20%^[3], 已往研究发现一定范围内, 作物产量随氮肥用量的增加而增加, 但过量和不合理施肥会显著降低肥料利用率^[4], 可能会造成养分损失和生产利润降低, 甚至会造成环境污染等一系列问题, 严重限制了水稻生产的可持续发展。因此, 科学合理的化肥施用对提高水稻化肥利用率至关重要, 这也是当前广大农业工作者广泛关注的焦点议题。

近年来, 随着农业的发展和产业结构的调整, 水稻播种呈现出手栽、直播和机插等多元化发展的趋势^[5]; 不同种植方式通过调节水稻种群结构^[6], 调节植株生理代谢, 影响水稻源库特性^[7], 促进氮素等养分的吸收利用, 对籽粒产量有显著影响^[8], 且配合氮肥运筹^[9-10]、水氮耦合^[11-12]、耕作模式^[13]和田间管理措施等影响水稻对营养元素的吸收及利用。前人有关栽培措施对水稻氮素吸收利用特性影

响的研究较多^[14-15], 但多偏重于单一因素对水稻的氮素吸收利用特征, 而关于不同种植方式下施氮量对水稻氮、磷和钾吸收利用特性的影响及种植方式与施氮量间是否存在互作效应的研究, 还鲜见报道。

为此, 本研究以 F 优 498 为试验材料, 对不同种植方式与施氮量下水稻养分吸收特性、根系活力、产量及其构成因子进行研究, 以明确 F 优 498 在不同处理下对养分积累、根系活力、产量及其构成因子的影响, 旨在为水稻高产栽培及养分高效利用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验点概况

供试品种为四川稻区普遍应用的杂交籼稻 F 优 498 (中粳迟熟型, 全生育期 145~152 d)。试验于四川省成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验田 (30°44'N, 103°52'E) 进行。试验地气候属于亚热带湿润季风气候, 2016 年和 2017 年水稻全生育期日平均气温分别为 23.26℃和 22.32℃, 全生育期降水量分别是 828.18 mm 和 766.61 mm, 水稻生育期间试验区气象数据由四川省气象局提供(图 1), 2 年气温无明显差异, 2017 年 7 月中旬至 8 月末降雨量较 2016 相同时段有所增加。耕层土壤(0~20 cm)质地为沙壤土, 土壤理化性状见表 1。

表 1 基础土样理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of basic soil samples

年份 Year	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hydrolysable N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Olsen P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Exchangeable K (mg kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	pH	容重 Bulk density (g cm ⁻³)
2016	1.07	118.42	14.10	49.70	25.07	6.61	1.71
2017	1.19	88.96	12.26	59.91	20.13	6.45	1.88

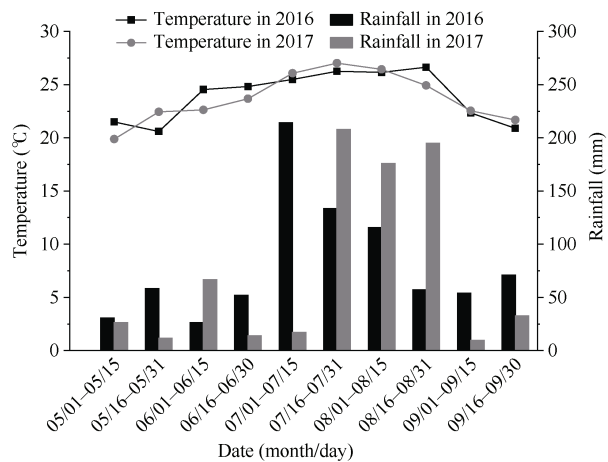


图 1 水稻生育时期气温与降雨量
Fig. 1 Temperature and rainfall during the rice growth period

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计, 主区设毯苗机插(T1)、湿润精量穴直播(T2)和人工移栽(T3)共 3 种植方式, 副区设 0 kg hm⁻² (N0)、90 kg hm⁻² (N1)、135 kg hm⁻² (N2)和 180 kg hm⁻² (N3)共 4 个施氮水平。施用的肥料种类氮肥为尿素(N 含量 46%), 磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%), 钾肥为氯化钾(K₂O 含量 60%), 氮肥运筹采用基肥: 蘖肥: 穗肥为 3: 3: 4。基肥于播前一天施用, 机插和人工移栽的蘖肥于移栽后 7 d 施用, 直播的蘖肥于秧苗五叶一心期施用, 穗肥分为促花肥和保花肥按 1: 1 的比例分别在倒四叶(拔节期)和倒二叶(孕穗期)施用。磷肥(75 kg hm⁻²)和钾肥(150 kg hm⁻²)全部作基肥施用。12 个处理, 重复 3 次, 共计 36 个小区。小区面积为 24 m², 小区间筑埂(宽 40 cm, 高 30 cm), 并用塑料薄膜包裹, 以防串肥串水, 其余田间管理按照当地水稻高产灌溉方式进行。

2016 年毯苗机插分别采用塑料软盘和东洋

PF455S 四行插秧机进行育秧和插秧, 干谷量 70 g 盘⁻¹, 秧龄 38 d, 叶龄 4.5~5.5 叶, 无分蘖; 直播稻浸种催芽露白后进行直播, 播种量 22.5 kg hm⁻²; 早育秧后进行人工移栽, 秧龄 38 d, 叶龄 4.5~5.5 叶, 无分蘖。机插和人工移栽于 9 月 12 日收获, 直播于 9 月 25 日收获。

2017 年毯苗机插分别采用塑料软盘和东洋 PF455S 四行插秧机进行育秧和插秧, 干谷量 70 g 盘⁻¹, 秧龄 33 d, 叶龄 4~5 叶, 无分蘖; 直播稻浸种催芽露白后进行直播, 播种量 22.5 kg hm⁻²; 早育秧后进行人工移栽, 秧龄 33 d, 叶龄 4.5~5.5 叶, 无分蘖。机插于 9 月 7 日收获, 直播于 9 月 18 日收获, 人工移栽于 8 月 30 日收获, 不同种植方式的主要生育时期见表 2。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系活力调查 分别在抽穗及抽穗后 7 d、14 d 和 21 d, 每小区按平均茎蘖数取 2 株水稻, 于当日下午 19:00, 从地上部 10 cm 处剪去茎秆, 套上称重后的伤流管, 于次日上午 07:00 取下, 测定伤流量(2017 年测定)。

1.3.2 干物质积累 分别在水稻拔节期、抽穗期和成熟期时, 各小区选择 3 株具有代表性且生长一致的水稻(按平均茎蘖数取样), 将根、茎、叶和穗(抽穗期及成熟期)分离, 105℃下杀青 30 min 后, 75℃下烘干至恒重并称重。

1.3.3 氮、磷和钾素积累 将 1.3.2 中各时期烘干并称重后的植株茎、叶和穗粉碎, 过 0.2 mm 孔径筛, 采用浓 H₂SO₄-H₂O₂法消煮, 用丹麦 FOSS 公司的 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定全氮含量, 用钒钼黄比色法测定全磷含量, 用火焰分光光度计测定全钾含量。

表 2 水稻主要生育时期
Table 2 Main growth stages of rice

年份 Year	种植方式 Transplanting methods	播种时间 Sowing date (month/day)	移栽时间 Transplanting date (month/day)	生育时期 Growth stage		
				拔节期 Jointing (month/day)	抽穗期 Heading (month/day)	成熟期 Maturity (month/day)
2016	T1	04/15	05/21	06/28	08/01	09/12
	T2	05/23	—	07/14	08/17	09/25
	T3	04/15	05/23	06/28	08/01	09/12
2017	T1	04/05	05/08	06/19	07/26	09/07
	T2	05/08	—	06/30	08/04	09/18
	T3	04/05	05/08	06/19	07/22	08/30

T1: 毯苗机插; T2: 精量穴直播; T3: 人工移栽。
T1: mechanical transplanting; T2: direct seeding; T3: artificial transplanting.

1.3.4 考种与计产 于收获前先调查各小区有效穗数, 每小区取 5 株具有代表性的植株(按平均茎蘖数取样)进行考种, 测定千粒重、每穗实粒数、瘪粒数, 计算结实率。计产时, 每小区去除边行后, 按实收株数计产。

1.4 数据计算

(1) 氮、磷、钾素积累总量 = Σ 单位面积植株各部位氮、磷、钾的积累量(成熟期);

(2) 氮、磷、钾素积累量(kg hm^{-2}) = 该时期地上部干物重 $\times$ 含氮、磷、钾率;

(3) 氮、磷、钾素阶段积累速率($\text{kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) = (后一时期氮、磷、钾的积累量 - 前一时期氮、磷、钾的积累量)/该生育时期天数。

1.5 数据整理及分析

使用 Microsoft Excel 整理数据, 使用 DPS 对数据进行方差分析, 采用 Origin 绘图, 并以最小极差显著法(LSD)检验显著性, $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 种植方式和施氮量对杂交籼稻产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, 种植方式对水稻有效穗、穗粒数和结实率影响达极显著水平, 氮素水平对水稻有效

穗、穗粒数、结实率和产量影响达显著或极显著水平。不同种植方式下, 人工移栽(T3)和机插(T1)的水稻产量基本持平, 而直播(T2)显著降低, T1 和 T3 分别比 T2 增产 9.92%~13.80%和 8.09%~15.00%。施氮处理的产量显著高于不施氮处理且以 N3 处理最高, 表现为 $N3 > N2 > N1 > N0$; 在不同种植方式下, T1、T2 和 T3 处理的 N1、N2 和 N3 比 N0 分别增产 5.39%~15.96%、6.04%~15.94%和 9.45%~33.91%。2 年间不同种植方式下氮素水平互作对产量的影响各不相同, 2016 年 T1N3 产量最高, 而 2017 年则是 T3N3 最高。

产量构成上, 2 年试验均表现为: T1、T2 有效穗数显著高于 T3, 但 T1 和 T2 千粒重、穗粒数和结实率均低于 T3, 其中 2017 年 T3 千粒重显著高于 T1。从氮素水平来看, 提高施氮水平平均表现出增产, 但 N3 处理下增产并不显著, 随施氮量的增加, 稻株产量的增幅呈先大后小的变化趋势, 有效穗数随着施氮水平的增加而逐渐增加, N0 处理下千粒重和结实率均高于其余氮处理, 其余氮处理间差异不显著。

2.2 种植方式和施氮量对杂交籼稻物质积累的影响

由表 4 可以看出, 除成熟期的根系干重外, 种植方式对各生育时期的水稻干重有极显著的影响, 且氮素水平对水稻干重的影响均达极显著水平。

表 3 不同种植方式与施氮量对产量及构成因子的影响

Table 3 Effect of different cropping practices and nitrogen application on yield and its components

处理 Treatment		水稻产量及其构成因子 Rice yield and its components				
		有效穗 Effective panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t hm^{-2})
2016						
T1	N0	177.32 b	194.48 c	92.83 a	31.39 a	10.46 c
	N1	184.96 b	233.82 a	88.56 b	29.57 b	11.21 b
	N2	205.79 a	212.74 b	84.82 c	30.04 b	11.70 a
	N3	209.95 a	217.61 b	87.67 b	29.89 b	12.13 a
平均值 Mean		194.50	214.66	88.47	30.22	11.38
T2	N0	190.56 b	172.58 d	82.51 a	31.38 a	9.39 b
	N1	203.21 ab	224.09 c	72.51 b	30.20 b	10.06 a
	N2	210.19 a	233.03 b	65.98 c	30.78 ab	10.12 a
	N3	216.56 a	244.95 a	73.94 b	29.70 c	10.44 a
平均值 Mean		206.57	218.66	73.73	30.52	10.00
T3	N0	150.60 b	235.31 c	95.51 a	31.73 a	10.48 b
	N1	163.31 ab	277.82 a	87.99 b	29.94 c	11.47 a
	N2	172.32 a	260.61 b	91.64 ab	30.05 bc	11.95 a
	N3	184.55 a	262.00 b	91.75 a	30.67 b	12.10 a

(续表 3)

处理 Treatment		水稻产量及其构成因子 Rice yield and its components				
		有效穗 Effective panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikeletes per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t hm^{-2})
平均值 Mean		167.69	258.93	91.72	30.60	11.50
F 值	T	22.11**	59.93**	96.08**	0.32	20.83**
F-value	N	9.70**	110.25**	21.41**	19.52**	23.48**
	T×N	0.21	15.14**	3.81*	1.79	0.74
2017						
T1	N0	196.76 c	189.20 b	84.50 a	29.89 a	10.57 c
	N1	215.97 b	205.30 a	79.62 b	29.14 b	11.14 b
	N2	234.03 a	190.38 b	79.28 b	29.06 b	11.90 a
	N3	241.67 a	188.33 b	76.02 c	28.83 b	12.03 a
平均值 Mean		222.11	193.30	79.86	29.23	11.41
T2	N0	168.35 d	190.43 a	80.39 a	30.54 a	9.60 c
	N1	202.84 c	183.67 ab	78.91 a	30.01 ab	10.18 b
	N2	213.86 b	180.55 ab	78.42 a	29.68 b	10.60 b
	N3	227.12 a	171.55 b	73.62 b	29.36 b	11.13 a
平均值 Mean		203.04	181.55	77.84	29.90	10.38
T3	N0	135.29 c	235.35 b	92.82 a	30.77 a	9.23 c
	N1	151.41 b	254.01 a	91.58 a	30.67 ab	11.35 b
	N2	165.70 a	230.64 b	86.15 b	30.60 ab	11.94 a
	N3	174.27 a	233.65 b	85.20 b	30.01 b	12.36 a
平均值 Mean		156.67	238.41	88.94	30.51	11.22
F 值	T	158.89**	63.13**	77.67**	14.43*	6.71
F-value	N	123.00**	4.67*	15.79**	1.75	76.03**
	T×N	2.25	1.21	1.04	3.05*	6.92**

T1: 毯苗机插; T2: 精量穴直播; T3: 人工移栽; N0、N1、N2 和 N3 分别代表施氮量为 0 kg hm^{-2} 、 90 kg hm^{-2} 、 135 kg hm^{-2} 和 180 kg hm^{-2} 。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著, *和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

T1: mechanical transplanting; T2: direct seeding; T3: artificial transplanting; N0, N1, N2, and N3 indicate 0 kg hm^{-2} , 90 kg hm^{-2} , 135 kg hm^{-2} , and 180 kg hm^{-2} of nitrogen, respectively. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 4 种植方式和施氮量对杂交籼稻物质积累的影响

Table 4 Effect of cropping method and nitrogen application on the accumulation of matter in hybrid *indica* rice (kg hm^{-2})

处理 Treatment		群体地上部干重 Population shoot dry matter			群体根系干重 Population root dry matter		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
2016							
T1	N0	2150 c	9110 c	15,520 b	773 b	954 b	755 c
	N1	2470 b	10,120 b	17,220 a	918 a	1156 a	960 a
	N2	2590 b	10,800 a	17,720 a	941 a	1025 ab	926 ab
	N3	3080 a	11,100 a	17,590 a	881 a	1094 a	905 b
平均值 Mean		2572	10,283	17,012	878	1057	886
T2	N0	2270 c	10,020 b	16,170 b	736 b	1121 b	787 c
	N1	2430 bc	10,700 a	17,170 ab	923 a	1341 a	1017 a
	N2	2770 ab	10,900 a	17,530 ab	873 a	1324 a	951 ab
	N3	3050 a	11,030 a	18,090 a	854 a	1263 a	946 b

(续表 4)

处理 Treatment		群体地上部干重 Population shoot dry matter			群体根系干重 Population root dry matter		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
平均值 Mean		2630	10,660	17,240	846	1262	925
T3	N0	1610 b	9060 b	15,690 b	559 b	982 a	832 c
	N1	1940 ab	9300 ab	17,190 a	874 a	1091 a	940 b
	N2	2070 a	9530 ab	17,910 a	837 a	1028 a	1093 a
	N3	2260 a	9930 a	18,770 a	829 a	1006 a	1006 b
平均值 Mean		1970	9460	17,390	775	1027	968
F 值	T	8.45*	22.17**	0.28	13.77	25.39*	94.43*
F-value	N	30.66**	11.04**	8.90**	30.18**	3.61	56.99**
	T×N	0.73	1.11	0.34	2.10	0.43	5.45*
2017							
T1	N0	2030 c	10,230 d	15,430 d	354 c	726 b	502 b
	N1	2160 c	11,300 c	16,810 c	428 b	833 a	594 a
	N2	2600 b	11,760 b	17,859 b	564 a	811 a	642 a
	N3	3120 a	12,130 a	18,450 a	558 a	808 a	614 a
平均值 Mean		2480	11,350	17,140	476	794	588
T2	N0	1970 c	8120 d	14,250 d	498 b	684 b	517 b
	N1	2250 b	9130 c	16,290 c	530 b	792 a	612 a
	N2	2650 a	9730 b	16,900 b	666 a	811 a	625 a
	N3	2860 a	10,560 a	17,550 a	688 a	856 a	622 a
平均值 Mean		2430	9380	16,250	596	786	594
T3	N0	2380 c	8310 c	13,830 d	571 b	844 b	556 b
	N1	2680 b	10,860 b	17,090 c	610 ab	945 a	596 ab
	N2	3050 a	11,100 ab	17,990 b	619 ab	955 a	641 a
	N3	3080 a	11,250 a	18,730 a	648 a	939 a	674 a
平均值 Mean		2800	10,380	16,910	612	921	617
F 值	T	19.06**	119.19**	129.09**	189.80**	134.66**	9.21
F-value	N	70.26**	428.99**	196.54**	32.69**	13.43**	8.44**
	T×N	2.39	21.06**	5.98**	3.54*	0.79	0.38

处理同表 3。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著,*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 3. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2016 年各处理在拔节期和抽穗期的地上部及根系干物重均表现为 T3 最低,而成熟期 T3 高于 T1 及 T2,分别高 2.23%~12.05%和 4.60%~9.19%。2017 年各处理下, T3 条件下水稻全生育时期的群体根系干重及拔节期的群体地上部干重均极显著大于 T1 和 T2,表明人工移栽有利于根系物质积累。不同种植方式的地上部和根系干物重分别在成熟期和抽穗期达到最大。T1、T2 和 T3 抽穗期的根系干物重比拔节期分别增加了 20.40%~66.99%、31.91%~49.12%和 32.52%~50.43%;随着生育进程的推进,根系逐渐衰老死亡,T1、T2 和 T3 成熟期的根系干物重比拔节期分别衰减了 16.16%~25.97%、24.41%~26.69%和

5.75%~33.03%。另外,氮素水平对水稻整个生育时期的地上干物重及拔节期和成熟期的根系干物重均有极显著的影响。就不同施氮量而言,施氮处理的群体根系干物重显著高于 N0 处理,但不同施氮水平间差异不显著。在水稻不同生育期,不同种植方式下群体地上部干重均表现为 N3>N2>N1>N0。

2.3 种植方式和施氮量对主要生育时期氮、磷和钾素积累量及积累速率的影响

由表 5 可知,种植方式对水稻成熟期的氮素积累量及钾素积累量影响达显著或极显著水平,氮素水平对水稻氮、磷和钾积累量的影响达极显著水平。人工移栽(T3)方式下,抽穗期及成熟期植株氮素总

表 5 不同种植方式下氮素水平对杂交籼稻各生育时期氮磷钾素积累量的影响

Table 5 Effect of nitrogen levels on nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation of hybrid *indica* rice at various fertility periods under different cropping practices (kg hm^{-2})

处理 Treatment		氮素积累量 N accumulation			磷素积累量 P accumulation			钾素积累量 K accumulation		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
2016										
T1	N0	36.86 d	78.47 d	113.38 d	7.12 c	20.66 d	32.09 b	59.94 d	147.98 d	164.08 c
	N1	47.15 c	115.61 c	151.81 c	9.46 b	26.91 c	34.26 b	66.83 c	168.13 c	174.79 b
	N2	52.08 b	152.49 b	173.38 b	11.06 a	32.1 b	39.61 a	74.44 b	185.08 b	201.29 a
	N3	58.14 a	174.34 a	192.79 a	11.84 a	36.97 a	43.04 a	83.89 a	190.93 a	211.96 a
平均值 Mean		48.56	130.23	157.84	9.87	26.60	37.25	71.28	173.03	188.03
T2	N0	37.72 c	90.00 d	108.52 c	5.58 c	19.09 b	33.86 b	60.73 c	143.90 d	150.51 c
	N1	43.66 b	122.95 c	159.87 b	10.18 b	27.63 a	39.52 a	66.65 b	163.80 c	178.3 b
	N2	48.46 a	136.67 b	168.11 b	13.21 a	28.15 a	39.69 a	75.33 a	171.45 b	193.94 a
	N3	51.52 a	147.67 a	183.02 a	13.89 a	30.22 a	39.69 a	79.12 a	184.76 a	200.01 a
平均值 Mean		45.34	124.32	154.88	10.71	26.27	38.19	70.46	165.98	180.69
T3	N0	38.74 c	92.14 d	123.71 d	7.02 d	20.93 c	33.88 c	60.07 b	143.57 d	166.92 c
	N1	42.64 c	118.58 c	156.65 c	12.03 c	24.55 b	36.52 bc	65.24 b	173.51 c	185.14 b
	N2	49.67 b	155.89 b	173.43 b	15.01 b	29.42 a	40.49 ab	74.45 a	183.54 b	207.93 a
	N3	54.97 a	166.56 a	193.03 a	17.00 a	31.49 a	44.24 a	81.58 a	188.12 a	211.21 a
平均值 Mean		46.51	133.29	161.71	12.76	29.16	38.78	70.34	172.18	192.8
F 值	T	5.10	13.65**	1.68	18.93**	7.50*	6.00	0.11	2.54	2.97
F-value	N	61.66**	405.74**	143.3**	88.16**	56.85**	21.44**	43.73**	713.78**	82.18**
	T×N	1.29	11.07**	1.13	3.64*	2.24	2.00	0.32	8.14**	0.98
2017										
T1	N0	32.37 d	96.61 d	136.61 d	9.97c	35.22 c	40.88 c	60.33 d	156.98 d	196.69 d
	N1	36.05 c	120.63 c	169.91 c	10.28 c	41.65 b	44.94 b	72.02 c	190.62 c	224.66 c
	N2	52.42 b	139.82 b	181.82 b	12.60 b	45.80 a	50.02 a	82.11 b	196.95 b	239.69 b
	N3	62.73 a	151.63 a	195.75 a	14.86 a	46.74 a	53.25 a	92.78 a	213.04 a	259.52 a
平均值 Mean		45.89	127.17	171.02	11.93	42.35	47.27	76.81	189.40	230.14
T2	N0	30.63 c	74.78 d	122.84 d	8.80 c	33.49 c	43.22 b	60.315 c	159.50 c	196.61 c
	N1	35.37 b	112.83 c	155.82 c	10.52 b	37.34 b	50.46 a	70.705 b	188.22 b	220.11 b
	N2	41.13 a	126.79 b	170.46 b	11.79 ab	39.74 b	51.00 a	76.39 ab	200.54 a	229.72 a
	N3	39.88 ab	147.18 a	183.33 a	12.37 a	44.57 a	53.43 a	81.01 a	209.37 a	239.86 a
平均值 Mean		36.75	115.40	158.11	10.87	38.78	49.52	72.105	189.41	221.57
T3	N0	35.31 c	102.94 d	136.74 c	10.86 b	33.27 c	37.95 c	68.84 c	162.2 d	204.72 d
	N1	37.45 bc	125.23 c	174.58 b	11.04 b	42.41 b	45.01 b	80.20 b	184.1 c	219.20 c
	N2	43.08 b	139.64 b	182.5 b	13.35 a	44.02 b	49.40 ab	87.39 ab	199.23 b	235.86 b
	N3	49.76 a	152.14 a	195.27 a	13.74 a	48.07 a	54.40 a	92.93 a	210.48 a	251.31 a
平均值 Mean		41.40	129.99	172.27	12.25	41.94	46.69	82.34	189.00	227.77
F 值	T	17.79	6.40	40.63*	2.23	15.28	0.59	5.85	0.01	39.23**
F-value	N	57.70**	193.42**	183.80**	25.35**	75.38**	22.66**	34.26**	114.48**	107.04**
	T×N	8.49*	2.75	0.27	1.21	1.85	0.74	0.71	0.64	1.90

处理同表 3。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著, *和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 3. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

积累量最多, 分别比机插(T1)和直播(T2)高 0.73%~2.45%和 4.41%~12.64%, 可见 T3 有利于氮素积累; 拔节期植株磷素积累量 T3 最多, 分别比 T1 和 T2 高 2.68%~29.28%和 12.70%~19.14%; T2 方式下, 成熟期植株钾素积累量最少, 分别比 T1 和 T3 低 3.87%~4.06%和 2.80%~6.70%。钾积累量拔节至抽穗期的最高, 拔节前次之, 抽穗至成熟期最低, 抽穗至成熟期主要依靠其他途径转运。随生育时期延长, 植株氮、磷和钾积累量均随氮素水平的升高而显著增加, 且均为 N3>N2>N1>N0, 表现出氮磷、氮钾协同吸收, 但是在中高氮条件下, 植株磷素积累增量不显著。从氮、磷和钾积累量的增幅来看, 拔节至抽穗期的吸收量均大于抽穗至成熟期, 且随着施氮量增加, 稻株养分积累量的增幅呈先大后小的变化趋势。

由表 6 可知, 种植方式对拔节前植株氮、磷和钾素积累速率和拔节至抽穗期植株磷素积累速率均有显著或极显著的影响。拔节至抽穗期是植株氮、磷和钾素积累速率最高的时期, 表明水稻在拔节至抽穗期需要大量的氮、磷和钾来支持生长和代谢过程。从种植方式来看, T2 拔节前的氮素积累速率和拔节前及抽穗至成熟期的磷素积累速率均高于 T1 和 T3, 分别高 34.92%~63.64%和 5.34%~91.11%; T3 方式下, 拔节至抽穗期的氮素积累速率和抽穗至成熟期的钾素积累速率均高于 T1 和 T2, 分别高 0.47%~37.47%和 9.91%~44.28%。就氮素水平而言, 抽穗至成熟期中低氮水平(90~135 kg hm⁻²)有利于提高氮素的积累, 而钾素积累速率在 N2 和 N3 处理下差异不显著; 抽穗至成熟期 T2 在 N1 和 N2 处理, T3 则在 N3 处理下磷素积累速率较高。

表 6 不同种植方式下氮素水平对杂交籼稻各生育时期氮磷钾素积累速率的影响

Table 6 Effect of nitrogen levels on the rate of nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation in hybrid *indica* rice at various fertility periods under different cropping practices (kg hm⁻² d⁻¹)

		氮素积累速率 N accumulation rate			磷素积累速率 P accumulation rate			钾素积累速率 K accumulation rate		
处理 Treatment		拔节前 Before Jointing	拔节- 抽穗期 Jointing- Heading	抽穗- 成熟期 Heading- Maturity	拔节前 Before Jointing	拔节- 抽穗期 Jointing- Heading	抽穗- 成熟期 Heading- Maturity	拔节前 Before Jointing	拔节- 抽穗期 Jointing- Heading	抽穗- 成熟期 Heading- Maturity
2016										
T1	N0	0.50 d	1.22 d	0.83 a	0.10 c	0.40 d	0.27 a	0.81 d	2.61 c	0.38 a
	N1	0.64 c	2.01 c	0.86 a	0.13 b	0.51 c	0.18 ab	0.90 c	2.96 b	0.16 b
	N2	0.70 b	2.95 b	0.50 b	0.15 a	0.62 b	0.18 ab	1.01 b	3.31 a	0.39 a
	N3	0.79 a	3.42 a	0.44 b	0.16 a	0.74 a	0.14 b	1.13 a	3.12 ab	0.50 a
平均值 Mean		0.66	2.40	0.66	0.13	0.57	0.19	0.96	2.99	0.36
T2	N0	0.90 c	1.54 c	0.47 b	0.11 c	0.40 b	0.38 a	1.17 c	2.41 b	0.17 bd
	N1	1.04 b	2.33 b	0.95 a	0.20 b	0.51 a	0.31 ab	1.28 b	2.85 a	0.37 abc
	N2	1.15 a	2.60 a	0.81 a	0.25 a	0.44 ab	0.30 ab	1.45 a	2.80 a	0.58 a
	N3	1.23 a	2.83 a	0.91 a	0.27 a	0.48 ab	0.24 b	1.52 a	3.03 a	0.39 ab
平均值 Mean		1.08	2.32	0.78	0.21	0.46	0.31	1.35	2.77	0.38
T3	N0	0.52 b	1.57 c	0.75 a	0.09 d	0.41 a	0.31 a	0.81 b	2.51 b	0.56 a
	N1	0.58 b	2.23 b	0.91 a	0.16 c	0.37 a	0.29 a	0.88 b	3.08 a	0.28 b
	N2	0.67 a	3.12 a	0.42 b	0.20 b	0.42 a	0.26 a	1.01 a	3.13 a	0.58 a
	N3	0.74 a	3.28 a	0.63 ab	0.23 a	0.43 a	0.30 a	1.10 a	3.10 a	0.55 a
平均值 Mean		0.63	2.55	0.68	0.17	0.41	0.29	0.95	2.95	0.49
F 值	T	570.40**	4.22	0.66	35.17**	18.15**	14.89*	98.49**	173.17**	0.39
F-value	N	48.80**	212.28**	3.83*	104.50**	6.51**	2.66	49.57**	22.79	3.50
	T×N	0.90	7.01**	2.52	6.57**	3.83*	0.56	0.40	1.18	1.47
2017										
T1	N0	0.44 c	1.78 b	0.93 a	0.14 b	0.70 b	0.13 a	0.83 c	2.66 b	0.97 ab
	N1	0.49 c	2.35 a	1.15 a	0.14 b	0.87 a	0.08 a	0.99 b	3.13 a	0.86 b
	N2	0.72 b	2.43 a	0.98 a	0.17 a	0.92 a	0.10 a	1.12 a	3.06 a	1.04 a
	N3	0.86 a	2.47 a	1.03 a	0.20 a	0.89 a	0.15 a	1.27 a	3.35 a	1.13 a

(续表 6)

处理 Treatment		氮素积累速率 N accumulation rate			磷素积累速率 P accumulation rate			钾素积累速率 K accumulation rate		
		拔节前 Before Jointing	拔节- 抽穗期 Jointing- Heading	抽穗- 成熟期 Heading- Maturity	拔节前 Before Jointing	拔节- 抽穗期 Jointing- Heading	抽穗- 成熟期 Heading- Maturity	拔节前 Before Jointing	拔节- 抽穗期 Jointing- Heading	抽穗- 成熟期 Heading- Maturity
平均值	Mean	0.63	2.26	1.02	0.16	0.85	0.11	1.05	3.05	1.00
T2	N0	0.71 c	1.26 c	1.07 a	0.20 c	0.71 c	0.22 a	1.40 c	2.76 c	0.83 a
	N1	0.82 b	2.21 b	0.96 a	0.24 b	0.77 b	0.29 a	1.64 b	3.32 b	0.69 ab
	N2	0.96 a	2.45 b	0.97 a	0.27 ab	0.80 b	0.25 a	1.77 ab	3.68 ab	0.69 ab
	N3	0.93 a	3.07 a	0.80 a	0.29 a	0.92 a	0.20 a	1.88 a	3.83 a	0.58 b
平均值	Mean	0.85	2.25	0.95	0.25	0.80	0.24	1.68	3.40	0.70
T3	N0	0.48 c	2.05 c	0.89 b	0.15 b	0.68 c	0.12 a	0.94 b	2.79 b	1.18 a
	N1	0.51 bc	2.66 b	1.30 a	0.15 ab	0.95 b	0.07 a	1.10 a	3.21 a	0.83 b
	N2	0.59 ab	2.93 ab	1.13 ab	0.18 a	0.93 b	0.14 a	1.20 a	3.40 a	1.03 ab
	N3	0.68 a	3.10 a	1.14 ab	0.19 a	1.04 a	0.17 a	1.27 a	3.58 a	0.98 ab
均值	Mean	0.57	2.68	1.11	0.17	0.90	0.12	1.13	3.24	1.01
F 值	T	66.39*	4.60	3.22	56.90*	54.32*	0.27	80.35*	8.53	104.65**
F-value	N	36.47**	70.43**	1.18	16.60**	55.15**	0.87	27.56**	15.86*	2.20
	T×N	3.50*	5.24*	1.11	0.95	5.42*	0.34	0.40	0.61	1.31

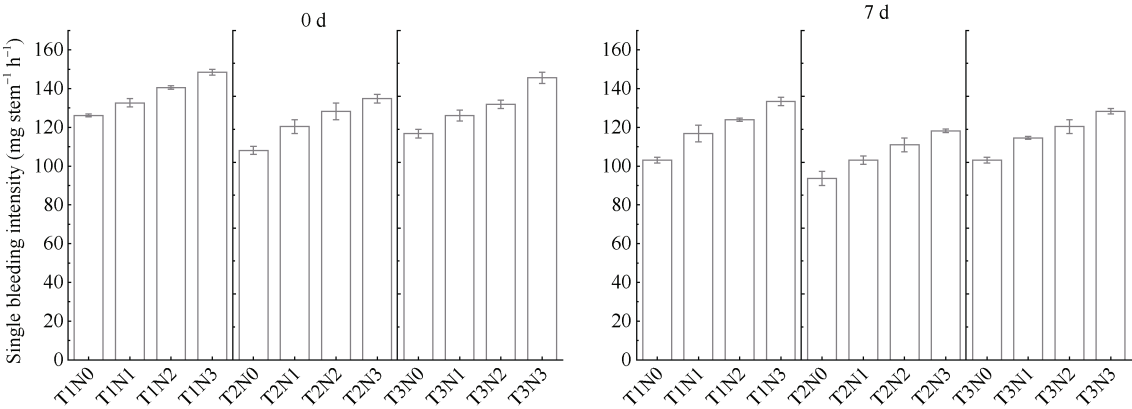
处理同表 3。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著,*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 3. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.4 种植方式和施氮量对杂交籼稻根系伤流强度的影响

由图 2 可知,随着生育进程的推进,杂交籼稻抽穗后单茎伤流强度逐渐降低,在 7~14 d 下降幅度最大。不同种植方式下,抽穗期机插(T1)单茎根系活力大于直播(T2)和人工移栽(T3),但在抽穗后 7~21 d, T1 和 T2 的单茎根系伤流强度下降速度快于 T3, T3 在抽穗后期还能维持较高的单茎根系伤流强度。就氮素水平而言,根系伤流强度均表现为 N3>N2> N1>N0, 且差异显著;由图 3 可知,随着抽穗期进程的推进,抽穗后根系群体伤流强度也逐

渐降低,在 14~21 d 下降幅度最大。抽穗到抽穗后 21 d 的 T1 群体根系伤流强度明显高于 T2 和 T3, 群体优势明显; T3 较 T1 及 T2 在抽穗期的单茎根系伤流强度降幅较小。

由表 7 可知,抽穗后 0 d、7 d、14 d 和 21 d 的水稻单茎和群体根系伤流强度与产量呈显著或极显著的正相关关系,而与穗粒数无显著相关性。抽穗后 0 d、7 d 和 14 d 的群体根系伤流强度与结实率呈显著或极显著的负相关,抽穗后 0 d、7 d、14 d 和 21 d 的群体根系伤流强度与有效穗数呈极显著的正相关。



(图 2)

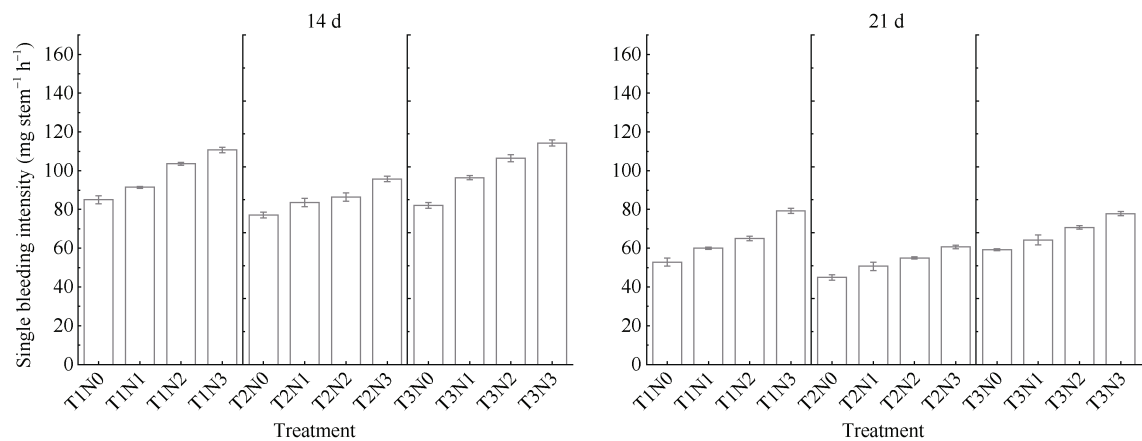


图 2 不同种植方式下氮素水平对抽穗后水稻单茎根系伤流强度的影响
Fig. 2 Effects of nitrogen levels on root bleeding intensity of single stem rice after heading under different planting patterns
处理同表 3。Treatments are the same as those given in Table 3.

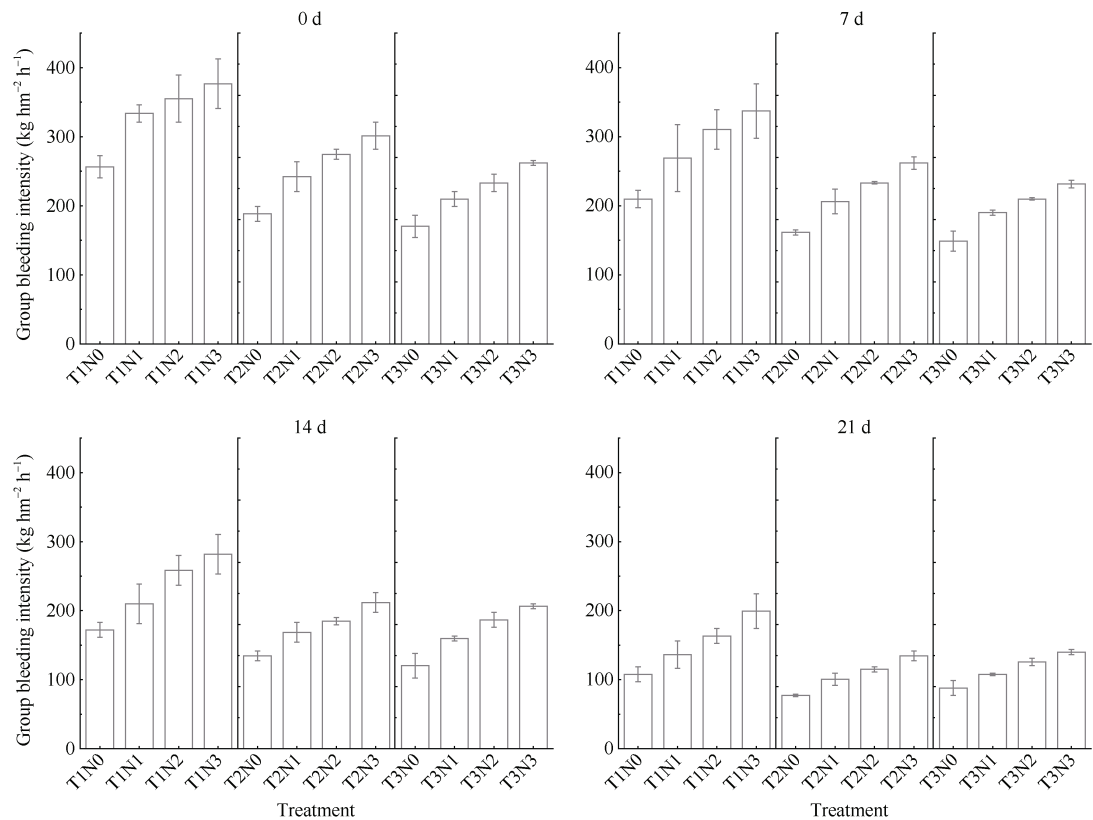


图 3 不同种植方式下氮素水平对抽穗后水稻群体根系伤流强度的影响
Fig. 3 Effects of nitrogen levels on root bleeding intensity of population stem of rice after heading under different planting patterns
处理同表 3。Treatments are the same as those given in Table 3.

表 7 不同生育时期根系活力与产量及其构成因素的相关关系
Table 7 Correlation between root activity at different growth stages and yield and its components

时间 Time	根系参数 Root system traits	有效穗数 Effective panicles	穗粒数 Spikeletes per panicle	结实率 Seed-setting rate	产量 Yield
抽穗后 0 d 0 day after heading	SBI	0.58*	-0.04	-0.34	0.90**
	GBI	0.91**	-0.49	-0.70**	0.64*
抽穗后 7 d 7 days after heading	SBI	0.45	0.13	-0.23	0.92**
	GBI	0.88**	-0.43	-0.67*	0.70**

(续表 7)

时间 Time	根系参数 Root system traits	有效穗数 Effective panicles	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate	产量 Yield
抽穗后 14 d 14 days after heading	SBI	0.26	0.28	-0.07	0.94**
	GBI	0.82**	-0.34	-0.60*	0.79**
抽穗后 21 d 21 days after heading	SBI	0.14	0.39	0.07	0.84**
	GBI	0.73**	-0.22	-0.49	0.79**

SBI: 单茎伤流强度; GBI: 群体伤流强度。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平相关性显著。

SBI: single Bleeding Intensity; GBI: group Bleeding Intensity. * and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

3.1 不同种植方式下氮素水平对水稻产量及其构成因素的影响

前人对不同种植方式下氮素水平对水稻产量影响的研究结果^[16]与本试验结果一致, 表现为人工移栽>机插>直播, 直播较人工移栽减产 8.09%~15.00%, 本研究中直播稻产量低主要是由于低结实率的限制, 原因可能是直播稻有效穗数和总颖花数高, 且营养生长期缩短^[17], 造成库大源不足的失衡, 不利于籽粒灌浆结实; 机插稻产量较低是由总颖花量不足、穗粒数低造成的。另外, 中、高氮条件下, 产量无显著性差异, 表明当氮肥施用过多时, 可能会使成熟期茎叶的氮贮存量增加, 导致水稻叶片和茎鞘徒长, 不能有效流向穗部, 产量没有明显提高。对于影响产量及其构成因子的因素, 前人研究的结果不尽相同。李杰等^[18]认为造成不同种植方式下水稻产量不同的原因是千粒重和结实率的差异, 王文霞等^[19]试验结果表明水稻产量的提高主要得益于有效穗数增加。

从本试验产量构成上来看, 机插稻施氮量在中低氮水平(90~135 kg hm⁻²)穗粒数和结实率较高, 直播稻和人工移栽稻在中高氮水平(135~180 kg hm⁻²)取得较高的有效穗数。人工移栽和机插的水稻产量基本持平, 而直播最低, 减产 8.09%~15.00%; 机插和直播有效穗数均显著高于人工移栽, 但千粒重、穗粒数和结实率显著降低。究其原因可能是人工移栽没有明显的返青期, 具有良好根系构型, 可避免和降低前期无效分蘖大量发生、中期群体过大^[20]、后期穗粒数和结实率大幅下降, 实现“增粒扩大产量库容”。虽然相关研究结果可能因品种、环境及田间管理措施不尽相同, 但大量研究认为机插稻较手插稻在产量构成因素上差异不大。

3.2 不同种植方式下氮素水平对杂交籼稻物质积累的影响

干物质的生产、积累及其转运最终形成了水稻的产量, 而氮肥条件、栽培方式及二者互作效应对水稻干物质的积累和分配存在一定的影响^[21]。本试验结果表明, 不同种植方式的地上部和根系干物质积累量分别在成熟期和抽穗期达到最大, 表明水稻高产群体干物质积累的优势在于抽穗前。地上部干物质积累均以中、高氮水平处理较高, 成熟期以 T3N3 处理最高。分蘖盛期至齐穗期, 干物质积累以叶片、茎鞘为主要增重器官, 叶片、茎鞘干物重均随施氮量的增加而提高。机插稻施氮量在中、低氮水平下根系干物重较高, 机插稻、直播稻和人工移栽稻在中、高氮水平下获得较高的群体地上部干重。2016 年水稻拔节末期至成熟前的降雨量相较 2017 年更低, 且在 8 月至 9 月, 2016 年的气温偏高 2~3℃, 降雨量的偏低和气温的提高可能更有利于根系的生长, 导致 2016 年的根系干重略高于 2017 年, 而地上部干重和养分积累量差异较小, 可能是植株生长后期对氮素吸收和利用的动态平衡调节导致的。因此, 在进行水稻种植时, 不仅需要因地制宜地选用科学的种植方式, 而且要合理选用与种植方式相匹配的氮肥水平。

3.3 不同种植方式下氮素水平对水稻氮、磷和钾素利用特征的影响

氮、磷和钾是水稻必需的大量元素^[22], 水稻对氮、磷和钾的吸收和利用程度因不同的种植方式而异。郭鑫年等^[23]研究认为人工移栽提高了水稻养分积累量, 显著高于直播, 霍中洋等^[24]研究表明水稻拔节期氮素积累量为直播最高, 抽穗期和成熟期为人工移栽最高。本研究结果表明, 抽穗期和成熟期氮素积累量表现为人工移栽>机插>直播, 成熟期氮素积累量直播比人工移栽和机插分别低 4.41%~

8.95%和 1.91%~8.16%。分析其原因,可能是基肥施用后尿素发生挥发和淋溶,而直播稻根系不发达^[25],吸收氮素的能力较弱,影响茎叶生长和幼穗分化,不能有效积累同化物以供抽穗后养分向穗部运转,促进谷粒灌浆结实,抽穗后,直播稻个体质量不及机插和人工移栽,茎秆细小,成穗率低,阶段吸收速率不高,最终植株氮积累量不及人工移栽和机插。另外,抽穗至成熟时,机插稻在中、低施氮水平下氮和磷积累速率较高,人工移栽在中、高氮水平下磷和钾积累速率较高。本研究结果还表明拔节至抽穗期是植株养分积累速率最高的时期,与王强盛等^[26]研究一致。除此之外,成熟期磷积累量和抽穗期钾积累量无显著差异,随着水稻走向成熟,氮、磷和钾积累量的增幅逐渐减小,这种增幅的降低可能是干物质增加和化肥吸收减少对作物成熟的影响^[27]。

不同氮肥水平对水稻主要生育期磷、钾的吸收、转运和分配有显著影响($P < 0.05$)^[28],本试验结果表明不同生育时期植株氮、磷和钾素积累量均随氮素水平的升高而显著增加,且均为 $N3 > N2 > N1 > N0$; Li 等^[29]研究认为氮素积累量与磷钾积累量呈正相关关系;孙永健等^[30]研究认为养分间存在相互作用,如磷、钾间,氮、钾间表现出正交互作用,且随生育进程的推进养分吸收间的相关性加强($r = 0.650^* \sim 0.987^{**}$);而王伟妮等^[31]研究则认为当肥料施用量处于较低或中等水平时,氮和磷、氮和钾、磷和钾之间的交互作用呈协同作用,反之则呈拮抗作用。本研究结果与王伟妮等相似,施用氮肥显著地促进了水稻地上部对磷和钾的吸收累积,可能是施氮使土壤离子浓度增大^[32]和根际酸化效应增强^[33],从而明显促进土壤磷和钾的吸收作用,但是过量施用的氮肥会造成作物对养分吸收的抑制作用,导致在中高氮条件下,植株磷素积累增量不显著。另外, F 优 498 为四川稻区普遍应用的杂交籼稻,对不同种植方式与施氮量下 F 优 498 的养分吸收特性进行研究,可为当地水稻高产栽培及养分高效利用提供理论和实践依据。

3.4 不同种植方式下氮素水平对水稻根系伤流强度影响

根系伤流强度可作为评判根系活力的指标,能较准确地反应根系活性的变化^[34]。本研究结果表明,随着生育进程的推进,杂交籼稻抽穗后单茎和群体伤流强度逐渐降低,分别在 7~14 d 和 14~21 d 下降幅度最大,机插稻单茎和群体根系活力显著高于人工移栽和直播,与李杰等^[35]研究结果一致,可能是

机插稻茎蘖数多,个体空间占有量小。有研究^[36]指出,根系生长(根系氧化力和根系伤流液强度)与地上部生长呈极显著正相关,不同种植方式下增施氮肥能够显著提高根系伤流强度,减缓后期根系衰老,均表现为 $N3 > N2 > N1 > N0$,且差异显著,这与 Ju 等^[37]研究结果一致。抽穗水稻单茎和群体根系伤流强度与产量呈显著或极显著的正相关关系,这可能是施氮量增加至高氮水平时,水稻叶片光合作用向根部输送较多的光合产物,维持和促进根系功能,根系又为地上部提供了营养物质,增加了地上部干物质重^[38],进而增加了产量。从育种和栽培角度考虑,人工移栽维持个体生长优势,机插和直播发挥群体生长特色,同时注重改善单茎根系质量,并在中后期适当提高氮素施用比例,有效减缓抽穗后根系衰老消亡速度,保证抽穗后根系有较高的根系活力,这对于稳定和进一步提高水稻产量将具有非常重要的作用。

4 结论

水稻氮、磷和钾吸收利用有各自的特征,并受种植方式和氮肥水平的影响。直播与人工移栽和机插相比,拔节前植株氮、磷和钾吸收速率高,吸收能力强,分别比机插和人工移栽高 40.68%~63.64%和 19.42%~71.43%;拔节期植株氮和磷积累量分别为机插和人工移栽最多;拔节至抽穗期是植株氮、磷和钾积累速率最高的时期,抽穗后植株吸收量和吸收速率明显减少;从氮素水平上看,表现出氮磷、氮钾协同吸收,但是在中高氮条件下,植株磷素积累增量不显著;直播与人工移栽相比,减产 8.09%~15.00%,机插稻有效穗较手插稻有所提高,但在穗粒数和千粒重方面不占优势,这降低了机插稻的群体库容量,最终的产量表现低于手插稻,施氮后产量的显著提高是由于提高了单位面积有效穗数和每穗粒数。T1 方式下水稻在穗粒数和结实率方面能够有所补偿,结实率提高,能在保产的同时达到节肥的效果。综合产量与效益、养分吸收及根系活力等因素,机插稻施氮量在中低氮水平($90 \sim 135 \text{ kg hm}^{-2}$),直播稻和人工移栽稻在中高氮水平($135 \sim 180 \text{ kg hm}^{-2}$)时既能获得稳定的产量,也能维持较高养分吸收速率及根系活力。

References

- [1] 吴宇,刘磊,崔克辉,齐晓丽,黄见良,彭少兵.低氮条件下超级杂交稻苗期根系特征的变化及与其高氮素积累的关系.

- 作物学报, 2024, 50: 414–424.
- Wu Y, Liu L, Cui K H, Qi X L, Huang J L, Peng S B. Changes in seedling root characteristics of super heterosis rice under low nitrogen conditions and their relationship with its high nitrogen accumulation. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 414–424 (in Chinese with English abstract).
- [2] 徐冉, 陈松, 徐春梅, 刘元辉, 章秀福, 王丹英, 褚光. 施氮量对籼梗杂交稻甬优 1540 产量和氮肥利用效率的影响及其机制. 作物学报, 2023, 49: 1630–1642.
- Xu R, Chen S, Xu C M, Liu Y H, Zhang X F, Wang D Y, Chu G. Effects and mechanism of nitrogen fertilization rate on yield and nitrogen use efficiency of *indica-japonica* hybrid rice Yongyou 1540. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1630–1642 (in Chinese with English abstract).
- [3] 郭九信, 孔亚丽, 谢凯柳, 李东海, 冯绪猛, 凌宁, 王敏, 郭世伟. 养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响. 作物学报, 2016, 42: 1016–1025.
- Guo J X, Kong Y L, Xie K L, Li D H, Feng X M, Ling N, Wang M, Guo S W. Effects of nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1016–1025 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李松竹. 不同配方施肥对水稻产量及肥料利用率的影响. 东北农业大学硕士学位论文, 黑龙江哈尔滨, 2019.
- Li S Z. Effects of Different Fertilization Formulations on Rice Yield and Fertilizer Use Efficiency. MS Thesis of Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang, China, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [5] Xu G W, Tan G L, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Effects of wheat residue application and site-specific nitrogen management on growth and development in direct-seeding rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 685–694.
- [6] Nikobakht M, Payandeh K, Gholami A. Assessment the effect of different planting pattern (rice-wheat, corn-wheat) and growth stage on soil chemical properties. *J Crop Nutr Sci*, 2015, 1: 40–53.
- [7] Mishra A, Salokhe V M. FLOODING STRESS: the effects of planting pattern and water regime on root morphology, physiology and grain yield of rice. *J Agron Crop Sci*, 2010, 196: 368–378.
- [8] Xing Z, Huang Z, Yao Y, Fu D, Cheng S, Tian J Y, Zhang H C. Nitrogen use traits of different rice for three planting modes in a rice-wheat rotation system. *Agriculture*, 2023, 13: 77.
- [9] Gu J, Yang J. Nitrogen (N) transformation in paddy rice field: its effect on N uptake and relation to improved N management. *Crop Environ*, 2022, 1: 7–14.
- [10] Liang H, Gao S, Ma J, Zhang T, Wang T Y, Zhang S, Wu Z X. Effect of nitrogen application rates on the nitrogen utilization, yield and quality of rice. *Food Nutr Sci*, 2021, 12: 13–27.
- [11] Sun Y J, Yan F J, Sun Y Y, Xu H, Guo X, Yang Z Y, Yin Y Z, Guo C C, Ma J. Effects of different water regimes and nitrogen application strategies on grain filling characteristics and grain yield in hybrid rice. *Arch Agron Soil Sci*, 2018, 64: 1152–1171.
- [12] Li Y, Shao X, Li D, Xiao M, Hu X, He J. Effects of water and nitrogen coupling on growth, physiology and yield of rice. *Int J Agric Biol Eng*, 2019, 12: 60–66.
- [13] Qiu X, Zhang X, Mo Z, Pan S G, Tian H, Duan M Y, Tang X G. Effects of different tillage and fertilization methods on the yield and nitrogen leaching of fragrant rice. *Agronomy*, 2023, 13: 2773.
- [14] Wang W X, Shen C C, Xu Q, Za S, Du B, Xing D Y. Grain yield, nitrogen use efficiency and antioxidant enzymes of rice under different fertilizer N inputs and planting density. *Agronomy*, 2022, 12: 430.
- [15] Zhu H J, Wen T, Sun M W, Ali L, She M S, Wahab A, Tan W J, Wen C, He X, Wang X H. Enhancing rice yield and nitrogen utilization efficiency through optimal planting density and reduced nitrogen rates. *Agronomy*, 2023, 13: 1387.
- [16] 杨波, 徐大勇, 张洪程. 直播、机插与手栽水稻生长发育、产量及稻米品质比较研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2012, 33(2): 39–44.
- Yang B, Xu D Y, Zhang H C. Research on grow thvield, quality of rice under direct seeding, mechanical transplant in gand artificial transplanting. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci Edn)*, 2012, 33(2): 39–44 (in Chinese with English abstract).
- [17] 乔月, 朱建强, 吴启侠, 黄思情, 李明辉. 氮肥运筹下不同种植方式水稻对氮素的吸收、转运和利用. 中国土壤与肥料, 2021, (6): 180–188.
- Qiao Y, Zhu J Q, Wu Q X, Huang S Q, Li M H. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen absorption, translocation and utilization of rice in different planting methods. *Soil Fert China*, 2021, (6): 180–188 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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. 作物学报, 2011, 37: 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. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 309–320 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王文霞, 周燕芝, 曾勇军, 吴自明, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华, 曾研华. 不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响. 中国水稻科学, 2020, 34: 46–56.
- Wang W X, Zhou Y Z, Zeng Y J, Wu Z M, Tan X M, Pan X H, Shi Q H, Zeng Y H. Effects of different mechanical direct seeding patterns on yield and lodging resistance of high-quality late *indica*-rice in South China. *Chin J Rice Sci*, 2020, 34: 46–56 (in Chinese with English abstract).
- [20] 金朝强. 不同种植方式对水稻及其后茬小麦生长发育的影响. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2020.
- Jin C Q. Effects of Different Planting Patterns on the Growth and Development of Rice and its Subsequent Wheat. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [21] 邓飞, 王丽, 刘利, 刘代银, 任万军, 杨文钰. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响. 作物学报, 2012, 38: 1930–1942.
- Deng F, Wang L, Liu L, Liu D Y, Ren W J, Yang W Y. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1930–1942 (in Chinese with English abstract).
- [22] Liu T Q, Li C F, Tan W F, Wang J P, Feng J H, Hu Q Y, Cao C G. Rice-crayfish co-culture reduces ammonia volatilization and increases rice nitrogen uptake in central China. *Agric Ecosyst Environ*, 2022, 330: 107869.
- [23] 郭鑫年, 孙娇, 梁锦绣, 周涛, 田旭东, 陈刚. 栽培方式与施

- 磷量对水稻养分累积、分配及磷素平衡的影响. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 104–111.
- Guo X N, Sun J, Liang J X, Zhou T, Tian X D, Chen G. Effects of cultivation methods and phosphorus application rates on nutrient accumulation, distribution and phosphorus balance in rice. *Soil Fert Sci China*, 2017, (4): 104–111 (in Chinese with English abstract).
- [24] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 龚金龙. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性. 作物学报, 2012, 38: 1908–1919.
- Huo Z Y, Li J, Zhang H C, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Gong J L. Characteristics of nitrogen uptake and utilization of rice under different planting methods. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1908–1919 (in Chinese with English abstract).
- [25] 何艳, 严田蓉, 郭长春, 李娜, 彭志芸, 唐源, 马鹏, 余华清, 孙永健, 杨志远, 马均. 秸秆还田与种植方式对水稻根系生长及产量的影响. 农业工程学报, 2019, 35(7): 105–114.
- He Y, Yan T R, Guo C C, Li N, Peng Z Y, Tang Y, Ma P, Yu H Q, Sun Y J, Yang Z Y, Ma J. Effects of different planting methods and straw returning on soil physicochemical properties, root growth and nitrogen use of rice. *Trans CSAE*, 2019, 35(7): 105–114 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 朱艳, 王绍华, 曹卫星. 钾对不同类型水稻氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2009, 35: 704–710.
- Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F, Zhu Y, Wang S H, Cao W X. Effects of potassium on nitrogen uptake and utilization in different types of rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 704–710 (in Chinese with English abstract).
- [27] Anil S A, Singh S Y. Effect of rate and sources of nitrogen, phosphorus and zinc fertilization on potassium nutrition of rice in different cultivation methods. *Int J Bio-resour Stress Manag*, 2018, 9: 460–467.
- [28] Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, Wang C Y, Yang Z Y, Li N, Yan F J, Li Y H, Wang H Y, Ma J. Effects of fertilizer levels on the absorption, translocation, and distribution of phosphorus and potassium in rice cultivars with different nitrogen-use efficiencies. *J Agric Sci*, 2016, 8: 38.
- [29] Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Luo D Q. Accumulation and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium of irrigated rice cultivars with high productivities and high N use efficiencies. *Field Crops Res*, 2014, 161: 55–63.
- [30] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 张荣萍, 郭翔, 马均. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响. 作物学报, 2010, 36: 655–664.
- Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Zhang R P, Guo X, Ma J. Effects of water-nitrogen interaction on nitrogen uptake, transport and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 655–664 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 李小坤, 李慧. 氮、磷、钾肥施用对水稻籽粒产量、品质、养分吸收和利用的影响. 中国水稻科学, 2011, 25: 645–653.
- Wang W N, Lu J W, He Y Q, Li X K, Li H. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25: 645–653 (in Chinese with English abstract).
- [32] 刘东海, 张智, 乔艳, 李双来, 陈云峰, 李菲, 胡诚. 长期施肥对黄棕壤水稻土真菌群落结构的影响. 植物营养与肥料学报, 2023, 29: 1112–1124.
- Liu D H, Zhang Z, Qiao Y, Li S L, Chen Y F, Li F, Hu C. Effects of long-term fertilization on fungal community structure in yellow-brown paddy soil. *J Plant Nutr Fert*, 2023, 29: 1112–1124 (in Chinese with English abstract).
- [33] Yan J Y, Ren T, Wang K K, Li H Z, Li X K, Cong R H, Lu J W. Improved crop yield and phosphorus uptake through the optimization of phosphorus fertilizer rates in an oilseed rape-rice cropping system. *Field Crops Res*, 2022, 286: 108614.
- [34] 吴昊, 张瑛, 王琛, 顾汉柱, 周天阳, 张伟阳, 顾骏飞, 刘立军, 杨建昌, 张耗. 栽培优化对长江下游水稻灌浆期根系特征和稻米淀粉特性的影响. 作物学报, 2024, 50: 478–492.
- Wu H, Zhang Y, Wang C, Gu H Z, Zhou T Y, Zhang W Y, Gu J F, Liu L J, Yang J C, Zhang H. Effects of cultivation optimization on root characteristics and starch properties of rice at grain filling stage in the lower reaches of the Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 478–492 (in Chinese with English abstract).
- [35] 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. 作物学报, 2011, 37: 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. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 2208–2220 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张晨晖, 章岩, 李国辉, 杨子君, 查莹莹, 周驰燕, 许轲, 霍中洋, 戴其根, 郭保卫. 侧深施肥下水稻高产形成的根系形态及其生理变化特征. 作物学报, 2023, 49: 1039–1051.
- Zhang C H, Zhang Y, Li G H, Yang Z J, Zha Y Y, Zhou C Y, Xu K, Huo Z Y, Dai Q G, Guo B W. Root morphology and physiological characteristics for high yield formation under side-deep fertilization in rice. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1039–1051 (in Chinese with English abstract).
- [37] Ju C X, Buresh R J, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. *Field Crops Res*, 2015, 175: 47–55.
- [38] 褚光, 周群, 薛亚光, 颜晓元, 刘立军, 杨建昌. 栽培模式对杂交粳稻常优 5 号根系形态生理性状和地上部生长的影响. 作物学报, 2014, 40: 1245–1258.
- Chu G, Zhou Q, Xue Y G, Yan X Y, Liu L J, Yang J C. Effects of cultivation patterns on root morph-physiological traits and aboveground development of japonica hybrid rice cultivar Changyou 5. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1245–1258 (in Chinese with English abstract).