

王振洋,王冀川,郭子扬,等.施氮量与栽插密度对南疆水稻氮素利用率及产量的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):72-81.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.009

施氮量与栽插密度对南疆水稻氮素利用率 及产量的影响

王振洋¹,王冀川¹,郭子扬¹,袁杰²,张凯雨¹,王奉斌³,康德锐¹

1.塔里木大学农学院,阿拉尔843300;2.新疆农业科学院核技术生物技术研究所,乌鲁木齐830091;
3.新疆农业科学院粮食作物研究所,乌鲁木齐830091

摘要 为研究施氮量与栽插密度对南疆水稻氮素利用效率及产量的影响,开展施氮量为主区、栽插密度为副区的裂区试验,分析新稻36号的群体LAI、NR活性、氮素吸收与转运及产量变化。结果显示:适当增施氮肥和适宜密植有利于提高群体LAI和叶片NR活性,其中LAI在施氮量360 kg/hm²、密度20.83万~26.69万穴/hm²较大,NR在施氮量240~260 kg/hm²、密度16.67万~20.83万穴/hm²时较高;施氮量240 kg/hm²配合27.78万穴/hm²的栽插密度能获得最大的茎鞘氮转运量和穗部氮增加量,其氮肥农学利用率显著高于其他组合处理。结果表明,适当增加密度可减轻由于施氮量增加而导致的氮肥偏生产力、氮素吸收效率下降的现象;在240 kg/hm²的施氮量条件下,配合20.83万~27.78万穴/hm²的栽插密度能够实现氮素利用及产量协同提高。

关键词 南疆;水稻;施氮量;密度;氮素利用效率;硝酸还原酶活性;产量

中图分类号 S143.1; S511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0072-10

新疆南疆是典型的荒漠绿洲区,在塔里木河、叶尔羌河和田河流域上游地带具有较充足的水资源,能够满足水稻生育期生长所需水分^[1]。近年来,随着南疆经济作物种植面积不断扩大,水稻种植面积呈逐渐减少趋势^[2],提高单产成为水稻生产的主要目标。生产中,人们通常以提高种植密度、增施氮肥作为提高单产的主要途径^[3],但密度过高、群体质量下降、无效蘖增加且群体过大增加水稻倒伏风险;氮肥投入过大,对产量的增效作用逐渐减小,且会带来环境污染^[4],只有在合理种植密度的基础上适当增施氮肥,才能提高群体氮素利用效率,挖掘产量潜力。当前,由于水资源紧张,南疆水稻从传统的直播栽培逐渐转向育苗移栽种植,但种植密度与氮肥施用仍然采用直播方案,造成水稻产量、品质提升不显著,如何确定水稻施氮量与栽插密度,以实现氮素利用与产量的协同提高,是目前亟待解决的科学问题^[5-6]。密度与氮素是影响水稻群体、个体生长及氮素吸收与转运的主控因子,发挥二者的耦合效应是

提高水稻氮素高效利用、保证有效穗数从而提高产量的关键。本研究以当地推广的高产优质品种新稻36号为材料,研究南疆绿洲区水稻在不同施氮量与密度下氮素吸收利用以及产量的差异,明确南疆水稻种植密度与氮素调控响应特征,旨在为南疆地区水稻的高产优质栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及材料

试验于2021年在新疆农业科学院粮食作物研究所阿克苏地区温宿县水稻试验站进行。该试验区位于塔里木盆地西北边缘,海拔1 012.2 m,年平均气温10.8℃,年均降水量51.3 mm,年均蒸发量1 988.4 mm,年均相对湿度在55%以下。土壤质地为沙壤土,耕作层土壤pH为8.0,含盐量7.4 g/kg,含有机质17.7 g/kg,碱解氮119.4 mg/kg,速效磷48.8 mg/kg,速效钾220.0 mg/kg。

收稿日期:2022-10-19

基金项目:新疆维吾尔自治区科技援疆项目(2019E0246);新疆生产建设兵团2021年三区科技人才专项(BT1720220015F)

王振洋,E-mail:583775080@qq.com

通信作者:王冀川,E-mail:wjcwzy@126.com

1.2 试验设计与田间管理

选用中晚熟粳型水稻品种新稻36号为试验材料,开展施氮量为主区、栽插密度为副区的二因素裂区试验,其中施氮量设4个水平:无氮N0(不施氮肥,CK)、低氮N1(纯氮120 kg/hm²)、中氮N2(纯氮240 kg/hm²)、高氮N3(纯氮360 kg/hm²);移栽密度设5个水平:D1(30 cm×24 cm,13.89万穴/hm²)、D2(30 cm×20 cm,16.67万穴/hm²)、D3(30 cm×16 cm,20.83万穴/hm²)、D4(30 cm×12 cm,27.78万穴/hm²)、D5(30 cm×8 cm,41.67万穴/hm²)。试验共计20个组合处理,并设计3次重复。采用随机区组排列,小区面积64 m²。各主区之间打埂采用独立排灌,埂体覆塑料膜包防止水流互串。试验地于4月中下旬整地,翻地前人工均匀撒施基肥,磷钾肥一次性以重过磷酸钙225 kg/hm²、硫酸钾75 kg/hm²施用,氮肥以设计用量折算成尿素按基肥:追肥=2:8的比例施用,追肥共计5次,按照返青期:分蘖初期:分蘖盛期:拔节期:孕穗期=2:3:2:2:1的比例施用。小区于5月10日进行移栽,秧龄42 d,每穴2株。分蘖期保持浅水3~5 cm,分蘖后期断水晒田5 d以控制无效蘖,拔节期保持水层4~5 cm,抽穗前10~15 d深水10 cm,抽穗扬花期浅水(5~6 cm)灌溉,灌浆期采取间歇灌溉防止倒伏,蜡熟期断水,15 d后(10月10日)收获。分蘖期分别喷施除草剂(苯达松+敌稗)和毒死蜱防治田间杂草和稻摇蚊,抽穗前喷施稻瘟灵防治稻瘟病。

1.3 测定项目及方法

1)叶面积指数(LAI)。于返青期、分蘖初期、分蘖中期、分蘖末期、拔节期、穗期、乳熟期、蜡熟期、完熟期在各小区取3穴稻株,量取所有绿叶长和宽。单

叶面积=长×宽×0.75,再计算叶面积指数(LAI)。

2)硝酸还原酶活性。于水稻返青期、分蘖期、拔节期、穗期、乳熟期、蜡熟期、完熟期各处理取有代表性的3穴水稻植株叶片,使用全波长多功能酶标仪Infinite R 200测定。

3)氮素利用率。于水稻拔节期、穗期、完熟期各处理选取3穴有代表性的稻株,将稻株按茎鞘、叶、穗三部分分开,用纸袋装好并做标记,放入烘箱105℃杀青后,80℃烘干至恒质量。使用微型植物粉碎机将各个部分进行磨粉,用Thermo Fisher scientific Flashsmart元素分析仪测定不同处理下植株各器官氮含量,并计算氮素积累量^[7-8]。

4)产量。于成熟期每小区实割100穴,从中取有代表性的10穴稻株测定其产量构成因素,然后对实割稻穗脱粒测定产量。

1.4 数据处理

用Microsoft Excel(2013)和DPS(v9.50)统计软件分析数据,使用Origin 9.0软件作图,采用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施氮量与栽插密度对水稻产量的影响

不同施氮量与栽插密度处理对有效穗数有较大影响(图1),施氮量在0~240 kg/hm²、栽插密度13.89万~27.78万穴/hm²以内时有效穗数随施氮量与栽插密度的增加而增加,超过此范围有效穗数有下降趋势。不同施氮量有效穗数表现为N2>N3>N1>N0,其变异系数(CV)为19.65%,不同栽插密度间表现为D4>D5>D3>D2>D1,其CV为9.55%。可见,适宜施氮量(N2)与栽插密度(D4)处理对有效

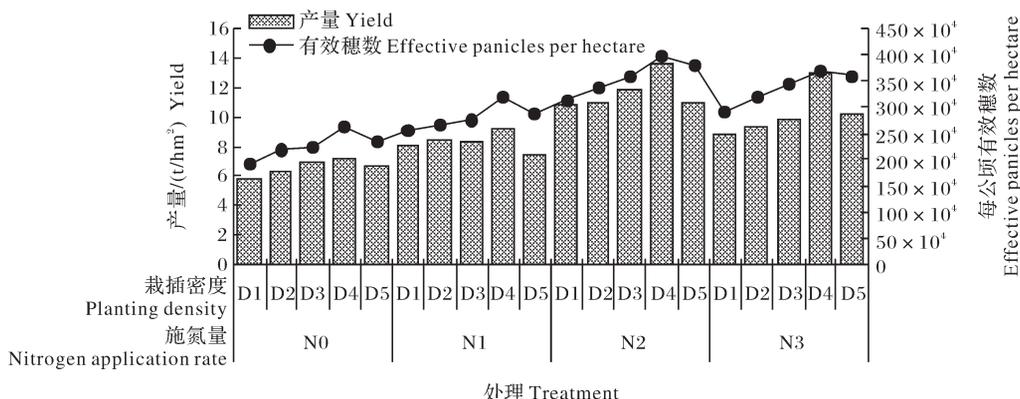


图1 不同施氮量与栽插密度处理的产量和有效穗数比较

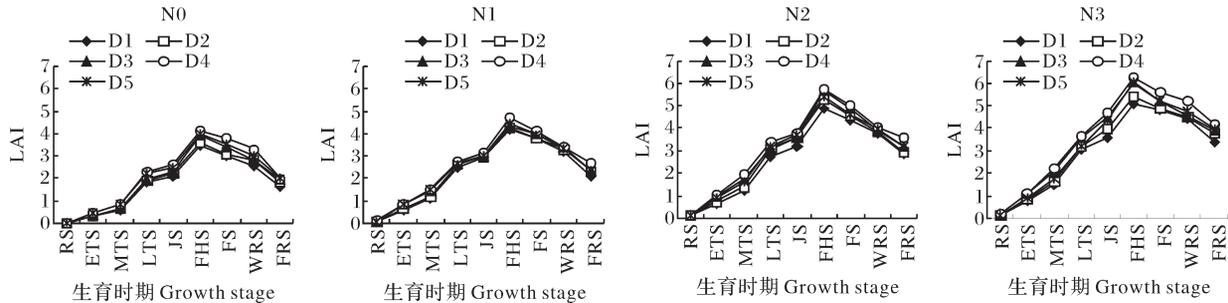
Fig. 1 Comparison of yield and panicle weight under different nitrogen application rates and planting densities

穗数形成有利,且施氮量对有效穗数的影响效应大于栽插密度。同一栽插密度下不同施氮量间产量表现为 $N2>N3>N1>N0$,最高产量平均为 11.65 t/hm^2 ;同一施氮量下不同栽插密度处理产量表现为 $D4>D3>D5>D2>D1$,最高产量平均为 10.72 t/hm^2 。处理组合中,群体产量排前3位的是 $N2D4$ 、 $N3D4$ 和 $N2D3$,分别达 13.61 、 12.94 和 11.99 kg/hm^2 ,均高于其他处理。从施氮量和栽插密度对产量

的影响程度上看,其施氮量处理间CV 24.19%,其栽插密度处理间CV为9.87%,表明施氮量对产量的影响效应大于栽插密度,说明南疆水稻合理增施氮肥并配合适宜栽插密度是保证产量的关键。

2.2 施氮量与栽插密度对水稻叶面积指数(LAI)的影响

由图2可以看出,南疆水稻叶面积指数(LAI)从分蘖期至成熟期呈单峰曲线变化,抽穗期达高峰。



RS,ETS,MTS,LTS,JS,FHS,FS,WRS和FRS分别表示返青期、分蘖初期、分蘖中期、分蘖末期、拔节期、齐穗期、乳熟期、蜡熟期和成熟期。下同。RS,ETS,MTS,LTS,MJS,FHS,FS,WRS and FRS represent rejuvenation stage, early tillering stage, middle tillering stage, late tillering stage, jointing stage, full heading stage, filling stage, wax ripening stage and full ripe stage respectively. The same as below.

图2 各时期水稻LAI动态对施氮量与栽插密度的响应

Fig. 2 Response of LAI dynamics of rice to nitrogen application rate and density at different stages

同等栽插密度条件下,随施氮量提高,群体平均LAI增加,以N3的LAI最高(6.77),较N0、N1和N2分别增加50.92%、31.03%和6.97%。群体平均叶面积指数从大到小依次为 $N3>N2>N1>N0$,N3较N0、N1和N3分别增加103.72%、61.60%和21.66%。在同一施氮量条件下,随栽插密度增加,群体平均最高LAI呈现先增后降的趋势,以D4的平均LAI最大(5.51),较D1、D2、D3、D5分别增加18.73%、12.90%、5.13%和4.86%;群体平均LAI各处理表现为 $D4>D5>D3>D2>D1$,D4较D1、D2、D3、D5分别增加25.76%、14.22%、9.21%和8.36%。组合处理中N3D4的最高LAI最大,达6.27;其次是N3D5和N3D3,N0D1最小,仅为3.46。N3D4的最终叶面积指数最大,达4.17,其次是N3D5和N3D3,N0D1最小,仅为1.62。不同施氮量下群体最高LAI和最平均LAI的变异系数(CV)分别为18.43%、30.60%,不同栽插密度下群体最高LAI和平均LAI的CV分别为6.72%、8.29%,说明施氮量对叶面积指数的影响更大。

2.3 施氮量与栽插密度对水稻硝酸还原酶活性(NR)的影响

由图3可见,水稻的NR活性随生育进程的推进呈现单峰变化趋势,峰值出现在抽穗期,随后持续下降。同等栽插密度条件下,叶片NR活性随施氮量在各时期呈先增后降的趋势,以N2处理最高。在抽穗期,N2的NR活性较N0、N1和N3分别增加82.25%、18.65%和2.98%,全生育期平均NR活性N2较N0、N1和N3分别增加66.33%、18.68%和6.82%。在同一施氮量条件下,栽插密度与叶片NR活性在各个时期均呈负相关。抽穗期D5的NR活性较D1、D2、D3、D4分别降低16.58%、13.92%、10.88%和5.19%,全生育期平均NR活性D5较D1、D2、D3、D4分别降低19.82%、15.48%、10.88%和4.42%。组合处理中抽穗期以N2D1、N3D1和N2D2在的NR活性较高,其次是N2D3、N3D2和N3D4,分别达 $122.56\sim 127.22\text{ }\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$ 和 $115.21\sim 121.14\text{ }\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$,全生育期平均值分别达 $68.82\sim 72.51$ 、 $61.26\sim 65.89\text{ }\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$ 。N0D5最低,在抽穗期为 $55.87\text{ }\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$,全生育期平均值仅有 $34.02\text{ }\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g})$ 。不同施氮量处理抽穗期的NR活性及其

全生育期平均值的CV分别为24.75%、20.70%，不同栽插密度处理的NR活性及其全生育期平均值的

CV分别为7.25%、8.93%，说明施氮量对叶片NR活性影响更大。

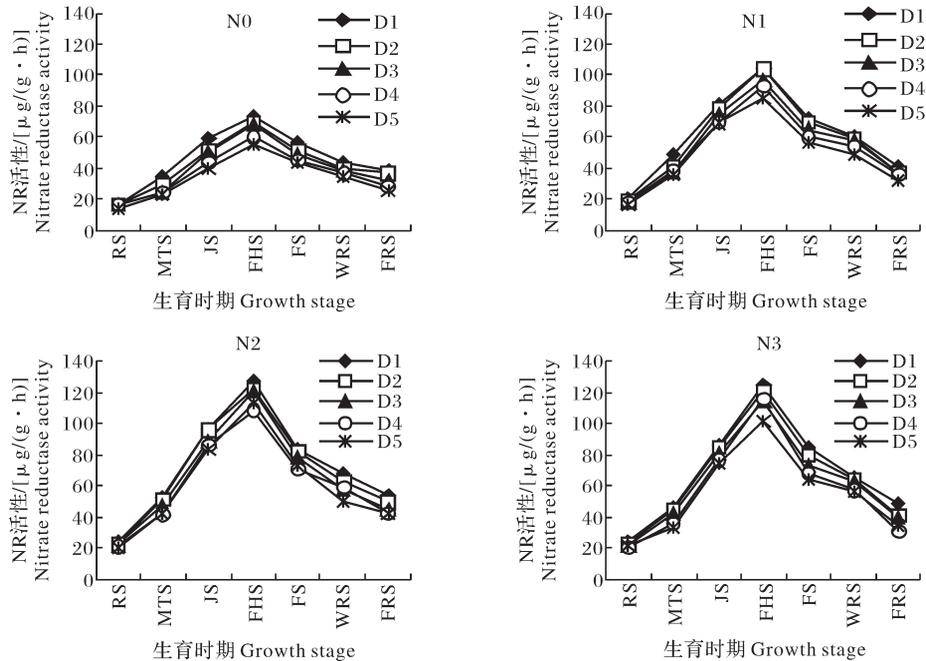


图3 各时期水稻NR活性对施氮量与栽插密度的响应

Fig. 3 Response of NR activity of rice to nitrogen application rate and density at different stages

2.4 施氮量与栽插密度对水稻氮素积累与转运的影响

根据图4可知，茎鞘与叶片的氮积累量随生育进程推进呈先增后降的趋势，且均在穗期达到峰值；穗部氮积累量持续上升，在成熟期达到最大值。在拔节期、穗期和成熟期各器官氮素积累量占总积累量的比例，叶片分别为52.62%~60.91%、45.51%~54.07%和20.01%~27.41%，茎鞘分别为39.09%~47.54%、32.85%~43.13%和20.01%~27.41%，穗部分别为0%、6.22%~20.06%和47.48%~62.52%。可见，各生育期叶片氮积累量均高于茎鞘。自抽穗以后，叶片与茎鞘氮积累量持续下降，至完熟期，分别平均下降了40.45%、40.20%，穗部则增加267.14%。

在同一栽插密度情况下，茎鞘与叶片的氮积累量随施氮量的增加而增加，其氮积累量占整株氮积累量的比例增加且差异显著，其中，在完熟期N3处理的茎叶氮积累占氮积累总量的比例达0.49，较N0、N2、N1分别增加了27.24%、25.05%和19.63%。在同一施氮量条件下，随栽插密度增加，茎鞘、叶片和穗部氮积累呈先增后降的趋势，以D4处理最大，茎叶氮积累量占整株氮积累量的比例变化不明显，完熟期在0.42~0.43。处理组合中N3D4、N3D5的茎叶氮积

累量最大，其次是N2D3、N2D4处理，而穗部氮积累量最高的是N2D4和N2D5，其次是N2D3，可见N2处理配合D3~D5的组合有利于各器官氮素积累。

由表1可知，叶片氮素的转运量、转运率以及对籽粒氮素积累的贡献率均大于茎鞘。在同一栽插密度下，茎鞘氮素转运量、转运率和贡献率随施氮量增加呈先增后降的趋势，以N2处理最大，与N3处理的氮转运率和贡献率差异不显著，其余处理间差异显著。叶片氮素转运量和贡献率随施氮量的增加而增加，各处理间差异明显，氮转运率以N1、N2处理较大，与N3处理差异不显著。在同一施氮量下，茎鞘和叶片氮素积累及转运特征均表现为随栽插密度增加而增加的趋势，以D5处理最大，但与D4差异不大，D1、D2的茎鞘氮转运量及贡献率、D1的茎鞘转运率显著低于D4处理，D1、D2和D3处理的叶片氮转运量、D1的叶片转运率和贡献率显著低于D4处理。组合处理中以N2D4的茎秆氮转运量、转运率、贡献率及叶片的氮转运量最大，与N2D5差异不显著，与其他处理差异显著；N1D5的叶片氮转运率最大，与N2D5差异不大，N3D3处理的叶片贡献率最大，与N3D5差异不大，但均显著高于其他处理。

栽插密度与施氮量对营养器官转运与贡献率的影响效应均达极显著水平($P < 0.01$)，其中施氮量处

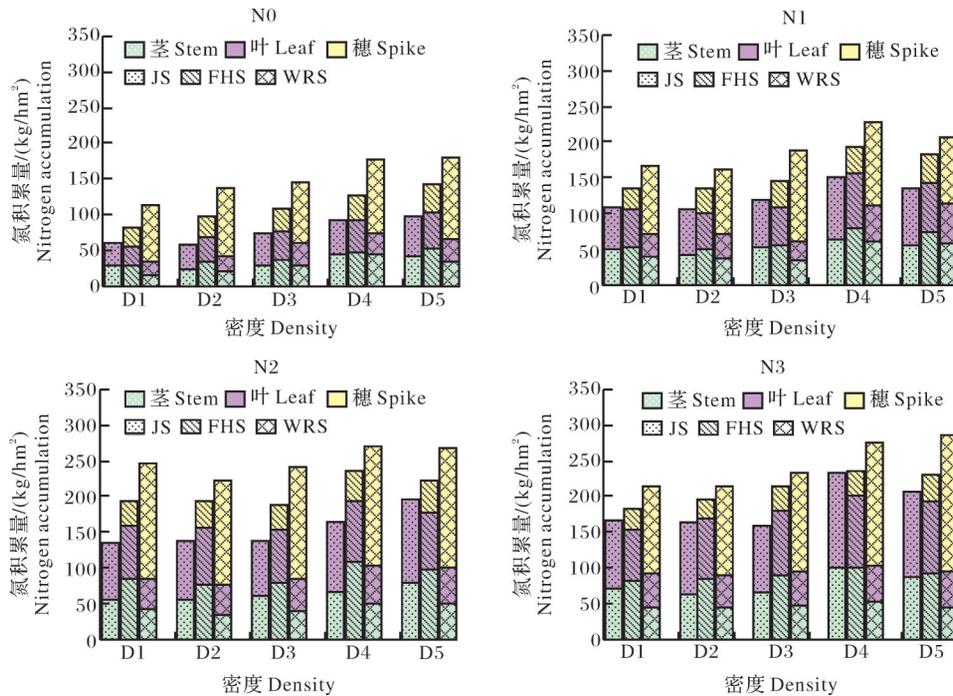


图4 施氮量与栽插密度对新疆水稻氮素积累的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application rate and density on nitrogen accumulation of rice in Southern Xinjiang

理的茎鞘、叶片中氮转运量的CV分别为47.48%和35.01%，氮转运贡献率的CV分别为35.69%和26.51%；而栽插密度处理的茎鞘、叶片中氮转运量的CV分别为18.70%和20.46%，氮转运贡献率的CV分别为10.75%和12.42%，均小于氮素供应。可见，栽插密度、氮肥对群体氮素转运特征影响较大，且在籽粒氮素积累与贡献率上，氮素效应大于栽插密度效应。茎鞘和叶片的转运量、转运效率及贡献率的氮密耦合效应达极显著水平，说明合理的氮密组合能够促进营养器官向籽粒转运氮素，以N2D4处理效果更显著。

2.5 施氮量与栽插密度对水稻氮肥利用率的影响

由表2可知，施氮量、栽插密度及其互作对水稻氮肥利用率影响的差异均达显著或极显著水平($P < 0.05$ 或 0.01)，说明二者是新疆中晚熟水稻高效种植的关键因素。N2处理的平均氮肥农学利用率、氮素收获指数和氮素利用效率最大，其次是N1处理，N3处理最小；氮肥偏生产力和氮素吸收效率随施氮量增加而下降，各处理间差异显著。同一施氮量情况下，随栽插密度增加，氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮素利用效率呈先增后降的趋势，以D4最大，且显著高于其他处理；氮素收获指数随栽插密度增加而下降，除D5外，其他处理间差异不显著，氮素吸收

效率随栽插密度增加而增加，除D1外，其他处理间差异不显著。组合处理中，N2D4处理的氮肥农学利用率、氮素收获指数最大，而N1D4的氮肥偏生产力和氮素利用效率最大，N1D5的氮素吸收率最大。

相关分析表明(图5)，产量与氮肥农学利用率、氮素收获指数、氮素利用效率、茎鞘氮转运量、茎鞘氮转运率、茎鞘对籽粒的贡献率、叶氮转运量以及叶片对籽粒的贡献率呈正相关，其中与氮肥农学利用率、氮素收获指数、茎鞘对籽粒的贡献、叶氮转运量达到显著相关，与茎鞘氮转运量达到极显著相关关系。可见，提高氮肥农学利用率、氮素收获指数与叶片与茎鞘的转运量是获得氮素利用与产量协同提高的关键。

3 讨论

3.1 施氮量与栽插密度对水稻LAI与NR活性的影响

合理的LAI能够充分为籽粒供给养分^[9]，前人研究表明水稻最大LAI在6.0左右，且生育后期LAI下降缓慢，有利于灌浆易获得高产^[10]。本研究中N2处理有利于创造良好的群体环境，适当增加栽插密度能够弥补少量施氮造成的LAI下降。N2与D4组合在穗期LAI达到5.75~6.27、完熟期维持在3.58~

表 1 不同施氮量和栽插密度下水稻抽穗期至成熟期群体各器官的氮素转运特征
Table 1 Nitrogen transport characteristics in different organs of rice population from heading stage to maturity under different nitrogen rates and planting densities

施氮量 N appli- cation rate	栽插密度 Density	茎鞘 Stem-sheaths			叶 Leaves		
		氮转运量/ (kg/hm ²) N translocation amount	氮转运率/% N translocation efficiency	贡献率/% Contribution rate	氮转运量/ (kg/hm ²) N translocation amount	氮转运率/% N translocation efficiency	贡献率/% Contribution rate
N0	D1	3.98±0.14d	12.61±0.03 e	5.21±0.01d	12.88±0.42c	30.88±0.02 e	16.86±0.02c
	D2	11.13±1.79c	29.32±2.93c	11.66±1.64c	20.23±2.51b	39.75±2.50c	21.21±2.20b
	D3	10.57±1.35c	26.87±1.62d	10.74±0.88c	21.05±1.13b	36.11±0.92d	21.48±0.85b
	D4	16.98±0.31b	34.42±0.57b	15.74±0.40b	31.91±0.53a	47.20±0.46a	29.58±0.55a
	D5	24.38±1.49a	41.72±1.03a	22.26±0.95a	30.13±1.84a	41.82±1.03b	27.51±1.17a
	均值 Mean	13.41	28.99	13.12	23.24	39.15	23.33
N1	D1	21.73±1.98b	41.15±0.83b	20.68±0.71b	30.68±2.70c	45.08±0.78c	29.20±0.92d
	D2	20.93±0.52b	38.56±0.25c	19.41±0.21bc	31.65±0.83c	44.31±0.23c	29.34±0.27d
	D3	20.36±2.53b	36.09±2.64d	15.56±1.75c	43.57±4.31b	49.59±2.08b	33.28±2.73c
	D4	29.99±2.53a	42.69±0.93b	20.70±0.80b	52.61±5.95a	48.88±1.63b	36.26±2.36b
	D5	31.28±0.49a	45.37±0.42a	23.16±0.40a	53.79±0.96a	52.83±0.37a	39.82±0.58a
	均值 Mean	24.86	40.77	19.90	42.46	48.14	33.58
N2	D1	32.59±2.57d	42.66±0.13b	22.71±0.12d	38.98±3.07d	42.05±0.13c	27.17±0.14c
	D2	33.71±3.13d	40.55±1.51c	23.99±1.50c	50.67±4.17c	48.72±1.30b	36.08±1.88b
	D3	50.01±3.78c	50.57±1.54a	33.04±2.02b	59.94±4.63b	49.23±1.58ab	39.61±2.49a
	D4	61.16±2.38a	52.04±0.82a	36.57±1.18a	68.19±2.69a	51.24±0.83a	40.77±1.34a
	D5	56.25±2.54b	52.80±1.02a	35.29±1.44a	60.17±2.92b	48.80±1.10b	37.74±1.67ab
	均值 Mean	46.74	47.73	30.32	55.59	48.01	36.27
N3	D1	35.88±2.51bc	42.41±0.19b	31.96±0.24a	42.56±2.98d	41.82±0.19b	37.92±0.29d
	D2	39.84±1.82a	45.20±1.22 a	33.67±1.65 a	55.61±2.33c	49.50±1.13a	47.00±2.10b
	D3	38.67±2.71ab	41.49±1.25b	31.98±1.64a	62.39±3.89ab	49.25±1.08a	51.60±2.23a
	D4	34.22±1.88c	32.36±1.35d	25.33±1.56b	58.43±2.60bc	42.80±1.14b	43.24±2.01c
	D5	34.79±1.01c	35.05±1.64c	26.33±1.90b	64.44±0.65a	47.67±1.32a	48.74±2.59ab
	均值 Mean	36.68	39.30	29.86	56.69	46.21	45.70
方差分析 Analysis of variance							
F	N	555.57 **	190.69 **	264.15 **	418.08 **	105.45 **	222.27 **
	D	129.27 **	70.53 **	44.91 **	164.17 **	72.71 **	64.87 **
	N×D	44.39 **	80.65 **	47.29 **	8.32 **	20.96 **	8.78 **

注：同列不同小写字母表示同一施氮水平下不同栽插密度间差异显著 ($P < 0.05$)。方差分析中**表示效应存在极显著差异 ($P < 0.01$)，下同。Note: Different small in the same column mean significant difference ($P < 0.05$) in different density treatments at the same irrigation level. ** indicate significant difference in effect at 0.01 level. The same as below.

3.95, 对提升产量构成因素有利。

NR 活性是影响植物氮同化的直接因素^[11-12], 增加施氮量, 会提高 NR 活性^[7]。本研究发现, 在施纯氮 0~240 kg/hm² 的范围内 NR 活性与施氮量呈正相关, 继续增加施用量会导致 NR 活性显著降低。孙常

青等^[13]认为, 栽插密度对 NR 活性的调节力更强, 且密度增大 NR 活性激增后缓慢下降。本研究发现增加栽插密度对 NR 活性的提高不利, 且对 NR 活性的影响小于施氮量, 造成差异的原因可能与地区环境及土壤条件有关。

表2 不同施氮量和栽插密度下水稻的氮素利用特征

Table 2 Characteristics of nitrogen utilization in rice under different nitrogen rates and planting densities

施氮量 N applica- tion rate	栽插密度 Density	氮肥农学利用率/ (kg/kg) N agronomic utilization efficiency	氮肥偏生产力/ (kg/kg) N fertilizer partial productivity	氮素收获指数/% N harvest index	氮素吸收效率/ (kg/kg) N uptake efficiency	氮素利用效率/% N utilization efficiency
N0	D1			43.49±0.25a		
	D2			41.21±0.08a		
	D3			42.23±0.03a		
	D4			40.99±3.67a		
	D5			36.02±0.89b		
	均值 Mean			40.79		
N1	D1	19.29±1.79a	67.42±3.57c	46.72±0.19a	1.11±0.04e	33.68±4.70c
	D2	18.45±1.54a	70.73±0.64b	46.95±1.99a	1.27±0.03d	24.03±2.73d
	D3	11.44±1.28c	69.13±1.43bc	39.42±2.17b	1.37±0.06c	39.40±7.78b
	D4	16.12±1.55b	76.14±5.73a	38.09±1.02b	1.47±0.04b	52.97±12.43a
	D5	6.51±0.27d	62.16±2.17d	33.79±1.09c	1.54±0.03a	29.61±5.18c
	均值 Mean	14.36	69.12	40.99	1.35	35.94
N2	D1	21.22±1.16b	45.28±2.05c	45.21±1.29a	0.75±0.03 d	45.05±5.63a
	D2	19.47±0.03b	45.61±0.52c	45.14±0.87a	0.88±0.06c	37.66±1.76b
	D3	20.65±2.35b	49.50±3.71b	45.39±2.98a	1.00±0.05a	40.70±2.91ab
	D4	26.69±0.32a	56.69±1.81a	47.17±0.67a	0.92±0.03b	46.84±3.60a
	D5	17.81±1.65c	45.63±2.86c	40.16±2.34b	1.00±0.07a	36.39±0.94b
	均值 Mean	21.17	48.54	44.61	0.91	41.33
N3	D1	8.52±0.03b	24.56±0.57c	40.31±2.21bc	0.61±0.05c	24.32±3.58ab
	D2	8.51±0.80b	25.93±1.14bc	41.79±0.93b	0.62±0.01bc	19.75±0.48b
	D3	8.15±0.29b	27.38±1.19b	41.15±0.67b	0.67±0.02b	20.97±0.29b
	D4	15.95±1.40a	35.95±2.79a	45.36±1.61a	0.79±0.03a	30.25±4.25a
	D5	9.91±0.08b	28.46±0.87b	38.27±0.48c	0.74±0.03a	22.93±2.24ab
	均值 Mean	10.21	28.46	41.38	0.69	23.64
方差分析 Analysis of variance						
	N	292.76 **	2 181.61 **	13.50 **	1 929.54 **	35.35 **
	D	43.02 **	46.56 **	24.66 **	102.56 **	13.62 **
	N×D	16.48 **	4.20 **	5.74 **	13.68 **	2.66 *

3.2 施氮量与栽插密度对水稻氮素积累及利用率的影响

梁青铎等^[14]认为,增密增氮均能提高水稻氮积累量,但各栽插密度处理间差异不显著。本研究结果表明,各生育时期、各器官氮积累量均随氮肥用量增加而增加,随栽插密度增加呈先增后降变化趋势,在D4处达到最大,可能是在本地区栽插密度过高会限制水稻个体发育,导致群体氮积累量下降。Hae-fele等^[15]认为成熟期稻株氮积累量与单位面积产量

呈抛物线关系,本研究中成熟期总氮积累量为N3>N2>N1>N0,产量表现为N2>N3>N1>N0,与前人研究结果相符。

周江明等^[16]等研究发现,密植少氮是协同提高氮素利用效率和产量的有效途径。本研究表明适量增施氮肥能够提高氮素利用效率与氮肥农学利用率,过量施用反而使氮素利用率下降,降低投入产出比。增加密度主要通过增加地上部生物量来提高氮素吸收效率,能够弥补因为氮肥用量不足而造成的



NGU: 氮肥农学利用率 N agronomic utilization efficiency; NFP: 氮肥偏生产力 N fertilizer partial productivity; NHI: 氮素收获指数 N harvest index; NUE: 氮素吸收效率 N uptake efficiency; NUTE: 氮素利用效率 N utilization efficiency; SNTA: 茎鞘氮转运量 Stem-sheaths N translocation amount; SNTE: 茎鞘氮转运率 Stem-sheaths N translocation efficiency; SCR: 茎鞘贡献率 Stem-sheaths contribution rate; LNTA: 叶氮转运量 Leaves N translocation amount; LNTE: 叶氮转运率 Leaves N translocation efficiency; LCR: 叶贡献率 Contribution rate; Y: 产量 Yield.

图5 氮素利用率相关指标与干物质、产量之间的相关性

Fig. 5 Correlation between nitrogen utilization rate and dry matter and yield

氮素吸收效率、氮肥农学利用效率和产量的下降。密度与施氮量对氮素利用特征和产量有显著的耦合效应,与前人研究结果相似^[17-18],所不同的是本研究中施氮量 240~360 kg/hm²、密度为 20.83 万~27.78 万穴/hm²的条件下产量较高,其氮肥农学利用率为 15.95~26.69 kg/kg,氮素利用效率为 32.25%~46.84%,而江苏一带水稻种植区,中晚熟粳稻(以淮稻 5 号为例)则以施氮量 225~300 kg/hm²左右、密度为 33 万穴/hm²左右时产量较高,其氮肥农学利用率为 14.08~15.88 kg/kg,氮素利用效率为 36.34%~37.64%^[19]。

3.3 施氮量与密度对水稻产量构成因素的影响

水稻产量与有效穗数关系密切,施氮量与密度均对群体有效穗数与产量有显著影响。施氮量低,个体发育不良,有效穗数减少。本研究中施氮量为 240 kg/hm²(N2 处理)时的有效穗数最大,而施氮量为 360 kg/hm²时部分个体生长旺盛、后期倒伏,导致有效穗数有所下降。南方地区水稻的适宜密度一般为 18 万~25 万穴/hm²,有效穗数为 185 万~196 万/hm²^[20-21],而本研究中 D4 处理(27.78 万穴/hm²)的最

终茎蘖数最大达 350.42 万/hm²,提高 78.79%~89.41%,这可能与南疆特殊的土质与光热气候条件有关。

只有在适当增加氮肥用量基础上,发挥较高密度下有效穗数显著提高的优势,充分利用南疆丰富的光热资源,才能达到氮素利用与产量协同提高的效果。本研究结果表明,在 240 kg/hm²的施氮量条件下,配合 20.83 万~27.78 万穴/hm²的栽插密度能够实现氮素利用及产量协同提高,可为南疆地区新稻 36 号种植提供参考。

参考文献 References

[1] 贾春平,王奉斌,袁杰,等.水氮互作对新疆粳稻‘新稻 11 号’产量、品质和群体结构的影响[J].分子植物育种,2022,20(2): 555-563. JIA C P, WANG F B, YUAN J, et al. Effects of water and nitrogen interaction on yield, quality and population structure of japonica rice ‘Xindao11’ in Xinjiang [J]. Molecular plant breeding, 2022, 20(2): 555-563 (in Chinese with English abstract).

[2] 布哈丽且木·阿不力孜,白志刚,黄洁,等.氮肥运筹对不同类型水稻产量和氮素吸收的影响[J].中国稻米,2018,24(4):64-67. ABLIZI B, BAI Z G, HUANG J, et al. Effects of nitrogen fertil-

- izer on yield and nitrogen uptake of different types of rice[J]. China rice, 2018, 24(4): 64-67 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吴培, 陈天晔, 袁嘉琦, 等. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 269-281. WU P, CHEN T Y, YUAN J Q, et al. Effects of interaction between nitrogen application rate and direct-sowing density on yield formation characteristics of rice[J]. Chinese journal of rice science, 2019, 33(3): 269-281 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李思平, 曾路生, 吴立鹏, 等. 氮肥水平与栽植密度对植稻土壤养分含量变化与氮肥利用效率的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(1): 69-79. LI S P, ZENG L S, WU L P, et al. Effects of nitrogen fertilizer level and planting density on changes in soil nutrient contents and nitrogen use efficiency in rice[J]. Chinese journal of rice science, 2020, 34(1): 69-79 (in Chinese with English abstract).
- [5] 潘俊峰, 钟旭华, 黄农荣, 等. 近20年新疆水稻生产发展及影响因素分析[J]. 中国稻米, 2017, 23(3): 22-27. PAN J F, ZHONG X H, HUANG N R, et al. Development of rice production in recent twenty years and its influencing factors in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. China rice, 2017, 23(3): 22-27 (in Chinese with English abstract).
- [6] 潘俊峰, 钟旭华, 约麦尔·艾麦提, 等. 不同栽培模式对新疆水稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(6): 21-25. PAN J F, ZHONG X H, Aimaier Amaiti, et al. Effects of different cultivation patterns on grain yield and nutrient utilization efficiency of japonica rice in Xinjiang[J]. China rice, 2018, 24(6): 21-25 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张迪. 氮肥运筹对新疆滴灌春小麦产量生理及氮素利用效率的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019. ZHANG D. Effects of nitrogen fertilizer management on yield physiology and nitrogen use efficiency of spring wheat under drip irrigation in southern Xinjiang[D]. Alar: Tarim University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [8] 武浩. 种植密度及氮肥投入量对水稻氮素利用效率的协同效应研究[J]. 种子科技, 2022, 40(6): 8-10. WU H. Study on synergistic effect of planting density and nitrogen fertilizer input on nitrogen use efficiency of rice[J]. Seed science & technology, 2022, 40(6): 8-10 (in Chinese).
- [9] 罗亢, 曾勇军, 石庆华, 等. 施氮量和密度对机直播双季稻产量与氮素利用率的影响研究[J]. 核农学报, 2021, 35(12): 2850-2859. LUO K, ZENG Y J, SHI Q H, et al. Effects of nitrogen application rate and density on yield and nitrogen use efficiency of double cropping rice under mechanized direct-seeding[J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2021, 35(12): 2850-2859 (in Chinese with English abstract).
- [10] 周丽燕, 黄影华, 张善炫, 等. 不同氮肥调控对水稻分蘖数和叶面积指数的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(7): 33-37. ZHOU L Y, HUANG Y H, ZHANG S X, et al. Effects of different nitrogen fertilizer regulation on tiller number and leaf area index of rice[J]. Hubei agricultural sciences, 2020, 59(7): 33-37 (in Chinese with English abstract).
- [11] 徐志文, 谢振文. 水稻生育期内硝酸还原酶活性的变化趋势研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 14919-14920. XU Z W, XIE Z W. Study on the change trend of nitrate reductase activity (NRA) during growth period of rice[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2008, 36(34): 14919-14920 (in Chinese with English abstract).
- [12] 潘韬文, 陈侯, 蔡昆争. 硅氮互作改善优质稻植株生理生态特性[J]. 热带作物学报, 2020, 41(4): 694-700. PAN T W, CHEN Y, CAI K Z. Silicon and nitrogen improving the eco-physiological characteristics of high quality rice[J]. Chinese journal of tropical crops, 2020, 41(4): 694-700 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孙常青, 杨艳君, 郭志利, 等. 施肥和密度对杂交谷可溶性糖、可溶性蛋白及硝酸还原酶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1169-1177. SUN C Q, YANG Y J, GUO Z L, et al. Effects of fertilization and density on soluble sugar and protein and nitrate reductase of hybrid foxtail millet[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2015, 21(5): 1169-1177 (in Chinese with English abstract).
- [14] 梁青铎. 施氮量和机插密度对水稻生长、产量和氮肥利用效率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. LIANG Q D. Effects of nitrogen application rate and planting density on growth, yield and nitrogen use efficiency of rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [15] HAEFELE S M, JABBAR S M A, SIOPONGCO J D L C, et al. Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different water regimes and nitrogen levels[J]. Field crops research, 2008, 107(2): 137-146.
- [16] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281. ZHOU J M, ZHAO L, DONG Y Y, et al. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2010, 16(2): 274-281 (in Chinese with English abstract).
- [17] 鲁伟林, 段仁周, 余新春, 等. 氮肥运筹对水稻株型特征的影响及其相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(1): 85-88. LU W L, DUAN R Z, YU X C, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on plant type characteristics of rice and its correlation analysis[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2012, 40(1): 85-88 (in Chinese).
- [18] 张洪程, 霍中洋, 许轲, 等. 水稻武陵粳1号高产群体量化指标与精确栽培技术[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(4): 60-63. ZHANG H C, HUO Z Y, XU K, et al. Quantitative indicators and accurate cultivation techniques for high yield population of rice Wulingjing No. 1[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2011, 39(4): 60-63 (in Chinese).
- [19] 唐东南. 栽培措施对机插水稻淮稻5号产量形成及氮素吸收利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2019. TANG D N. Effect of cultivation management on yield formation and nitrogen absorption in machine-transplanted rice Huaidao No. 5[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019 (in Chinese with English abstract).

- [20] 樊红柱, 曾祥忠, 张冀, 等. 移栽密度与供氮水平对水稻产量、氮素利用影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1137-1141. FAN H Z, ZENG X Z, ZHANG J, et al. Effects of transplanting density and nitrogen management on rice grain and nitrogen utilization efficiency [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2010, 23(4): 1137-1141 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501. WANG S H, CAO W X, DING Y F, et al. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice [J]. Scientia agricultura sinica, 2004, 37(4): 497-501 (in Chinese with English abstract).

Effects of nitrogen application rate and planting density on nitrogen use efficiency and yield of rice in Southern Xinjiang

WANG Zhenyang¹, WANG Jichuan¹, GUO Ziyang¹, YUAN Jie²,
ZHANG Kaiyu¹, WANG Fengbin³, KANG Derui¹

1. College of Agronomy, Tarim University, Alar 843300, China;

2. Institute of Nuclear and Biotechnology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences,
Urumqi 830091, China;

3. Institute of Food Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences,
Urumqi 830091, China

Abstract To study the effects of nitrogen application rate and planting density on nitrogen use efficiency and yield of rice in Southern Xinjiang, split plot experiments were carried out in the main area of nitrogen application rate and the subarea of the planting density to analyze LAI, NR activity, nitrogen absorption and transport and yield changes in the population of Xindao 36. The results showed that appropriate nitrogen application and dense planting were beneficial for increasing LAI and NR activity in the population. LAI was higher at 360 kg/hm² nitrogen application rate and 2 083-2 669 thousand holes/hm² density, and NR was higher at 240-260 kg/hm² nitrogen application rate and 166 700-208 300 thousand holes/hm² density. The maximum amount of nitrogen transport in the stem and sheath and the increase in nitrogen in the ear can be obtained by applying 240 kg/hm² of nitrogen and a planting density of 277 800 holes/hm², and the agronomic utilization rate of nitrogen fertilizer is significantly higher than that of other combinations. A proper increase in density can reduce the decline in nitrogen partial productivity and nitrogen absorption efficiency caused by the increase in nitrogen application rate. Under the condition of a 240 kg/hm² nitrogen application rate, a planting density of 208 300-277 800 holes/hm² can achieve the coordinated improvement of nitrogen utilization and yield, which can be a reference for the planting of Xindao 36 in Southern Xinjiang.

Keywords Southern Xinjiang; rice; nitrogen application rate; density; nitrogen utilization efficiency; nitrate reductase activity; yield

(责任编辑: 张志钰)