

周乾顺, 吴启侠, 朱建强, 等. 氮肥不同基追比对直播稻氮素吸收、转运及利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 915-923.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.007

氮肥不同基追比对直播稻氮素吸收、转运及利用的影响

周乾顺, 吴启侠, 朱建强, 乔月, 彭瑞雪, 范楚江
(长江大学农学院/湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025)

摘要: 为研究不同氮肥基追比对直播稻产量、氮素利用率的影响, 以深两优 332 为供试材料, 采用田间小区试验, 设置 8 个不同氮肥基追比处理, 基肥: 分蘖肥: 穗肥比例分别为 0: 8: 2 (T1)、0: 6: 4 (T2)、2: 6: 2 (T3)、2: 4: 4 (T4)、4: 6: 0 (T5)、4: 4: 2 (T6)、4: 2: 4 (T7)、6: 4: 0 (农民习惯施肥, T8), 以不施氮肥 (T0) 为对照 (CK), 以期筛选出最适合直播稻的氮肥施用方法。结果表明: 分蘖盛期、拔节期以 T5 处理的干物质积累量最高, 明显高于 T8 处理, 分别比 T8 处理高 11.03%、4.04%, 且拔节期 T5 处理干物质积累量显著高于 T1、T2 处理, 分别比 T1、T2 处理高 9.19%、11.96%; 孕穗期以 T6 处理的干物质积累量最高, 比 T5 处理高 6.12%; 成熟期以 T5 处理的干物质积累量最高, 比 T8 处理高 12.68%。与 T8 处理相比, 氮肥基施 40% 可以增加直播稻在分蘖盛期、拔节期的干物质积累量, 同时与 T8 处理相比, 氮肥适量后移作穗肥施用 (T6 处理) 可增加直播稻孕穗期干物质积累量。在产量上, T5、T6、T7 处理之间不存在显著差异, 但 T5 处理与其他 5 个处理及 CK 之间均存在显著差异, 且 T5 处理的产量比 T8 处理高 7.68%, 比 T1、T2 处理高 27%~30%。由此可以看出, 氮肥适量基追配施以及氮肥适当后移可以显著提高直播稻的产量。在氮肥吸收利用方面, T5 处理和 T6 处理的氮肥吸收利用率和农学利用率不存在显著差异, 但 T5 处理与其他处理间均存在显著差异, 且 T5 处理的氮肥吸收利用率和农学利用率分别比 T8 处理高 7.61%、15.04%, 分别比 T1 处理高 21.79%、73.68%, 分别比 T3 处理高 14.02%、23.47%, 氮肥适当后移可以提高直播稻氮肥利用率。通过比较直播稻氮肥不同基追肥配施下干物质质量、产量以及氮肥利用率可以得出, 基肥: 分蘖肥: 穗肥为 4: 6: 0 和 4: 4: 2 为直播稻的较佳施肥方法。

关键词: 直播稻; 氮肥基追比; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S511.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)04-0915-09

Effects of different basal-topdressing ratios of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption, transportation and utilization of direct-seeding rice

ZHOU Qian-shun, WU Qi-xia, ZHU Jian-qiang, QIAO Yue, PENG Rui-xue, FAN Chu-jiang
(College of Agriculture, Yangtze University/Engineering Research Center for Wetland Ecology and Agricultural Utilization, Ministry of Education, Jingzhou 434025, China)

Abstract: Shenliangyou 332 was used as experimental material to study the effects of different ratios of nitrogen used as basal fertilizer to that used as topdressing on grain yield and nitrogen use efficiency of direct-seeding rice. Field plot ex-

periment was used and eight different treatments (based on ratios of nitrogen used as basal fertilizer to that used as topdressing) were set. Ratios of basal fertilizer: booting fertilizer were 0: 8: 2 (T1 treatment), 0: 6: 4 (T2 treatment), 2: 6: 2 (T3 treatment), 2: 4: 4 (T4 treatment), 4: 6: 0 (T5 treatment), 4: 4: 2 (T6 treatment), 4: 2: 4 (T7 treatment), 6: 4: 0 (fertilizer usually used by farmers, T8

收稿日期: 2021-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A2039); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800500)

作者简介: 周乾顺 (1998-), 男, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要从事稻田面源污染防控研究。 (E-mail) zhouqianshun2021@163.com

通讯作者: 吴启侠, (E-mail) qixiawu@yangtzeu.edu.cn

treatment), no nitrogen fertilizer application (T0) was taken as the control (CK) to screen out the most suitable nitrogen fertilizer application method for direct-seeding rice. The results showed that, dry matter accumulation was the highest under T5 treatment at tillering stage and jointing stage, which was 11.03% and 4.04% higher than T8 treatment respectively, and the differences were obvious. Dry matter accumulation of T5 treatment at jointing stage was 9.19% and 11.96% higher than T1 treatment and T2 treatment respectively, and the differences were significant. At booting stage, T6 treatment had the highest dry matter accumulation, which was 6.12% higher than T5 treatment. The dry matter accumulation of T5 treatment was the highest, which was 12.68% higher than that of T8 treatment. Dry matter accumulation at tillering stage and jointing stage of direct-seeding rice could be increased under the treatment of 40% nitrogen fertilizer used as basal fertilizer compared with that of T8 treatment, and the dry matter accumulation at booting stage of direct-seeding rice could be increased under the treatment of applying appropriate nitrogen fertilizer later as booting fertilizer (T6 treatment) compared with that of T8 treatment. There was no significant difference between treatments of T5, T6 and T7 on the aspect of yield, but there was significant difference between T5 treatment and other five treatments and CK. The yield of T5 treatment was 7.68% higher than that of T8 treatment, and was 27%–30% higher than those of T1, T2 treatments. It can be seen that, the yield of direct-seeding rice could be significantly improved under the treatments of applying proper amount of nitrogen as basal fertilizer and topdressing, as well as appropriate Delayed applying of nitrogen fertilizer. In terms of nitrogen uptake and utilization, there were no significant differences of nitrogen uptake and utilization rates as well as agronomic utilization rates between T5 treatment and T6 treatment, but there were significant differences between T5 treatment and other treatments. Nitrogen uptake and utilization rate and agronomic utilization rate of T5 treatment were 7.61% and 15.04% higher than those of T8 treatment respectively, were 21.79% and 73.68% higher than those of T1 treatment respectively, and were 14.02% and 23.47% higher than those of T3 treatment respectively. Appropriate Delaying of nitrogen fertilizer could improve nitrogen use efficiency of direct-seeding rice. By comparing the dry matter amount, yield and nitrogen use efficiency under treatments of different combinations of nitrogen fertilizer as basal fertilizer to topdressing of direct-seeding rice, it can be concluded that ratios of basal fertilizer : tillering fertilizer : booting fertilizer as 4 : 6 : 0 and 4 : 4 : 2 are good fertilizing method for direct-seeding rice.

Key words: direct-seeding rice; basal-topdressing ratio of nitrogen fertilizer; yield; nitrogen use efficiency

水稻在中国的农业生产中扮演着非常重要的角色,中国历年的水稻种植面积在 $3.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 左右,总产量约 $2.0 \times 10^8 \text{ t}$,占世界水稻总种植面积的 21%和总产量的 37%^[1]。决定一个地区水稻种植方式的不是种植传统,而是这个地区的劳动力数量^[2]。在中国农村劳动力严重不足的现实背景下,对劳动力需求较大的水稻移栽技术已经不是最优的选择,反而具有省时省工特点的水稻直播技术成为中国很多地区农民种植水稻的优先选择。近几年来,水稻直播技术在中国很多地区不推自广^[3-6]。2004 年湖北省直播稻种植面积约 $1.333 \times 10^5 \text{ hm}^2$,2008 年发展至 $2.333 \times 10^5 \text{ hm}^2$,2008–2015 年种植面积总体增长 10.58%^[7]。随着农业机械化普及、高效除草剂技术的成熟和水稻品种的不断改良,许多国家早已将直播作为水稻的主要种植方式,美国、澳大利亚和一些欧洲国家的水稻种植都以机械化直播为主^[8-11]。由于水稻直播面积的不断扩大,如何提高直播稻的产量和氮肥利用率已成为研究热点。

氮素养分是影响水稻产量的主要因子之一,因此一些农民误认为氮肥施用量越大产量越高,为了获取更高的产量而施用大量的氮肥,致使中国氮肥用量和稻田氮肥用量分别约占全球总用量的 30%和 37%,中国已成为世界第一氮肥消费国^[12-13]。氮素养分只有在一定区间内才与水稻产量成正比,当越过区间之后,氮肥的投入与产出比会逐渐下降,除此之外随着氮肥的不断投入还会引起一系列的环境问题,例如水体富营养化、地下水硝酸盐含量过高、土壤退化等^[14-17]。目前已有许多提高氮素吸收的研究^[16,18-20],但大多数只针对传统手插稻和机插稻,关于直播稻氮肥运筹方式的研究较少。直播稻的生育期短、前期的干物质积累慢、中后期生长量大^[19-23],因此直播稻前期对氮素养分的需求量偏小,中后期需求量较大。氮肥施用应适当后移以适应直播稻对氮素养分的需求。但农民习惯性地重施基肥,据调查在湖北、广东、浙江等省农民习惯性地 将氮肥总量的 55%~85% 作为基肥和追肥施用^[24]。

这样的施肥模式并不符合直播稻的氮肥吸收规律,从而导致氮肥的大量流失,降低了氮肥利用率。本试验选用深两优 322 为供试品种,设置 9 个不同的氮肥施用处理,研究不同氮肥基追比对直播稻氮素吸收和产量的影响,以期为江汉平原的直播稻氮肥施用提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本试验所用材料为深两优 332,属籼型两系杂交中稻迟熟品种,在湖北省作一季中稻栽培。

试验于长江大学农学院试验基地(30°21'N, 112°09'E)标准小区进行。本基地地处江汉平原,属北亚热带农业气候带。土壤基本性状为:pH7.15,有机质含量 28.25 g/kg,全氮含量 2.13 g/kg,碱解氮含量 113.05 mg/kg,速效磷含量 12.89 mg/kg,速效钾含量 219.65 mg/kg。试验设置基肥:分蘖肥:穗肥比例分别为 0:8:2(T1)、0:6:4(T2)、2:6:2(T3)、2:4:4(T4)、4:6:0(T5)、4:4:2(T6)、4:2:4(T7)、6:4:0(T8,农民最常用的氮肥配施比例),共 8 个氮肥运筹方式,以不施氮肥(T0)为对照(CK),每个处理 3 次重复,共 27 个小区。小区面积均为 45 m²,小区之间用薄膜和土埂隔开,防止小区之间串水串肥,每小区均有独立的灌溉系统。

1.2 田间管理

按照当地稻田耕作习惯,冬前进行翻耕,在水稻栽种前进行旋耕、泡田。于 2020 年 5 月 26 日在浅水层撒施基肥,施基肥后人工耙平,并将小区整成沟厢模式(小区中间开沟),厢宽 1.5 m,沟宽 0.3 m,沟深 0.1~0.2 m。播种前进行田间排水,保证田间湿润无水层,播种时进行人工划行均匀播种,播种量折干种为 22.5 kg/hm²,播种前对种子进行浸泡和催芽,在芽长为 3 mm 左右时,适当摊开晾干。播种后 3 d 内进行化学除草,播种至三叶一心期保持土壤湿润,若土壤发白则灌跑马水,如遇强降雨田面有积水就及时排水,6 月 5 日复水至田面有 2~3 cm 浅水层,6 月 10 日撒施分蘖肥,8 月 9 日撒施穗肥。T1~T8 处理氮肥施用量均为 180 kg/hm²,8 个处理均施等量的磷肥和钾肥,P₂O₅和 K₂O 用量分别为 75 kg/hm²和 105 kg/hm²。磷钾肥作为基肥一次性施入。基肥为普通复混肥,其养分含量为 41%(N-

P₂O₅-K₂O=18-8-15),追肥为尿素(N≥46%)。

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 干物质质量 分别于三叶一心期、分蘖盛期、拔节期、孕穗期、齐穗期和成熟期,取具有代表性样品,按茎、叶及穗部分开收集,随后将各部位器官于 105 ℃杀青 30 min 后 80 ℃烘干至恒质量,测定各部分的干物质质量。

1.3.2 氮素积累量 植株干样粉碎后用 H₂SO₄-H₂O₂消化,再用 Alliance-Futura II 连续流动分析仪(法国)测定各部分氮含量。

1.3.3 产量测定 于成熟期每小区选定约 3 m²收获,记录实际测产面积。脱粒并晒干,清除杂质和瘪粒,称量风干实粒总质量。

1.4 数据计算与统计分析

采用以下公式分别计算氮素积累量(A , kg/hm²)、茎叶氮素转运量(B , kg/hm²)、茎叶氮素转运率(C , %)、氮素贡献率(D , %)、氮肥表观利用率(E , %)和氮肥农学利用率(F , kg/kg)、净干物质积累量(R , kg/hm²)、净氮素吸收量(W , kg/hm²)等指标: $A=M \times N$, $B=I-J$, $C=B/I$, $D=B/L$, $E=(O-P)/Q \times 100$, $F=(G-H)/Q$, $R=S-T$, $W=X-Y$ 。式中: G 为施氮区产量(kg/hm²), H 为空白产量(kg/hm²), I 为齐穗期茎叶氮素吸收量(kg/hm²), J 为成熟期茎叶氮素吸收量(kg/hm²), L 为成熟期穗部氮素吸收量(kg/hm²), M 为氮含量(kg), N 为干物质质量(kg/hm²), O 为施氮区氮素积累量(kg/hm²), P 为不施氮区氮素积累量(kg/hm²), Q 为施氮量(kg), S 为后一个生育期干物质积累量(kg/hm²), T 为前一个生育期干物质积累量(kg/hm²), W 为后一个生育期的氮素吸收量(kg/hm²), S 为前一个生育期的氮素积累量(kg/hm²), X 为后一个生育期的氮素吸收量(kg/hm²), Y 为前一个生育期的氮素积累量(kg/hm²)。

数据一般分析和作图用 Excel 软件,方差分析用 DPS 软件完成,处理间多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 氮肥不同基追比对水稻干物质积累量的影响

不同氮肥基追比下,直播稻各个生育期净干物质积累量如表 1 所示。由表 1 可知,三叶一心期各处理净干物质积累量随基肥施氮量的增加而增加,其中 T8 处理的基肥施氮量比 T5~T7 处理高 20%,

但净干物质积累量仅高出 13.85%。分蘖盛期以 T5 处理的净干物质积累量最高,显著高于 T8 处理,比 T8 处理高 11.03%,表明氮肥大量基施不会提升直播稻分蘖期的净干物质积累量,而氮肥适量后移能显著提升直播稻在分蘖期间的净干物质积累量。拔节期,T3、T4、T5、T6、T7、T8 处理间净干物质积累量无显著性差异,以 T5 处理最高,比 T8 处理高 4.04%,T5 处理与两个基肥不施氮的 T1、T2 处理间存在显著性差异,比 T1、T2 处理分别高 9.19%、11.96%。由此可以说明,氮肥作追肥适量后移可以提高直播稻拔节期对干物质的积累。在孕穗期,T2、T4、T5、T6、T7、T8 处理之间的净干物质积累量不存在显著性差异,由于 T6 处理施用 20% 穗肥,其净干物质积累量相对偏高,与 T8 处理相比高 12.23%,比不施穗肥的 T5 处理高 6.12%,由此可以说明,氮肥适量后移作穗肥施用对直播稻孕穗期干物质的积累有一定的影响。在成熟期,各处理间不存在显著性差异,总体上看以氮肥基施 40% 的处理

净干物质积累量较高,以 T5 处理的净干物质积累量最高,分别比 T1、T3、T8 处理高 0.65%、5.78%、12.68%。综合来看,氮肥基施 40% 可以增加直播稻在分蘖盛期、拔节期的净干物质积累量,同时氮肥适量后移作穗肥、分蘖肥施用可增加直播稻孕穗期、齐穗期和成熟期的净干物质积累量。

分蘖盛期-拔节期期间,直播稻的干物质主要积累在茎秆中,茎秆中的干物质积累量占总积累量的 50.00%~51.70%,叶片干物质积累量占地上部干物质积累总量的 48.30%~50.00% (图 1)。在孕穗期-成熟期,干物质逐渐从茎叶转移到穗中,水稻成熟后穗中干物质积累量占总干物质积累量的 59.00%~62.48%。T5 处理茎中干物质积累量较 T6 处理高 1.04%,叶中干物质积累量较 T6 处理低 1.42%,穗中干物质积累量较 T6 处理高 2.63%。由此可见,T5、T6 处理的氮肥基追比例能够提高直播稻的干物质转运量,与直播稻的生长习性更加契合。

表 1 不同氮肥基追比处理下直播稻各生育期净干物质积累量

Table 1 Net dry matter accumulation of direct-seeding rice in each growth period under different nitrogen fertilizer ratios of base to topdressing

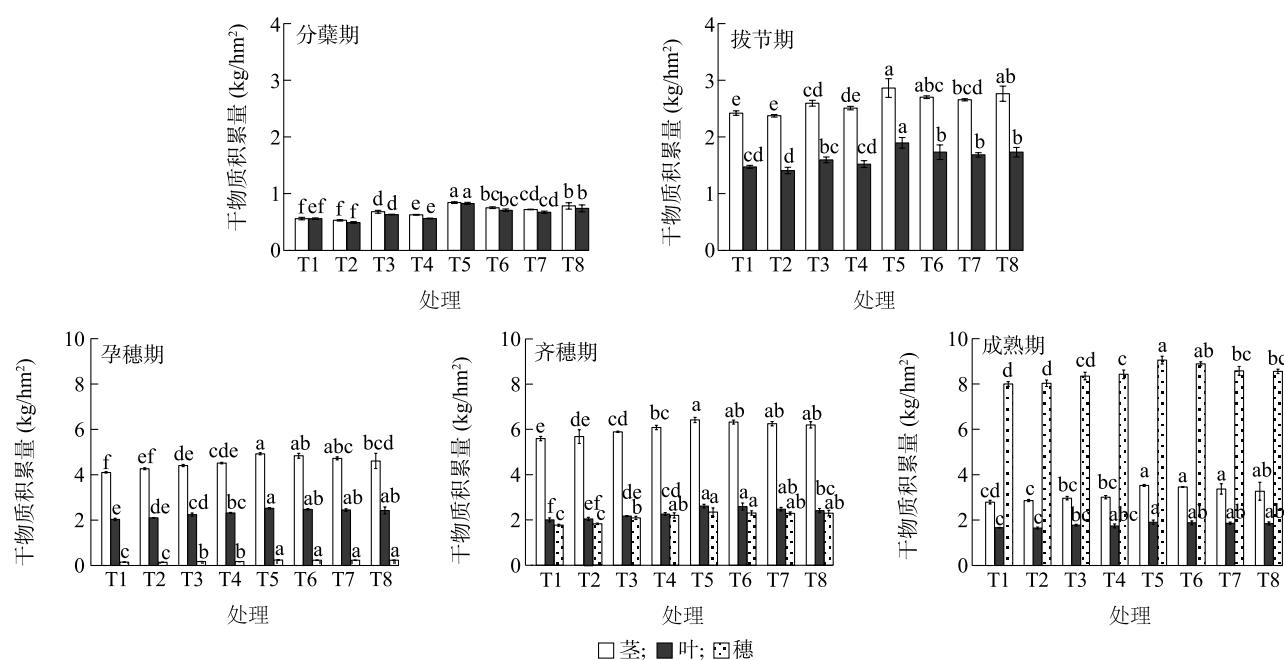
处理	净干物质积累量 (kg/hm ²)					
	三叶一心期	分蘖盛期	拔节期	孕穗期	齐穗期	成熟期
CK	20±1d	660±40g	1 260±80c	1 640±310d	3 890±370a	1 530±90b
T1	21±1d	1 040±30f	2 830±20b	2 390±20c	3 080±200bc	3 090±90a
T2	21±1d	1 000±20f	2 760±90b	2 730±130abc	3 060±310c	2 970±290a
T3	34±2c	1 280±30d	2 880±70ab	2 650±60bc	3 320±120abc	2 940±50a
T4	36±1c	1 150±10e	2 840±30ab	2 980±60ab	3 530±130abc	2 630±330a
T5	65±2b	1 610±30a	3 090±250a	2 940±150ab	3 680±30a	3 110±100a
T6	65±3b	1 400±30bc	2 970±150ab	3 120±140a	3 660±230a	3 010±360a
T7	65±2b	1 330±20cd	2 950±40ab	3 070±20ab	3 610±230abc	2 800±460a
T8	74±2a	1 450±120b	2 970±160ab	2 780±450abc	3 640±500ab	2 760±550a

T1~T8:基肥:分蘖肥:穗肥比例分别为0:8:2、0:6:4、2:6:2、2:4:4、4:6:0、4:4:2、4:2:4、6:4:0。对照(CK)不施氮肥。同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同氮肥基追比对直播稻产量的影响

由表 2 可知,不同氮肥基追比处理对深两优 332 的千粒质量没有显著影响,但有效穗数、每穗粒数和产量在不同氮肥处理间有显著性差异。总体来看以基施 40% 的处理有效穗数较多,在基施 40% 的 3 个处理中又以 T5 处理的有效穗数最多,分别比 T1、T3、T8 处理高 23.59%、12.56%、7.75%。不同处理下每穗粒

数同样以基施 40% 的处理较高,T5 处理的每穗粒数显著高于 T1、T4 和 T8 处理。基施 40% 的 3 个处理 T5、T6 和 T7 处理之间的产量没有显著性差异,以 T5 处理的产量最高,显著高于 T8 处理,分别比 T6、T7、T8 处理高 1.47%、6.99%、7.68%。这说明氮肥施用比例(基肥:分蘖肥:穗肥)为 4:6:0 和 4:4:2 更有利于直播稻产量的提高。



各处理见表1注。同一生育期内不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同氮肥基追比处理下直播稻各器官干物质积累量

Fig.1 Net dry matter accumulation of direct-seeding rice organs under different nitrogen fertilizer ratios of base to topdressing

表2 不同施氮处理下直播稻产量

Table 2 Direct-seeding rice yield under different nitrogen application treatments

处理	有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	每穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)
CK	157.33 \pm 5.73e	160.86 \pm 1.81f	66.42 \pm 1.38d	22.25 \pm 0.66a	3.78 \pm 0.24e
T1	183.67 \pm 6.34d	165.58 \pm 1.57e	66.52 \pm 0.93d	22.68 \pm 0.25a	6.37 \pm 0.39d
T2	184.33 \pm 6.13d	166.03 \pm 1.84e	67.38 \pm 0.79cd	22.19 \pm 0.58a	6.50 \pm 0.22d
T3	201.67 \pm 3.86c	168.32 \pm 2.12d	69.94 \pm 1.35b	22.44 \pm 0.64a	7.42 \pm 0.06c
T4	200.33 \pm 3.68c	169.50 \pm 0.70cd	69.57 \pm 1.65bc	22.58 \pm 0.91a	7.53 \pm 0.25bc
T5	227.00 \pm 8.29a	176.81 \pm 1.49a	73.86 \pm 2.59a	23.42 \pm 0.29a	8.27 \pm 0.23a
T6	221.00 \pm 5.35ab	175.86 \pm 0.47ab	72.92 \pm 0.92ab	22.79 \pm 0.74a	8.15 \pm 0.04ab
T7	214.33 \pm 4.92b	170.95 \pm 1.86c	71.69 \pm 0.79ab	22.60 \pm 0.57a	7.73 \pm 0.17abc
T8	210.67 \pm 3.40bc	170.42 \pm 1.72c	70.42 \pm 1.70b	22.88 \pm 1.14a	7.68 \pm 0.13bc

各处理见表1注。同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同氮肥基追比对直播稻地上部分氮素净吸收量与不同器官中氮素累积量的影响

表3为不同氮肥基追比下直播稻地上部分各个时期的氮素净吸收量。在三叶一心期,由于T8处理氮肥大量基施,导致T8处理在三叶一心期的氮素净吸收量偏高,与T7、T6、T5、T4、T3、T2、T1处理之间表现出显著性差异。在分蘖盛期,T5处理的氮素净吸收量与其余处理间均表现出显著性差异,比T1、T3、T6、T8处理分别高53.42%、33.69%、17.43%、21.95%,由此可见,在前中期,氮肥大量基施不能使

直播稻对氮素吸收有显著的提升。在孕穗期,T2、T4、T5、T6、T7处理之间的氮素净吸收量不存在显著性差异,由于T7处理有40%的氮肥作穗肥施用,导致T7处理的氮素净吸收量偏高,显著高于T8、T3、T1处理。在齐穗期,T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8处理之间的氮素净吸收量无显著性差异,氮素净吸收量以T5处理最高,分别比T1、T3、T8处理高21.90%、11.31%、10.83%。在成熟期,各处理间氮素吸收量无显著性差异,但T1、T2、T3、T4处理的氮素净吸收量相对较高,有可能是T1、T2、T3、T4处理

分蘖肥和穗肥施用较多,造成水稻贪青晚熟,从而使其成熟期对氮素的吸收较强。综合来看,氮肥大量基施会使直播稻在三叶一心期对氮素的吸收量有一定的提升,但不会提升直播稻在分蘖盛期、拔节期对

氮素的吸收量,齐穗期以减少基肥用量(40%)、适量增加追肥用量(60%)的 T5、T6、T7 处理氮素吸收量较高。说明氮肥适量后移作分蘖肥和穗肥施用可以提升直播稻在中后期对氮素的吸收。

表 3 不同氮肥基追比下直播稻地上部分的氮素净吸收量

Table 3 Net nitrogen absorption of direct-seeding rice under different nitrogen fertilizer ratios of base to topdressing

处理	氮素净吸收量 (kg/hm ²)					
	三叶一心期	分蘖盛期	拔节期	孕穗期	齐穗期	成熟期
CK	0.71±0.04d	11.56±0.60f	8.78±1.86b	18.01±5.43d	9.68±2.13b	3.59±1.71b
T1	0.79±0.06d	19.45±1.35e	12.83±1.03a	19.10±1.27cd	16.71±3.16a	26.55±1.56a
T2	0.80±0.07d	19.50±1.20e	11.49±1.66ab	22.41±0.97abcd	16.47±1.46a	26.77±1.99a
T3	1.31±0.06c	22.32±0.62cd	13.16±1.31a	20.01±1.27bcd	18.30±2.65a	24.63±0.57a
T4	1.25±0.12c	21.85±1.06de	12.00±0.64ab	23.76±0.51abc	18.52±0.47a	24.22±0.69a
T5	2.67±0.17b	29.84±0.33a	12.49±1.74a	21.36±0.68abcd	20.37±4.38a	22.47±6.01a
T6	2.62±0.17b	25.41±1.50b	12.21±2.54a	24.71±0.63ab	19.55±2.76a	22.57±0.98a
T7	2.72±0.20b	21.79±0.66de	13.52±0.33a	25.56±0.62a	19.73±0.21a	22.32±1.17a
T8	3.98±0.34a	24.47±2.18bc	14.08±2.07a	19.38±3.93cd	18.38±0.82a	23.48±4.39a

各处理见表 1 注。同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 显示,分蘖盛期-成熟期都以 T5 处理的氮素积累量最高。说明氮肥适当后移作分蘖肥施用能显著增高直播稻整个生育时期的氮素积累量。进一步分析可以看出,直播稻茎叶中的氮素积累量随生育期的变化而呈现先增后减的趋势,穗中的氮素积累量从孕穗期开始呈上升的趋势。成熟期 T5 处理的地上部氮素积累量显著高于其他处理,分别比 T1、T3、T8 处理高 16.16%、11.15%、6.84%。从齐穗期至成熟期穗中的氮素积累量看,T5 处理的氮素积累量显著高于 T8、T4、T3、T2、T1 处理,分别比 T8、T4、T3、T2、T1 处理高 4.43%~13.17%、5.86%~17.69%、7.16%~20.53%、8.85%~28.27%、10.61%~30.73%。可以看出,氮肥适量后移作分蘖肥施用可以提升直播稻中后期的氮素积累量以及氮素转运量。

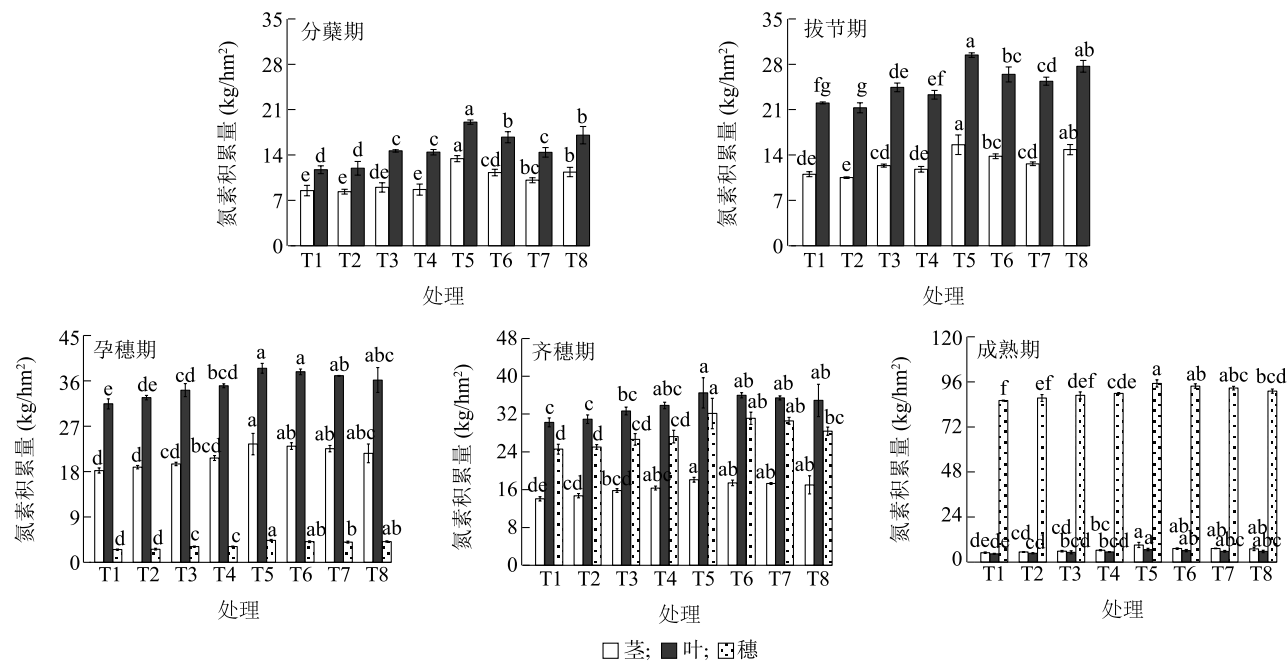
2.4 不同氮肥基追比下水稻的氮素转运量、氮素转运率和氮素贡献率

由表 4 可见,直播稻氮素积累量和转运量与施氮处理密切相关,总体表现出 T5 处理>T6 处理>T7 处理>T8 处理>T4 处理>T3 处理>T2 处理>T1 处理的趋势。无论是氮素贡献率还是氮素转运量都以 T5 处理最优。说明在相同施氮量的前提下,氮肥适量后移作分蘖肥施用可以提高直播稻的氮素转运量和氮素贡献率。但就氮素转运率来看,T5 处理要低于 T1、T3、

T8 处理,原因可能是 T5 处理在齐穗期以前茎叶中积累的氮素过多,从而导致其氮素转运率偏低,但这也从侧面反映出氮肥基施 40%+追施 60%的施肥方式在前中期使直播稻积累大量的氮素,更有利于直播稻灌浆期氮素从茎叶向穗中转移,满足水稻籽粒灌浆对氮素的需求,从而增加直播稻产量。

2.5 不同氮肥基追比对直播稻氮肥利用率的影响

氮肥利用率是评价水稻对氮素吸收、利用效果的重要指标。表 5 说明,不同的氮肥运筹能够显著影响直播稻的氮肥吸收利用。氮肥吸收利用率总体呈现出 T1 处理<T2 处理<T3 处理<T4 处理<T8 处理<T7 处理<T6 处理<T5 处理,且 T5 处理与 T1、T2、T3、T4、T8 处理之间表现出显著差异,分别比 T1、T2、T3、T4、T8 处理高出 21.79%、18.05%、14.02%、10.97%、7.61%。氮素干物质生产效率在各处理间无显著性差异,但以氮肥基施 40%的 T6、T5 处理相对较高,分别比 T8 处理高 0.70%、0.84%。氮素稻谷生产效率在氮肥基施与不施氮肥的处理之间差异显著 ($P<0.05$),在氮肥基施的 6 个处理中以氮肥基施 40%的 T5、T6 处理氮素稻谷生产效率较高,分别比 T8 处理高 2.30%、2.80%。在氮肥农学利用率方面,同样以基施 40%的 T5、T6 处理相对较高,且与 T8 处理之间表现出显著性差异,分别比 T8 处理高 15.04%、11.95%。说明氮肥基追比例为 4:6:0 和 4:4:2 更加符合直播稻氮素吸收利用规律。



各处理见表 1 注。同一生育期不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同氮肥基追比下直播稻不同器官中的氮素积累量

Fig.2 Nitrogen accumulation in different organs of direct-seeding rice under different nitrogen fertilizer ratios of base to topdressing

表 4 不同氮肥基追比下直播稻的氮素转运

Table 4 Nitrogen transfer of direct-seeding rice under different nitrogen fertilizer ratios of base to topdressing

处理	茎叶氮素积累量 (kg/hm ²)		氮素转运量 (kg/hm ²)	氮素转运率 (%)	氮素贡献率 (%)
	齐穗期	成熟期			
T1	44.31±0.66e	9.40±0.06f	34.91±0.70c	78.77±2.44a	40.40±3.50c
T2	45.64±1.36de	10.03±0.15ef	35.61±1.27bc	78.01±0.41ab	41.76±1.90c
T3	48.46±0.82cd	10.95±0.99de	37.51±1.73abc	77.37±0.50abc	49.01±0.43b
T4	50.15±1.07bc	11.72±0.15cd	38.43±0.91abc	76.61±2.37abc	49.75±1.69b
T5	54.60±3.21a	14.04±0.87a	40.56±3.18a	74.21±0.20c	54.24±1.27a
T6	53.40±0.42a	13.28±0.91ab	40.11±0.94a	75.12±2.08bc	53.60±0.23a
T7	52.75±0.24ab	12.94±0.30abc	39.80±0.54a	75.46±1.69abc	51.08±1.09ab
T8	51.91±10.48ab	12.66±0.86bc	39.25±2.73ab	75.53±2.51abc	50.77±0.85ab

各处理见表 1 注。同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 5 不同氮肥基追比对水稻氮肥利用率的影响

Table 5 Effect of different nitrogen fertilizer ratio of base to topdressing on rice nitrogen use efficiency

处理	氮素干物质生产效率 (kg/kg)	氮素稻谷生产效率 (kg/kg)	氮肥吸收利用率 (%)	氮肥农学利用率 (%)	氮素贡献率 (%)
T1	130.51±0.82a	66.71±5.15b	35.06±4.28f	14.36±2.14d	40.40±3.50c
T2	128.63±3.83a	66.71±2.65b	36.17±2.32ef	15.10±1.20d	41.76±1.90c
T3	131.25±0.79a	74.36±0.70a	37.45±0.52de	20.20±0.35c	49.01±0.43b
T4	129.67±2.62a	74.15±2.93a	38.48±2.07cd	20.84±1.35c	49.75±1.69b
T5	132.66±3.22a	75.74±0.72a	42.70±1.56a	24.94±1.28a	54.24±1.27a
T6	132.85±3.27a	76.11±0.37a	41.52±0.29ab	24.27±0.23ab	53.60±0.23a
T7	130.73±4.30a	73.20±1.93a	40.72±1.33ab	21.96±0.94bc	51.08±1.09ab
T8	131.74±7.99a	74.04±1.31a	39.68±1.04bc	21.68±0.73c	50.77±0.85ab

各处理见表 1 注。同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。氮素干物质生产效率=成熟期地上部干物质积累量/成熟期地上部氮素积累量;氮素稻谷生产效率=籽粒产量/成熟期地上部氮素积累量。

3 讨论

已有研究表明,直播稻的生育期较移栽稻短,前期生长缓慢,中后期生长量大^[19,25]。本试验中,T8 处理(基肥:分蘖肥:穗肥比例6:4:0)基肥施氮量大,前期的干物质积累量要显著高于其他处理,但中后期的干物质积累量低于 T5、T6、T7 处理。T5 处理(氮肥的基肥:分蘖肥:穗肥比例4:6:0)和 T6 处理(氮肥的基肥:分蘖肥:穗肥比例4:4:2)中后期的干物质积累量要显著高于其他处理。说明氮肥的基肥:分蘖肥:穗肥比例4:6:0 和4:4:2 的施肥方式更符合直播稻的生长规律,可以提高直播稻的干物质含量。李木英等^[26]的研究结果表明,水稻的基肥施用过多会导致后期氮素吸收量减小,并且施用的氮肥浓度过高会抑制水稻的生长,降低水稻的干物质积累量。本试验中 T8 处理的氮肥大量基施降低了直播稻中后期氮素吸收量和干物质积累量,氮肥大量作分蘖肥降低了前期氮素吸收量和干物质积累量,这与李木英等^[26]的研究结果基本一致。江立庚等^[27]的研究结果表明,水稻在生长前中期干物质主要集中在茎中,成熟期干物质积累主要分布在穗中,本试验结果表明,在水稻分蘖前-齐穗期干物质主要积累在茎中,孕穗期-成熟期,穗中干物质积累量逐渐呈升高趋势。

氮肥是使水稻产量增加的一个重要因素,但是氮肥的运筹不当会导致氮肥的肥效下降,从而影响水稻产量。有研究表明,直播稻的氮肥施用量在 298 kg/hm²时产量最高,仅知最佳施肥量而不知最佳基追配施方式同样很难使直播稻达到高产,同时还会引起氮素不必要的流失,造成农田面源污染^[28],阻碍农业的发展。优良的氮肥配施方式可以增加直播稻的分蘖,减少无效分蘖,同时还可以提升直播稻对氮素的吸收。本试验结果表明,基肥:分蘖肥:穗肥比例分别为4:6:0 和4:4:2 的 2 个处理(T5、T6)的产量相较于其他处理要高,尤其比农民习惯的施肥方式 T8 处理分别高 7.68%、6.12%。在氮素吸收方面,李木英等^[26,20]的研究结果表明,直播稻在前期生长量小,中后期生长量大。本试验结果表明,T5、T6 处理的氮素吸收在分蘖盛期-孕穗期达到高峰,分别占总氮素吸收量的 35.13%、42.39%,这说明 T5、T6 处理的 2 种氮肥配施方式更符合直播稻的生长特性,也更符合直播稻

对氮素吸收的特性。氮素转运量也是水稻高产的一个重要指标。Ntanos 等^[29]的研究结果表明,水稻花期营养器官中 67%的氮量被转运用以促进籽粒的形成,因此提升氮素转运量是水稻获得高产的重要途径。张雪凌等^[30]研究指出,应在习惯性施肥的基础上减少氮肥基施 20%,而适当增加分蘖肥和穗肥的施用。本试验结果表明,基肥:分蘖肥:穗肥比例为4:6:0 和4:4:2 处理的氮素转运量要高于其他处理,且分别比农民常用施肥方式 T8 处理的氮素转运量高 3.34%、2.19%,这说明 T5、T6 处理的氮肥配施方式有利于提高直播稻的产量。

氮肥利用率是衡量氮素流失的一个重要指标^[31-33]。李启红等^[34]的研究结果表明,不同氮肥基追比例的氮素积累量差异明显,分蘖期、孕穗期和抽穗期是水稻氮素吸收的高峰期,因此氮肥后移有利于提高水稻的氮素吸收量,减少氮素流失,其研究结果还表明,适当地增加分蘖肥的用量可以提高水稻的农学利用率。在本试验中 T5、T6 处理的氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率较高,此结果与李启红等^[34]的研究结果基本一致。马洪文等^[35]的研究结果显示,氮肥基追比例为43.6%:56.4%时,氮素吸收率最高,这与本试验中 T5、T6 处理结果基本一致。通过不同氮肥基追比对直播稻干物质、产量、氮素转运量、氮素吸收量、氮素积累量影响的试验,我们认为基肥:分蘖肥:穗肥比例为4:6:0 和4:4:2 为较适合江汉平原直播稻的施肥方式。

参考文献:

- [1] 剧成欣,陈尧杰,赵步洪,等. 实地氮肥管理对不同氮响应梗稻品种产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学,2018,154(3): 33-42.
- [2] 曾雄生. 直播稻的历史研究[J]. 中国农史,2005(2):3-16.
- [3] 冯延江,王 麒,赵宏亮,等. 我国水稻直播技术研究现状及展望[J]. 中国稻米, 2020, 153(1):27-31.
- [4] LIU H, HUSSAIN S, ZHENG M, et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(1):285-294.
- [5] 傅友强,梁开明,麦国勋,等. 不同施肥方式和播种量对华南直播稻产量的影响[J]. 中国稻米,2021,27(5):84-89,92.
- [6] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizer reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80-90.
- [7] 鄢亮哲,蔡 鑫,曹 鹏,等. 湖北省直播稻生产现状、存在的

- 问题及建议[J].湖北农业科学,2017,56(22):4248-4249,4263.
- [8] 郑盛华,陈红琳,朱孟琦,等.播期对川西平原直播稻光合特性和产量的影响[J].核农学报,2019,33(3):574-582.
- [9] ZHANG Y P, ZHU D F, XIONG H, et al. Development and transition of rice planting in China[J]. Agricultural Science and Technology, 2012, 13(6): 1270-1276.
- [10] 张喜娟,来永才,孟英,等.种植方式对寒地粳稻生育期、产量和温度利用的影响[J].作物杂志,2017,33(5):124-128.
- [11] 朱德峰,张玉屏,陈惠哲,等.中国水稻高产栽培技术创新与实践[J].中国农业科学,2015,48(17):3404-3414.
- [12] PENG S, BURESH R J, HUANG J, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. Field Crops Research, 2006, 96: 37-47.
- [13] ZHANG F S, FAN M S, ZHANG W F. Principles, dissemination and performance of fertilizer best management practices developed in China[M]// PRINCIPLE G. Fertilizer best management practices: general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs. regulations. Brussels Belgium: International Fertilizer Industry Association, 2007: 193-201.
- [14] 乔月,朱建强,吴启侠,等.氮肥运筹下不同种植方式水稻对氮素的吸收、转运和利用[J].中国土壤与肥料,2021(6):180-188.
- [15] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等.农业面源污染现状与防治进展[J].中国人口·资源与环境,2010,20(4):81-84.
- [16] 王火焰,周健民.根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J].土壤,2013,45(5):785-790.
- [17] 文方芳,张梦佳,张卫东,等.北运河上游昌平区化肥面源污染年际间差异分析[J].环境科学学报,2021,1(1):16-19.
- [18] 郭海,杨鹏金,李录久,等.氮肥基追比例运筹方式对水稻生长和肥料利用效率的影响[J].现代农业科技,2015(20):20,27.
- [19] 姜心禄,杨永波,付明全,等.直播方式和播种方式对直播稻生长发育及产量形成的影响[J].中国稻米,2018,24(3):58-61.
- [20] 李木英,陈关,潘晓华,等.直播稻不同品种茎秆和根系性状与抗倒伏性关系[J].中国稻米,2012,18(2):17-21.
- [21] 刘红江,郑建初,陈留根,等.不同播栽方式对水稻生长发育特性的影响[J].生态学杂志,2013,32(9):2326-2331.
- [22] 刘红江,陈虞雯,张岳芳,等.不同播栽方式对水稻叶片光合特性及产量的影响[J].江苏农业学报,2016,32(6):1206-1211.
- [23] 田青兰,刘波,钟晓媛,等.不同播栽方式下杂交籼稻非结构性碳水化合物与枝梗和颖花形成及产量性状的关系[J].中国农业科学,2016,49(1):35-53.
- [24] 黄国勤,周泉,陈阜,等.长江中游地区水稻生产可持续发展战略研究[J].农业现代化研究,2018,39(1):28-36.
- [25] 晏娟,沈其荣,尹斌,等.施氮量对氮高效水稻种质4007的氮素吸收、转运和利用的影响[J].土壤学报,2010,47(1):107-114.
- [26] 李木英,石庆华,王涛,等.氮肥运筹对陆两优996吸氮、干物质生产和产量的影响[J].江西农业大学学报,2008,30(2):187-193.
- [27] 江立庚,甘秀芹,韦善清,等.水稻物质生产与氮、磷、钾、硅素积累特点及其相互关系[J].应用生态学报,2004,15(2):226-230.
- [28] 姚麒麟,黄慧珍,沈为民,等.直播稻秀水123氮肥用量试验[J].浙江农业科学,2011(2):326-327.
- [29] NTANOS D A, KOUTROUBAS S D. Dry matter and N accumulation and translocation for India and Japonica rice under Mediterranean conditions[J]. Field Crops Research. 2002,74(1):93-101.
- [30] 张雪凌,姜慧敏,刘晓,等.优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):351-359.
- [31] 董瑜皎,王昌桃,袁江,等.覆膜栽培显著提高水稻氮肥利用效率——不同氮肥利用率计算方法的多维度比较[J].江苏农业科学,2021,49(5):85-91.
- [32] 陈桂芬,黄雁飞,刘斌,等.广西稻区不同水稻品种对氮肥施用量的响应差异[J].南方农业学报,2021,52(1):137-144.
- [33] 李太魁,寇长林,郭战玲,等.有机氮替代部分无机氮对砂姜黑土冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J].江苏农业科学,2021,49(5):97-101.
- [34] 李启红,贺双明,刘琼峰,等.氮肥不同基追比例对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J].湖南农业科学,2012(13):56-58,61.
- [35] 马洪文,张秀珍,张骞,等.氮肥不同基追比例对水稻保墒旱直播产量的影响[J].宁夏农林科技,2012,53(11):25-26.

(责任编辑:张震林)