

氮肥运筹对河西绿洲灌区膜下滴灌 水稻产量、氮肥利用率的影响

唐文雪¹, 马忠明^{2*}, 陈娟³, 罗双龙¹

(1.甘肃省农业科学院 土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 2.甘肃省农业科学院,
兰州 730070; 3.甘肃省农业科学院 经济作物与啤酒原料研究所, 兰州 730070)

摘 要:【目的】探索氮肥运筹对水稻产量、氮肥利用率的影响。【方法】在河西绿洲灌区张掖节水农业试验站设置 5 个施氮水平和 3 种施氮策略的田间试验, 研究不同施氮量及施氮策略对膜下滴灌水稻生长发育、产量、产量构成因子及氮肥利用率的影响。【结果】施氮量对水稻有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量等产量构成因子均有显著影响, 可显著提高膜下滴灌水稻产量。与 N0 处理相比, N1、N2、N3、N4 处理产量显著提高 33.50%、45.60%、39.20%、30.63%, 并且施氮处理间差异显著。施氮量为 225 kg/hm² 时, 水稻产量最高, 为 5 622.8 kg/hm²。适当的氮肥后移可显著提高水稻的有效穗数, 形成水稻高产。N2B 处理有效穗数比 N2A、N2C 处理显著提高 16.72%、7.32%, 产量提高 4.88%、2.54%。水稻氮肥利用率与施氮量具有显著负相关关系, 施氮量为 225 kg/hm² 时, 水稻氮素吸收利用各项指标显著低于 N1 处理, 但显著高于 N3、N4 处理。并且增施水稻穗肥、粒肥可显著提高氮肥利用率。N2B 处理氮肥吸收利用率达到 35.81%, 比 N2A、N2C 处理提高 21.02%、11.73%。【结论】施氮量为 225 kg/hm², 基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥投入比例为 15%:30%:40%:15% 是河西绿洲灌区既保证水稻高产, 又保证氮肥高效利用的适宜施氮量和施氮策略。

关键词: 膜下滴灌; 水稻; 产量; 产量构成因子; 氮肥利用率; 氮肥运筹

中图分类号: S511

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022480

唐文雪, 马忠明, 陈娟, 等. 氮肥运筹对河西绿洲灌区膜下滴灌水稻产量、氮肥利用率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.2): 1-8.

TANG Wenxue, MA Zhongming, CHEN Juan, et al. Effects of Nitrogen Management on Rice Yield and Nitrogen Fertilizer Utilization Rate under Drip Irrigation in Hexi Oasis Irrigation Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.2): 1-8.

0 引言

【研究意义】水稻是我国重要的粮食作物。2021 年种植面积达 2 992.12 万 hm², 总产量 2.13 亿 t, 占粮食播种面积及总产量的 25.44%、31.17%^[1]。但在传统种植方式下, 水稻 80% 的灌溉水通过蒸发和淋失途径损失, 耗水量占农业用水的 70%, 占全国总用水量的 54%^[2-3]。水稻膜下滴灌技术是新疆天业集团近年来研发的一种创新型的栽培技术, 该技术改变了水稻传统种植方式, 将地膜覆盖、滴灌技术、机械播种、随水施肥等技术有机结合, 比传统栽培

方式节水 60% 以上。在节水、节肥、节约劳动力、调整种植结构方面效果显著^[4], 因此, 在干旱半干旱区探索膜下滴灌水稻栽培关键技术对扩大水稻种植范围、提高水稻产量、保障国家粮食安全具有重要战略意义。【研究进展】氮肥运筹是影响水稻产量和品质的主要栽培技术措施, 是滴灌施肥管理研究的热点问题。目前水稻生产中氮肥的过量施用及不合理的投入比例问题普遍存在, 导致肥料利用率较低、土壤无机氮残留过多、地下水硝酸盐污染等问题及生态环境风险不断增加^[5], 为此, 前人在水稻的施氮量、不同生育期施肥比例等方面开展了大量的研究工作。施泽升等^[6]在洱海北部地区研究表明, 施氮量对水稻产量的影响呈二次曲线关系, 施氮能显著提高水稻产量, 但当施氮量达到 304.34 kg/hm² 后, 水稻有减产风险。侯云鹏等^[7]研究提出施氮量 60~180 kg/hm² 范围内, 水稻有效穗数和穗粒数随着

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 甘肃省农业科学院科技创新专项项目 (2019GAAS12); 甘肃省科技计划项目 (21YF5NA145, 21ZD4NF044)

作者简介: 唐文雪 (1967-), 女, 研究员, 主要从事农业面源污染防治与节水农业研究。E-mail: gstw@163.com

通信作者: 马忠明 (1963-), 男, 研究员, 主要从事作物高产高效栽培及节水农业研究。E-mail: mazhming@163.com

施氮水平的提高而增加,进而提高水稻产量,氮肥用量超过 180 kg/hm^2 时水稻产量下降,有效穗数和穗粒数减少。凌启鸿等^[8]在江苏省 10 块高产农田调查水稻各生育阶段吸氮量,结果显示水稻移栽前苗期、移栽后—拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—成熟期吸氮量占总吸氮量的 15%、25%、45%、15%,前期合计 40%、中后期合计占 60%左右。氮肥运筹中,根据水稻需肥规律,确定基肥与穗肥的比例是精确定量施氮的核心内容。丁艳锋等^[9]研究提出在大面积平均氮素基肥、分蘖肥用量基础上,基肥、分蘖肥用量减少 15%的处理产量最高。陈仁天等^[10]研究表明,施氮量 210 kg/hm^2 、适当降低基肥提高穗肥,基肥、蘖肥、穗肥施氮比例为 4:3:3 时,可实现桂两优 2 号高产高效,其产量达 $8\ 170.2 \text{ kg/hm}^2$,氮肥吸收利用率高达 41.5%。适宜氮肥运筹比例可以提高水稻氮肥利用效率^[11-12],在水稻产量和品质形成过程中起着决定性作用^[13]。因此,进一步优化膜下滴灌栽培模式下的氮肥运筹,提高用肥精准性,对促进水稻生产的提质增效具有重要意义。【切入点】甘肃省河西走廊地处我国西北干旱区,面积约 27 万 km^2 ,是甘肃省商品粮基地。该区有丰富的光热资源和土地资源,但水资源紧缺,不足全国平均水平的 $2/3$ ^[14],主要作物是春小麦、啤酒大麦、制种玉米和

玉米,种植结构单一、生态环境脆弱,严重影响农业持续稳定发展。甘州区乌江镇历史上有种植水稻的传统,生产的水稻品质优良,但由于水资源限制等原因使水稻种植面积逐年萎缩。水稻膜下滴灌技术是一种全新的水稻栽培技术,但有关施肥等配套技术还缺乏研究。【拟解决的关键问题】为此,本研究开展不同施氮水平及施氮策略对水稻产量及氮肥利用率的影响研究,明确膜下滴灌水稻适宜的氮肥运筹方式,为膜下滴灌水稻高产高效栽培提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年4—10月在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站进行。试验站地处甘肃省河西走廊中段,黑河中上游($38^{\circ}56'N$ 、 $100^{\circ}26'E$,海拔 $1\ 570 \text{ m}$)。该区域干旱少雨,年降水量不足 130 mm ,平均年蒸发量 $2\ 075 \text{ mm}$,干旱指数达 15.96 ,属于典型的大陆性草原荒漠气候。区域日照充足,日照时数 $2\ 932\sim 3\ 085 \text{ h}$,年均气温 $7.38\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $1\ 837\sim 2\ 870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无霜期 153 d 。试验地土壤属轻壤土,播前 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤基本理化性状见表1。

表 1 0~20 cm 土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of 0~20 cm soil

pH 值	有机质量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全盐量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
8.22	7.9	0.77	0.14	13.97	1.74	17.36	1.18	24.7	82.0

1.2 试验设计

根据前人研究提出的水稻需肥规律^[6]、水稻优化施氮量^[7]、不同生育期适宜施肥比例^[10-12]等研究成果及水稻生产施肥现状^[8-9],结合本区域气候特点、土壤肥力状况、生产水平,确定 225 kg/hm^2 为标准施氮量,并在此施氮量基础上设定重施基肥、分蘖肥的传统施氮策略及降低基肥和分蘖肥、提高穗肥和粒肥比例的优化施氮策略。

试验采用随机区组设计,7 个处理,3 次重复。小区面积为 52.8 m^2 ($16.0 \text{ m}\times 3.3 \text{ m}$)。氮肥(N)设 0、135、225、315、405 kg/hm^2 共 5 个施氮水平,处理简称为 N0、N1、N2、N3、N4。在 N2 水平上设定 3 种施氮策略,即基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥投入比例为 35%:20%:35%:10% (N2A)、15%:30%:40%:15% (N2B)、25%:40%:30%:5% (N2C)。

试验磷肥(P_2O_5)为 120 kg/hm^2 ,钾肥(K_2O) 120 kg/hm^2 均作基肥。氮肥分基肥和追肥,基肥播

前结合旋地施入,追肥随灌水施入。生育期灌水量 $9\ 000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。采用比例施肥器进行滴灌施肥。滴灌带采用内镶贴片式滴灌带,滴头间距 30 cm ,滴头流量为 2.6 L/h ,滴管直径 16 mm 。施肥时,将肥料完全溶解于施肥罐中,施肥前 30 min 滴水,停水前 30 min 结束施肥。不同生育期灌水施肥设计见表 2。

供试水稻品种为张掖农业科学研究院提供的乌江黑芒稻,肥料为尿素、普通过磷酸钙、硫酸钾。

1.3 栽培模式

采用 1 膜 2 管 8 行模式,即 1 幅地膜(膜宽 145 cm),铺设滴灌带 2 条,种植水稻 8 行。带幅为 165 cm ,穴距 10 cm 。宽窄行种植。采用专用播种机 1 次完成铺管、覆膜、播种、覆土作业。播种密度 48.5 穴/hm^2 ,每穴播种 6~8 粒种子,播深 $2.5\sim 3.0 \text{ cm}$ 。2021 年 5 月 5 日播种,9 月 28 日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 茎蘖动态监测

在三叶期前,每个小区随机选取具有代表性的

连续10穴稻株，调查基本苗，并做好标记。茎蘖发生后，每隔10 d调查1次茎蘖数。

1.4.2 地上部干物质量测定

在分蘖中期、拔节期、抽穗期、灌浆中期、成

熟期，每个小区随机选取有代表性的连续6穴水稻连根拔出，带回实验室清洗去根装袋，在105 ℃下杀青30 min，在80 ℃下烘干至恒质量后称质量。

表2 各生育期膜下滴灌水稻施氮量设计

Table 2 Nitrate application rate of rice drip irrigation under plastic film at each growth stages

指标	幼苗期	分蘖期	拔节期	抽穗期	灌浆期	合计
灌水时间	5月中下旬	6月—7月上旬	7月中旬和下旬	8月上旬	8月中旬—9月上旬	
灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	610	2 400	2 415	840	2 735	9 000
灌水次数	2	8	7	3	8	28
施氮量/ (kg·hm ⁻²)	N0	0	0		0	0
	NI	20.25	40.5	54	20.25	135
	N2	33.75	67.5	90	33.75	225
	N3	47.25	94.5	126	47.25	315
	N4	60.75	121.5	162	60.75	405
	N2A	78.75	45	78.75	22.5	225
	N2B	33.75	67.5	90	33.75	225
	N2C	56.25	90	67.5	11.25	225
施肥次数	1	2	2	0	1	6

1.4.3 植株全氮测定

从测产样品中随机选取3穴，分籽粒和秸秆粉碎，过2 mm筛备用。植株样品全氮采用H₂SO₄-H₂O₂消煮后凯氏定氮法测定。

1.4.4 测产和考种

收获前随机取样测产，测产面积为16.5 m²，单收单打测定籽粒产量、秸秆产量。同时每小区随机选取连续10穴，测定穗数、有效穗数、穗粒数、实粒数及千粒质量。

1.5 计算方法

氮相关指标采用下列方法计算^[15-16]：

作物吸氮量 (kg/hm²) = 籽粒含氮量 × 籽粒产量 + 秸秆含氮量 × 秸秆产量

氮肥吸收利用率 (%) = (施氮区作物吸氮量 - 不施氮区作物吸氮量) / 施氮量 × 100%

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

土壤氮依存率 (%) = 不施氮区作物吸氮量 / 施氮区作物吸氮量 × 100

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量

氮素收获指数 (%) = 籽粒吸氮量 / 作物吸氮量 × 100%

1.6 数据处理与分析

试验采用 Excel 2019 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析，数据采用 SPSS 18.0 软件进行 LSD 多重比较，利用 Excel 2019 绘制图表。表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 施氮量及施氮策略对膜下滴灌水稻生长发育影响

2.1.1 对膜下滴灌水稻茎蘖动态变化影响

不同施氮量下水稻茎蘖数动态变化见图1，不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。6月9日各处理基本苗为259.92~263.53万株/hm²，处理间差异不显著。6月19日调查结果显示，N2处理水稻茎蘖数达到386.27万株/hm²，显著高于同期N0、N1处理，与N3、N4处理差异不显著。6月29日、7月9日、7月19日调查结果显示，随生育进程推进，各处理茎蘖数增加迅速。与基本茎蘖数相比，施氮处理茎蘖数增幅分别为52.64%~75.34%、73.87%~99.98%、76.72%~100.82%。并且6月9日后，水稻茎蘖数随施氮量增加均表现为先增加后降低趋势，N2处理茎蘖数最大，各处理间差异显著。6月19日—7月9日是膜下滴灌水稻分蘖的快速发生期，是水稻适宜群体形成的关键时期。7月9—19日水稻茎蘖数基本稳定，变化幅度小。图2为不同施氮策略下水稻茎蘖数动态变化。在施氮量225 kg/hm²条件下，N2A、N2B、N2C处理氮肥基施比例分别为35%：15%：25%，但6月9日各处理的基本茎蘖数并没有显著差异。3种施肥策略分蘖肥比例为20%：30%：40%，6月19日的调查结果显示，最低的分蘖肥处理的分蘖数最低，但最高的分蘖肥处理并未获得最高的分蘖数，3个处理中N2B处理茎蘖数最高，显著高于N2A处理，但与N2C处理差异不显著。6月29日、7月9日、7月19日调查结果表现出相似规律。

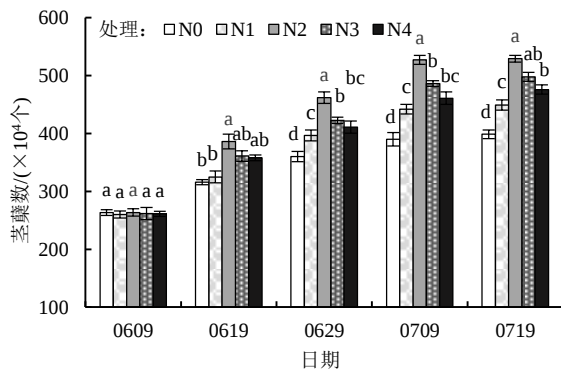


图1 施氮量对水稻茎蘖数的影响

Fig.1 Effects of different nitrate application rate on numbers of tillers and culms

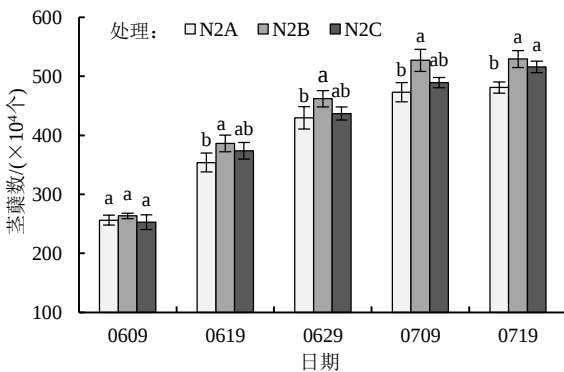


图2 施氮策略对水稻茎蘖数的影响

Fig.2 Effects of different nitrate application strategies on numbers of tillers and culms

2.1.2 对膜下滴灌水稻干物质质量积累的影响

图 3 为不同施氮量下水稻干物质质量积累的动态变化。从水稻生育进程看, 水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期, 水稻干物质积累呈“慢-快-慢”的特点, 在成熟期达到最大。分蘖期后, 干物质积累量随施氮量的增加呈先增加后降低趋势。施氮量为 225 kg/hm^2 时干物质积累量最大。拔节期, N2 处理干物质质量为 3959.0 kg/hm^2 , 比 N0 处理显著提高 35.25%, 比 N1、N3、N4 处理提高 10.87%、7.78%、3.87%; 收获期干物质质量达到 15740.6 kg/hm^2 , 比 N0 处理显著提高 62.19%, 比 N1、N3、N4 处理显著提高 12.11%、1.97%、11.36%, 以上分析说明施氮量可显著提高干物质积累量, 但过量氮肥不能增加水稻的生物产量, 反而对生物量积累有负效应。由图 4 可知, 施氮策略对水稻干物质质量积累具有显著影响。分蘖期, 各处理干物质质量无显著差异, 基施氮肥量对水稻出苗至分蘖期间干物质的积累影响不明显。拔节期干物质质量表现为 N2C 处理 > N2B 处理 > N2A 处理, 这与该阶段氮肥投入量大小对应。抽穗期、灌浆期、成熟期 N2B 处理干物质质量最大, 显著高于 N2A 处理, 说明适宜的分蘖肥、穗肥及粒肥可促进分蘖、促进干物质积累。

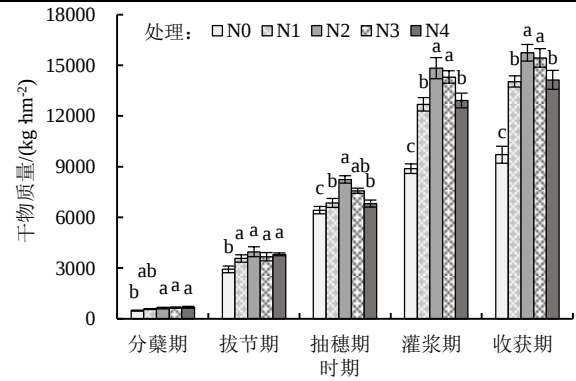


图3 施氮量对水稻干物质质量的影响

Fig.3 Effects of nitrate application rate on dry matter quality of rice

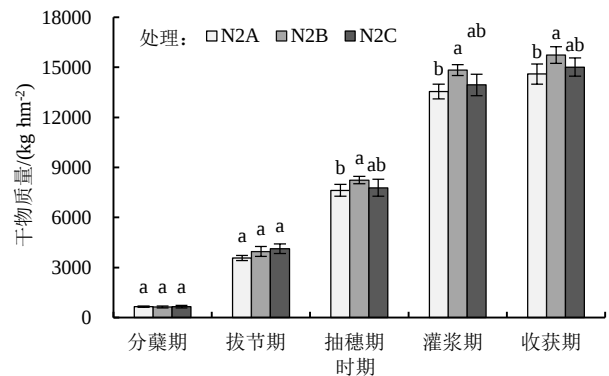


图4 施氮策略对水稻干物质质量的影响

Fig.4 Effects of nitrate application strategies on dry matter quality of rice

2.2 施氮量及施氮策略对膜下滴灌水稻产量及产量构成因子的影响

水稻产量由单位面积有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量等因子共同决定。水稻高产要求产量构成因子在较高水平上达到协调统一。由表 3 可知, 施用氮肥能显著提高水稻产量。施氮量为 225 kg/hm^2 时, 水稻产量最高, 为 5622.8 kg/hm^2 。与 N0 处理相比, N1、N2、N3、N4 处理产量显著提高 33.50%、45.60%、39.20%、30.63%, 并且各处理间差异显著。从产量构成因子对产量贡献分析, 施氮对水稻有效穗数有显著影响, 施氮处理有效穗数显著高于 N0 处理, 并且各处理间差异也显著。N2 处理有效穗数为 481.1 万穗/hm^2 , 显著高于 N0 处理, 比 N1、N3、N4 处理显著提高 22.08%、10.04%、18.47%。施氮对穗粒数、结实率、千粒质量等这些因子也有显著影响, 但施氮处理间影响不显著。以上分析说明, 施氮量能显著影响膜下滴灌水稻产量, 而造成该结果的主要原因是施氮显著影响水稻有效穗数。由表 4 可知, 不同施氮策略对产量影响显著。N2B 处理有效穗数比 N2A、N2C 处理显著提高 16.72%、7.32%; 产量提高 4.88%、2.54%。表明对

膜下滴灌水稻而言，减少氮肥的基施量，增施分蘖肥、穗肥和粒肥可显著提高水稻的有效穗数，进而

表3 施氮量对水稻产量及产量构成因子的影响

Table 3 Effects of nitrate application on yield and yield components

处理	成穗率/%	有效穗数/($\times 10^4$ 穗·hm $^{-2}$)	穗粒数/穗	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg·hm $^{-2}$)
N0	84.4 $\pm$ 3.5b	345.1 $\pm$ 15.6d	57.0 $\pm$ 3.4b	80.6 $\pm$ 2.1b	21.5 $\pm$ 0.6b	3 861.8 $\pm$ 170.8c
N1	85.8 $\pm$ 2.4b	394.1 $\pm$ 16.0c	64.7 $\pm$ 2.6a	86.5 $\pm$ 4.2a	24.7 $\pm$ 0.5a	5 155.6 $\pm$ 111.0b
N2	90.9 $\pm$ 3.9a	481.1 $\pm$ 18.7a	63.8 $\pm$ 3.8ab	84.3 $\pm$ 0.9ab	23.2 $\pm$ 1.1ab	5 622.8 $\pm$ 271.0a
N3	87.8 $\pm$ 2.7ab	437.2 $\pm$ 20.0b	65.5 $\pm$ 3.1a	85.0 $\pm$ 0.5ab	25.2 $\pm$ 0.4a	5 375.6 $\pm$ 379.4ab
N4	85.3 $\pm$ 1.5b	406.1 $\pm$ 18.1c	66.4 $\pm$ 1.7a	82.3 $\pm$ 1.0b	24.7 $\pm$ 2.9a	5 044.5 $\pm$ 183.9b

注 同一列数值之后的不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同

表4 氮肥运筹对水稻产量及产量构成因子的影响

Table 4 Effects of different nitrate application strategies on yield and yield components

处理	成穗率/%	有效穗数/($\times 10^4$ 穗·hm $^{-2}$)	穗粒数/穗	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg·hm $^{-2}$)
N2A	85.7 $\pm$ 1.8b	412.2 $\pm$ 28.9c	65.4 $\pm$ 3.0a	85.1 $\pm$ 1.4a	24.5 $\pm$ 0.5a	5 361.4 $\pm$ 35.9b
N2B	90.9 $\pm$ 0.9a	481.1 $\pm$ 28.0a	63.8 $\pm$ 3.8a	84.2 $\pm$ 1.6a	23.6 $\pm$ 1.6a	5 622.8 $\pm$ 120.8a
N2C	86.9 $\pm$ 3.5b	448.3 $\pm$ 35.6b	64.1 $\pm$ 3.5a	81.5 $\pm$ 0.2b	22.6 $\pm$ 1.0a	5 483.4 $\pm$ 102.8ab

2.3 施氮量及施氮策略对膜下滴灌水稻氮素吸收利用的影响

不同施氮水平下，水稻氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力与施氮量具有显著线性负相关关系（表5）。产量最高的N2处理氮肥吸收利用率为35.81%，均显著高于N3、N4处理，但显著低于N1处理。施氮处理间氮素收获指数差异显著，各施氮处理氮素收获指数在47.27%~52.88%之间变化，

总体表现为N1处理>N2处理>N3处理>N4处理，说明高施氮量不利于籽粒产量的形成及氮素从茎叶向籽粒的运移。N2处理土壤氮依存率最低，较N1、N3、N4处理降低12.82%、3.08%、8.91%。在不同施氮策略下（表6），N2B处理水稻氮肥吸收利用率比N2A、N2C处理显著提高21.02%、11.73%，氮肥农学利用率显著提高17.57%、8.60%。此外，其土壤氮依存率较N2A、N2C处理降低9.90%、5.17%。

表5 施氮量对膜下滴灌水稻氮肥利用率的影响

Table 5 Effects of nitrate application on nitrogen use efficiency of rice

处理	作物吸氮量/(kg·hm $^{-2}$)	氮肥农学利用率/(kg·kg $^{-1}$)	氮肥吸收利用率/%	氮肥偏生产力/(kg·kg $^{-1}$)	土壤氮依存率/%	氮素收获指数/%
N1	171.59 $\pm$ 11.84b	9.58 $\pm$ 0.23a	40.96 $\pm$ 2.06a	38.19 $\pm$ 2.30a	67.78 $\pm$ 7.10a	52.88 $\pm$ 1.98a
N2	196.88 $\pm$ 10.24a	7.83 $\pm$ 0.74b	35.81 $\pm$ 0.89b	24.99 $\pm$ 1.46b	59.07 $\pm$ 5.16b	51.69 $\pm$ 1.39a
N3	190.72 $\pm$ 7.29a	4.81 $\pm$ 0.86c	23.63 $\pm$ 2.36c	17.07 $\pm$ 0.98c	60.97 $\pm$ 4.84b	49.88 $\pm$ 1.21ab
N4	179.29 $\pm$ 3.17b	2.92 $\pm$ 0.75d	15.55 $\pm$ 1.55d	12.46 $\pm$ 0.87d	64.87 $\pm$ 3.51ab	47.27 $\pm$ 1.88b

表6 氮肥运筹对膜下滴灌水稻氮肥利用率的影响

Table 6 Effects of different nitrate application strategy on nitrogen use efficiency of rice

处理	作物吸氮量/(kg·hm $^{-2}$)	氮肥农学利用率/(kg·kg $^{-1}$)	氮肥吸收利用率/%	氮肥偏生产力/(kg·kg $^{-1}$)	土壤氮依存率/%	氮素收获指数/%
N2A	179.16 $\pm$ 11.28b	6.66 $\pm$ 0.58b	29.59 $\pm$ 1.10b	23.83 $\pm$ 2.07a	64.91 $\pm$ 2.24a	52.07 $\pm$ 1.44a
N2B	196.85 $\pm$ 10.24a	7.83 $\pm$ 0.74a	35.81 $\pm$ 0.89a	24.99 $\pm$ 1.46a	59.07 $\pm$ 5.16b	52.71 $\pm$ 1.39a
N2C	186.71 $\pm$ 6.16ab	7.21 $\pm$ 0.71a	32.05 $\pm$ 0.94a	24.37 $\pm$ 1.87a	62.29 $\pm$ 4.63ab	51.98 $\pm$ 1.84a

3 讨论

3.1 施氮量及分蘖肥对膜下滴灌水稻茎蘖数的影响

分蘖是与水稻群体质量和籽粒产量密切相关的农艺性状^[17]。水稻分蘖除受自身遗传因素的作用外，还受营养条件、水分、光照、温度、种植密度等外界因素的影响。在一定施氮量范围内茎蘖数随氮肥

用量的增加而增加^[18]。达到一定水平后增施氮肥不会引起茎蘖数的增加^[19]。分蘖期适宜施氮量才能保证分蘖的发生和有效穗数的形成^[20]。冯来定等^[21]研究发现，水稻分蘖数与土壤铵态氮量显著正相关。在土壤铵态氮质量浓度为 100~120 μ g/mL 时移栽，能促进主茎发生 3 个左右低节位分蘖，当铵态氮质量浓度降至 30 μ g/mL 时分蘖停止。丁艳峰等^[22]在水

培试验中发现速效氮质量浓度在 10~90 $\mu\text{g/mL}$ 范围内, 水稻分蘖量与培养液质量浓度呈极显著二次曲线相关, 而在质量浓度高达 90 $\mu\text{g/mL}$ 时, 分蘖量反而减少。本研究也得到类似的结果, 水稻茎蘖数与分蘖期施氮量 (0~121.5 kg/hm^2) 呈二次曲线关系。分蘖肥为 80 kg/hm^2 时, 水稻茎蘖数最多。N2 处理分蘖肥 67.5 kg/hm^2 , 茎蘖数为 505.67 万株/ hm^2 , 显著高于 N3、N4 处理。从图 2 可知, N2A 处理分蘖肥比例仅为 20%, 其茎蘖数显著低于分蘖肥比例为 30%和 40%的 N2B、N2C 处理; N2C 茎蘖数与 N2B 处理相近, 但有效穗数显著低于 N2B 处理, 是因为分蘖肥比例高达 40%, 造成水稻营养生长旺盛, 在分蘖后期产生大量无效分蘖, 造成水稻有效穗数降低。因此, 分蘖期适宜施氮量是保证水稻茎蘖数及有效分蘖的重要因素。

3.2 氮量对膜下滴灌水稻产量及有效穗数的影响

郭庆人等^[23]研究表明, 膜下滴灌水稻只有保证一定的有效分蘖数, 才能保证产量。朱齐超等^[20]研究发现, 膜下滴灌条件下施氮量可显著提高水稻产量和有效穗数、穗粒数、实粒数和千粒质量等产量构成因子, 但施氮处理间除有效穗数外, 其余各项差异均不显著。吴汉^[24]研究发现, 随着施氮量的增加, 甬优 1540 的有效穗变化并不明显, 但穗粒数增加; 镇稻 18 的有效穗先增加后减小, 但穗粒数无明显变化。施氮量对不同品种有效穗、穗粒数的影响效果并不相同。本研究提出施氮量显著提高水稻有效穗数、穗粒数、千粒质量, 但施氮处理间仅有效穗数差异显著, 而穗粒数、千粒质量等因子间差异均不显著, 说明不同施氮水平下, 产量差异显著的主要原因是施氮量对膜下滴灌水稻有效穗数的影响。该研究结果与前人^[20]研究结论一致, 但对穗粒数影响效果并不完全一致。因为施肥效果主要受区域内土壤状况、气候条件、作物特征 (包括不同作物和同一作物不同品种)、栽培方式和灌溉等生产条件的影响^[25], 影响因素较复杂, 还需进一步研究。

3.3 氮肥后移对膜下滴灌水稻有效穗数、结实率的影响

凌启鸿等^[8]研究发现水稻分蘖期、穗分化期吸氮量占全生育期吸氮量的 25%、45%, 分蘖期、穗分化期为 2 个吸氮高峰。Datta^[26]指出, 水稻前期施用氮肥主要影响水稻的分蘖和单位面积的穗数, 在幼穗分化始期和灌浆期施氮主要影响水稻的穗粒数和结实率。因此, 研究氮肥前氮后移, 降低基肥、分蘖肥的比例, 提高穗和粒肥的比例, 对实现水稻高产和优质至关重要。郭晓红等^[27]研究提出氮肥平衡 (施氮量为 150 kg/hm^2 , 基肥: 蘖肥: 穗肥=4:3:3)

与氮肥平衡减氮 (施氮量为 135 kg/hm^2 , 基肥: 蘖肥: 穗肥=4:3:3) 提高了穗数、结实率和千粒质量, 产量比农民常规施氮增加了 11.45%和 5.71%。本研究发现 N2B、N2C 处理茎蘖数差异不大, 但有效穗数、结实率差异显著, 说明减少基肥、分蘖肥投入量, 增加穗肥、粒肥追施量, 较好地满足水稻对氮肥的需求, 促进生育中后期的物质合成及氮素向籽粒中的运移, 提高水稻有效穗数和结实率。

3.4 氮肥运筹对膜下滴灌水稻氮素积累量及氮肥利用率的影响

氮素施入量及施氮比例势必影响作物对氮素的吸收利用率。本研究表明, 施氮量为 225 kg/hm^2 时, 水稻氮素积累量明显高于其他施氮处理, 且氮肥利用率较高, 适宜施氮量可较好的协调产量与氮肥利用率的矛盾。基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥施氮比例为 15%:30%:40%:15%时, 与 N2A、N2C 处理相比, 水稻氮素积累量明显提高 9.89%、5.45%, 水稻氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率也显著提高 11.73%~21.02%、8.60%~17.57%。梁东丽等^[28]研究发现, 作物吸收的氮素主要由土壤供应, 其次为氮肥。本研究也得出不同施氮水平及施氮策略土壤氮依存率均在 60%以上, 并且 N2、N2B 处理土壤氮依存率最低的结论, 说明适宜的氮肥运筹可提高肥料氮的吸收比例。本研究还提出增加水稻穗肥、粒肥可提高水稻对氮肥的利用率, N2B 处理氮肥吸收利用率达到 35.81%, 比 N2A、N2C 处理提高 21.02%、11.73%, 该结论与丁艳锋等^[9]、丁华萍等^[29]研究结论相似。综上可知, 通过施氮量及施氮比例优化可实现在水稻养分需求关键时期合理、精准施肥, 达到按需施肥的目的, 既促进了水稻对氮肥的吸收与利用, 又可有效减少氮肥损失量及盈余量, 降低因施用氮肥对环境造成的负面效应。

4 结论

适宜的施氮量及不同生育期施氮比例能够显著提高水稻产量及氮肥利用率。施氮量为 225 kg/hm^2 , 基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥的投入比例为 15%:30%:40%:15%时, 膜下滴灌水稻产量最高。并且该氮肥运筹方式下, 水稻氮素积累量也达到最高, 比其他施氮处理、施氮策略提高 3.23%~14.74%、5.45%~9.89%。同时还可显著降低土壤氮依存率, 提高肥料氮吸收率。综合分析提高水稻产量及氮肥利用率等因素, 在河西绿洲灌区膜下滴灌条件下, 水稻施氮量为 225 kg/hm^2 , 基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥投入比例为 15%:30%:40%:15%, 可实现在水稻养分需求关键时期按需施肥、精准施肥, 是既保证

膜下滴灌水稻高产, 又保证氮肥高效利用的适宜氮肥运筹方式。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于 2021 年粮食产量数据的公告[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202112/t20211206_1825058.html.
- [2] 欧阳由男, 金千瑜, 陈进红, 等. 我国西部地区节水型稻作的问题与对策[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 34-37.
- [3] 朱德峰, 程式华, 张玉屏, 等. 全球水稻生产现状与制约因素分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474-479.
- [4] 陈林, 银永安. 膜下滴灌水稻创新与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [5] 井涛, 樊明寿, 周登博, 等. 滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(3): 654-661.
- [6] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区水稻氮肥投入阈值研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(2): 462-470.
- [7] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(4): 836-845.
- [8] 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): 2 457-2 467.
- [9] 丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 等. 氮素基、蘖肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 762-767.
- [10] 陈仁天, 陶伟, 陈雷, 等. 氮肥运筹对桂两优 2 号干物质生产及氮肥利用率的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(6): 954-957.
- [11] 胡雅杰, 钱海军, 吴培, 等. 秸秆还田条件下氮磷钾用量对软米粳稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24(3): 817-824.
- [12] 彭碧琳, 李妹娟, 胡香玉, 等. 轻简氮肥管理对华南双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1 424-1 438.
- [13] 吕艳东, 徐令旗, 姜红芳, 等. 氮肥运筹对苏打盐碱地水稻养分积累、转运及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 103-111.
- [14] 谢继忠. 河西走廊的水资源问题与节水对策[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 802-808.
- [15] 王海琪, 黄艺华, 蒋桂英, 等. 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮代谢及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 297-306, 315.
- [16] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1 361-1 368.
- [17] LI X Y, QIAN Q, FU Z M, et al. Control of tillering in rice[J]. Nature, 2003, 422(6 932): 618-621.
- [18] 田广丽, 周毅, 孙博, 等. 氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24(4): 896-904.
- [19] 俞双恩, 张梦婷, 陈凯文, 等. 灌排模式和施氮水平对水稻株高与茎蘖生长动态的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 210-218.
- [20] 朱齐超, 危常州, 李美宁, 等. 氮肥运筹对膜下滴灌水稻生长和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(4): 440-446.
- [21] 冯来定, 蒋彭炎, 洪晓富, 等. 土壤铵态氮浓度与水稻分蘖的发生和终止的关系[J]. 浙江农业学报, 1993, 5(4): 203-207.
- [22] 丁艳锋. 氮素营养调控水稻群体质量指标的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 1997.
- [23] 郭庆人, 陈林. 水稻膜下滴灌栽培技术在我国发展的优势及前景分析[J]. 中国稻米, 2012, 18(4): 36-39.
- [24] 吴汉. 氮肥运筹对钵苗机插水稻产量、品质及氮肥利用的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [25] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [26] DATTA S D. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia[J]. Fertilizer Research, 1986, 9(1/2): 171-186.
- [27] 郭晓红, 姜红芳, 兰宇辰, 等. 氮肥运筹对苏打盐碱地水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(8): 1 796-1 804.
- [28] 梁东丽, 同延安, OVE Emterdy, 等. 黄土地土壤剖面中 N_2O 排放的研究初报[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 802-809.
- [29] 丁华萍, 陈斌, 吉训风, 等. 氮肥运筹对机插水稻产量、效益及肥料利用率的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20(1): 92-93, 96.

Effects of Nitrogen Management on Rice Yield and Nitrogen Fertilizer Utilization Rate under Drip Irrigation in Hexi Oasis Irrigation Area

TANG Wenxue¹, MA Zhongming^{2*}, CHEN Juan³, LUO Shuanglong¹

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

3. Institute of Economic Crops and Malting Barley Material, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: **【Objective】** To explore the effect of the optimal nitrogen application rate and nitrogen management on nitrogen fertilizer utilization and rice yield under drip irrigation. **【Method】** Five nitrogen application levels and three nitrogen fertilizer planning and management methods were set for field trials at the Zhangye Water-saving Agricultural Experimental Station of the Hexi Oasis Irrigation Area, aiming to study the effects of different nitrogen application rates and nitrogen fertilizer planning and management methods on rice growth, yield, and nitrogen fertilizer utilization rate under drip irrigation. **【Result】** Nitrogen rate had a significant impact on rice yield components such as effective panicle number, grain number per panicle, ripening rate, and 1000-grain weight, and can significantly improve rice yield under drip irrigation. Compared with N0 treatment, N1, N2, N3, and N4 treatments significantly increased rice yield by 33.50%, 45.60%, 39.20%, and 30.63%, respectively, with significant differences between the nitrogen treatments. Rice yield was highest (5 622.8 kg/hm²) when the nitrogen application rate was 225 kg/hm². Nitrogen fertilizer planning and management methods can significantly affect the effective panicle number of rice. Among the three planning and management methods, N2B contributed the highest yield. The effective panicle number of rice can be significantly increased by the appropriate rear shift of nitrogen fertilizer, resulting in a high rice yield. The utilization rate of nitrogen fertilizer was significantly and negatively correlated with the nitrogen application rate. When the nitrogen application rate was 225 kg/hm², the nitrogen uptake and utilization indicators in rice were significantly lower than those of N1 treatment but significantly higher than those of N3 and N4 treatments. Meanwhile, the addition of rice panicle fertilizer and grain fertilizer can significantly improve the absorption and utilization rate of nitrogen fertilizer and the agronomic utilization efficiency of nitrogen fertilizer. **【Conclusion】** It was proposed through comprehensive analysis that the Hexi Oasis Irrigation Area will see high rice yield and appropriate nitrogen fertilizer application rate, as well as planning and management method for efficient utilization when the nitrogen application rate is 225 kg/hm² and the input percentage of basal fertilizer, tiller fertilizer, panicle fertilizer, and grain fertilizer are 15% : 30% : 40% : 15%.

Key words: drip irrigation with plastic film mulching; rice; yield; yield construction; nitrogen use efficiency; nitrogen management

责任编辑: 白芳芳