



不同种植密度与施肥量对青稞分蘖动态及群体结构的影响

郭案铭^{1,2,3}, 吴昆仑^{1,2,3}, 姚晓华^{1,2,3}, 郭童鑫^{1,2,3}, 姚有华^{1,2,3}

(1. 青海大学农林科学院, 西宁 810016; 2. 青海省青稞遗传育种重点实验室/国家麦类改良中心
青海青稞分中心, 西宁 810016; 3. 青藏高原种质资源研究与利用实验室, 西宁 810016)

摘要 为探究施肥量和种植密度互作对青稞分蘖变化、群体结构及产量的影响,以‘昆仑14号’为供试材料,于大田条件下设置不施肥(FC1)、少量施肥(FC2:尿素 37.5 kg·hm⁻²、磷酸二铵 75 kg·hm⁻²)、适量施肥(FC3:尿素 75 kg·hm⁻²、磷酸二铵 150.0 kg·hm⁻²)和过量施肥(FC4:尿素 150.0 kg·hm⁻²、磷酸二铵 300 kg·hm⁻²)4个施肥处理和低密度(LD:播量 225 kg·hm⁻²)、中密度(MD:播量 262.5 kg·hm⁻²)和高密度(HD:播量 300 kg·hm⁻²)3个播种密度处理。结果表明,随着生育期的推进,单株分蘖数随施肥量和播种密度的增加表现为先增加后降低的趋势,且在FC3施肥处理下,青稞分蘖效果最好,在MD播种密度下,FC2处理下的分蘖成穗率最高,为84.69%。与不施肥处理相比,3个肥密互作下的青稞产量增产率分别为4.22%~14.68%、5.17%~8.72%、7.45%~10.21%,穗数、有效穗数、穗粒质量和千粒质量均随施肥量和播种量的增加呈先增加后降低的趋势。根据产量相关性分析可知,施肥量与有效穗数、穗粒质量呈极显著相关,播种密度与穗数呈极显著相关,肥密互作对穗数呈极显著相关,与株高、千粒质量呈显著相关,有效穗数与ZT/IAA的比值呈显著相关。在本试验条件下,FC3和LD组合是实现青稞促蘖增穗、高产、节本增效的合理肥密运筹方式。

关键词 青稞;播种密度;施肥量;分蘖动态;群体结构

青稞(*Hordeum vulgare* Linn. var. *nudum* Hook. f.)属禾本科大麦属,因其籽粒内外稃与颖果分离,故称裸大麦,在青藏高原地区称为青稞^[1]。青稞是最能适应青藏高原自然环境的优势作物和藏族的基本口粮作物^[2-3],确保青稞稳产和增产对保证藏区粮食安全、维护藏区社会稳定具有重大意义。

分蘖是决定禾本科作物产量的重要农艺性状^[4-5],其发生数和成穗率可直接影响群体结构的优劣,通过调控分蘖进而调节和优化群体结构,是夺得高产的重要环节^[6-9]。作物分蘖性强弱主要取决于自身基因型,还受温度^[10]、水分和光照^[11]以及栽培管理措施^[12]的影响,而栽培管理措施对分蘖的发生与成穗有较大的调控作用,其中以播种密度和施肥措施对分蘖的影响尤为明显^[6,9,11]。前人研究表明,合理的栽培密度和施肥量是调控作物分蘖的关键技术^[8,13],合理的栽培密度可有

效利用光能,充分利用地力,保证个体的正常发育和群体的协调发展,从而使群体干物质积累、分蘖、单位面积穗数、穗粒数和千粒质量得到统一,进而获得高产^[13-14];合理施肥可明显改善植株体内的营养代谢和内源激素水平,可有效促进群体的生长、特别是分蘖的发生,使群体结构更加合理^[7,9]。国内外研究表明,单位面积穗数作为作物产量构成因素之一,主要取决于分蘖发生数量与成穗率的高低^[4,6],通过增穗,可以显著提高作物产量,而增加或减少栽培密度,虽可调节作物的分蘖特性,但能否达到增穗的目的,还要取决于适宜的养分管理方式,合理栽培密度和养分管理措施的配合应用,可显著提高作物群体分蘖成穗率和产量^[7,9,15-17]。因此,通过适宜种植密度与养分管理协同栽培技术的应用,合理利用分蘖,达到高产所需穗数和粒数的协调发展,是确保作物高产的关键。

收稿日期:2024-01-09 修回日期:2024-03-30

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2301300);青海省2023年创新平台建设专项(1_5);国家大麦青稞产业技术体系(CARS-05-01A-05)。

第一作者:郭案铭,男,硕士研究生,主要从事作物高产栽培与生理生化研究。E-mail:luoko888@163.com

通信作者:姚有华,男,副研究员,主要从事麦类作物育种与栽培研究。E-mail:youthua888@126.com

青稞生产受严酷自然条件^[18]和传统栽培技术的约束^[19],导致选育的优良新品种在穗粒数和粒质量基本稳定前提下,分蘖成穗率低,增产潜力得不到发挥,进而影响着青稞的丰产和稳产,因此,促蘖增穗是进一步挖掘青稞产量的有效途径^[19-20]。在影响青稞产量的诸多因子中,除光、温和水(旱地)等不可控因子^[18],肥料、密度作为较易调节的关键可控因子^[21],在青稞增产中起到了积极作用,而单位面积穗数作为产量构成要素之一^[22],也必将受肥、密调控的影响,因此,深入了解不同肥、密措施下的青稞分蘖成穗特性,对于稳定调控其高产群体的形成意义重大,但未见相关报道。本试验通过比较研究不同播种密度和施肥组合交互作用对青稞分蘖动态及群体结构的影响,揭示青稞分蘖发生数和成穗率与群体生产力的关系,探明有助于青稞促蘖增穗和高产群体结构建成的肥、密调控措施,以期为青稞的分蘖合理利用和高产栽培提供理论与实践依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

‘昆仑 14 号’属粮草双高型青稞品种,由青海省农林科学院自主选育,通过农业部登记和青海省审定。植株繁茂性强,丰产性好,品质优良,适应性广。主茎总叶片数 8 个,伸长节间数 5 个,株高 109.53 ± 2.25 cm,旗叶长 21.05 ± 0.38 cm,叶绿色,叶姿下垂,主茎基部第一节间长 2.73 ± 0.07 cm,穗下节长 38.55 ± 2.03 cm,单株分蘖数 2.20 ± 1.30 个,穗茎弯垂,每 667 m^2 产 300~400 kg。

1.2 试验地概况

在青海省西宁市二十里铺镇农林科学院种质资源创新试验基地进行定位试验($36^{\circ}62'N, 101^{\circ}77'E$)。该地属青海省东部湟水河流域灌区,海拔 2309.00 m。土壤类型为栗钙土,体积质量 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水率 15.20% ,耕层有机质含量 $22.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $1.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $37.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。为避免春旱导致青稞出苗差的不利因素,试验地于秋收后耕层土壤封冻前做充分灌溉处理(11 月上旬),冬季封冻(11 月中下旬至来年 3 月上旬),来年早春顶凌播种(3 月下旬至 4 月上旬),整个生育期模拟典型青稞生长环境,不作灌水处理。2023 年青稞生育期内(4 月—8 月)降雨量分别为 295.6、321.6、376.2

mm,平均气温分别为 14.7°C 、 14.3°C 、 15.1°C 。

1.3 试验设计

采用双因素裂区试验,主区为施肥组合(Fertilization combinations, FC),按生产常规施肥,肥料选用尿素 $[\omega(\text{N})=46\%]$ 和磷酸二铵 $[\omega(\text{N})=18\%, \omega(\text{P}_2\text{O}_5)=46\%]$,设 FC_1 (CK, 不施肥)、 FC_2 (尿素 $37.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 FC_3 (尿素 $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 FC_4 (尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $300.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)4 个施肥组合。副区为种植密度,设低密度(Low density, LD, 播量 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基本苗 $280 \text{ 万} \cdot \text{hm}^{-2}$)、中密度(Medium density, MD, 播量 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基本苗 $315 \text{ 万} \cdot \text{hm}^{-2}$)和高密度(High density, HD, 播量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基本苗 $360 \text{ 万} \cdot \text{hm}^{-2}$)3 个水平;共 12 个处理,设 3 个区组,随机排列,共 36 个小区;小区行长 3 m,等行距播种,行距 0.20 m,每小区 10 行,小区面积 6 m^2 。肥料在播种前按生产常规均作为基肥一次性均匀撒入小区,在人工开沟播种时翻入耕层,后期不追肥,播种采用人工开沟均匀溜播。整个生育期不灌水,其他管理同一般大田。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 茎蘖动态调查 每小区选择植株长势一致处插牌定点(0.5 m 双行),拔节前每 5 d 观察 1 次,拔节后每 7 d 观察 1 次,成熟期观察 1 次。

1.4.2 植物内源激素测定 于分蘖盛期取样,从分蘖节中采集鲜样, -80°C 保存,用高效液相色谱法^[23]测定生长素(IAA, Indole acetic acid)和玉米素(ZT, Zeatin)含量,样品重复测定 3 次,取平均值。

1.4.3 群体结构及产量构成因素调查 每小区选择植株长势一致处定点样方($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} = 0.25 \text{ m}^2$),于 3 叶期、拔节期和抽穗期,分别调查基本苗数和穗数;成熟期每小区随机选择 10 株,调查单株分蘖数、有效穗数、每穗粒数、单株粒质量和千粒质量;成熟期每小区全部收获称量,测定小区产量;测定以上指标时均设 3 次重复,取平均值。

1.5 数据处理与分析

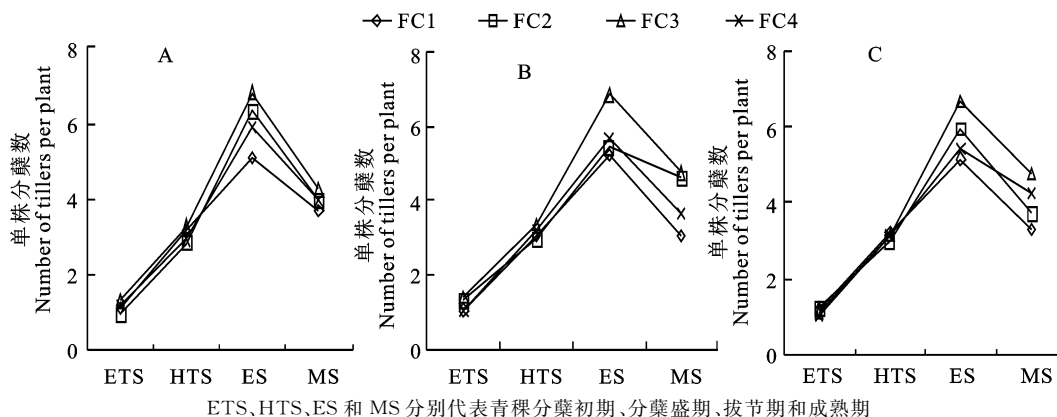
对试验数据取平均值,采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 26.2 软件处理数据与统计分析, Origin 2023 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同肥密运筹对青稞分蘖动态和群体结构的影响

2.1.1 青稞分蘖动态变化 由图 1 可知,随着青稞生育期的推进,单株分蘖数在不同施肥处理、播种密度下均表现为先增加后降低的趋势。在分蘖初期(ETS)和分蘖盛期(HTS)时期,LD、MD 和 HD 3 个播种密度和 4 个不同施肥处理互作下

单株分蘖数差异不显著;在拔节期(ES)时期,不同施肥处理间分蘖数存在显著差异,且在 3 个播种密度下均以 FC3(尿素 75.0 kg·hm⁻²、磷酸二铵 150 kg·hm⁻²)处理下分蘖数最高,在同一施肥处理、不同播种密度下青稞分蘖数差异不显著,表明播种密度对参试青稞分蘖数的影响不是很大。仅分蘖而言,表明 ES 是促进青稞分蘖成穗的关键时期,施肥量为 FC3(尿素 75.0 kg·hm⁻²、磷酸二铵 150 kg·hm⁻²)是参试青稞的最佳施肥量。



ETS, HTS, ES and MS represent the early tillering stage, full tillering stage, nodulation stage and maturity stage of barley, respectively

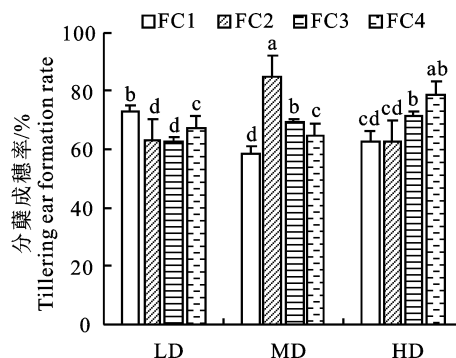
图 1 不同播种密度和施肥量互作条件下的青稞分蘖

Fig. 1 Effect of different sowing densities and fertilizer application interactions on barley tillering

2.1.2 青稞分蘖成穗率 青稞分蘖成穗率是衡量青稞群体结构质量的重要指标之一。从图 2 可以看出,在 LD 播种密度处理下,FC1 施肥处理下的分蘖成穗率最高,为 72.83%,分蘖成穗率依次为 FC1>FC4>FC2>FC3;在 MD 播种密度下,FC2 处理下的分蘖成穗率最高,为 84.69%,分蘖成穗率为 FC2>FC3>FC4>FC1;在 HD 播种密度处理下,FC4 处理下的青稞分蘖成穗率最高,为 78.71%,分蘖成穗率为 FC4>FC3>FC1>FC2。

2.2 不同肥密运筹对青稞内源激素含量变化的影响

播种密度和施肥量的多少对内源激素含量有显著影响,如图 3 所示,在 3 个播种密度处理下,FC4 施肥处理时的 ZT 含量均高于另外 3 个施肥处理,即在同一播种密度下施肥水平高的青稞分蘖节中 ZT 含量也高。由图 3 可知,在 LD 播种密度处理下,IAA 含量随施肥量的增加呈现出先增加后降低的趋势,在 FC2 施肥处理下含量最高;在 MD 播种密度下,IAA 含量随施肥量的增加呈显著上升趋势,在 FC4 施肥处理下含量最高;在 HD 播种密度下,IAA 含量随施肥量的增加呈降低趋势,在 FC3 施肥处理下含量最高。



不同小写字母表示各播种密度处理下不同施肥量间差异在 0.05 水平显著,下同

Different lowercase letters between different fertilizer application rate indicate significant difference at 0.05 level, the same below

图 2 不同播种密度和施肥量互作条件下的青稞分蘖成穗率

Fig. 2 Effect of different sowing densities and fertilizer application rates on barley tiller spike formation rate

2.3 不同肥密运筹互作对青稞产量及其构成因子的影响

2.3.1 肥料和播种密度互作对产量的影响 施肥量和播种密度均显著影响青稞产量(表 1),随

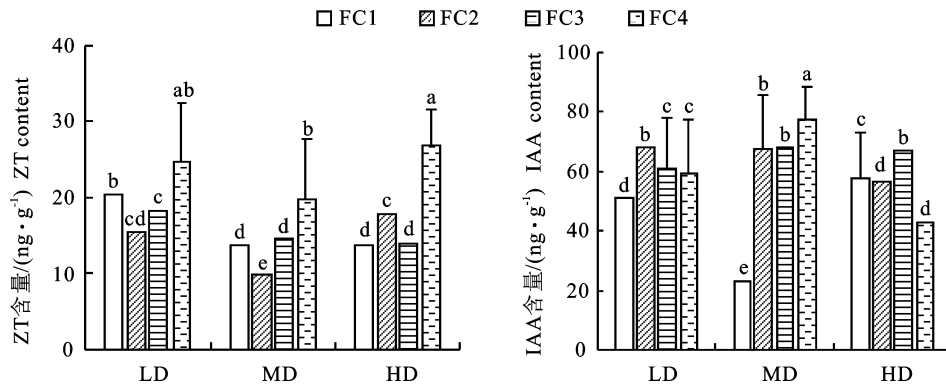


图3 不同播种密度和施肥量互作条件下青稞分蘖节中内源激素含量

Fig. 3 Effect of different sowing densities and fertilizer interactions on endogenous hormone content in barley tiller nodes

着施肥量和播种密度的增加,呈现出先上升后降低的趋势。LD(播量 225 kg·hm⁻²)、HD(300 kg·hm⁻²)处理下的产量均在 FC3 施肥处理下最高,MD(播量 262.5 kg·hm⁻²)在 FC2 处理下产量最高,与 FC1 施肥处理相比,分别增产 929.35、656.72、565.59 kg·hm⁻²,增产率为 14.68%、10.21%、8.72%;与不施肥相比,LD 播种密度下 3 个施肥处理的青稞产量分别增产 267.36、929.38、357.40 kg·hm⁻²,增产率为 4.22%、14.68%、5.65%,MD 播种密度下 3 个施肥处理的青稞产量分别增产 565.59、476.01、

335.48 kg·hm⁻²,增产率为 8.72%、7.33%、5.17%,HD 播种密度下 3 个施肥处理的青稞产量分别增产 542.78、656.72、479.41 kg·hm⁻²,增产率分别为 8.44%、10.21%、7.45%。不施肥时,产量随播种密度的增加表现出先上升后降低的趋势,随着肥料的增加(FC1、FC2 和 FC3),MD 和 HD 处理下的产量差异无显著差异;施肥量为 FC3 时,3 个不同播种密度处理下的产量反而下降。表明合理的播种密度与施肥量的多少有一定的关系,施肥量较少时适当密植,施肥量较多是适当减少播种密度。

表 1 不同播种密度和施肥量互作条件下的产量及其构成因素

Table 1 Effects of different seeding densities and fertilization rates on yield and its components

| 种密度 Sowing density | 施肥处理 Fertilizer treatments | 株高/cm Plant height | 穗数(×10 ⁶) Number of ears | 有效穗数 Number of effective spikes | 穗粒质量/g Kernel mass | 千粒质量/g Thousand- grain mass | 产量/ (kg·hm ⁻²) Yield |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|
| LD | FC1 | 115.26±7.03 c | 3.77±0.05 c | 3.69±0.90 c | 3.25±0.16 d | 52.33±0.23 d | 6 330.94±162.47 d |
| | FC2 | 114.34±5.78 c | 4.27±0.11 b | 4.00±1.25 b | 3.28±0.16 d | 51.83±3.29 d | 6 598.30±486.17 c |
| | FC3 | 110.80±3.11 d | 4.06±0.17 c | 4.25±0.75 b | 3.88±0.37 b | 54.15±3.56 c | 7 260.29±129.76 a |
| | FC4 | 121.54±5.83 a | 3.51±0.36 d | 3.94±1.15 c | 4.39±0.46 a | 56.93±2.74 b | 6 688.34±129.77 c |
| MD | FC1 | 112.20±6.88 d | 3.87±0.19 c | 3.06±1.22 d | 3.24±0.14 d | 53.13±0.44 c | 6 489.60±441.68 d |
| | FC2 | 113.66±5.42 c | 3.59±0.07 d | 4.63±1.41 a | 3.96±0.03 b | 56.91±0.99 b | 6 965.61±182.49 b |
| | FC3 | 111.10±4.47 d | 3.62±0.19 d | 4.75±1.01 a | 3.41±0.32 d | 52.51±2.05 d | 7 055.19±542.34 ab |
| | FC4 | 110.06±3.05 d | 3.91±0.08 c | 3.69±1.50 c | 3.87±0.47 b | 57.78±2.59 a | 6 825.08±352.52 b |
| HD | FC1 | 109.84±6.51 d | 4.24±0.17 b | 3.25±1.14 d | 3.06±0.24 d | 53.19±1.07 c | 6 431.82±441.75 d |
| | FC2 | 117.52±6.43 b | 4.41±0.19 a | 3.75±1.89 c | 4.24±0.95 a | 58.77±0.91 a | 6 974.60±592.49 b |
| | FC3 | 119.42±7.14 b | 4.29±0.16 b | 4.75±1.49 a | 3.07±0.56 d | 56.14±1.09 b | 7 088.54±87.75 ab |
| | FC4 | 112.82±4.41 d | 4.21±0.08 b | 4.25±1.16 b | 3.67±0.54 c | 52.80±3.93 d | 6 911.23±372.29 b |
| 方差分析 ANOVA | FC | ns | ns | ** | ** | ns | ns |
| | D | ns | ** | ns | ns | ns | ns |
| | FC×D | * | ** | ns | ns | * | ns |

注:同列不同字母分别表示各播种密度处理下不同施肥量间差异在 0.05 水平显著;数据为“平均数±标准差”;*,** 分别在 0.05 和 0.01 水平显著,ns 表示未达到显著水平;下表同。

Note:Different letters in the same column indicate that the differences between different fertilizer application rates at each sowing density treatment are significant at the P<0.05 level; data in table are “mean±standard deviation”;*,** are significant at the P<0.05 and P<0.01 levels,respectively,and ns denotes that the level of significance has not been reached; the following table is the same as the table below.

2.3.2 肥料和播种密度互作对产量构成因素的影响 施肥量、播种密度对青稞产量构成因子仍有一定的影响(表2)。穗数、有效穗数、穗粒质量和千粒质量均随施肥量和播种量的增加呈先上升后降低的趋势,在同一施肥处理下,与LD处理相比,MD处理下的有效穗数、千粒质量分别增加1.57%、2.36%,穗数、穗粒质量分别降低3.97%、2.16%,HD处理下的穗数、有效穗数、千粒质量分别增加9.86%、0.75%、2.63%,穗粒质量降低5.14%;在不同播种密度下,与FC1施肥处理相比,FC2处理下的穗数、有效穗数、穗粒质

量、千粒质量分别增加3.28%、23.80%、20.21%、5.58%,FC3处理下的穗数、有效穗数、穗粒质量、千粒质量分别增加0.76%、37.5%、8.48%、2.62%,FC3处理下的有效穗数、穗粒质量、千粒质量分别增加18.80%、24.92%、5.58%,穗数降低2.10%。如表2所示,有效穗数与穗粒质量、产量呈正相关关系,与千粒质量、结实率呈负相关关系,产量与穗粒质量呈极显著正相关关系,结实率与穗粒质量、产量呈极显著正相关关系,即产量较高时,青稞的每穗粒质量、结实率较高,产量较低时,则相反。

表2 肥料和密度互作下内源激素、产量及构成因素间的相关性

Table 2 Correlation between endogenous hormones, yield and constitutive factors under fertilizer and density interactions

| 因素 Considerations | 有效穗数 Number of effective spikes | 穗粒质量 Kernel mass | 千粒质量 Thousand-grain mass | 产量 Yield | 结实率 Fertility | ZT | IAA | ZT/IAA |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------|------------------|---------|----------|--------|
| 有效穗数 Number of effective spikes | 1 | | | | | | | |
| 穗粒质量 Kernel mass | 0.037 | 1 | | | | | | |
| 千粒质量 Thousand-grain mass | -0.218 | -0.063 | 1 | | | | | |
| 产量 Yield | 0.037 | 0.516** | -0.069 | 1 | | | | |
| 结实率 Fertility | -0.036 | 0.467** | -0.003 | 0.962** | 1 | | | |
| ZT | 0.227 | -0.092 | -0.183 | 0.103 | 0.014 | 1 | | |
| IAA | -0.039 | -0.060 | -0.076 | 0.188 | 0.265 | -0.359* | 1 | |
| ZT/IAA | 0.333* | 0.036 | -0.016 | -0.115 | -0.167 | 0.442** | -0.614** | 1 |

注:“*”“**”分别表示在0.05和0.01水平显著相关。

Note:“*”“**” indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level.

3 讨论

3.1 不同施肥和密度互作对青稞分蘖动态变化的影响

分蘖是禾本科作物所特有的分枝方式,青稞分蘖的发生是构建良好的群体结构、提高产量的重要环节,受分蘖期植株生理活动、环境、施肥量和栽培方式的制约^[24]。大量学者对小麦分蘖规律及外界环境对小麦分蘖的影响进行了大量系统研究^[25-27],增施氮肥可提高小麦分蘖的发生速率^[28],但肥料施用量过大也提高了小麦无效分蘖的发生^[29]。本试验结果表明,在同一播种密度处理下,不同施肥处理间的青稞分蘖数随施肥量的增加呈现出先增加后降低的趋势,与前人的研究结果一致,拔节期是促进青稞分蘖成穗的关键时期。在同一施肥水平处理下,不同播种密度处理的青稞分蘖数差异不显著,即施肥量的多少是影响青稞的分蘖数及分蘖成穗率主要因素。

3.2 不同施肥和密度互作对青稞内源激素的影响

植物内源激素作为生长调节物质,对植物体

内组织器官的生长活性、养分的分配、以及基因表达的调节都起着非常重要的作用^[30],尤其在籽粒灌浆过程中发挥重要作用^[31-32]。前人的研究表明,吲哚乙酸(IAA)会参与抑制生殖器官的发育,细胞分裂素(CTK)能打破生殖器官之间的相互抑制作用,小麦分蘖节玉米素(ZT)可促进分蘖发生,生长素抑制分蘖发生,脱落酸(ABA)诱导分蘖死亡^[33-34]。施肥量的多少和种植密度均影响植株合成自身所需的内源激素,从而影响青稞产量。在本试验中,青稞分蘖节中的玉米素(ZT)含量均在FC4施肥处理下含量最高,吲哚乙酸(IAA)在不同播种密度、施肥处理间差异显著,ZT/IAA的比值与有效穗数呈正显著相关(表2),即玉米素与吲哚乙酸的比值越大,青稞的有效分蘖数越多,构建良好的群体结构,从而进一步提高青稞产量。

3.3 不同施肥和密度互作对青稞群体结构及产量的影响

作物的群体生产力与作物的生长发育和栽培管理有着密切的关系^[35-36]。合理增加种植密度,通过增施肥料调节植株个体和群体之间的矛

盾^[37],从而可获得较高的产量、有效分蘖数和肥料利用率。本试验中,每个处理的青稞有效穗数、产量均随施肥量的增加呈现出先增加后降低的趋势,但参试青稞‘昆仑14’在最适宜的播种密度和施肥下,即播种量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施肥量为尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $150.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下的产量最高。结合(表2)产量构成因素分析,产量与结实率、穗粒质量呈极显著正相关关系,与有效穗数呈正相关关系。

4 结论

不同施肥处理和播种密度对青稞分蘖数和产量有明显的差异。在相同施肥水平、不同播种密度处理下,青稞分蘖数、有效穗数随密度的增加呈先增加后降低的趋势,产量随密度的增加呈上升趋势;在相同播种密度、不同施肥水平处理下,青稞分蘖数、有效穗数、产量均随施肥量的增加呈先增加后降低的趋势,且3个播种密度均在FC3(尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $150.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下的青稞有效穗数、产量最高。结合产量及构成因素分析可知,施肥量(尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $150.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和播种密度(播量 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下的青稞产量最高。

参考文献 Reference:

- [1] 吴昆仑,赵媛,迟德钊.青稞 *Wx* 基因多态性与直链淀粉含量的关系[J].作物学报,2012,38(1):71-79.
WU K L,ZHAO Y,CHI D ZH. Relationship between polymorphism of *Wx* gene and amylose content in hulless barley [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(1): 71-79.
- [2] 姚晓华,吴昆仑.青稞脂质转运蛋白基因 *blt4.9* 的克隆及其对非生物胁迫的响应[J].作物学报,2016,42(3):399-406.
YAO X H,WU K L. Isolation of *blt4.9* gene encoding LTP protein in hulless barley and its response to abiotic stresses [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(3): 399-406.
- [3] 白羿雄,姚晓华,姚有华,等.适度水分亏缺管理提高青稞营养品质和环境效益[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):499-506.
BAI Y X,YAO X H,YAO Y H, *et al.* Mild water deficit management to achieve high nutrition quality of hulless barley and environmental benefit[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 499-506.
- [4] KHUSH G S. Green revolution: preparing for the 21st century[J]. *Genome*, 1999, 42(4): 646.
- [5] CONWAY G, TOENNIESSEN G. Feeding the world in the twenty-first century[J]. *Nature*, 1999, 402(6761 Suppl.): C55-C58.
- [6] KARIALI E, MOHAPATRA P K. Hormonal regulation of tiller dynamics in differentially-tillering rice cultivars[J]. *Plant Growth Regulation*, 2007, 53(3): 215-223.
- [7] 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].植物营养与肥料学报,2018,24(4):896-904.
TIAN G L,ZHOU Y,SUN B, *et al.* Effects of nitrogen and transplanting density on the mechanisms of tillering dynamic of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 896-904.
- [8] 贾飞霞.种植密度对冬小麦分蘖成穗及产量的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2018.
JIA F X. Effects of planting density on effective spike formation of the tillers and yield of winter wheat[D]. Tai'an Shandong: Shandong Agricultural University, 2018.
- [9] 张金汕,董庆国,方伏荣,等.种植密度和施氮量对啤用大麦生长、产量及品质的影响[J].中国农业大学学报,2016,21(9):23-32.
ZHANG J SH,DONG Q G,FANG F R, *et al.* Effect of planting density and N application rate on growth, yield and quality of malt barley[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9): 23-32.
- [10] 陆魁东,李涵茂,黄晚华,等.双季超级早稻分蘖期温度适宜性指标[J].生态学杂志,2015,34(2):406-412.
LU K D, LI H M, HUANG W H, *et al.* Suitable temperature indices of double-cropping super early rice at tillering stage[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 406-412.
- [11] 李睿,姜运生,张震,等.节水灌溉和遮光强度对水稻生长发育的耦合影响[J].中国农业气象,2018,39(11):702-714.
LI R, LOU Y SH, ZHANG ZH, *et al.* Coupling effects of water-saving irrigation and shading intensity on growth and development for rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(11): 702-714.
- [12] 李杰,张洪程,龚金龙,等.稻麦两熟地区不同栽培方式超级稻分蘖特性及其与群体生产力的关系[J].作物学报,2011,37(2):309-320.
LI J, ZHANG H CH, GONG J L, *et al.* Tillering characteristics and its relationships with population productivity of super rice under different cultivation methods in rice-wheat cropping areas[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 309-320.
- [13] 韦还和,李超,张洪程,等.水稻‘甬优12’超高产群体分蘖特性及其与群体生产力的关系[J].作物学报,2014,40(10):1819-1829.
WEI H H, LI CH, ZHANG H CH, *et al.* Tillering characteristics and its relationship with population productivity of super-high yield rice population of ‘Yongyou 12’ [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1819-1829.
- [14] 王如芳,张吉旺,吕鹏,等.多分蘖玉米分蘖发生规律及密度和播期的影响[J].作物学报,2012,38(2):322-332.
WANG R F, ZHANG J W, LÜ P, *et al.* Tillering characteristics of multi-tiller maize and influence of plant density and sowing date[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(2): 322-332.
- [15] LI X, QIAN Q, FU Z, *et al.* Control of tillering in rice[J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 618-621.
- [16] CHEN X, CUI Z, FAN M, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486.
- [17] HUANG M, YANG C, JI Q, *et al.* Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China [J]. *Field Crops Research*, 2013, 149(2): 187-192.
- [18] 赵雪雁,王伟军,万文玉,等.近50年气候变化对青藏高原

- 青稞气候生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10):1329-1338.
- ZHAO X Y, WANG W J, WAN W Y, *et al.* Influence of climate change on potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau in the past 50 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10):1329-1338.
- [19] 强小林, 巴桑玉珍, 扎西罗布. 青藏高原区域青稞生产现状调研考察初报[J]. 西藏农业科技, 2011, 33(1):36-38.
- QIANG X L, BASANG Y ZH, ZHAXI L B. Preliminary study of analysis on highland barley production in Qinghai-Tibet plateau area suggested countermeasure [J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 33(1):36-38.
- [20] 吴昆仑, 迟德钊. 青海青稞产业发展及技术需求[J]. 西藏农业科技, 2011, 33(1):4-9.
- WU K L, CHI D ZH. Highland barley industry development and technique requirement in Qinghai province[J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 33(1):4-9.
- [21] 徐冬丽, 刘梅金, 王 贺, 等. 不同肥料及施肥方式对青稞农艺性状和产量的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2018, 35(4):24-26, 34.
- XU D L, LIU M J, WANG H, *et al.* Effect of different fertilisers and application methods on agronomic traits and yield of barley[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35(4):24-26, 34.
- [22] 颜昌兰. 青稞品种稳定性、适应性及主要农艺性状的评价与分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- YAN CH L. Evaluation and analysis of stability, adaptability and major agronomic characters on barley variety[D]. Yangling Shanxi: Northwest A&F university, 2015.
- [23] PAN X Q, WELTI R, WANG X M. Quantitative analysis of major plant hormones in crude plant extracts by high-performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Nature Protocols*, 2010, 5(6):986-992.
- [24] 张维军, 袁汉民, 陈东升, 等. 氮肥和密度对‘宁冬11号’分蘖成穗及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(1):63-69.
- ZHANG W J, YUAN H M, CHEN D SH, *et al.* Effects of nitrogen application and density on tillers growing into spikes and yield of ‘Ningdong 11’[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(1):63-69.
- [25] 马元喜, 王化岑, 王晨阳, 等. 冬小麦根系各级分枝形成及其解剖结构研究[J]. 作物学报, 2002, 28(3):327-332.
- MA Y X, WANG H C, WANG CH Y, *et al.* Formation of the root branches of different orders and their anatomical structures in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(3):327-332.
- [26] 张明伟, 马 泉, 陈京都, 等. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2):15-21.
- ZHANG M W, MA Q, CHEN J D, *et al.* Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application in winter wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(2):15-21.
- [27] 郑飞娜, 初金鹏, 张 秀, 等. 播种方式与种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J]. 作物学报, 2020, 46(3):423-431.
- ZHENG F N, CHU J P, ZHANG X. Interactive effects of sowing pattern and planting density on grain yield and nitrogen use efficiency in large spike wheat cultivar[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3):423-431.
- [28] 王兆龙, 曹卫星, 戴廷波. 小麦小花两极分化中内源植物激素与糖氮含量的变化特征[J]. 作物学报, 2001, 27(4):447-452.
- WANG ZH L, CAO W X, DAI Y B. Changes of endogenous plant hormones and soluble sugars and proteins during floret development and degeneration in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4):447-452.
- [29] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. 作物学报, 2002, 28(5):577-585.
- YU ZH W, TIAN Q ZH, PAN Q M, *et al.* Theory and practice on cultivation of super high yield of winter wheat in the wheat fields of yellow river and huaihe river districts [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5):577-585.
- [30] 库文珍, 彭克勤, 张雪芹, 等. 低钾胁迫对水稻苗期矿质营养吸收和植物激素含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):69-75.
- KU W ZH, PENG K Q, ZHANG X Q, *et al.* Effect of low potassium stress on mineral nutrient uptake and phytohormone content in rice seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1):69-75.
- [31] 王瑞英, 于振文, 潘庆民, 等. 小麦籽粒发育过程中激素含量变化[J]. 作物学报, 1999, 26(2):227-231.
- WANG R Y, YU ZH W, PAN Q M, *et al.* Changes of endogenous plant hormone contents during grain development in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 26(2):227-231.
- [32] PATEL R, MOHAPATRA P K. Regulation of spikelet development in rice by hormones[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1992, 43:257-262.
- [33] JIN D M, WANG W J, LAN S Y, *et al.* Dynamic status of endogenous IAA ABA and GA levels in superior and inferior spikelets of heavy panicle hybrid rice during grain filling[J]. *Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(3):215-220.
- [34] 李晓宇, 穆春生. 盐碱胁迫及外源植物激素对小麦和羊草生长发育的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(2):257-260.
- LI X Y, MU CH SH. Effects of salt and alkali stresses, and exogenous plant hormones on growth and development of wheat and *L. chinensis*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(2):257-260.
- [35] 马瑞萍, 韦泽秀, 卓 玛, 等. 氮磷施肥对青稞生长发育及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6):2577-2585.
- MA R P, WEI Z X, ZHUO M, *et al.* Effect of mixed application of N and P on growth and yield of highland barley [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(6):2577-2585.
- [36] 杨吉顺, 高辉远, 刘 鹏, 等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(7):1226-1233.
- YANG J SH, GAO H Y, LIU P, *et al.* Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7):1226-1233.
- [37] 曹 倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):815-822.
- CAO Q, HE M R, DAI X L, *et al.* Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4):815-822.

Effects of Different Seeding Densities and Fertilizer Amount Onhulless Barley Tiller Dynamics and Population Structure

GUO Anming^{1,2,3}, WU Kunlun^{1,2,3}, YAO Xiaohua^{1,2,3},
GUO Tongxin^{1,2,3} and YAO Youhua^{1,2,3}

(1. Academy of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Genetic Breeding of Hulless Barley/Qinghai Hulless Barley Sub-center of National Wheat Improvement Center, Xining 810016, China; 3. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining 810016, China)

Abstract To investigate the impact of fertilizer amount and seeding density on tiller changes, population structure, and yield of hulless barley, ‘Kunlun 14’ was used as the test material, and four fertilization treatments and three seeding density treatments were set under field conditions. The fertilization treatments included no fertilizer (FC1), small amount of fertilizer (FC2: urea 37.5 kg · hm⁻², diammonium phosphate 75 kg · hm⁻²), moderate fertilizer (FC3: urea 75 kg · hm⁻², diammonium phosphate 150.0 kg · hm⁻²) and excessive fertilizer (FC4: urea 150.0 kg · hm⁻², diammonium phosphate 300 kg · hm⁻²). The seeding density treatments consisted of low density (LD: sowing rate 225 kg · hm⁻²), medium density (MD: sowing rate 262.5 kg · hm⁻²) and high density (HD: sowing rate 300 kg · hm⁻²). The results indicated that with the advance of growth period, the number of tillers per plant initially increased and then decreased with the increase in fertilizer amount and seeding density. The highest tillering effect of hulless barley was observed under the FC3 fertilization treatment, while the highest tillering rate was achieved under the MD seeding density with the FC2 treatment reaching 84.69%. Compared to no fertilization, the yield increase rates for hulless barley varied between 4.22% to 14.68%, 5.17% to 8.72%, and 7.45% to 10.21% for the three fertilizer-density interactions, respectively. Spike number, effective spike number, grain mass per spike and thousand-grain mass all increased first and then decreased with the increase of fertilizer application and sowing amount. According to the yield correlation analysis, fertilizer amount was highly significantly correlated with the effective number of spikes and spike grain mass, the seeding density was highly significantly correlated with the number of spikes, the fertilizer-density interactions were highly significantly correlated with the number of spikes, significantly correlated with the plant height and the thousand-grain mass, and the effective number of spikes was significantly correlated with the ratio of ZT/IAA. Under the conditions of this study, the combination of FC3 and LD is a reasonable fertilizer-density management method to achieve barley tiller promotion and spike increase, high yield, cost saving and efficiency.

Key words Hulless barley; Seeding density; Fertilizer amount; Tiller dynamics; Population structure

Received 2024-01-09

Returned 2024-03-30

Foundation item National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFD2301300); the Construction Project for Innovation Platform of Qinghai Province 2023 (No. 1_5); the China Agriculture Hulless Barley Research System (No. CARS-05-01A-05).

First author GUO Anming, male, master student. Research area: crop high-yield cultivation and physiological and biochemical research. E-mail: luoko888@163.com

Corresponding author YAO Youhua, male, associate researcher. Research area: wheat crop breeding and cultivation research. E-mail: youhua8888@126.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)