

合理氮肥运筹提高双季机插稻产量及氮肥利用率

吕伟生^{1,2}, 曾勇军¹, 石庆华¹, 潘晓华¹, 黄山¹, 商庆银¹, 谭雪明¹

(1. 江西农业大学农学院, 双季稻现代化生产协同创新中心, 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,

江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045;

2. 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 农业部江西耕地保育科学观测实验站, 南昌 331717)

摘要: 为明确双季机插稻合理氮肥运筹, 2013—2014年在长江中游双季稻地区(江西上高)研究了氮肥施用量、施用比例及施用时期对双季机插稻产量与氮素吸收利用效率的影响。结果表明, 适量施氮可同步增加有效穗数和每穗粒数, 从而扩大群体库容量, 机插早、晚稻分别在施氮量为 180、195 kg/hm² 时即可达到较高产量, 同时保持较高的氮素吸收利用率。在适宜施氮量下, 施氮比例及追氮时期对双季机插稻产量及氮素吸收利用具有显著影响, 基肥与穗肥比例早稻 8:2 至 7:3、晚稻 7:3, 移栽后 7 天+倒 2 叶抽出期追施氮肥有利于分蘖成穗, 中后期维持较高的叶面积指数(LAI)和干物质积累量, 粒叶比协调, 穗数充足, 穗型较大, 总颖花量高, 并同步提高产量及氮素吸收利用率。

关键词: 氮肥运筹; 双季机插稻; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0259-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.038

Proper Nitrogen Fertilizer Application Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency of Machine-transplanted Double Rice

LÜ Weisheng^{1,2}, ZENG Yongjun¹, SHI Qinghua¹, PAN Xiaohua¹,

HUANG Shan¹, SHANG Qingyin¹, TAN Xueming¹

(1. Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University, Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Nanchang 330045; 2. Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Scientific Observational and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture, Nanchang 331717)

Abstract: To explicit proper nitrogen fertilizer application of machine-transplanted double rice, a two-year (2013—2014) field experiment was conducted to study the effects of amount, ratio and period of nitrogen fertilizer application on the yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted double rice in double-cropping rice areas of the middle reaches of the Yangtze River (Shanggao of Jiangxi). The main results were as follows. Moderate amount of nitrogen fertilizer could increase effective panicle number and grain number per panicle, thereby increased spikelet number. For machine-transplanted double rice, the optimal nitrogen fertilizer application amount was 180 kg/hm² for the early rice and 195 kg/hm² for the late rice, which could maintain higher yield and utilization and absorption rate of nitrogen. Under the proper nitrogen application rate, ratio and period of nitrogen application had significant influences on yield and nitrogen utilization and absorption. The optimal ratio of basal tiller fertilizer and panicle fertilizer was 8:2 to 7:3 for the early rice, and 7:3 for the late rice. Appropriate time for top nitrogen application was 7 days after transplanting and the stage of the second leaf to top shooting out. The optimal ratio and time of nitrogen application was beneficial to maintain higher leaf area index (LAI) and dry matter accumulation, coordinated ratio of grain and leaf, sufficient panicle number, larger panicle type and high total spikelet quantity, while maintain high

收稿日期: 2018-06-13

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B11, 2013BAD07B1202); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300501, 2017YFD0301605); 公益性行业科研专项(201303102); 国家自然科学基金项目(31360310); 江西省水稻产业体系专项(JXARS-02-03); 江西省重点研发专项(20161ACF60013, 20171BBF60030); 江西省青年科学家培养计划项目(20153BCB23015)

第一作者: 吕伟生(1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事水稻、油菜优质高产栽培与耕作技术研究。E-mail: Lvweisheng2008@163.com

通信作者: 曾勇军(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事水稻优质高产理论与技术研究。E-mail: zengyj2002@163.com

utilization and absorption rate of nitrogen.

Keywords: nitrogen application; machine-transplanted double rice; yield; nitrogen use efficiency

氮肥运筹是水稻群体发育的关键调控措施,对水稻产量形成具有决定性的影响^[1]。合理的氮肥运筹,不仅可以提高水稻的产量和氮肥利用率,改善稻米品质,而且还可以减少因过量施氮造成的环境污染^[2-5]。合理的氮肥运筹主要包括适宜的氮肥类型、氮肥施用量、施用比例及施用时期^[6]。适宜的氮肥用量,可采用斯坦福(Stanford)理论方程进行求取,即目标产量的施氮量=(目标产量的需氮量-土壤氮素供应量)/肥料当季利用率,相关参数与土壤类型、气候条件、品种特性等因素密切相关,但在相同条件下机插稻与手栽稻基本一致^[6-7]。前人关于氮肥施用比例的研究较多,总体而言,分期施肥、前氮后移有利于提高水稻产量和氮肥利用率。钟旭华等^[8]认为,增施穗粒肥对华南双季稻具有显著的增产效果。石庆华等^[9]研究表明,对于长江中游地区双季超级稻,生育期在 110 天以内的早稻基肥与穗肥的比例以 6:2:2 为宜,110 天以上品种则以 5:2:3 为宜;生育期在 115 天左右的晚稻以 5:2:3 为宜,120 天以上品种则以 4:2:4 为宜;分蘖肥与穗肥施用适期为栽后 5~7 天和倒 2 叶抽出期。吴文革等^[10]提出,双季稻北缘地区早稻适宜的氮肥施用比例为基:蘖:穗=5.0:2.5:2.5。凌启鸿等^[6,11]认为,长江中下游地区单季稻,基肥与穗肥的比例以 5.5(5~6):4.5(4~5)为宜,其中穗肥以倒 4 叶和倒 2 叶等量施用的效果最好^[12]。

虽然目前关于氮肥运筹对水稻产量及氮素吸收利用的影响的研究很多,但主要集中在施用量与施用比例方面,而且主要针对传统的手栽稻,关于机插稻特别是双季机插稻的研究较少。随着水稻农机农艺技术的进步、集中育秧及专业合作社的发展,机插秧正逐渐成为双季稻主要的种植方式。然而,机插稻要求农艺和农机相配套,其生育及需肥特性与传统手栽稻存在一定差异^[7]。与其他稻作相比,双季稻茬口较为紧张,机插条件下秧龄弹性小、生育期延迟、品种选择范围窄,种植管理技术也有别于常规手栽稻^[13]。至今,机插稻氮素运筹及需肥特性的研究多集中于单季稻。稻麦(油)两熟制下,手栽稻和机插稻间植株含氮率和百千克籽粒需氮量差异不明显,但手栽稻拔节后的阶段吸氮量、总吸氮量和氮素吸收利用率均高于机插^[14]。学者们^[14-15]认为,应根据机插水稻的秧苗和分蘖发生特点,调整机插水稻前后期的施氮比例,适当增加后期氮肥比例更有利于机插稻生长^[16]。但是,水稻合理的氮肥运筹还应该根据当地的生态条件和栽培方式综合确定^[17]。因此,本研究立足长江中

游双季稻地区,通过开展氮肥施用量、施用比例及施用时期等试验,研究氮肥运筹对双季机插稻产量及氮素吸收利用的影响,旨在为双季机插稻高产栽培和氮肥优化管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013—2014 年在江西农业大学产学研合作与人才培养上高创新基地(115°6′52″E,28°16′42″N)进行。供试土壤地力中等,2 年试验土壤有机质含量分别为 35.06,37.24 g/kg,全氮分别为 2.29,2.40 g/kg,碱解氮分别为 165.34,182.15 mg/kg,速效钾分别为 74.79,71.84 mg/kg,速效磷分别为 23.14,27.28 mg/kg,土壤 pH 分别为 5.38 和 5.49。

2013 年开展氮肥施用量试验,早稻以中嘉早 17 为材料,设 0,120,150,180,210 kg/hm² 5 个施氮水平;晚稻以五优 308 为材料,设 0,135,165,195,225 kg/hm² 5 个施氮水平。磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施用量早稻分别为 90,150 kg/hm²,晚稻分别为 105,165 kg/hm²,其中磷全作基肥,氮和钾按基肥:分蘖肥:穗肥为 5:2:3 施用,分蘖肥与穗肥分别在机插后 7 天和倒 2 叶抽出期施用。每个处理种植 32 行(8 m),行长 24 m,每 8 m 设一工作行,即作为 3 个区组。

2014 年开展氮肥施用比例及时期试验,早稻以中嘉早 17 为材料,晚稻以 H 优 518 为材料。早、晚稻施氮量分别为 180,195 kg/hm²,基肥:分蘖肥:穗肥设 6 个处理(8:2:0,3:2:5,7:2:1,6:2:2,5:2:3,4:2:4),穗肥施用时期 3 个处理(倒 3、倒 2、倒 1 叶抽出期),分蘖肥设 2 个处理(栽插后 7 天、12 天,基肥:分蘖肥:穗肥为 5:2:3、穗肥施用时期为倒 2 叶抽出期),不施氮为对照,共 17 个处理。磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施用量早稻分别为 90,150 kg/hm²,晚稻分别为 105,165 kg/hm²,其中磷全作基肥,钾按基肥:分蘖肥:穗肥为 5:2:3 施用,分蘖肥与穗肥分别在机插后 7 天和倒 2 叶抽出期施用。每个处理种植 8 行(2 m),行长 48 m,每 16 m 设一工作行,即作为 3 个区组。

采用 7 寸硬盘进行基质早育秧,落谷密度早稻 2.7 粒/cm²、晚稻 2.0 粒/cm²。早稻播种后 25 天、晚稻播种后 20 天,采用井关乘坐式高速窄行插秧机(井关 PZ80-25)栽插,抓秧面积 2.0 cm²,栽插规格 25 cm×14 cm。不同氮肥处理间作泥巴埂并用薄膜包裹,以防止串水串肥。

1.2 测定项目与方法

- 1.2.1 茎蘖动态 机插当天开始调查,每个小区定苗 10 穴,每 3 天调查一次分蘖动态,直到齐穗。
- 1.2.2 干物质量及叶面积指数(LAI) 于幼穗分化 III 期、抽穗期、成熟期,每个小区调查 50 穴的茎蘖数,按 5 点取样法选取代表性的植株 5 穴,按茎鞘、叶、穗分开包扎,在干燥箱内 105 ℃ 杀青 20 min,再用 80 ℃ 烘至恒重,冷却至室温后称重;同时按小叶干重法计算叶面积指数(LAI)。
- 1.2.3 植株含氮率 结合成熟期干物质量测定,将植株样品用粉碎机粉碎,再用凯斯定氮仪 Foss 2300 测定含氮率。
- 1.2.4 产量及产量构成 成熟期取样考种,每个小区按平均茎蘖数选 5 穴考查总粒数、空粒数、千粒重,在每个小区中心实割 200 穴,脱粒、晒干、风选后称重,计算实际产量。

1.3 相关指标计算

按 Peng 等^[1]的方法计算各项氮肥利用效率指标:

氮肥吸收利用率(%)=(施氮肥区植株总吸氮量—不施氮肥区植株总吸氮量)/施氮量×100%

氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮肥区产量—不施氮肥区产量)/施氮量

氮素生理利用率(kg/kg)=(施氮区产量—不施氮肥区产量)/(施氮区植株总吸氮量—不施氮肥区植株总吸氮量)

氮肥偏生产力(kg/kg)=施肥区籽粒产量/施氮量

1.4 分析与统计方法

用 Excel 2007 软件进行数据输入、计算及制图,用 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量对双季机插稻产量及氮素吸收利用的影响

2.1.1 施氮量对双季机插稻产量及产量构成的影响 由施氮量试验产量结果(表 1)可知,早、晚稻在施氮量 0~210,0~225 kg/hm² 范围内,产量总体随施氮量的增加呈增加的趋势。早稻在施氮量为 180 kg/hm² 时产量最高,达 9 058.62 kg/hm²,显著高于其他低氮处理,略高于 210 kg/hm² 施氮量处理,但差异不显著。晚稻在施氮量为 225 kg/hm² 时产量最高,达 9 520.56 kg/hm²,与 195 kg/hm² 施氮量处理差异不显著,但二者均显著高于其他处理。进一步研究表明,在施氮条件下,施氮量与早、晚稻产量均呈抛物线关系(图 1)。可见,早、晚稻分别在施氮量 180~210,195~225 kg/hm² 时即可获得较高的产量。

从产量构成因素(表 1)来看,随施氮量的增加,早、晚稻有效穗数均显著增加,每穗粒数表现为先增后减的趋势,最终总颖花量呈增加的趋势,但在早、晚稻施氮量超过 180,195 kg/hm² 时增加不显著。结实率和千粒重随施氮量的增加表现为下降的趋势,其中结实率变化较大,千粒重差异较小。表明适量施氮可同步增加有效穗数和每穗粒数,从而扩大群体库容量。

表 1 施氮量对机插早、晚稻产量及产量结构的影响

季别	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	有效穗数/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	每穗 粒数	总颖花量/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	结实率/ %	千粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
早稻	0	243.60d	113.10d	27560.67d	85.39a	26.16a	5437.61d
	120	320.15c	129.65c	41502.25c	84.00ab	26.20a	8216.88c
	150	332.35b	134.70b	44772.89b	82.30bc	26.22a	8645.90b
	180	343.78ab	139.29a	47889.22a	80.61cd	26.23a	9058.62a
	210	349.76a	136.95ab	47901.43a	79.13d	25.93b	8851.50ab
晚稻	0	243.33e	114.67c	27895.72d	92.65a	24.83a	5828.27d
	135	314.18d	131.83b	41425.03c	90.03b	25.02a	8400.96c
	165	336.76c	133.40b	44922.07b	88.01c	24.94a	8940.91b
	195	351.75b	138.48a	48715.77a	87.32cd	24.78a	9377.63a
	225	368.73a	134.97ab	49772.89a	85.87d	24.65a	9520.56a

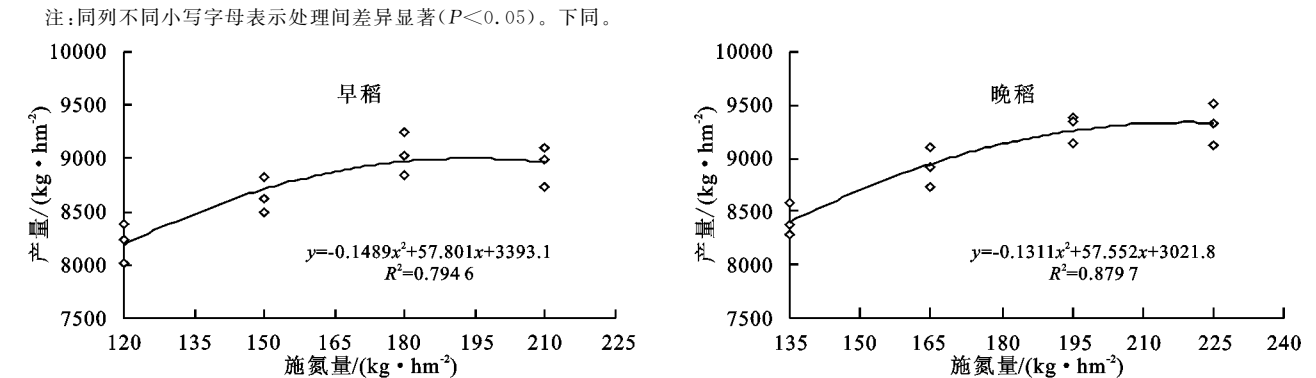


图 1 施氮量与产量的关系

2.1.2 施氮量对双季机插稻氮素吸收利用的影响
施氮量对机插早、晚稻氮素吸收及利用效率均有显著影响(表 2)。

随施氮量的增加,总吸氮量表现出增加的趋势,但在早、晚稻施氮量超过 180,195 kg/hm² 时增加不

显著。氮肥偏生产力、吸收利用率、生理利用率及农学利用率均随施氮量的增加而不断降低,其中高氮处理与低氮处理差异达显著水平。由此可知,施氮量的增加并不能使水稻同步增加氮素吸收量和提高其利用率。

表 2 施氮量对机插早、晚稻氮素吸收利用的影响

季别	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	总吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	吸收 利用率/%	生理利用率/ (kg·kg ⁻¹)	农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
早稻	0	82.93e	—	—	—	—
	120	143.61d	50.57a	45.84a	23.16a	68.47a
	150	155.36c	47.96ab	44.29ab	21.39ab	57.64b
	180	164.81ab	45.49b	44.27ab	20.12b	50.33c
	210	168.55a	40.77c	39.88b	16.26c	42.15d
晚稻	0	94.57e	—	—	—	—
	135	160.09d	50.64a	39.14a	19.43a	62.23a
	165	175.79c	49.23ab	38.32ab	18.86ab	54.19b
	195	191.24ab	48.91ab	36.74bc	18.20b	48.09c
	225	200.94a	46.94b	34.73c	16.41c	42.31d

2.2 施氮比例及追氮时期对双季机插稻产量及氮素吸收利用的影响

2.2.1 施氮比例及追氮时期对双季机插稻产量及产量构成的影响
施氮比例及追氮时期对机插早稻产量及产量构成存在一定的影响(表 3)。在基蘖肥:穗肥为 7:3、穗肥于倒 2 叶抽出期施用的条件下,分蘖肥 7 天施用产量略高于 12 天施用,但二者差异不显著。总体而言,适量适期增施穗肥有利于产量的提高,基蘖肥:穗肥为 7:3 和 8:2、穗肥于倒 2 叶抽出期施用产量较高,均显著高于 5:5 处理和 10:

0 处理。在相同施氮比例条件下,9:1 处理在倒 1 叶抽出期施用穗肥产量最高,6:4 处理则在倒 3 叶抽出期施用产量最高。从表 3 还可以看出,施氮比例及追氮时期对机插早稻有效穗数及每穗粒数的影响较大,而对结实率及千粒重的影响较小。追施穗肥有利于同步提高有效穗数和每穗粒数,有效穗数、每穗粒数及总颖花量随穗肥比例的增加呈先增后减的趋势。有效穗数随穗肥施用时期的提前呈增加的趋势,而每穗粒数的变化因施氮比例而异,综合而言,7:3 和 8:2 处理,穗肥于倒 2 叶抽出期施用穗粒结构协调,总颖花量大。

表 3 施氮比例及追氮时期对机插早稻产量及产量结构的影响

施氮 比例	追肥 时期	有效穗数/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	每穗 粒数	总颖花量/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	结实率/ %	千粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	—	207.60h	122.68g	25464.52g	85.39a	26.67a	5212.62f
10:0	7 d	319.82ef	127.29fg	40710.59f	79.21b	26.11a	7473.43e
7:3	12 d+倒 1 叶	327.69de	137.12abc	44932.70c	79.40ab	26.25a	8236.13abcd
7:3	12 d+倒 2 叶	333.13bcd	139.23ab	46383.71ab	80.58ab	26.33a	8617.54abc
9:1	7 d+倒 1 叶	333.28bcd	132.67cdef	44217.02cd	79.73ab	26.19a	8155.14bcd
9:1	7 d+倒 2 叶	340.23ab	130.93def	44547.63cd	79.43ab	26.17a	8092.40cd
9:1	7 d+倒 3 叶	338.42abc	128.22efg	43392.88de	77.64b	26.28a	7855.52de
8:2	7 d+倒 1 叶	333.13bcd	135.46abcd	45125.86bc	79.37ab	26.10a	8216.27abcd
8:2	7 d+倒 2 叶	344.16a	137.77abc	47415.02a	80.29ab	26.13a	8718.20ab
8:2	7 d+倒 3 叶	346.72a	133.46bcde	46274.43ab	78.99b	26.22a	8439.20abcd
7:3	7 d+倒 1 叶	330.41cd	136.44abcd	45082.52bc	80.55ab	26.20a	8379.56abcd
7:3	7 d+倒 2 叶	334.94bcd	140.20a	46961.21a	80.69ab	26.43a	8811.16a
7:3	7 d+倒 3 叶	338.71abc	136.76abcd	46323.00ab	80.10ab	26.28a	8548.32abc
6:4	7 d+倒 1 叶	316.36f	133.80bcde	42329.96e	80.82ab	26.18a	7892.72de
6:4	7 d+倒 2 叶	326.33de	135.95abcd	44363.88cd	79.59ab	26.31a	8186.89bcd
6:4	7 d+倒 3 叶	330.26cd	137.12abc	45284.80bc	79.47ab	26.33a	8346.05abcd
5:5	7 d+倒 2 叶	305.77g	133.33bcde	40765.97f	77.18b	26.26a	7377.01e

注:7 d、12 d 表示移栽后 7 天、12 天施分蘖肥,倒 1 叶、倒 2 叶、倒 3 叶分别表示在主茎倒 1 叶、倒 2 叶、倒 3 叶抽出期施用穗肥。下同。

施氮比例及追氮时期对机插晚稻产量及产量构成的影响与早稻基本一致(表 4)。分蘖肥 7 天施用产量比 12 天施用处理高 9.34%,差异大于早稻,但

未达显著水平。基蘖肥:穗肥为 7:3、穗肥于倒 2 叶抽出期施用产量最高,显著高于 5:5,9:1 和 10:0 处理。9:1 处理在倒 1 叶抽出期施用穗肥产量最高,8:2

处理在倒 2 叶抽出期施用穗肥产量最高,6 : 4 处理则在倒 3 叶抽出期施用产量最高。从穗粒结构来看,倒 2 叶抽出期追施氮肥对每穗粒数的提高具有明显的促进作用,而倒 3 叶抽出期施用氮肥对于增加穗数有一定作用。因此,生产上可通过不同时期追施氮肥的措施对穗数和每穗粒数进行合理的调节。

表 4 施氮比例及追氮时期对机插晚稻产量及产量结构的影响

施氮比例	追肥时期	有效穗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	每穗粒数	总颖花量/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	结实率/ %	千粒重/ g	产量/ (kg · hm ⁻²)
CK	—	248.55g	96.42h	23964.00j	92.67a	27.76ab	5710.79h
10 : 0	7 d	337.07ef	103.93g	35030.51i	88.71b	27.25ab	7725.29g
7 : 3	12 d+倒 1 叶	343.79cde	112.83de	38789.41fgh	85.39c	27.75ab	8309.64bcde
7 : 3	12 d+倒 2 叶	347.41bcde	115.49bcd	40122.11de	86.64bc	27.83a	8683.37ab
9 : 1	7 d+倒 1 叶	347.03bcde	111.46ef	38676.70fgh	86.18bc	27.64ab	8173.08cdef
9 : 1	7 d+倒 2 叶	353.51abc	108.76f	38448.37gh	85.78c	27.56ab	8026.98defg
9 : 1	7 d+倒 3 叶	351.51abcd	108.88f	38272.96gh	85.70c	27.39ab	7764.15fg
8 : 2	7 d+倒 1 叶	350.08abcde	115.95bcd	40590.05cd	85.46c	27.56ab	8469.29bc
8 : 2	7 d+倒 2 叶	358.13ab	116.56abc	41743.01a	86.09bc	27.68ab	8697.96ab
8 : 2	7 d+倒 3 叶	360.47a	115.44bcd	41608.16ab	85.73c	27.66ab	8544.74abc
7 : 3	7 d+倒 1 叶	344.93cde	114.67cde	39553.32ef	86.40bc	27.53ab	8492.34bc
7 : 3	7 d+倒 2 叶	352.46abc	118.86ab	41893.58a	86.61bc	27.71ab	8978.30a
7 : 3	7 d+倒 3 叶	358.37ab	115.66bcd	41448.02abc	86.19bc	27.70ab	8699.52ab
6 : 4	7 d+倒 1 叶	337.88ef	115.35bcd	38970.75fg	84.13c	27.67ab	8175.48cdef
6 : 4	7 d+倒 2 叶	339.03de	119.82a	40615.06cd	85.01c	27.51ab	8433.53abcd
6 : 4	7 d+倒 3 叶	343.32cde	118.94ab	40830.12bcd	85.52c	27.46ab	8627.32ab
5 : 5	7 d+倒 2 叶	326.17f	116.50abc	37994.94h	84.51c	27.19b	7985.68efg

2.2.2 施氮比例及追氮时期对双季机插稻分蘖成穗的影响 表 5 显示,施氮比例与追氮时期对机插早、晚稻分蘖成穗影响较大。早、晚稻分蘖肥 7 天施用与 12 天施用处理高峰苗数差异较小,但分蘖成穗率前者要高于后者。与不施穗肥处理相比,施用穗肥处理高峰苗数较低、成穗率较高。随穗肥施用比例的提

高,高峰苗数呈降低的趋势,成穗率表现为增加的趋势。在相同施氮比例条件下,早稻倒 3 叶抽出期施氮肥增加了高峰苗数和有效穗数,而穗肥施用时期对晚稻高峰苗数影响较小;不同时期施用穗肥成穗率差异较小,总体表现为倒 1 叶抽出期施用略低于倒 2 叶和倒 3 叶抽出期。

表 5 施氮比例及追氮时期对机插早、晚稻分蘖成穗的影响

施氮比例	追肥时期	早稻			晚稻		
		有效穗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	高峰苗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	成穗率/ %	有效穗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	高峰苗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	成穗率/ %
CK	—	207.60h	268.9i	80.07a	248.55g	384.05j	65.15a
10 : 0	7 d	319.82ef	512.09a	62.46e	337.07ef	674.09a	50.11f
7 : 3	12 d+倒 1 叶	327.69de	481.06defg	67.93bcd	343.79cde	605.40de	57.05de
7 : 3	12 d+倒 2 叶	333.13bcd	475.47efg	69.88b	347.41bcde	592.38ef	58.95cd
9 : 1	7 d+倒 1 叶	333.28bcd	502.87ab	66.08cd	347.03bcde	640.24bc	54.36e
9 : 1	7 d+倒 2 叶	340.23ab	501.61abc	67.63bcd	353.51abc	643.99b	55.03e
9 : 1	7 d+倒 3 叶	338.42abc	511.07a	66.12d	351.51abcd	644.55b	54.86e
8 : 2	7 d+倒 1 叶	333.13bcd	486.39cde	68.29bcd	350.08abcde	621.89bcd	56.72de
8 : 2	7 d+倒 2 叶	344.16a	491.26bcde	69.88b	358.13ab	624.78bcd	57.76cde
8 : 2	7 d+倒 3 叶	346.72a	494.72bcd	69.89b	360.47a	618.63cd	58.68cd
7 : 3	7 d+倒 1 叶	330.41cd	483.8def	68.09bcd	344.93cde	590.77ef	58.65cd
7 : 3	7 d+倒 2 叶	334.94bcd	480.4defg	69.54b	352.46abc	584.44efg	60.60bc
7 : 3	7 d+倒 3 叶	338.71abc	491.53bcde	68.73bcd	358.37ab	591.63ef	60.99bc
6 : 4	7 d+倒 1 叶	316.36f	466.84g	67.56bcd	337.88ef	573.39fgh	59.45cd
6 : 4	7 d+倒 2 叶	326.33de	469.41fg	69.35b	339.03de	559.50h	61.08bc
6 : 4	7 d+倒 3 叶	330.26cd	476.45efg	69.13bc	343.32cde	565.60gh	61.19bc
5 : 5	7 d+倒 2 叶	305.77g	432.37h	70.49b	326.17f	514.45i	63.65ab

2.2.3 施氮比例及追氮时期对双季机插稻 LAI 及粒叶比的影响 施氮比例及追氮时期对机插早、晚稻 LAI 及粒叶比的影响规律基本一致(表 6、表 7)。分蘖肥施用时期对早稻 LAI 影响较小,但晚稻分蘖肥施用过迟分蘖期 LAI 显著降低。随基蘖肥比例的提高,有效分蘖临界期及分化 III 期 LAI 呈逐渐增大的趋势,部分处理差异达显著水平。抽穗期至成熟期, LAI 随穗肥比例的增加呈先增后减的趋势,早、晚稻在基蘖肥:穗肥为 8:2 和 7:3 时较高,均显著高于 5:5 和 10:0 处理。在相同施氮比例条件下,随穗

肥施用时期的延迟, LAI 呈降低的趋势,总体表现为倒 3 叶抽出期施用显著高于倒 1 叶抽出期施用处理。由表 6、表 7 还可以看出,追施穗肥可显著提高粒叶比。随穗肥比例的提高,粒叶比总体表现出增大的趋势。在相同施氮比例条件下,粒叶比随穗肥施用时期的提前呈逐渐降低的趋势,其中倒 3 叶抽出期施用显著低于倒 1 叶抽出期施用处理。双季机插稻在倒 2 叶至倒 3 叶抽出期施氮有利于提高总颖花量(表 3、表 4),但倒 3 叶抽出期施氮会增大 LAI,最终使粒叶比下降,因此生产中应依群体大小而定。

表 6 施氮比例及追氮时期对机插早稻各时期 LAI 及粒叶比的影响

施氮比例	追肥时期	有效分蘖临界期	分化 III 期	抽穗期	成熟期	粒叶比 (朵·cm ⁻²)
CK	—	0.86j	1.57e	3.24i	1.68f	0.7859bc
10:0	7 d	2.14a	3.73a	5.79de	3.11de	0.7031h
7:3	12 d+倒 1 叶	1.43fg	2.93bc	5.76def	3.29bcd	0.7801bc
7:3	12 d+倒 2 叶	1.49efg	3.09bc	6.10bc	3.54abc	0.7605cdef
9:1	7 d+倒 1 叶	1.86b	3.37abc	5.68def	3.22cde	0.7786bcd
9:1	7 d+倒 2 叶	1.78b	3.41abc	5.69def	3.52abc	0.7830bc
9:1	7 d+倒 3 叶	1.75bc	3.46ab	5.80de	3.51abc	0.7482efg
8:2	7 d+倒 1 叶	1.65cd	3.28abc	5.75def	3.12de	0.7848bc
8:2	7 d+倒 2 叶	1.61de	3.23abc	6.31ab	3.61ab	0.7515defg
8:2	7 d+倒 3 叶	1.53def	3.36abc	6.38a	3.68a	0.7254gh
7:3	7 d+倒 1 叶	1.51efg	3.13bc	5.59ef	3.33bcd	0.8066ab
7:3	7 d+倒 2 叶	1.55def	3.12bc	6.19ab	3.81a	0.7588cdef
7:3	7 d+倒 3 叶	1.46fg	3.22bc	6.30ab	3.77a	0.7353fg
6:4	7 d+倒 1 叶	1.31h	2.84cd	5.27g	3.04de	0.8033ab
6:4	7 d+倒 2 叶	1.39gh	3.02bc	5.52f	3.13de	0.8037ab
6:4	7 d+倒 3 叶	1.30hi	2.95bc	5.90cd	3.48abc	0.7676cde
5:5	7 d+倒 2 叶	1.19i	2.38d	4.92h	2.93e	0.8286a

表 7 施氮比例及追氮时期对机插晚稻各时期 LAI 及粒叶比的影响

施氮比例	追肥时期	有效分蘖临界期	分化 III 期	抽穗期	成熟期	粒叶比 (朵·cm ⁻²)
CK	—	1.23g	2.79h	3.75g	1.93e	0.6471cde
10:0	7 d	2.32a	5.85a	6.21de	2.92d	0.5641i
7:3	12 d+倒 1 叶	1.67de	4.60ef	5.94ef	3.54abc	0.6535bcd
7:3	12 d+倒 2 叶	1.61de	4.76def	6.38bcd	3.64ab	0.6288fg
9:1	7 d+倒 1 叶	2.26ab	5.21bcd	6.15de	3.22cd	0.6286fg
9:1	7 d+倒 2 叶	2.19ab	5.37bc	6.40bcd	3.24c	0.6163gh
9:1	7 d+倒 3 叶	2.22ab	5.46ab	6.35cd	3.39bc	0.6032h
8:2	7 d+倒 1 叶	2.10b	5.01bcde	6.11de	3.4bc	0.6435def
8:2	7 d+倒 2 叶	2.15ab	4.93cde	6.47abcd	3.65ab	0.6403def
8:2	7 d+倒 3 叶	2.11b	5.08bcde	6.82a	3.67ab	0.6102h
7:3	7 d+倒 1 叶	1.81c	4.75def	6.25cde	3.44abc	0.6328ef
7:3	7 d+倒 2 叶	1.79c	4.72ef	6.61abc	3.77a	0.6437def
7:3	7 d+倒 3 叶	1.75cd	4.75def	6.75ab	3.75a	0.6139h
6:4	7 d+倒 1 叶	1.65cde	4.36f	5.90ef	3.24c	0.6606abc
6:4	7 d+倒 2 叶	1.61de	4.34f	6.13de	3.37bc	0.6623ab
6:4	7 d+倒 3 叶	1.57ef	4.47f	6.37bcd	3.64ab	0.6414def
5:5	7 d+倒 2 叶	1.43f	3.89g	5.66f	3.27c	0.6707a

2.2.4 施氮比例及追氮时期对双季机插稻干物质生产的影响 由施氮比例及追氮时期对机插早、晚稻各时期的干物质生产的影响(表 8、表 9)可知,分蘖肥施用时期对早稻各时期干物质生产影响较小,晚稻分蘖

肥施用过迟则降低了前、中期的干物质积累量。随基蘖肥比例的提高,移栽至分化期干物质积累量呈逐渐增大的趋势,部分处理间差异达显著水平。分化期至抽穗期及抽穗期至成熟期,干物质积累量随穗肥比例

的增加呈先增后减的趋势,早、晚稻均在基蘖肥:穗肥为 8:2 和 7:3 时较高,且显著高于 5:5 和 10:0 处理。在相同施氮比例条件下,随穗肥施用时期的延迟,分化期至抽穗期干物质质量呈降低的趋势,抽穗期至成熟期干物质的变化因施氮比例而表现不一。总体而言,全生育期干物质积累量与产量变化趋势一致,基蘖肥:穗肥为 8:2 和 7:3、倒 3 叶和倒 2 叶抽穗期追施穗肥的处理较高,与 10:0 处理差异显著。

表 8 施氮比例及追氮时期对机插早稻干物质生产的影响

施氮比例	追肥时期	移栽—分化期		分化—抽穗期		抽穗—成熟期		全生育期/ (kg·hm ⁻²)
		干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	比例/ %	干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	比例/ %	干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	比例/ %	
CK	—	1138.18f	13.76	3712.99e	44.88	3422.38h	41.37	8273.55j
10:0	7 d	2473.33a	20.08	5542.50bcd	45.01	4298.80g	34.91	12314.63h
7:3	12 d+倒 1 叶	2187.80bcd	16.38	5713.82abcd	42.77	5457.75abc	40.85	13359.38cdef
7:3	12 d+倒 2 叶	2276.93bc	16.34	6151.23abc	44.13	5510.71ab	39.53	13938.88ab
9:1	7 d+倒 1 叶	2213.87bcd	17.04	5577.58bcd	42.93	5200.75bcde	40.03	12992.20fg
9:1	7 d+倒 2 叶	2290.54bc	17.41	5732.49abcd	44.16	5055.42def	38.43	13155.13efg
9:1	7 d+倒 3 叶	2367.21ab	18.31	5860.81abcd	44.73	4778.75f	36.96	12930.10fg
8:2	7 d+倒 1 叶	2179.54bcd	16.39	6045.56abc	45.46	5073.00def	38.15	13298.10defg
8:2	7 d+倒 2 叶	2249.14bc	16.08	6206.19abc	44.86	5465.24abc	39.06	13990.17ab
8:2	7 d+倒 3 叶	2318.74ab	16.77	6432.18a	46.02	5144.75cde	37.21	13826.08abc
7:3	7 d+倒 1 叶	2214.22bcd	16.29	5969.83abcd	43.91	5411.40abc	39.80	13595.45bcde
7:3	7 d+倒 2 叶	2232.75bc	15.71	6339.34ab	44.72	5626.14a	39.57	14216.75a
7:3	7 d+倒 3 叶	2251.27bc	15.89	6472.93a	45.57	5457.88abc	38.53	14163.55a
6:4	7 d+倒 1 叶	2029.33d	15.83	5490.65cd	42.83	5298.85abcd	41.34	12818.83g
6:4	7 d+倒 2 叶	2116.07cd	16.03	5590.99bcd	43.02	5403.13abc	40.94	13196.92efg
6:4	7 d+倒 3 叶	2202.81bcd	15.99	6174.46abc	44.20	5482.10ab	39.80	13772.63abcd
5:5	7 d+倒 2 叶	1666.25e	14.09	5197.32d	43.94	4965.35ef	41.98	11828.92i

表 9 施氮比例及追氮时期对机插晚稻干物质生产的影响

施氮比例	追肥时期	移栽—分化期		分化—抽穗期		抽穗—成熟期		全生育期/ (kg·hm ⁻²)
		干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	比例/ %	干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	比例/ %	干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	比例/ %	
CK	—	2438.52g	23.73	4439.36h	43.21	3396.84j	33.06	10274.72g
10:0	7 d	4248.48a	29.79	5220.88fg	36.61	4791.04i	33.60	14260.41f
7:3	12 d+倒 1 叶	3517.94ef	23.17	5644.61ef	37.18	6018.46abc	39.64	15181.01de
7:3	12 d+倒 2 叶	3620.4de	22.83	6083.63bc	38.36	6156.85a	38.82	15860.88abc
9:1	7 d+倒 1 叶	4018.74b	27.37	5477.36f	37.30	5189.09h	35.34	14685.18ef
9:1	7 d+倒 2 叶	4031.43b	27.66	5709.65de	39.17	4835.94i	33.18	14577.01f
9:1	7 d+倒 3 叶	4078.98b	27.99	5785.58de	39.70	4710.31i	32.32	14574.87f
8:2	7 d+倒 1 叶	3893.77bc	25.61	5920.42cd	38.94	5390.74gh	35.45	15204.94de
8:2	7 d+倒 2 叶	3891.56bc	24.67	6182.74ab	39.20	5697.74def	36.13	15772.04abcd
8:2	7 d+倒 3 叶	3900.94bc	24.79	6302.46a	40.05	5532.35fg	35.16	15735.75bcd
7:3	7 d+倒 1 叶	3785.55cd	24.60	5782.97de	37.59	5816.98cde	37.81	15385.51cd
7:3	7 d+倒 2 叶	3778.48cd	23.13	6332.34a	38.76	6225.45a	38.11	16336.27a
7:3	7 d+倒 3 叶	3796.45cd	23.69	6363.17a	39.71	5863.80bcde	36.60	16023.42ab
6:4	7 d+倒 1 叶	3507.58ef	23.83	5574.54ef	37.87	5639.71efg	38.31	14721.83ef
6:4	7 d+倒 2 叶	3502.31ef	22.67	5899.48cd	38.18	6050.41abc	39.16	15452.21bcd
6:4	7 d+倒 3 叶	3569.83e	22.64	6065.13bc	38.47	6129.71ab	38.88	15764.67abcd
5:5	7 d+倒 2 叶	3353.92f	23.22	5134.95g	35.55	5956.02abcd	41.23	14444.88f

2.2.5 施氮比例及追氮时期对双季机插稻氮素吸收利用的影响 施氮比例及追氮时期对机插早、晚稻氮素吸收利用具有显著影响,且早、晚稻变化趋势相似(表 10、表 11)。

分蘖肥 7 天施用处理的氮素吸收量、利用率及偏

生产力总体高于 12 天施用处理,尤其是晚稻,氮素吸收利用率及农学利用率处理间差异显著。随基蘖肥比例的提高,氮素吸收量、利用率及偏生产力均表现为先增后减的趋势,早、晚稻均在基蘖肥:穗肥为 8:2 和 7:3 时较高,显著高于 10:0 处理。在相同施氮

比例条件下,随穗肥施用时期的延迟,氮素吸收量、利用率及偏生产力总体呈降低的趋势,基肥:穗肥为 8:2 和 7:3、倒 3 叶和倒 2 叶抽出期追施穗肥有利于早晚稻对氮素的吸收及利用。

表 10 施氮比例及追氮时期对机插早稻氮素吸收利用的影响

施氮比例	追肥时期	总吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	吸收 利用率/%	生理利用率/ (kg·kg ⁻¹)	农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
CK	—	81.31d	—	—	—	—
10:0	7 d	144.57c	35.14c	36.69e	12.88f	41.52de
7:3	12 d+倒 1 叶	152.27b	39.42b	43.44abcd	17.12bcde	45.76abc
7:3	12 d+倒 2 叶	155.72ab	41.33ab	46.59a	19.24abc	47.88ab
9:1	7 d+倒 1 叶	152.78b	39.70b	42.16bcd	16.67cde	45.31abcd
9:1	7 d+倒 2 叶	153.84b	40.29b	40.62cde	16.32cde	44.96abcd
9:1	7 d+倒 3 叶	154.61b	40.72ab	36.81e	15.00ef	43.64cde
8:2	7 d+倒 1 叶	155.89ab	41.43ab	41.12cd	17.01bcde	45.65abc
8:2	7 d+倒 2 叶	161.85a	44.74a	44.25abc	19.79ab	48.43a
8:2	7 d+倒 3 叶	157.13ab	42.12ab	43.31abcd	18.24abcd	46.88abc
7:3	7 d+倒 1 叶	156.26ab	41.64ab	43.11abcd	17.91abcde	46.55abc
7:3	7 d+倒 2 叶	161.83a	44.73a	45.47ab	20.31a	48.95a
7:3	7 d+倒 3 叶	157.25ab	42.18ab	44.73abc	18.85abc	47.49abc
6:4	7 d+倒 1 叶	151.37b	38.92bc	39.20de	15.21def	43.85bcde
6:4	7 d+倒 2 叶	154.41b	40.61ab	41.63bcd	16.84bcde	45.48abcd
6:4	7 d+倒 3 叶	155.45ab	41.19ab	43.11abcd	17.73abcde	46.37abc
5:5	7 d+倒 2 叶	150.48bc	38.43bc	32.27f	12.34f	40.98e

表 11 施氮比例及追氮时期对机插晚稻氮素吸收利用的影响

施氮比例	追肥时期	总吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	吸收 利用率/%	生理利用率/ (kg·kg ⁻¹)	农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
CK	—	85.57h	—	—	—	—
10:0	7 d	148.07g	32.05g	30.30cd	10.51g	39.12h
7:3	12 d+倒 1 叶	167.21cde	41.86e	32.33abc	13.51de	42.61cde
7:3	12 d+倒 2 叶	173.07abcd	44.87bcd	34.39a	15.54b	44.65ab
9:1	7 d+倒 1 叶	155.49fg	35.86f	33.94a	12.81ef	41.91def
9:1	7 d+倒 2 叶	156.40f	36.32f	33.20ab	12.06f	41.16efg
9:1	7 d+倒 3 叶	159.14ef	37.73f	29.87d	10.71g	39.82gh
8:2	7 d+倒 1 叶	169.90bcd	43.25de	33.13ab	14.33cd	43.43bcd
8:2	7 d+倒 2 叶	174.97abc	45.84bcd	33.80a	15.49b	44.60ab
8:2	7 d+倒 3 叶	171.64bcd	44.14de	34.02a	14.71bc	43.82bc
7:3	7 d+倒 1 叶	172.55bcd	44.60cd	32.39abc	14.44cd	43.55bcd
7:3	7 d+倒 2 叶	181.59a	49.24a	34.63a	16.94a	46.04a
7:3	7 d+倒 3 叶	176.31ab	46.53bc	33.32ab	15.51b	44.61ab
6:4	7 d+倒 1 叶	165.69de	41.09e	31.2bcd	12.82ef	41.93def
6:4	7 d+倒 2 叶	174.11abcd	45.40bcd	31.15bcd	14.14cd	43.25bcd
6:4	7 d+倒 3 叶	178.44ab	47.62ab	32.81ab	15.14bc	44.24bc
5:5	7 d+倒 2 叶	174.58abc	45.65bcd	25.95e	11.85f	40.95fg

3 讨论

3.1 双季机插稻适宜施氮量

在实际生产中,水稻适宜的施氮量可根据斯坦福(Stanford)理论方程进行计算,但目标产量需氮量、土壤氮素供应量及氮肥吸收利用率等相关参数受土壤类型、气候条件、品种特性等因素的综合影响。相关研究^[6-7]表明,在相同条件下机插稻与手栽稻施氮量公式参数基本一致,仅见氮肥吸收利用率手栽略高

于机插^[14]。陈爱忠等^[18]、霍中洋^[19]对江西双季手栽稻氮肥适宜施用量进行了较为系统的研究,结果表明,双季稻实现 9 000 kg/hm² 目标产量的适宜施氮量为 195~225 kg/hm²。而在本试验条件下,机插早、晚稻分别在施氮量为 180,195 kg/hm² 时即可达到较高产量,再增加氮肥用量产量变化不显著但氮素利用率显著降低。适量施氮可同步增加机插早、晚稻有效穗数和每穗粒数,从而扩大群体库容量并保持较

高的氮肥利用率;而过量施氮则会导致每穗粒数、结实率和千粒重降低,最终不利于高产优质群体的构建。本研究得出的适宜施氮量略低,可能与供试土壤基础肥力较高^[6,20]、机插稻品种生育期较短而产量潜力受限^[13]以及栽插基本苗较多^[21]等因素有关。

3.2 双季机插稻适宜施氮比例及追氮时期

从理论的角度分析,水稻适宜的施氮比例必须按高产水稻阶段需氮量、土壤阶段供氮量和氮素的阶段利用率进行具体计算,但生产上通过基肥与穗肥比例试验来确定高产高效氮肥运筹方式的方法更为方便,适应性也更广^[6,11]。本研究表明,在机插早、晚稻施氮量分别为180,195 kg/hm²的条件下,基肥:穗肥比例机插早稻为8:2至7:3、机插晚稻为7:3时,群体质量优、产量较高。这与前人^[9]对传统手栽稻的研究结果基本一致,但机插早、晚稻品种生育期相对较短,穗肥比例不宜过大^[22]。此规律与一季稻差异较大,究其原因,可能与不同稻作的茬口特点有关。稻麦(油)两熟制茬口相对宽松,生产上往往通过推迟播期(较传统手栽推迟15天左右)来解决机插秧龄弹性问题,造成机插生育期明显缩短,生育及需肥特性与手栽稻差异大^[14];而双季稻受安全生产季节的限制,茬口更为紧张,机插播期与手栽无明显差异^[23]。早、晚稻季别之间存在一定差异,可能原因是早稻品种生育期更短,且前期气温相对较低,适当增加基肥比例可提高分蘖期土壤速效氮浓度,促进水稻营养生长期的氮素吸收,保证在有效分蘖期获得预期穗数^[22]。

分蘖肥的施用对促进水稻分蘖成穗、提高最终产量具有重要影响^[22,24]。关于双季稻分蘖肥的施用时期,一般提倡栽插后5~7天即施用,以促进分蘖早生快发^[9];但也有研究^[25]表明,早稻栽后13天、晚稻栽后11~14天施用分蘖肥,有利于控制病虫害高发。本研究表明,适当早施分蘖肥有利于取得相对较高的产量,尤其是机插晚稻,但栽后7天和12天施用分蘖肥的最终产量并无显著差异。这可能与早稻前期温度较低及机插早、晚稻苗体较小且均存在较大田分蘖缺位等因素有关^[26-27],总体与商庆银等^[28]的研究结果相似。而且,本研究分蘖肥施用时期处理中,已有50%的化学氮肥以基肥的形式作用于水稻生长前期,基本能满足前期氮素供应。此外,生产中封闭式化学除草剂一般要求移栽后5~7天施入,移栽后7天左右将分蘖肥与除草剂一并施用既有利于高产又有便于农事操作。由于本试验设置的分蘖肥施用处理较少,而分蘖肥施用还与秧苗素质、基本苗、施肥量等因素有关,因此相关研究有待于进一步深化。

关于穗肥的施用时期,前人研究主要针对传统的手栽稻,关于机插稻特别是双季机插稻的研究较少。

凌启鸿等^[6,11]认为,长江中下游地区单季稻穗肥以倒4叶和倒2叶等量施用的效果最好。石庆华等^[9]研究表明,双季手栽稻穗肥施用适期为倒2叶抽出期。本研究表明,穗肥施用时期与穗肥比例存在一定的互作效应,在相同施氮比例条件下,9:1处理在倒1叶抽出期施用穗肥产量最高,8:2和7:3处理在倒2叶抽出期施用产量最高,6:4处理则在倒3叶抽出期施用产量最高。因此,生产中可根据前期群体的大小对穗肥施用时期及施用量作相应的调整。总体来看,双季机插稻在倒3叶抽出期施用氮肥对于增加穗数有一定作用,而倒2叶抽出期追施氮肥对每穗粒数的提高具有明显的促进作用,倒3叶至倒2叶抽出期施氮有利于提高总颖花量,但倒3叶抽出期施氮会增大LAI,最终使粒叶比下降。倒2叶追施氮肥有利于塑造良好的株型^[29],协调穗粒结构间的矛盾,提高分蘖成穗率、中后期LAI及干物质生产,从而实现增产。从控制无效分蘖、促进大穗和优化群体质量等角度分析,对于4个或5个伸长节间的双季稻,属重叠型品种,高产群体的穗肥也宜在倒2叶抽出期施入^[11,29]。

3.3 双季机插稻氮素吸收利用问题

氮肥吸收量、吸收利用率、农学利用率、生理利用率及偏生产力等指标,从不同方面描述了水稻对氮肥的吸收利用情况^[1-2]。本研究表明,施氮量、施氮比例及追氮时期对机插早、晚稻氮素吸收利用均具有较大的影响。总吸氮量随施氮量的增加而增加,但在早、晚稻施氮量分别超过180,195 kg/hm²时增加不显著,且氮肥偏生产力、吸收利用率、生理利用率及农学利用率均随施氮量的增加而不断降低,施氮量的增加并不能使水稻同步增加氮素吸收量和提高其利用率。这与陈佳娜等^[30]、章起明等^[31]的研究结果基本一致。也有研究^[21]表明,栽插基本苗与施氮量存在一定的互作效应,适当增加基本苗、减少氮肥用量,可在保持高产的同时提高氮素吸收量和氮素利用率,而过量增施氮肥并不能弥补基本苗减少所导致的分蘖不足和产量下降^[32]。因此,随着窄行距插秧机的推广及化肥零增长行动的实施,机插稻“增苗减氮”技术更值得进一步深入研究。对于普通氮肥,分期施肥、前氮后移有利于同步提高水稻产量和氮肥利用率,但适宜比例及时期与气候条件、品种特性及栽培方式等因素密切相关^[7-11,17-19]。本研究表明,分蘖肥移栽后7天施用、基肥:穗肥为8:2至7:3、倒3叶至倒2叶抽出期追施穗肥有利于机插早、晚稻对氮素的吸收及利用率的提高。这与一季稻差异较大,而与双季手栽稻无明显差异。这也可能与本试验采用了基质早育秧、播种机精量匀播及高性能插秧机栽插等最新农机农艺技术,提高了秧苗素质和机插质量有关。

4 结论

(1) 适量施氮可同步增加有效穗数和每穗粒数, 从而扩大群体库容量, 机插早、晚稻分别在施氮量为 180, 195 kg/hm² 时即可达到较高产量, 同时保持较高的氮肥利用率。

(2) 施氮比例及追氮时期对双季机插稻产量及氮素吸收利用具有显著影响, 基肥与穗肥比例早稻 8:2 至 7:3、晚稻 7:3, 移栽后 7 天+倒 2 叶抽穗期追施氮肥, 有利于分蘖成穗, 中后期维持较高的 LAI 和干物质积累量, 粒叶比协调, 穗数充足、穗型较大、总颖花量高, 并同步提高产量及氮肥利用率。

参考文献:

- [1] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37-47.
- [2] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [3] 庞桂斌, 彭世彰. 中国稻田施氮技术研究进展[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 329-335.
- [4] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 基于稻田控水减排的氮肥运筹试验研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 229-236, 245.
- [5] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水稻氮素变化及径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 105-112, 118.
- [6] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2457-2467.
- [7] 张洪程, 郭保卫, 李杰, 等. 水稻机械化精简高产栽培[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 63-76.
- [8] 钟旭华, 黄农荣, 郑海波, 等. 不同时期施氮对华南双季杂交稻产量及氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. *杂交水稻*, 2007, 22(4): 62-66.
- [9] 石庆华, 潘晓华, 曾勇军, 等. 双季超级稻早穗壮秆强源高产栽培技术研究[J]. *江西农业大学学报*, 2012, 34(4): 619-626.
- [10] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 757-764.
- [11] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻精确定量栽培理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 99-124.
- [12] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制[J]. *作物学报*, 2011, 37(10): 1837-1851.
- [13] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J]. *中国稻米*, 2013, 19(4): 1-4.
- [14] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 等. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1908-1919.
- [15] 袁奇, 于林惠, 石世杰. 机插秧每穴栽插苗数对水稻分蘖与成穗的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10): 121-125.
- [16] 付立东, 王宇, 李旭, 等. 氮素基肥穗肥施入比例对机插水稻生育及产量的影响[J]. *广东农业科学*, 2014(19): 52-55.
- [17] 李旭毅, 孙永健, 程宏彪, 等. 氮肥运筹和栽培方式对杂交籼稻 II 优 498 结实期群体光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(9): 1650-1659.
- [18] 陈爱忠, 潘晓华, 吴建富, 等. 双季水稻精确施氮参数的确定与验证[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(1): 6-12.
- [19] 霍中洋. 长江中游地区双季早稻超高产形成特征及精确定量栽培关键技术研究[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2010.
- [20] 张军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(11): 2020-2029.
- [21] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 763-772.
- [22] 王秀斌, 徐新朋, 孙静文, 等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1167-1176.
- [23] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 近 30 年江西双季稻安全生产期及温光资源变化[J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(3): 323-334.
- [24] Peng S B, Garcia F V, Laza R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. *Field Crops Research*, 1996, 47(2/3): 243-252.
- [25] 黄大山, 陈忠平, 程飞虎, 等. 不同时期施用分蘖肥对水稻产量及其结构的影响[J]. *江西农业学报*, 2014, 26(5): 29-32.
- [26] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 机插早稻分蘖成穗特性及基本苗公式参数研究[J]. *作物学报*, 2016, 42(3): 418-427.
- [27] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 基于机插晚稻分蘖成穗特性获取基本苗定量参数[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 30-37.
- [28] 商庆银, 吕伟生, 曾勇军, 等. 分蘖肥不同施用时期对机插双季稻产量和群体发育的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2015, 37(1): 42-47.
- [29] 曾勇军. 双季稻高产群体株型指标及调控对策研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2008.
- [30] 陈佳娜, 谢小兵, 伍丹丹, 等. 机插密度与氮肥运筹对中嘉早 17 产量形成及氮肥利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(6): 628-636.
- [31] 章起明, 曾勇军, 吕伟生, 等. 每穴苗数和施氮量对双季机插稻产量及氮肥利用效率的影响[J]. *作物杂志*, 2016(3): 144-150.
- [32] Huang M, Yang C L, Ji Q M, et al. Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149: 187-192.