

# 氮肥与播种量互作对燕麦穗部性状及种子产量的影响

贾志锋<sup>1,2</sup>, 马祥<sup>2</sup>, 琚泽亮<sup>2</sup>, 柴继宽<sup>1</sup>, 刘凯强<sup>2</sup>, 赵桂琴<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为明确青燕1号燕麦适宜的氮肥施量和播种量,采用随机区组设计,设置3个播种量和5个施氮水平,研究氮肥和播种量对燕麦穗部性状和种子产量的影响。结果表明,施氮量、播种量及其交互作用对种子产量和穗部性状有显著影响( $P < 0.001$ )。种子产量随施氮量和播种量的增加先增加后降低,最大值出现在90 kg/hm<sup>2</sup>氮肥施用量和180 kg/hm<sup>2</sup>播种量。穗部性状随施氮量和播种量变化明显,穗长、每穗小穗数、每穗粒数、每穗粒重和千粒重均随着施氮量增加先增加后降低,随播种量的增加而降低。燕麦种子产量与穗长和每穗小穗数极显著相关( $P < 0.01$ ),与每穗粒数和每穗粒重之间存在显著相关性( $P < 0.05$ )。因此,90 kg/hm<sup>2</sup>氮肥施用量和180 kg/hm<sup>2</sup>播种量是湟中及周边地区种植燕麦的适宜栽培措施。

**关键词:**燕麦;氮肥;播种量;种子产量;穗部性状

**中图分类号:**S512.604 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)04-0120-08

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.04.016



燕麦(*Avena sativa*)是一年生禾本科粮饲兼用作物,适合在日照时间长、无霜期短和低温的寒冷地区生长。燕麦分布于世界40多个国家和地区,主要集中在北纬40°以北地区,包括亚洲、欧洲和北美,因此,这一地带也被称为北半球燕麦带<sup>[1]</sup>。目前,燕麦世界种植面积约为 $2.5 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,总产量超过4.3亿t<sup>[2]</sup>。在我国,燕麦在北部和西部地区广泛种植,青藏高原是主产区之一,包括青海、西藏、甘肃和四川省的部分地区<sup>[3-6]</sup>。

优化氮肥施量和播种量是优化群体结构、提高作物产量、改善作物品质的有效途径,氮肥施用量和播种

量是影响作物产量的重要农艺措施。氮肥会影响作物的营养和生殖发育,氮素的缺乏会延缓营养生长和生殖生长的物候时期,降低叶量、产量构成要素并最终导致减产<sup>[7]</sup>。Frey<sup>[8]</sup>研究发现施氮增加了燕麦单株小穗数和每穗粒数;Peltonen-Sainio和Jrvinen<sup>[9]</sup>研究表明,与较低的施氮量处理相比,在开花前追施氮肥可以增加燕麦小花的结实率和存活率,并使每穗粒数增加;且上述研究发现氮肥施量的影响因品种而异。燕麦个体良好发育可以提高单株籽粒产量,但同样群体产量收益还受播种量的调控,其作为一项重要的田间管理措施,调节与作物密切相关的目标性状,包括营养和生殖生长、光合作用、产量构成要素等来影响作物产量<sup>[10]</sup>。作物生产中播种量的增加通常对营养和生殖生长分配有很大的影响,过高的播量会造成叶片遮光,降低叶片养分浓度和冠层的光合作用,加速叶片衰老并降低作物种子产量,过低的播量会引起光能利用效率降低,造成生产成本冗余,经济效益下降<sup>[11-14]</sup>。因此,探究适宜的青藏高原地区播种量和氮肥施用量配

收稿日期:2020-09-01; 修回日期:2021-03-31

基金项目:青海省科技厅重点实验室发展专项(2020-ZJ-Y03);国家燕麦荞麦产业技术体系(CARS-07)

作者简介:贾志锋(1978-),男,甘肃金昌人,在读博士。

E-mail:jzhfeng@163.com

赵桂琴为通讯作者。

E-mail:zhaogq@gsau.edu.cn

置技术,对于提升当地燕麦生产力和生产效益,增加该品种在青海省种子产业化中的应用具有重要意义。

青燕 1 号是青海省本地推广新品种,种子需求量逐年增加,但该品种种子田的高产栽培技术尚无相关报道,在实际生产中存在诸如播种量过大或过小以及氮肥施用不合理的问题,急需适合当地生产条件的农艺措施。前人有关氮肥施用量和播种量的研究多数都集中在氮素吸收、种子产量及品质、饲草产量及品质和禾豆混播田管理方面<sup>[15-18]</sup>,而有关氮肥施用量和播种量对燕麦产量形成要素的影响研究较少,尤其是在青藏高原地区。因此,本研究通过评估氮肥施用量和播种量对燕麦穗部性状及种子产量的重要性,确定适宜青藏高原地区燕麦种子生产田的适宜氮肥施用量和播种量,以为当地种植者丰产增收提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于青海省西宁市湟中县鲁沙尔镇东村,地势平坦,地理坐标 E 101°37', N 36°28', 海拔 2 620 m, 气候寒冷潮湿, 无绝对无霜期, 年均气温 3.7℃, 年降水量 553 mm, 且多集中在 7—9 月, 年蒸发量 1 830 mm,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的年积温 1 630.4℃,  $\geq 0^\circ\text{C}$  的年积温 2 773.7℃。地带性植被类型属高山草原, 境内为西宁市主要产粮区之一。土壤为栗钙土, pH 值 7.9, 试验前土壤养分状况为: 有机质含量 18.8 g/kg, 总氮 1.4 g/kg, 速效氮 136 mg/kg, 总磷 0.73 g/kg, 速效磷 22.2 mg/kg, 总钾 24.9 g/kg, 速效钾 98.5 mg/kg (0~30 cm 土层)。前茬作物为荞麦 (*Fagopyrum*)。燕麦生长季的气温及降水见表 1。

### 1.2 供试品种

供试材料青燕 1 号 (*Avena sativa* cv. Qingyan No. 1) 种子, 为 2015 年收获, 来源于青海省畜牧兽医科学院, 种子发芽率为 99.4%。

### 1.3 试验设计

试验于 2016 年开展, 采用随机区组设计, 小区面积 4 m×5 m, 3 次重复, 小区间隔 0.5 m, 区组间隔 1 m。设置 3 个播种量: 60 kg/hm<sup>2</sup> (D1)、180 kg/hm<sup>2</sup> (D2) 和 300 kg/hm<sup>2</sup> (D3)。每个播种量设 5 个不同氮肥施用量: 0 kg/hm<sup>2</sup> (N0)、45 kg/hm<sup>2</sup> (N1)、90 kg/hm<sup>2</sup> (N2)、135 kg/hm<sup>2</sup> (N3) 和 180 kg/hm<sup>2</sup> (N4), 氮肥为尿素 (氮含量为 46%)。除氮肥外, 所有

小区均以 45 kg/hm<sup>2</sup> 过磷酸钙 (有效 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 14%) 作为基肥在种植时一次施入。种植前进行深耕灭茬、耙耱碎土、平整和镇压紧实等一系列作业, 条播深度 4~5 cm, 行距 25 cm。生育期人工除草 2 次, 均无灌溉, 后期保持其他田间管理一致。

表 1 燕麦生长季的气温及降水

Table 1 Temperature and precipitation during oat growing season

时间/月	降水/mm		温度/℃	
	30 年均值 (1986—2015)	2016 年	30 年均值 (1986—2015)	2016 年
04	32.1	29.6	5.5	7.4
05	70.4	55.5	9.9	9.8
06	86.7	54.2	13.1	14.5
07	106.0	109.5	15.2	16.6
08	100.2	41.0	14.2	17.6
09	80.7	81.4	9.9	10.6

### 1.4 观测记载项目

于 2016 年 8 月 25 日燕麦完熟期进行穗部性状的测试分析, 所有采样都不包括边界行。每个小区随机选取 20 株燕麦, 测定植株穗长、每穗小穗数 (NSP)、每穗粒数 (NGP)、每穗种子重量 (WGP) 和千粒重。

种子产量: 每小区随机选取 1 m×1 m 样方, 手工收割后脱粒、装袋、标记, 带回实验室风干后测定种子质量, 计算种子产量。

### 1.5 统计分析

采用 Excel 2019 对数据进行初步整理, 以 SPSS 20.0 软件的 GLM 模型对所有数据进行方差的最小二乘法分析, 数据分析按随机区组试验设计, 阶乘排列处理因素 (3 个播种量 (5 个氮肥施用量), 固定因子为重复、播种量、氮肥施用量及播种量和氮肥施用量的交互作用。当检测到显著差异时, 结合 Duncan 法进行多重比较 ( $P < 0.05$ )。试验误差以均值的标准误 (Standard error of mean, SEM) 表示。

回归分析用 SPSS 20.0 软件进行。将各处理燕麦种子产量数据与穗部性状数据做图。测试了线性、二次方程、双曲线方程和对数方程的适用性, 以描述种子产量响应与穗部性状之间的关系, 以及氮肥施用量和播种量与种子产量和穗部性状之间的关系。确定系数 ( $R^2$ ) 值最高的方程式被认为是最合适的。在回归方程中, 种子产量或播种量或氮肥施用量是自变量 ( $x$ ), 穗部性状或种子产量和穗部性状是因变量 ( $y$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥与播种量互作对燕麦穗部性状及产量的影响

氮肥施用量和播种量对燕麦穗长、每穗小穗数、每穗粒数、每穗粒重、千粒重和种子产量均具有极显著 ( $P < 0.001$ ) 影响。二者交互作用对燕麦穗长、每穗小穗数、每穗粒数、每穗粒重、千粒重和种子产量的影响均达到极显著 ( $P < 0.001$ ) 水平(表 2)。

燕麦穗长随着氮肥施用量的增加呈现先升高后降

低的趋势。当氮肥施用量从 0 增加至 90 kg/hm<sup>2</sup>, 3 种播种量下燕麦穗长均值由 15.46 cm 增加到 26.11 cm, 而氮肥施用量进一步增加至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 燕麦穗长降至 18.69 cm。与氮肥效应不同, 随着播种量的上升, 燕麦穗长总体呈降低趋势, 播种量从 60 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 300 kg/hm<sup>2</sup> 时, 5 个氮肥施用量下燕麦穗长均值从 22.44 cm 下降至 19.65 cm。总体来看, N2D1 处理下燕麦穗长最高, 为 27.22 cm, 显著高于其他各处理, N2D2 处理次之(表 3)。

表 2 氮肥和播种量交互作用下各指标的  $P$  值

Table 2  $P$  value of each factor under the interaction of nitrogen and sowing rate

项目	df	穗长/cm	每穗小穗数	每穗粒数	每穗粒重/g	千粒重/g	种子产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
氮肥	4	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
播种量	2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
氮肥×播种量	8	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001
SEM		0.063	0.342	0.628	0.022	0.042	7.763

注: SEM: 均值的标准误

每穗小穗数受氮肥施用量和播种量的影响明显, 当氮肥施用量从 0 增加至 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, 3 个播种量下燕麦每穗小穗数均值由 63.16 上升到 70.92, 而氮肥施用量进一步增加至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 燕麦每穗小穗数则降至 45.71, 为 5 个氮肥施用量处理中最低。当播种量从 60 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 300 kg/hm<sup>2</sup> 时, 5 个氮肥施用量下燕麦每穗小穗数均值由 75.54 下降至 46.73。最高的燕麦每穗小穗数处理组合为 N2D1, 达到 88.14, 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他各处理, 是 N4D3 处理的 3.3 倍; 其次为 N1D1 处理(表 3)。

每穗粒数对氮肥施用量和播种量的响应与每穗小穗数相似, 随着氮肥施用量的增加呈现先升高后降低的趋势, 当氮肥施用量从 0 增加至 90 kg/hm<sup>2</sup>, 3 个播种量下燕麦每穗粒数均值由 134.77 增加到 158.47, 而氮肥施用量进一步增加至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 燕麦每穗粒数降至 69.15。随着播种量的上升, 5 个氮肥施用量下燕麦每穗粒数均值总体呈降低趋势, 当播种量从 60 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 300 kg/hm<sup>2</sup> 时, 燕麦每穗粒数由 162.68 下降至 85.59。最高的燕麦每穗粒数处理组合为 N2D1, 达 206.39, 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他各处理, N1D1 处理次之。

每穗粒重随着氮肥施用量的增加呈现出先升高后降低的趋势。氮肥施用量从 0 增加至 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, 3 个播种量下燕麦每穗粒重均值由 3.89 g 增加到 5.36 g, 当氮肥施用量进一步增加至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 燕麦每穗粒重则降低至 3.50 g。播种量的影响则不同, 当播种量从 60 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 300 kg/hm<sup>2</sup> 时, 5 个氮肥施用量下燕麦每穗粒重均值由 5.35 g 下降至 4.37 g。最高的燕麦每穗粒重处理组合为 N2D1, 达 6.18 g, 显著高于其他各处理。

千粒重对氮肥施用量和播种量的响应与每穗粒重相似, 随着氮肥施用量的增加呈现出先升高后降低的趋势, 氮肥施用量从 0 增加至 90 kg/hm<sup>2</sup>, 3 个播种量下燕麦千粒重均值由 30.66 g 增加到 36.98 g, 而当氮肥施用量进一步增加至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 燕麦千粒重降至 29.08 g。随着播种量的上升, 5 个氮肥施用量下燕麦千粒重均值总体呈降低趋势, 当播种量从 60 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 300 kg/hm<sup>2</sup>, 燕麦千粒重由 34.46 g 下降至 31.11 g。最高的燕麦千粒重处理组合为 N2D1, 达 38.21 g, 显著高于其他各处理, N2D2 处理次之。

不同氮肥施用量和播种量交互作用下燕麦种子产量波动幅度较大。从相同施氮量下 3 个播种量的平均

表 3 氮肥和播种量对燕麦穗部性状的影响

Table 3 Effects of nitrogen and sowing rate on the panicle characteristics of oat

处理	穗长/cm	每穗小穗数	每穗粒数	每穗粒重/g	千粒重/g	种子产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
N0D1	17.77 <sup>i</sup>	76.12 <sup>c</sup>	174.73 <sup>c</sup>	5.09 <sup>d</sup>	32.38 <sup>e</sup>	2 500.93 <sup>j</sup>
N1D1	22.43 <sup>e</sup>	82.98 <sup>b</sup>	191.59 <sup>b</sup>	5.50 <sup>c</sup>	36.61 <sup>c</sup>	2 668.60 <sup>i</sup>
N2D1	27.22 <sup>a</sup>	88.14 <sup>a</sup>	206.39 <sup>a</sup>	6.18 <sup>a</sup>	38.21 <sup>a</sup>	2 957.30 <sup>e</sup>
N3D1	24.95 <sup>c</sup>	68.12 <sup>de</sup>	140.38 <sup>ef</sup>	5.32 <sup>cd</sup>	34.59 <sup>e</sup>	2 913.10 <sup>gh</sup>
N4D1	19.83 <sup>e</sup>	62.33 <sup>fg</sup>	100.32 <sup>h</sup>	4.66 <sup>e</sup>	30.48 <sup>i</sup>	2 846.17 <sup>h</sup>
N0D2	15.60 <sup>j</sup>	63.57 <sup>fg</sup>	138.08 <sup>f</sup>	4.03 <sup>h</sup>	30.86 <sup>i</sup>	2 919.00 <sup>gh</sup>
N1D2	21.17 <sup>f</sup>	64.93 <sup>ef</sup>	147.39 <sup>de</sup>	4.32 <sup>fg</sup>	35.59 <sup>d</sup>	3 423.97 <sup>e</sup>
N2D2	26.08 <sup>b</sup>	69.02 <sup>d</sup>	150.91 <sup>d</sup>	5.77 <sup>b</sup>	37.23 <sup>b</sup>	4 002.00 <sup>a</sup>
N3D2	23.53 <sup>d</sup>	59.94 <sup>e</sup>	104.94 <sup>h</sup>	4.42 <sup>ef</sup>	33.26 <sup>f</sup>	3 868.63 <sup>b</sup>
N4D2	18.67 <sup>h</sup>	48.31 <sup>j</sup>	63.56 <sup>j</sup>	3.31 <sup>i</sup>	29.55 <sup>j</sup>	3 757.43 <sup>c</sup>
N0D3	13.01 <sup>k</sup>	49.78 <sup>ij</sup>	91.49 <sup>i</sup>	2.55 <sup>k</sup>	28.74 <sup>k</sup>	2 623.53 <sup>i</sup>
N1D3	20.23 <sup>g</sup>	52.77 <sup>hi</sup>	105.56 <sup>h</sup>	2.85 <sup>j</sup>	32.43 <sup>g</sup>	3 153.97 <sup>f</sup>
N2D3	25.03 <sup>c</sup>	55.59 <sup>h</sup>	118.11 <sup>e</sup>	4.15 <sup>gh</sup>	35.49 <sup>d</sup>	3 624.37 <sup>d</sup>
N3D3	22.43 <sup>e</sup>	49.02 <sup>ij</sup>	69.22 <sup>j</sup>	2.68 <sup>jk</sup>	31.71 <sup>h</sup>	3 402.00 <sup>e</sup>
N4D3	17.57 <sup>i</sup>	26.50 <sup>k</sup>	43.56 <sup>k</sup>	2.54 <sup>k</sup>	27.21 <sup>i</sup>	3 201.77 <sup>f</sup>

注:不同小写字母表示同列不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

值来看,随着氮肥施用量从 0 增加至 90 kg/hm<sup>2</sup>,燕麦的种子产量由 2 681.16 kg/hm<sup>2</sup> 上升到 3 527.89 kg/hm<sup>2</sup>,当氮肥施用量增加至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时,燕麦种子产量则呈下降趋势,降至 3 268.46 kg/hm<sup>2</sup>。随着播种量的上升,燕麦种子产量也呈现出先升高后降低的趋势。相同播种量下 5 个氮肥施用量的平均值表明,播种量从 60 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 180 kg/hm<sup>2</sup>,燕麦种子产量从 2 777.22 kg/hm<sup>2</sup> 上升至 3 594.21 kg/hm<sup>2</sup>,当播种量进一步增加至 300 kg/hm<sup>2</sup> 时,燕麦种子产量降至 3 201.13 kg/hm<sup>2</sup>。最高的燕麦种子产量处理组合为 N2D2,达到 4 002.00 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于其他各处理,N3D2 处理次之,为 3 868.63 kg/hm<sup>2</sup>。

## 2.2 种子产量与穗部性状的关系

通过测试线性、二次方程、双曲线方程和对数方程的适用性,比较各模型之间确定系数( $R^2$ )值,发现二次回归方程( $y = a + bx - cx^2$ )的  $R^2$  值最高,被认为是最适宜用以描述燕麦种子产量与穗部性状之间关系的模型。

回归分析表明,不同氮肥施用量和播种量交互作用下燕麦种子产量与穗长和每穗小穗数极显著( $P < 0.01$ )相关(图 1-A 和 1-B);种子产量与每穗粒数和每穗粒重之间存在显著相关性( $P < 0.05$ )(图 1-C 和 1-D);但种子产量与千粒重之间没有显著相关性( $P >$

0.05)(图 1-E)。

## 2.3 氮肥或播种量与穗部性状和产量的关系

通过测试线性、二次方程、双曲线方程和对数方程的适用性,比较各模型之间确定系数( $R^2$ )值,发现二次回归方程( $y = a + bx - cx^2$ )的  $R^2$  值最高,最适宜用来描述氮肥施用量或播种量与种子产量和穗部性状之间关系的模型。

回归分析表明,氮肥施用量与燕麦穗长、每穗小穗数、每穗粒数、每穗粒重、千粒重和种子产量极显著相关( $P < 0.01$ ), $R^2 \geq 0.2$ 。播种量与燕麦每穗小穗数、每穗粒数、每穗粒重、千粒重和种子产量之间存在显著( $P < 0.05$ )相关性;但与穗长之间没有显著相关性( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

品种、田间管理和环境(土壤和气候)是相互作用的三组因素,它们共同决定了燕麦的生长发育,包括茎叶结构和穗部性状<sup>[18]</sup>。施用氮肥和播种量是最重要的两种作物田间管理方式。前人研究表明,在氮素缺乏的情况下,作物种子产量与产量构成要素显著相关,并且叶片的光合作用速率降低<sup>[19]</sup>。同样,本研究中,燕麦种子产量与穗长、每穗小穗数、每穗粒数和每穗粒重之间存在显著( $P < 0.05$ )相关性,这表明燕麦穗部

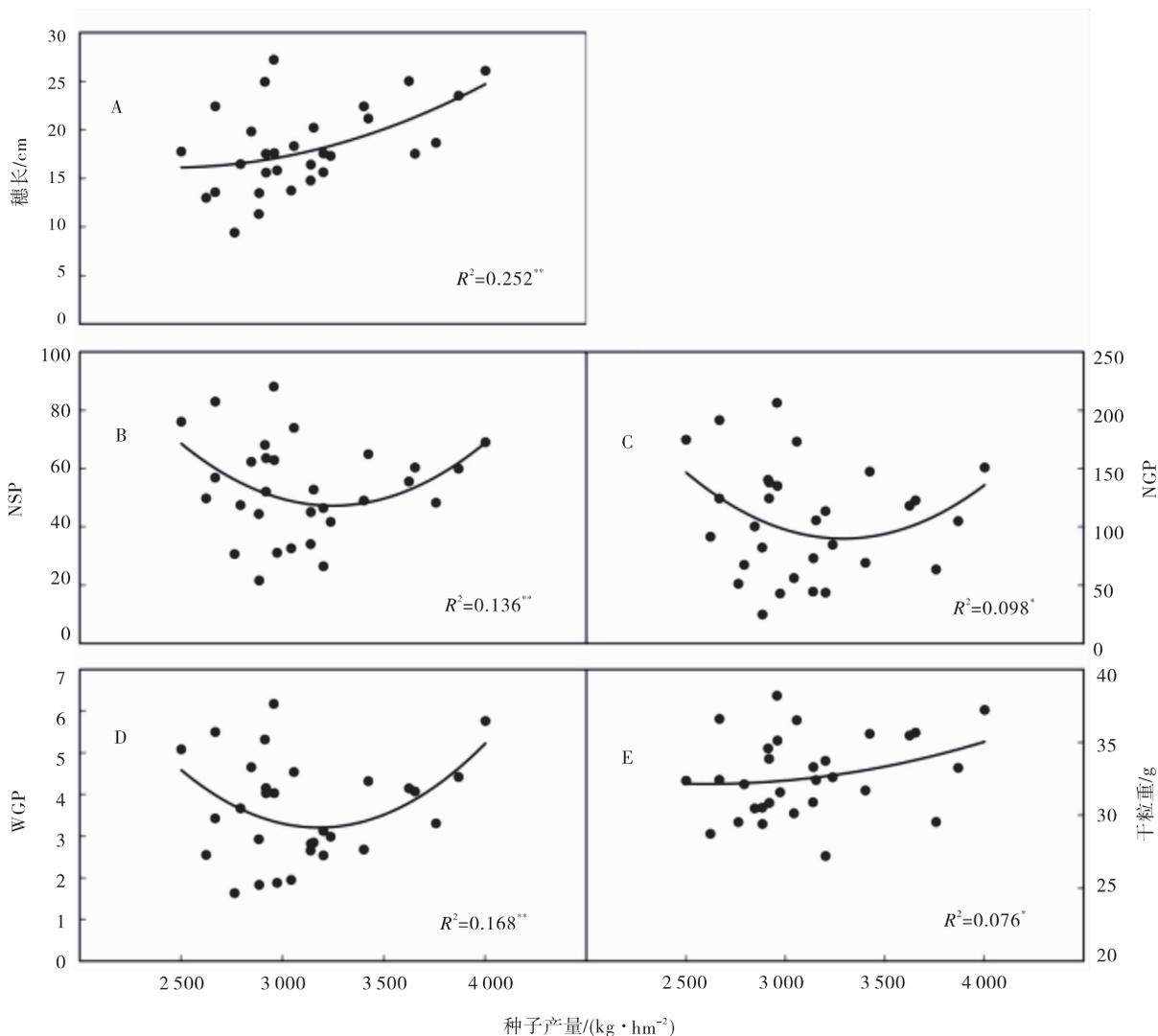


图 1 燕麦种子产量与穗部性状的关系

Figure 1 The relationship between oat grain yield and panicle characteristics

注: NSP: 每穗小穗数, NGP: 每穗粒数, WGP: 每穗粒重; ns 表示差异不显著, \* 和 \*\* 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平上差异显著

表 4 氮肥或播种量与穗部性状和种子产量的关系

Table 4 The relationship between grain yield, panicle characteristics and nitrogen fertilizer/sowing rate

指标	氮肥( $x_1$ )	播种量( $x_2$ )
穗长( $y_1$ )	$y_1 = -0.001x_1^2 + 0.203x_1 + 15.152 (R^2 = 0.871^{**})$	$y_1 = -0.000003x_2^2 - 0.013x_2 + 23.187 (R^2 = 0.084^{ns})$
每穗小穗数( $y_2$ )	$y_2 = -0.002x_1^2 + 0.223x_1 + 62.546 (R^2 = 0.323^{**})$	$y_2 = 0.000001x_2^2 - 0.119x_2 + 82.711 (R^2 = 0.618^{**})$
每穗粒数( $y_3$ )	$y_3 = -0.006x_1^2 + 0.642x_1 + 134.843 (R^2 = 0.472^{**})$	$y_3 = 0.0001x_2^2 - 0.400x_2 + 185.906 (R^2 = 0.476^{**})$
每穗粒重( $y_4$ )	$y_4 = -0.0001x_1^2 + 0.025x_1 + 3.782 (R^2 = 0.200^{**})$	$y_4 = -0.00002x_2^2 - 0.005x_2 + 5.675 (R^2 = 0.690^{**})$
千粒重( $y_5$ )	$y_5 = -0.001x_1^2 + 0.132x_1 + 30.707 (R^2 = 0.766^{**})$	$y_5 = -0.00004x_2^2 - 0.001x_2 + 34.648 (R^2 = 0.190^{**})$
种子产量( $y_6$ )	$y_6 = -0.058x_1^2 + 13.675x_1 + 2660.122 (R^2 = 0.392^{**})$	$y_6 = -0.042x_2^2 + 16.892x_2 + 1914.952 (R^2 = 0.530^{**})$

注: ns 表示差异不显著, \*\* 表示在  $P < 0.01$  水平上差异显著

发育是决定燕麦种子产量的关键因素。同时,从 2016 年燕麦生育期内的降水和温度与长期降水和温度(30

年)均值的比较可以发现,2016 年较为干旱,尤其是 6 月和 8 月,但并未影响 2016 年燕麦产量。前人研究表

明,花期前是作物非常敏感的时期,光热商(辐射/温度)和降水量对每穗粒数和产量有显著影响<sup>[20-22]</sup>。因此,出现这种现象的原因可能是氮肥和气候条件会影响作物的营养和生殖发育的能量分配。本研究中燕麦的生殖生长阶段主要在7月,而7月降水总量较长期平均水平为高,使得生殖生长阶段能量供应充足,因此种子生长发育未受较大影响。Anderson和McLean<sup>[23]</sup>也得出了类似的结论,在西澳大利亚燕麦对施用氮肥的产量响应取决于土壤氮素状况、季节性降水、播种日期、播种率和品种。

禾本科作物的种子产量取决于光合作用及同化物的运输和分配效率,氮离子在这些过程中起着关键作用。氮肥有助于增加叶面积指数、提高辐射拦截率和辐射利用效率、使光合产物分配至生殖器官、提高植物和种子的蛋白质含量<sup>[24]</sup>。先前研究表明,氮素缺乏会降低小麦<sup>[25]</sup>、玉米<sup>[26]</sup>和高粱<sup>[27]</sup>的产量。本研究中,随着氮肥施用量从0 kg/hm<sup>2</sup>增加至90 kg/hm<sup>2</sup>,燕麦穗部性状和种子产量呈上升趋势,然后当氮肥从90 kg/hm<sup>2</sup>增加至180 kg/hm<sup>2</sup>时,燕麦穗部性状和种子产量呈下降趋势。当氮肥施用量适宜时,小穗内的小花受精率增加,使得成熟种子数量增加<sup>[9]</sup>。减少小花败育和增加氮素利用率可增加作物种子产量<sup>[28]</sup>。较高的氮肥施用量下穗部性状和种子产量下降的原因可能是由于氮肥充足,遮荫对叶片的弱光照促进了叶片和茎秆的发育,降低了生殖生长的能量分配。且燕麦在氮肥充足时生长过高,会增加倒伏的风险,不利于种子生产。这说明过量的氮肥也不利于燕麦种子田的生产,适宜的氮肥施用量对燕麦种子生产至关重要。前人研究指出,产量主要取决于谷物种子数量而不是重量<sup>[29]</sup>,每穗小穗数和每穗粒数都可以影响种子数目,进而影响种子产量。本研究中,回归分析表明,燕麦种子产量与每穗小穗数和每穗粒数之间存在显著( $P < 0.05$ )相关性,但与千粒重之间没有显著相关性( $P > 0.05$ ),与先前的报道一致。

播种量是协调作物群体与个体之间矛盾的最重要因素之一<sup>[7]</sup>。一般而言,增加作物播种量可以提高大多数农作物的种子产量,但高播量也可能导致产量降低<sup>[30]</sup>。本研究中,在180 kg/hm<sup>2</sup>播种量下,燕麦种子产量最高,当播种量进一步增加至300 kg/hm<sup>2</sup>时,量明显降低。种子产量下降的原因可能是遮荫使叶片的光照减弱和高播量下个体间的竞争加剧<sup>[31]</sup>。穗部性

状值随着播量的增加而降低,在60 kg/hm<sup>2</sup>的播种量下穗部性状值最高。显然,低播量下的低竞争性使得燕麦可以更好地利用有效光来提高穗部性状。前人研究发现,在燕麦田中,随着播种量的降低,分蘖、每穗粒数和收获指数均增加的原因是每株植物拥有更大的空间<sup>[9]</sup>。可见播种量对燕麦种子产量的影响也很大,研究其与氮肥交互作用下燕麦穗部性状及种子产量的响应规律,对规范栽培技术、促进增产增收具有指导意义和实践价值。

## 4 结论

氮肥施用量和播种量对燕麦穗部性状和种子产量有显著影响。随着施氮量和播种量的增加,燕麦种子产量先增加后降低。穗部性状值随施氮量的增加先增加后降低,随播种量的增加而降低。在湟中及周边地区,燕麦种植适宜的施氮量为90 kg/hm<sup>2</sup>,播种量为180 kg/hm<sup>2</sup>。

### 参考文献:

- [1] Marshall A, Cowan S, Edwards S, *et al.* Crops that feed the world 9. Oats — a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. *Food Security*, 2013, 5(1):13—33.
- [2] Gorash A, Armonien? R, Mitchell Fetch J, *et al.* Aspects in oat breeding: nutrition quality, nakedness and disease resistance, challenges and perspectives[J]. *Annals of Applied Biology*, 2017, 171(3):281—302.
- [3] Li X, Li M, Ling A, *et al.* Effects of genotype and environment on avenanthramides and antioxidant activity of oats grown in northwestern China[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 73:130—137.
- [4] 据泽亮,赵桂琴,覃方铨,等.青贮时间及添加剂对高寒牧区燕麦—箭筈豌豆混播捆裹青贮发酵品质的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(6):148—157.
- [5] 张毕阳,赵桂琴.燕麦干草与青贮玉米不同组合对绵羊生产性能和消化代谢的影响[J]. *草原与草坪*, 2018, 38(2):19—24.
- [6] 李世丹,陈仕勇,马莉,等.青藏高原川西北高寒牧区黑麦青贮饲料中耐低温乳酸菌的分离与鉴定[J]. *草原与草坪*, 2018, 38(6):79—82+88.
- [7] Fang X, Li Y, Nie J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buck-

- wheat( *Fagopyrum esculentum* M. ) [J]. Field Crops Research, 2018, 219: 160–168.
- [8] Frey K J. Yield Components in Oats. II. The Effect of Nitrogen Fertilization [J]. Agronomy Journal, 1959, 51(10): 605–608.
- [9] Peltonen Sainio P, Jrvinen P. Seeding rate effects on tillering, grain yield, and yield components of oat at high latitude [J]. Field Crops Research, 1995, 40: 49–56.
- [10] Ciampitti I A, Vyn T J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages [J]. Field Crops Research, 2011, 121(1): 2–18.
- [11] Yan P, Zhang Q, Shuai X F, *et al.* Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize grain yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain [J]. The Journal of Agricultural Science, 2015, 154(6): 978–988.
- [12] Vos J, Van Der Putten P, Birch C. Effect of nitrogen supply on leaf appearance, leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in maize (*Zea mays*) [J]. Field Crops Research, 2005, 93(1): 64–73.
- [13] Andrade F H, Vega C, Uhart S, *et al.* Kernel number determination in maize [J]. Crop Science, 1999, 39(2): 453–459.
- [14] Tollenaar M, Aguilera A, Nissanka S P. Grain yield is reduced more by weed interference in an old than in a new maize hybrid [J]. Agronomy Journal, 1997, 89(2): 239–246.
- [15] Klikocka H, Cybulska M, Barczak B, *et al.* The effect of sulphur and nitrogen fertilization on grain yield and technological quality of spring wheat [J]. Plant Soil and Environment, 2016, 62(5): 230–236.
- [26] Neugschwandtner R W, Kaul H-P. Sowing ratio and N fertilization affect yield and yield components of oat and pea in intercrops [J]. Field Crops Research, 2014, 155: 159–163.
- [17] Neumann A, Schmidtke K, Rauber R. Effects of crop density and tillage system on grain yield and N uptake from soil and atmosphere of sole and intercropped pea and oat [J]. Field Crops Research, 2007, 100(2-3): 285–293.
- [18] White E, Finnan J. Crop structure in winter oats and the effect of nitrogen on quality-related characters [J]. Journal of Crop Improvement, 2017, 31(6): 758–779.
- [19] Olszewski J, Makowska M, Pszczółkowska A, *et al.* The effect of nitrogen fertilization on flag leaf and ear photosynthesis and grain yield of spring wheat [J]. Plant Soil and Environment, 2014, 60(12): 531–536.
- [20] Inoue T, Inanaga S, Sugimoto Y, *et al.* Effect of drought on ear and flag leaf photosynthesis of two wheat cultivars differing in drought resistance [J]. Photosynthetica, 2004, 42(2): 559–565.
- [21] Fischer R. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature [J]. The Journal of Agricultural Science, 1985, 105(2): 447–461.
- [22] Zhao B, Ma B-L, Hu Y, *et al.* Source Sink Adjustment; A Mechanistic Understanding of the Timing and Severity of Drought Stress on Photosynthesis and Grain Yields of Two Contrasting Oat (*Avena sativa*) Genotypes [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020,
- [23] Anderson W, Mclean R. Increased responsiveness of short oat cultivars to early sowing, nitrogen fertilizer and seed rate [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1989, 40(4): 729–744.
- [24] Dordas C A, Sioulas C. Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions [J]. Industrial crops and products, 2008, 27(1): 75–85.
- [25] Langer R H M, Liew F K Y. Effects of varying nitrogen supply at different stages of the reproductive phase on spikelet and grain production and on grain nitrogen in wheat [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1973, 24(5): 647–656.
- [26] Ding L, Wang K, Jiang G, *et al.* Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years [J]. Annals of Botany, 2005, 96(5): 925–930.
- [27] Zhao D, Reddy K R, Kakani V G, *et al.* Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum [J]. European journal of agronomy, 2005, 22(4): 391–403.
- [28] Ferrante A, Savin R, Slafer G A. Floret development and grain setting differences between modern durum wheats under contrasting nitrogen availability [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 64(1): 169–184.
- [29] Ferrante A, Savin R, Slafer G A. Floret development of durum wheat in response to nitrogen availability [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(15): 4351–

4359.

[30] Li P F, Mo F, Li D, *et al.* Exploring agronomic strategies to improve oat productivity and control weeds; Leaf type, row spacing and planting density [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2018, 98(5):1084–1093.

[31] Ma N, Yuan J, Li M, *et al.* Ideotype population exploration: growth, photosynthesis, and yield components at different planting densities in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *PloS One*, 2014, 9(12):e114232.

## Interactive effects of nitrogen and sowing rate on grain yield and panicle development of oat

JIA Zhi-feng<sup>1,2</sup>, MA Xiang<sup>2</sup>, JU Ze-liang<sup>2</sup>, CHAI Ji-kuan<sup>1</sup>, LIU Kai-qiang<sup>2</sup>,  
ZHAO Gui-qin<sup>1</sup>

(1. *College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China*; 2. *Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Academy of Animal Husbandry and Veterinary Sciences, Qinghai University, Qinghai Xining 810016, China*)

**Abstract:** This study used a combination of three sowing rates and five nitrogen application rates in a randomized block design to study the effects of nitrogen fertilizer and density on panicle characters and grain yield of oats cv. Qingyan No. 1. The results showed that nitrogen application rate, sowing rate and their interaction had significant effects on grain yield and panicle characteristics ( $P < 0.001$ ). Seed yield initially increased and followed by a decrease in response to the increasing application rate of nitrogen and sowing density, with the maximum value appeared under a combination of 90 kg/ha nitrogen application rate with 180 kg/ha sowing density (N2D2). Panicle traits changed significantly with nitrogen application rate and sowing density. Panicle length, number of spikelets per panicle, number of grains per panicle, grain weight per panicle and 1000-kernel weight increased initially and followed by a reduction along the increasing nitrogen application rate, while decreased with the increased sowing rate. The seed yield of oat was significantly correlated with panicle length and number of spikelets per panicle ( $P < 0.01$ ), and with number of grains per panicle and weight of grains per panicle ( $P < 0.05$ ). Therefore, the combination of 90 kg/ha nitrogen fertilizer and a sowing density of 180 kg/ha would be suitable cultivation measures for oats in Huangzhong and surrounding areas.

**Key words:** oat; nitrogen; sowing rate; grain yield; panicle development