

## 主季种植密度和施氮量对高粱再生产量的影响

周瑜 李泽碧 张亚勤 吴毓 黄娟\*

(重庆市农业科学院 特色作物研究所, 重庆 402160)

**摘要** 为探讨主季高粱种植密度和氮肥用量对高粱再生产量的影响,以‘晋渝糯3号’为供试材料,设置3个种植密度8.25万(LD)、10.5万(MD)和12.75万株/hm<sup>2</sup>(HD)和3个施氮水平120(LN)、150(MN)和225 kg/hm<sup>2</sup>(HN),测定再生季高粱再生力、干物质积累与转运特性、再生产量及其构成因素。结果表明,再生芽数和芽长随主季高粱种植密度的增加而减少,随施氮量的增加而增加。开花期和成熟期再生高粱单株干物质积累量均随密度的增大而减小,随施氮量的增加而增大。增加密度显著降低叶片花前干物质转运量、花前干物质转运率和花前干物质转运量对籽粒的贡献率,提高花后干物质积累量对籽粒的贡献率。增施氮肥降低叶片和茎鞘花前干物质转运率和花前干物质转运量对籽粒的贡献率,增加花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率。再生高粱产量随密度和施氮量的增加而增加,HD分别比LD、MD的2年平均产量高17.82%和1.49%,HN分别比LN、MN的2年平均产量高24.23%和14.72%。单穗重随密度的增加而减少,随施氮量的增加而增加;千粒重在不同密度处理之间无显著差异,但随施氮量的增加而增加。综上,重庆市主季高粱种植密度12.75万株/hm<sup>2</sup>和施氮量225 kg/hm<sup>2</sup>可获得较高再生产量。

**关键词** 高粱; 种植密度; 施氮量; 再生力; 再生产量

中图分类号 S514

文章编号 1007-4333(2021)08-0043-11

文献标志码 A

## Effects of planting density and nitrogen rate in main season on ratooning yield of sorghum

ZHOU Yu, LI Zebi, ZHANG Yaqin, WU Yu, HUANG Juan\*

(Institute of Characteristic Crops Research, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract** In order to study the effects of different planting densities and nitrogen rates in main season on the yield of ratoon sorghum, the sorghum hybrid ‘Jinyunuo 3’ was taken as study material under 3 planting densities, 82 500 (LD), 105 000 (MD), 127 500 plant/hm<sup>2</sup> (HD), and 3 nitrogen rates, 120 (LN), 150 (MN), 225 kg/hm<sup>2</sup> (HN). The ratooning ability, dry matter accumulation characteristics, yield and yield components of ratoon sorghum were investigated. The results showed that the number and length of regeneration buds decreased with the increase of planting density, while increased with the increase of nitrogen rate. The dry matter accumulation of ratoon sorghum decreased with the increase of planting density and increased with the increase of nitrogen rate at both anthesis and mature stages. The higher planting density reduced dry matter transportation and dry matter transportation efficiency of leaf before anthesis and its contribution to grain, but improved the contribution of dry matter accumulation after anthesis to grain. The higher nitrogen rate reduced dry matter transportation efficiency of leaf and stem + sheath before anthesis, as well as their contribution to grain, but boosted the contribution of dry matter accumulation after anthesis to grain. The yield of ratoon sorghum increased with the lifting of planting density and nitrogen rate. The average yield of ratoon

收稿日期: 2020-08-25

基金项目: 重庆市科研院所绩效激励引导专项(cstc2018jxjl80008, cqaas2019jxjl02); 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0125)

第一作者: 周瑜, 助理研究员, 主要从事高粱高效栽培技术研究, E-mail: xinganmermer@163.com

通讯作者: 黄娟, 助理研究员, 主要从事高粱栽培和育种研究, E-mail: hj.198800@163.com

sorghum under HD was respectively 17.82% and 1.49% higher than those under LD and MD for two years. The average yield of ratoon sorghum under HN was respectively 24.23% and 14.72% higher than those under LN and MN. The ear weight decreased with the increase of planting density, but increased with the increase of nitrogen rate. The 1 000-grain weight showed no significant difference among planting densities, while it increased with the increase of nitrogen rate. In conclusion, under the experimental field condition in this study, the planting density of 127 500 plant/hm<sup>2</sup> and nitrogen rate of 225 kg/hm<sup>2</sup> could obtain higher yield of ratoon sorghum.

**Keywords** sorghum; planting density; nitrogen rate; ratooning ability; ratooning yield

高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)抗逆性强、适应性广,粮、饲、酿、加工兼用,是世界第五大作物<sup>[1]</sup>,2017年我国高粱种植面积约62万hm<sup>2</sup>,总产280万t,分别居世界第14和7位(FAO统计数据)。西南地区是优质酿酒高粱(糯)优势产区,无霜期长,光热资源丰富,可利用高粱的再生性进行第二季生产<sup>[2]</sup>。再生高粱生育期短、省工、省种,大力发展可有效增加单位面积产量和经济收入,研究种植密度和氮肥施用量对高粱再生生长和产量的影响,对推广高粱再生生产、保证高粱高产稳产具有重要意义。

再生是指在生长季种植1次收获2次甚至更多次的一种种植制度<sup>[3]</sup>,高粱收获后,留茬上的休眠芽可萌发生长成穗,再次收获籽粒或全株。种植密度对于作物群体结构建成、干物质累积分配和产量构成因素之间的协调发展有显著调控效应<sup>[4-5]</sup>。群体结构合理,有效穗、实粒数、结实率和千粒重适中,再生稻产量高<sup>[6]</sup>。超级稻主季与再生季的产量均与抛植密度成正相关,高密度下的超级稻后期的生活力较强,再生能力较强,有利于再生稻高产<sup>[7]</sup>。增加密度可提高再生高粱叶绿素含量、叶面积指数和群体干物质重<sup>[8]</sup>。

高粱能否成功蓄留再生很大程度上取决于留茬上再生芽的萌发和生长,而氮肥显著影响再生芽的生长,进而影响再生产量<sup>[9]</sup>。氮肥对再生稻休眠芽的萌发有促进作用<sup>[10]</sup>,施氮延缓了主季稻生长后期绿叶衰老速度,提高叶片净光合速率,相对提高母茎茎鞘干物重而增强再生力<sup>[11]</sup>。Hamdy等<sup>[12]</sup>的研究显示,在70、140和210 kg/hm<sup>2</sup>3个纯氮施用量中,再生季饲草高粱鲜重、干重和籽粒产量均以施氮量最大时最高。再生稻齐穗至成熟期的干物质净积累量、再生稻的库容量及稻谷产量均与促芽促苗的氮肥施用量呈抛物线型相关<sup>[13]</sup>。

已有研究针对种植密度和氮肥用量对高粱群体籽粒灌浆特性、产量和生理特性等方面的影响进行

过探讨,然而两者对高粱再生产量的影响鲜见报道。本试验设置3个种植密度和3个主季氮肥施用量,测定再生力、再生高粱农艺性状、干物质积累与转运特性、产量及其构成因素,旨在探讨主季种植密度和氮肥用量及其互作效应对再生高粱产量影响的作用机理,以期为高粱高产高效栽培提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地和供试材料

试验于2017—2018年在重庆市农业科学院渝西作物试验站(105.71°E、29.75°N,海拔298m)实施。年均气温17.7℃,年均降雨量1 015.0mm,年均日照1 218.7h,年平均无霜期317d。试验地土壤类型为紫色土,耕层土壤pH5.6,有机质含量22.3g/kg,全氮1.31g/kg,速效氮119.0mg/kg,速效磷25.0mg/kg,速效钾74.7mg/kg。

供试材料为西南地区广泛种植的杂交糯高粱品种‘晋渝糯3号’,由重庆市农业科学院特色作物研究所提供。

### 1.2 试验设计

采用二因素裂区设计,种植密度(D)为主区,设置8.25万(LD)、10.5万(MD)和12.75万株/hm<sup>2</sup>(HD)3个处理,主季氮肥水平(N)为裂区,以尿素(纯N≥46%)作氮肥,纯氮用量分别为120(LN)、150(MN)和225 kg/hm<sup>2</sup>(HN),按基肥:拔节肥=3:7(质量比)的比例分2次施入,3次重复,共计27个小区。行长5m,行距0.5m,小区面积30m<sup>2</sup>(5m×6m),穴播,播后苗前进行化学除草,3~4叶期间苗,5~6叶期定苗,每穴留苗2株。田间管理按大田常规管理措施统一进行。

2017年3月29日播种,7月26日收获砍秆,高粱再生季11月18日收获。2018年4月4日播种,8月1日收获砍秆,高粱再生季12月6日收获。砍秆留茬高度约距地面3~4cm。当再生苗长到2~3叶时,每穴保留健壮苗2~3个。

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 再生力

主季高粱砍秆后第10天,采用5点取样法,调查每穴再生芽数,每穴随机选择5个再生芽测量芽长,不足5个的调查全部芽长。

#### 1.3.2 农艺性状

再生季成熟期每小区选取有代表性的植株3株,测定株高和茎粗。

#### 1.3.3 干物质积累及转运

采用烘干法测定。高粱再生季开花期和成熟期,每小区选取有代表性的植株3株,按叶片、茎秆+叶鞘(茎鞘)和穗分解,置于烘箱105℃杀青30 min,80℃烘至恒重,分别称取各部分质量,成熟期穗部烘干后脱粒,称取籽粒干重。

单株叶片(茎鞘)花前干物质转运量 =  
开花期叶片(茎鞘)干重 - 成熟期叶片(茎鞘)干重

单株叶片(茎鞘)花前干物质转运率 =  
单株叶片(茎鞘)花前干物质转运量 /  
开花期叶片(茎鞘)干重 × 100%

单株花后干物质积累量 = 成熟期籽粒干重 -  
(叶片 + 茎鞘)花前干物质转运量

单株叶片(茎鞘)花前干物质转运量

对籽粒的贡献率 = 叶片(茎鞘)花前

干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100%

单株花后干物质积累量对籽粒的贡献率 =  
单株花后干物质积累量 /  
成熟期籽粒干重 × 100%

#### 1.3.4 产量及其构成因素

成熟期选取长势均匀的10株,测定穗粒重、千粒重,小区(30 m<sup>2</sup>)实收测产。

### 1.4 数据分析

用Microsoft Excel 2010和SPSS 20.0进行统计分析,用Duncan's进行多重比较( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 对高粱再生力的影响

由表1可知,种植密度和施氮量对再生芽数和芽长都有显著( $P<0.05$ )或极显著影响( $P<0.01$ ),但二者交互作用不显著。再生芽数随密度的增加而减少,LD、MD和HD的2年平均每穴再生芽数分别为8.1、7.6和7.2;随施氮量的增加而增加,LN、MN和HN的2年平均再生芽数分别为7.1、7.6和8.2。再生芽长随密度的增加而减少,LD、MD和

HD的2年平均再生芽长分别为44.49、40.93和39.97 cm;随施氮量的增加而增加,LN、MN和HN的2年平均再生芽长分别为39.66、41.64和44.10 cm。2018年的再生芽长极显著高于2017年再生芽。

### 2.2 对再生高粱农艺性状的影响

种植密度和施氮量对再生高粱的株高有极显著影响( $P<0.01$ ),且二者的交互作用极显著( $P<0.01$ ),见表1。2017年MD处理下株高最高,显著高于LD和HD处理,2018年LD处理下株高最高,显著高于MD和HD处理。2017年MN和HN处理下株高显著高于LN,2018年HN处理株高显著高于LN和MN。茎粗在不同密度下差异极显著( $P<0.01$ ),随密度的增加而降低,而在不同施氮量下无显著差异。株高和茎粗在年际间差异极显著,2018年高于2017年。

### 2.3 对再生高粱干物质积累和转运的影响

种植密度对高粱再生季开花期( $F=55.828$ ,  $P<0.01$ )和成熟期干物质积累量( $F=57.500$ ,  $P<0.01$ )有极显著影响,施氮量对再生高粱开花期( $F=176.168$ ,  $P<0.01$ )和成熟期干物质积累量( $F=295.437$ ,  $P<0.01$ )均有极显著影响,但二者的交互作用不显著。由图1可知,开花期和成熟期再生高粱单株干物质积累量均随密度的增大而减小,2017年开花期单株干物质积累量LD分别比MD和HD高7.05%和17.25%,2018年分别高5.30%和11.70%;2017年成熟期单株干物质积累量LD分别比MD和HD高5.11%和14.00%,2018年分别高5.72%和9.98%。开花期和成熟期再生高粱单株干物质积累量均随施氮量的增加而增大,2017年开花期单株干物质积累量HN分别比LN和MN高26.67%和14.15%,2018年分别高27.17%和14.04%;2017年成熟期单株干物质积累量HN比LN和MN分别高26.53%和13.36%,2018年分别高31.41%和16.73%。

由表2和表3可知,种植密度对叶片和茎鞘花前干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率以及花后干物质积累量对籽粒的贡献率均有极显著影响( $P<0.01$ )。2017年各处理叶片和茎鞘的花前干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率由高到低均表现为LD>MD>HD(表2);花后干物质积累量在密度间无显著差异,花后干物质积累量对籽粒的贡献率由高到低表现为HD>MD>LD(表3)。2018年

叶片花前干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率与2017年表现趋势一致,而茎鞘花前干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率由高到低表现为

MD>LD>HD(表2);花后干物质积累量由高到低表现为LD>HD>MD,其对籽粒的贡献率表现为HD最大,LD和MD无显著差异(表3)。

表1 种植密度和施氮量对高粱再生力和农艺性状的影响

Table 1 Effects of planting densities and nitrogen rates on the ratooning ability and agronomic traits

年份(Y) Year	处理 Treatment	再生性 Ratooning ability		农艺性状 Agronomic trait	
		每穴再生芽数 Regeneration bud number per hole	芽长/cm Bud length	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter
2017	密度(D)				
	LD	8.4±0.8 a	41.11±3.17 a	168.00±5.24 b	19.01±0.49 a
	MD	7.8±0.9 ab	39.60±2.98 a	174.56±5.72 a	18.27±0.83 a
	HD	7.3±0.8 b	38.33±3.30 a	166.78±7.84 b	16.81±0.98 b
	施氮量(N)				
	LN	7.4±0.7 b	37.81±1.78 b	165.00±6.50 b	18.12±1.29 a
2018	LN	7.9±1.0 ab	39.91±3.04 ab	172.89±4.28 a	17.71±0.92 a
	MN	8.2±0.7 a	41.32±3.84 a	171.44±7.80 a	18.26±1.42 a
	密度(D)				
	LD	7.9±1.2 a	47.87±5.73 a	184.72±3.83 a	22.22±0.65 a
	MD	7.4±1.2 a	42.25±2.46 b	179.11±6.13 b	20.99±0.91 b
	HD	7.0±0.6 a	41.61±4.74 b	178.39±7.94 b	20.53±1.04 b
F	施氮量(N)				
	LN	6.9±0.7 b	41.50±3.96 b	176.94±7.58 b	20.93±0.73 a
	MN	7.2±0.7 b	43.37±4.86 ab	179.00±5.06 b	21.10±1.36 a
	HN	8.2±1.3 a	46.87±5.67 a	186.28±2.29 a	21.72±1.13 a
	Y	2.623	16.630**	88.703**	188.047**
	D	5.018*	7.043**	5.310**	22.885**
D * N	N	7.173**	6.118**	15.657**	2.316
	D * N	0.128	0.192	6.360**	0.131

注:LD,MD和HD表示种植密度8.25万、10.5万和12.75万株/hm<sup>2</sup>。LN,MN和HN表示施氮量120、150和225 kg/hm<sup>2</sup>。表中数据为平均数±标准偏差。同列不同小写字母表示不同处理差异显著(P<0.05)。\*,0.05水平上显著;\*\* ,0.01水平上显著。下同。

Note: LD, MD and HD represent planting density of 82 500, 105 000 and 127 500 plant/hm<sup>2</sup>. LN, MN and HN represent nitrogen rate of 120, 150 and 225 kg/hm<sup>2</sup>. Values are mean±SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. \*, significant difference at 0.05. \*\*, significant difference at 0.01 level. The same below.

施氮量对叶片花前干物质转运率和对籽粒的贡献率,茎鞘的干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率,花后干物质积累量和对籽粒的贡献率均有极显

著影响(P<0.01)。2017年叶片花前干物质转运量由高到低表现为HN>MN>LN,叶片花前干物质转运率和花前干物质转运量对籽粒的贡献率由高到

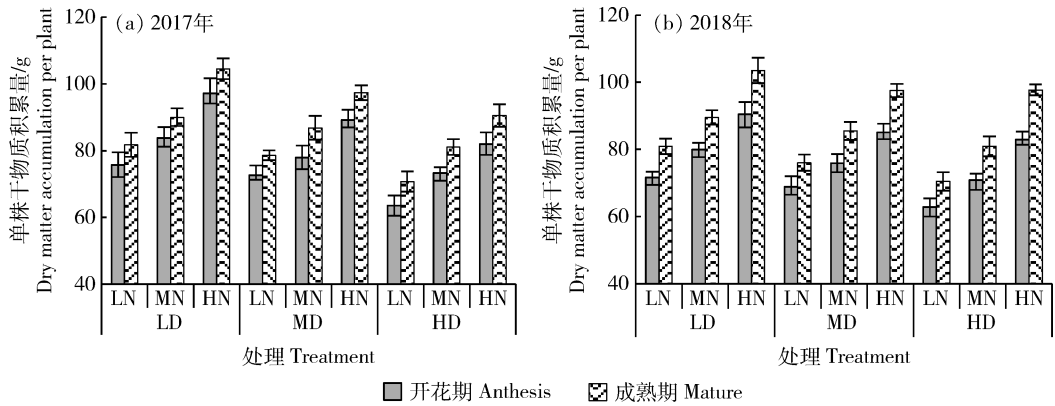


图 1 2017(a)和 2018 年(b)不同种植密度和施氮量下再生高粱干物质积累量

Fig.1 Dry matter accumulation of ratoon sorghum under different planting densities and nitrogen rates in 2017 (a) and 2018 (b)

表 2 种植密度和施氮量对再生高粱花前干物质转运的影响

Table 2 Effects of planting densities and nitrogen rates on the dry matter transportation before anthesis of ratoon sorghum

年份 (Y) Year	处理 Treatment	叶片 Leaf			茎鞘 Stem+sheath		
		干物质转 运量/(g/株) Dry matter transportation	干物质转 运率/% Dry matter transportation efficiency	对籽粒的 贡献率/% Contribution of dry matter transportation to grain	干物质转 运量/(g/株) Dry matter transportation	干物质转 运率/% Dry matter transportation efficiency	对籽粒的 贡献率/% Contribution of dry matter transportation to grain
2017	密度(D)						
	LD	4.18±0.61 a	14.47±2.05 a	15.26±1.77 a	7.19±1.16 a	15.45±3.12 a	26.70±5.98 a
	MD	3.77±0.48 b	14.25±1.27 a	14.41±2.00 a	6.37±0.61 b	14.23±1.62 ab	24.50±3.95 a
	HD	2.84±0.39 c	11.76±1.84 b	11.76±1.91 b	5.04±1.01 c	12.81±3.21 b	21.02±5.20 b
	施氮量(N)						
	LN	3.37±0.52 b	14.03±1.52 a	14.81±2.14 a	6.41±1.21 a	15.90±2.25 a	28.08±4.30 a
MN	3.58±0.98 ab	13.82±2.88 a	13.40±2.99 a	6.90±1.17 a	15.47±1.79 a	25.98±3.11 a	
HN	3.84±0.67 a	12.63±1.55 a	13.21±1.74 a	5.29±1.00 b	11.13±1.64 b	18.17±2.72 b	
2018	密度(D)						
	LD	4.44±0.44 a	21.30±3.10 a	14.17±2.15 a	7.62±0.91 a	15.22±2.41 b	24.47±5.06 b
	MD	3.46±0.44 b	17.42±4.30 b	11.91±2.78 b	8.00±0.57 a	16.86±1.70 a	27.36±4.47 a
	HD	3.17±0.62 b	17.33±4.78 b	11.49±3.23 b	6.52±0.56 b	14.54±2.16 b	23.49±4.70 b
	施氮量(N)						
	LN	3.77±0.47 a	22.19±1.58 a	14.63±1.00 a	7.57±0.85 a	16.98±1.11 a	29.45±2.39 a
MN	4.03±0.63 a	19.78±2.82 b	13.58±1.91 a	7.88±0.84 a	16.70±1.29 a	26.53±2.45 b	
HN	3.27±0.91 b	14.08±3.10 c	9.36±2.31 b	6.70±0.73 b	12.94±1.49 b	19.33±2.03 c	
F	Y	0.834	143.164**	11.171**	58.652**	16.296**	3.252
	D	55.395**	20.128**	21.486**	43.334**	12.018**	16.821**
	N	2.589	42.668**	27.201**	28.884**	68.941**	110.846**
	D * N	3.109*	2.129	3.161*	1.956	1.944	1.167

表3 种植密度和施氮量对再生高粱花后干物质积累的影响

Table 3 Effects of planting densities and nitrogen rates on the dry matter accumulation after anthesis of ratoon sorghum

年份 Year	处理 Treatment	干物质积累量/(g/株) Dry matter accumulation	对籽粒的贡献率/% Contribution of dry matter accumulation to grain
2017	密度(D)		
	LD	16.04±3.44 a	58.04±7.04 c
	MD	16.23±3.17 a	61.09±4.84 b
	HD	16.47±2.82 a	67.22±5.73 a
	施氮量(N)		
	LN	12.94±0.83 c	57.11±4.84 c
2018	密度(D)		
	LD	19.72±4.56 a	61.36±6.83 b
	MD	18.31±4.43 b	60.73±7.11 b
	HD	18.81±5.02 ab	65.02±7.65 a
	施氮量(N)		
	LN	14.37±1.35 c	55.92±2.84 c
F	MN	17.78±1.22 b	59.89±2.78 b
	HN	24.70±4.56 a	71.30±2.94 a
	Y	89.340**	0.140
	D	1.565	32.900**
	N	309.269**	136.491**
	D * N	1.573	2.167

低表现为 LN>MN>HN;茎鞘花前干物质转运量由高到低表现为 MN>LN>HN,茎鞘花前干物质转运率和花前干物质转运量对籽粒的贡献率随施氮量的增大而减小(表2)。花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率均随施氮量的增加而增大(表3)。2018年叶片花前干物质转运量由高到低表现为 MN>LN>HN,其他指标随施氮量的变化趋势均与2017年一致。

种植密度和施氮量的交互作用对叶片花前干物质转运量和对籽粒的贡献率有显著影响(表2)。

#### 2.4 对再生高粱产量及其构成因素的影响

由表4可知,种植密度和施氮量对再生高粱产量及其构成因素均有显著( $P<0.05$ )或极显著影响( $P<0.01$ ),但二者交互作用不显著。产量及其构

成因素在年际间差异极显著( $P<0.01$ ),2018年再生高粱单穗重、千粒重和产量均高于2017年,但2年的变化趋势相似。单穗重随种植密度的增加而减少,LD分别比MD和HD的2年平均单穗重高7.74%和27.34%;单穗重随施氮量的增加而增加,HN分别比LN和MN的2年平均单穗重高26.34%和14.27%。千粒重在主季种植密度之间没有显著差异,但随施氮量的增加而增加,HN分别比LN和MN的2年平均千粒重高9.53%和6.53%。产量随密度和施氮量的增加而增加,HD分别比LD和MD的2年平均产量高17.82%和1.49%,HN分别比LN和MN的2年平均产量高24.23%和14.72%。增施氮肥对高粱再生产量的提升效应大于增密效应。

表 4 种植密度和施氮量对高粱再生季产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of planting densities and nitrogen rates on the yield and yield components of ratoon sorghum

年份(Y) Year	处理 Treatment	单穗重/g Ear weight	千粒重/g 1 000-grain weight	产量/(kg/667 m <sup>2</sup> ) Yield
2017	密度(D)			
	LD	27.63±3.28 a	17.09±0.95 a	143.70±22.46 b
	MD	25.97±3.20 a	16.22±1.27 a	165.13±20.23 a
	HD	21.98±2.60 b	16.55±1.11 a	166.96±13.74 a
	施氮量(N)			
	LN	22.27±2.05 c	15.96±0.99 b	139.91±16.19 c
	MN	25.06±3.54 b	16.41±1.12 b	156.14±13.68 b
	HN	28.25±3.14 a	17.48±0.76 a	179.75±11.26 a
	2018	密度(D)		
LD		31.38±4.10 a	18.31±1.02 a	172.72±10.50 b
MD		28.80±3.82 b	17.38±1.39 a	202.21±28.14 a
HD		24.36±2.79 c	17.73±1.19 a	205.85±21.09 a
施氮量(N)				
LN		25.26±3.38 b	17.10±1.06 b	177.84±17.11 b
MN		27.49±4.12 b	17.58±1.20 b	187.95±16.90 b
HN		31.80±3.77 a	18.73±0.87 a	215.00±26.09 a
F		Y	28.836**	19.123**
	D	44.740**	3.767*	42.299**
	N	42.719**	11.755**	66.960**
	D * N	1.349	1.483	2.122

### 3 讨论

#### 3.1 种植密度和施氮量对高粱再生力的影响

再生芽的萌发主要取决于母茎自身的营养状况<sup>[14]</sup>,适当的密度和施氮量可延长群体维持较高叶面积指数的时间、提高净光合速率、延缓中后期叶片衰老进程<sup>[15]</sup>。主季茎秆贮藏淀粉能够供给再生芽萌发与初期生长所需要的营养<sup>[16]</sup>,收获时母体各部位可溶性糖总量与水稻再生芽数呈显著正相关<sup>[17]</sup>。高粱茎秆淀粉含量受种植密度的影响显著,密度越大,开花期总糖含量越高<sup>[18]</sup>,由此可推测密度越大再生芽数越多,而本研究中,密度越大,高粱再生芽数越少,因而密度对母茎生长状况的影响以及调控再生力的作用机理有待进一步研究。

适当提高主季茎秆干物重可增强水稻再生力<sup>[19]</sup>,甜高粱茎秆的干物重随着施氮量增加而迅速增加,占植株总干物质重比例也逐渐增加<sup>[20]</sup>。氮素有利于提升高粱光合特性及抗氧化酶系统能力<sup>[21]</sup>,提高施氮量可显著提高甜高粱成熟期茎秆总糖含量<sup>[22]</sup>。本研究结果显示,高粱再生芽数和芽长随主季施氮量的增加而增加,可能由于氮素提高了主季植株生育后期的活力,延缓衰老,增加了主季茎秆贮藏物质的含量,从而提高了高粱再生力。

#### 3.2 种植密度和施氮量对再生高粱干物质积累和转运的影响

种植密度可影响茎、叶、穗的干物质积累与分配,进而影响产量<sup>[23]</sup>。饲用甜高粱再生季单株总干重对密度的响应因品种而异,‘晋农大甜饲杂 1 号’

在低密度下单株总干重较高,而‘晋农大甜高粱1号’则相反<sup>[24]</sup>。本研究中,增加密度降低单株干物质重、叶片花前干物质转运量、转运率和对籽粒的贡献率,提高花后干物质积累量对籽粒的贡献率。与主季相比,再生季高粱生育期缩短,株高降低,叶片数和叶面积减少,群体结构改变,从而影响群体的光合性能及干物质的积累与分配,进而影响高粱产量及产量构成。

增施氮肥可延缓叶片衰老,提高光合速率,促进光合产物生成,进而提高干物质积累量,在一定范围内,干物质积累量和花后干物质积累量随施氮量增加而显著提高<sup>[25]</sup>。再生栽培生育期长,作物经历2个完整的生命周期,氮肥对作物生长状况的调控和对产量的影响更为复杂。主季总施氮量固定的情况下,增加主季中后期氮肥施用比例,可以提高再生季叶片硝酸还原酶活性、叶绿素含量、净光合速率及根系活力,增加干物质产量<sup>[26-27]</sup>。本研究中,再生高粱干物质积累量随施氮量的增加而增大,增施氮肥降低了花前营养器官干物质转运率和转运量对籽粒的贡献率,但增加了花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率。

### 3.3 种植密度和施氮量对再生高粱产量的影响

种植密度对高粱产量及产量构成因素影响较大,在一定范围内,高粱产量随着种植密度增加而增加<sup>[28-29]</sup>。王劲松等<sup>[30]</sup>研究发现,在4.5万~7.5万株/hm<sup>2</sup>密度范围内,籽粒产量和穗粒数随着密度增加而显著增加,但千粒重差异不显著。本研究中,高粱再生产量随密度增加而增加,穗粒重随密度增加而减少,千粒重差异不显著。随着密度增加,单位面积穗数显著增加,穗粒数显著减少,而对千粒重没有显著的影响,表明高密度下高粱增产的主要原因是增加了单位面积的穗数<sup>[31]</sup>。

高粱对养分需求量较大,每100 kg籽粒,需氮2.0 kg、磷1.3 kg、钾3.0 kg<sup>[32]</sup>,但同时高粱耐贫瘠且节肥,有研究认为,在肥力良好的土壤上,不建议施用氮肥<sup>[33]</sup>。徐富贤等<sup>[34]</sup>提出,在主季营养充足的情况下,可以少施或者不施促芽肥,而生产实践中主季氮肥在满足主季需要的情况下往往出现富余<sup>[35]</sup>。解振兴等<sup>[36]</sup>结果显示,随主季氮肥增加,再生季穗粒数增加,产量则降低。施氮能够促进高粱的生长,但施氮量过高可能会产生轻微抑制作用<sup>[37]</sup>。本研究中,再生高粱单穗重、千粒重和产量均随主季氮肥用量的增加而增加,表明主季施氮120~225 kg/hm<sup>2</sup>

可在满足主季需要的情况下出现氮肥富余,对高粱再生生长起到了促进作用。

## 4 结 论

主季种植密度和施氮量对高粱再生力和再生产量均有显著影响。增大密度降低高粱的再生力和单株干物质积累量,但能提高再生产量。增施氮肥提高高粱的再生力、单株干物质积累量和再生产量。本试验范围内,以种植密度12.75万株/hm<sup>2</sup>和施氮量225 kg/hm<sup>2</sup>可获得高粱较高的再生产量。

## 参考文献 References

- [1] 王劲松,焦晓燕,丁玉川,董二伟,白文斌,王立革,武爱莲. 粒用高粱养分吸收、产量及品质对氮磷钾营养的响应[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1269-1278  
Wang J S, Jiao X Y, Ding Y C, Dong E W, Bai W B, Wang L G, Wu A L. Response of nutrient uptake, yield and quality to nutrition of nitrogen, phosphorus and potassium in grain sorghum[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(8): 1269-1278 (in Chinese)
- [2] 卢庆善,邹剑秋,朱凯,张志鹏. 试论我国高粱产业发展:一论全国高粱生产优势区[J]. 杂粮作物, 2009, 29(2): 78-80  
Lu Q S, Zou J Q, Zhu K, Zhang Z P. The development of sorghum industry in China: Discussion on the advantageous regions of sorghum production in China[J]. *Horticulture & Seed*, 2009, 29(2): 78-80 (in Chinese)
- [3] Duncan R R, Gardner W A. The influence of ratoon cropping on sweet sorghum yield, sugar production, and insect damage[J]. *Canadian Journal of Plantence*, 1984, 64(2): 261-274
- [4] 赵黎明,李明,郑殿峰,顾春梅,那永光,解保胜. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 159-169  
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 159-169 (in Chinese)
- [5] 柏延文,杨永红,朱亚利,李红杰,薛吉全,张仁和. 种植密度对不同株型玉米冠层光能截获和产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(12): 1868-1879  
Bai Y W, Yang Y H, Zhu Y L, Li H J, Xu J Q, Zhang R H. Effect of planting density on light interception within canopy



- and grain yield of different plant types of maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(12): 1868-1879 (in Chinese)
- [6] 卿国林. 不同密度对杂交中稻—再生稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(14): 6387-6388
- Qing G L. The effects of different density on yield of hybrid medium rice-ratooning rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(14): 6387-6388 (in Chinese)
- [7] 刘仲民, 刘登中. 不同密度下培矮 64S/E32 头季及其再生的产量表现[J]. 湖南农业科学, 2005(5): 24-25
- Liu Z M, Liu D Z. The yield of main season and ratoon rice Peiai 64S/E32 under different planting density [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2005(5): 24-25 (in Chinese)
- [8] 唐小柳. 种植密度对再生高粱光合特性及产量的影响[J]. 农业工程技术, 2017, 37(17): 20, 30
- Tang X L. The effect of planting density on photosynthetic characteristics and yield of ratoon sorghum [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(17): 20, 30 (in Chinese)
- [9] Rodolfo G. Escalada, Donald L. Plucknett. Ratoon cropping of sorghum III effect of nitrogen and cutting height on ratoon performance [J]. *Agronomy Journal*, 1977, 69(3): 341-346
- [10] 黄育民, 李义珍, 蔡亚港, 柯碧娥, 蔡宝盛. 再生稻丰产技术研究: VIII 再生稻株对促芽肥的吸收积累 [J]. 福建稻麦科技, 1995, 13(3): 45-47
- Huang Y M, Li Y Z, Cai Y G, Ke B E, Cai B S. High-yield techniques of ratooning rice: VIII Absorption and accumulation of ratooning rice plant to N application for bud development [J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 1995, 13(3): 45-47 (in Chinese)
- [11] 徐富贤, 熊洪, 张林, 朱永川, 蒋鹏, 郭晓艺, 刘茂. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717
- Xu F X, Xiong H, Zhang L, Zhu Y C, Jiang P, Guo X Y, Liu M. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(9): 1702-1717 (in Chinese)
- [12] Hamdy M, Ali M M A Ekram A M, Ahmed S M. Response of growth parameters, forage quality and yield of dual-purpose sorghum to re-growth and different levels of FYM and N fertilizers in new reclaimed soil [J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 2015, 4(11): 762-782
- [13] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 卓传营, 谢华安. 不同氮肥施用量对再生稻干物质积累运转的影响 [J]. 福建农业学报, 2004, 19(2): 103-107
- Jiang Z W, Lin W X, Li Y Z, Zhuo C Y, Xie H A. Effects of nitrogen fertilizer rates on dry matter accumulation and transportation in ratoon rice [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2004, 19(2): 103-107 (in Chinese)
- [14] 徐富贤, 方文, 熊洪, 江世华, 罗文质, 张景国. 施氮与杂交中稻再生力关系研究 [J]. 杂交水稻, 1993(4): 25-28
- Xu F X, Fang W, Xiong H, Jiang S H, Luo W Z, Zhang J G. A study on relationship between N application and ratooning ability of medium hybrid rice [J]. *Hybrid Rice*, 1993(4): 25-28 (in Chinese)
- [15] 吴亚男, 齐华, 盛耀辉, 王敬亚, 梁熠, 王晓波, 刘明. 密度、氮肥对春玉米光合特性、干物质积累及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 124-127
- Wu Y N, Qi H, Sheng Y H, Wang J Y, Liang Y, Wang X B, Liu M. Effects of sowing density and applying nitrogenous fertilizer on the photosynthesis capacity dry matter accumulation and yield of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(5): 124-127 (in Chinese)
- [16] 廖塵塵, 曹大铭. 再生稻茎秆贮藏淀粉与再生苗生长的细胞化学研究 [J]. 南京农业大学学报, 1991, 14(2): 12-15
- Liao J L, Cao D M. Cyto-chemical studies on storage of culm and ratoon growth in ratooning rice [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1991, 14(2): 12-15 (in Chinese)
- [17] 程建峰, 潘晓云, 曾晓春, 刘宜柏. 水稻再生特性的生理基础研究 II: 头季收获时可溶性糖含量的影响. 江西农业大学学报, 2001, 23(2): 167-170
- Cheng J F, Pan X Y, Zeng X C, Liu Y B. A study on the physiological properties of ratooning rice II: Effects of soluble carbohydrase content during the harvest of main crop [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2001, 23(2): 167-170 (in Chinese)
- [18] Mcbee G G, Miller F R. Carbohydrates in sorghum culms as influenced by cultivars, spacing, and maturity over a diurnal period [J]. *Crop Science*, 1982, 22(2): 381-385
- [19] 徐富贤, 洪松, 熊洪. 促芽肥与杂交中稻再生力关系及其作用机理 [J]. 作物学报, 1997, 23(3): 311-317
- Xu F X, Hong S, Xiong H. Relation between N applying for bud development and ratooning ability and its mechanism in hybrid rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 311-317 (in Chinese)
- [20] 侯昊. 播期与施氮量对甜高粱生长发育及产量品质的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013
- Hou H. Effect of sowing date and nitrogen application rate on growth, yield and quality of sweet sorghum [D]. Changsha:

- Hunan Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [21] 艾雪莹, 吴奇, 周宇飞, 张瑞栋, 陈小飞, 张姣, 黄瑞冬, 许文娟. 干旱-复水条件下氮素对高粱光合特性及抗氧化代谢的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 99-105, 113  
Ai X Y, Wu Q, Zhou Y F, Zhang R D, Chen X F, Zhang J, Huang R D, Xu W J. Effects of nitrogen on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of sorghum under drought stress and re-watering[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 99-105, 113 (in Chinese)
- [22] Almodares A, Taheri R, Chung I M, Fathi M. The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2008, 29(6): 849-852
- [23] 张琳琳, 孙仕军, 陈志君, 姜浩, 张旭东, 迟道才. 不同颜色地膜与种植密度对春玉米干物质积累和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 113-124  
Zhang L L, Sun S J, Chen Z J, Jiang H, Zhang X D, Chi D C. Effects of different colored plastic film mulching and planting density on dry matter accumulation and yield of spring maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 113-124 (in Chinese)
- [24] 王锦涛. 不同种植密度对甜高粱生长发育与产量的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2014  
Wang J T. Effect on different density on the growth and yield of sweet sorghum[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [25] 李广浩, 刘娟, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌, 石德杨. 密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2247-2258  
Li G H, Liu J, Dong S T, Liu P, Zhang J W, Zhao B, Shi D Y. Effects of close planting and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen utilization efficiency of different density-tolerance maize hybrids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2247-2258 (in Chinese)
- [26] 杨东, 陈鸿飞, 卓传营, 林文雄. 头季不同施肥方式对再生稻生理生化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 643-646  
Yang D, Chen H F, Zhuo C Y, Lin W X. Effect of different N application modes in the first cropping rice on the physiobiochemistry of the first cropping rice and its ratoon rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 643-646 (in Chinese)
- [27] 陈鸿飞, 杨东, 梁义元, 张志兴, 梁康迳, 林文雄. 头季稻氮肥运筹对再生稻干物质积累、产量及氮素利用率的影响[J]. 中  
国生态农业学报, 2010, 18(1): 50-56  
Chen H F, Yang D, Liang Y Y, Zhang Z X, Liang K J, Lin W X. Effect of nitrogen application strategy in the first cropping rice on dry matter accumulation, grain yield and nitrogen utilization efficiency of the first cropping rice and its ratoon rice crop [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 50-56 (in Chinese)
- [28] 刘贵锋, 白文斌, 赵建武, 王金转, 郑香萍, 申慧勇. 旱地不同种植密度对中外晚熟矮秆高粱品种农艺性状及产量的影响[J]. 农学学报, 2012, 2(5): 32-35  
Liu G F, Bai W B, Zhao J W, Wang J Z, Zheng X P, Shen H Y. Effects of planting density on agronomic characters and yield of middle-late maturing short-stalked sorghum in dry areas[J]. *Journal of Agriculture*, 2012, 2(5): 32-35 (in Chinese)
- [29] 周峻波, 汪灿, 陆秀娟, 张国兵, 徐燕, 吴兰英, 邵明波. 施肥量和种植密度对糯高粱黔高7号光合特性、农艺性状及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(5): 644-648  
Zhou L B, Wang C, Lu X J, Zhang G B, Xu Y, Wu L Y, Shao M B. Effects of fertilizer application rate and planting density on photosynthetic characteristics, agronomic traits and yield of waxy sorghum Qiangao 7[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(5): 644-648 (in Chinese)
- [30] 王劲松, 杨楠, 董二伟, 王立革, 武爱莲, 丁玉川, 白文斌, 焦晓燕. 不同种植密度对高粱生长、产量及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 253-258  
Wang J S, Yang N, Dong E W, Wang L G, Wu A L, Ding Y C, Bai W B, Jiao X Y. Effect of different plant density on growth, yield and nutrient uptake of sorghum[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(36): 253-258 (in Chinese)
- [31] 杨楠, 丁玉川, 焦晓燕, 王劲松, 董二伟, 王立革, 武萍. 种植密度对高粱群体生理指标、产量及其构成因素的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(7): 11-17  
Yang N, Ding Y C, Jiao X Y, Wang J S, Dong E W, Wang L G, Wu P. Effects of plant density on population physiological indices, grain yield and yield component factors of sorghum[J]. *Journal of Agriculture*, 2013, 3(7): 11-17 (in Chinese)
- [32] 刘延光, 刘艳丰. 高粱高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2011(4): 61, 63  
Liu Y G, Liu Y F. Sorghum high-yield cultivation techniques[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(4): 61, 63 (in Chinese)
- [33] Ceotto E, Castelli F, Moschella A, Diozzi M, Candilo M D. It

is not worthwhile to fertilize sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L Moench) with cattle slurry: Productivity and nitrogen-use efficiency [J]. *Industrial Crops & Products*, 2014, 62: 380-386

- [34] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 王贵雄. 再生稻促芽肥高效施用量与头季稻齐穗期库源结构关系[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(5): 833-837

Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, Wang G X. Relationship between the efficient amount of nitrogen application for bud development and the source-sink structure at full heading stage of main crop [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(5): 833-837 (in Chinese)

- [35] 何海兵, 杨茹, 廖江, 武立权, 孔令聪, 黄义德. 水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(2): 305-318

He H B, Yang R, Liao J, Wu L Q, Kong L C, Huang Y D. Research advance of high-yielding and high efficiency in

resource use and improving grain quality of rice plants under water and nitrogen managements in an irrigated region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (2): 305-318 (in Chinese)

- [36] 解振兴, 卓传营, 林祁, 姜照伟. 头季氮肥不同施用量对再生稻生长发育及产量的影响[J]. *福建农业学报*, 2017, 32(8): 849-853

Xie Z X, Zhuo C Y, Lin Q, Jiang Z W. Effects of nitrogen fertilization on growth and grain yield of ratoon-rice, Tianyouhuazhan [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 32(8): 849-853 (in Chinese)

- [37] 倪玉琼, 张强, 曹方琴, 杨琳. 不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 95-99, 105

Ni Y Q, Zhang Q, Cao F Q, Yang L. Effect of different nitrogen concentrations on *Sorghum bicolor* yield and nutrient accumulation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 95-99, 105 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅