

DOI:10.11686/cyxb2024353

http://cyxb.magtech.com.cn

马文艳, 李杰东, 周镇磊, 等. 肥料、保水剂和播种量互作对燕麦综合生产性能的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 107—119.

MA Wen-yan, LI Jie-dong, ZHOU Zhen-lei, *et al.* Effects of interactions among fertilizer, water retention agent, and seeding rate on the yield production performance of oat (*Avena sativa*). Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 107—119.

肥料、保水剂和播种量互作对燕麦综合生产性能的影响

马文艳^{1,2**}, 李杰东^{1,2**}, 周镇磊^{1,2}, 曹东², 刘宝龙², 张怀刚², 王东霞^{1*}

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008)

摘要:为揭示肥料、保水剂和播种量互作对呼伦贝尔地区燕麦综合生产性能的影响,本试验以‘青海444’为对象,采用正交试验设计,对不同处理组合下燕麦农艺性状、单株生物量、草产量及营养品质相关指标进行了观测和分析。结果表明: $A_3(N:89.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, P:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 水平下单株总生物量、茎秆生物量、粗蛋白、钙、磷含量显著高于 $A_1(N:44.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, P:83.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 和 $A_2(N:44.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, P:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 水平;随着保水剂浓度的增加,燕麦的苗数、穗数、分蘖成穗率、穗下节长、株高、重心高度、倒伏率和灰分含量均呈上升趋势,单株总生物量、根系生物量和叶片生物量呈下降趋势;随着燕麦播种量的增加,燕麦的茎数、穗数、重心高度、根系生物量和中性洗涤纤维含量呈上升趋势,单株粒数、穗下节长、穗长、株高、穗位高、单株总生物量、穗部生物量和酸性洗涤纤维含量呈下降趋势;9个处理组合中 $A_3B_1C_3$ 处理的茎数、第二节长、第三节长、茎粗、茎壁厚、粗蛋白、粗脂肪、钙、磷含量最高,酸性洗涤纤维含量最低, $A_3B_2C_1$ 处理的穗位高、单株总生物量、茎秆生物量和穗部生物量最高。极差分析结果显示,肥料配施对燕麦扬花期产量和品质的影响最大,其次是保水剂,播种量影响最小。通过隶属函数综合分析筛选得到 $A_3B_1C_3$ 处理,肥料配比为 $N_2P_1K_1(N:89.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, P:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, K:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$,保水剂为 $60.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播量为 $157.05\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时燕麦的产量和品种的综合表现最好,该结果可为呼伦贝尔地区燕麦的绿色高效栽培提供理论依据和技术指导。

关键词:燕麦;肥料配施;保水剂;播种量;农艺性状;草产量;营养品质

Effects of interactions among fertilizer, water retention agent, and seeding rate on the yield production performance of oat (*Avena sativa*)

MA Wen-yan^{1,2**}, LI Jie-dong^{1,2**}, ZHOU Zhen-lei^{1,2}, CAO Dong², LIU Bao-long², ZHANG Huai-gang², WANG Dong-xia^{1*}

1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: The aim of this study was to determine the effects of interactions among fertilizer, polyacrylamide water-retention agent (PAC), and seeding rate on the yield, yield components and nutritive traits of oat (*Avena sativa*) in the Hulunbuir region. A field experiment was conducted with an orthogonal design using the oat cultivar ‘Qinghai 444’. The experiment was an incomplete $3\times3\times3$ factorial design with three fertilizer treatments (A_1, A_2, A_3), three levels of PAC (B_1, B_2, B_3), and three seeding rates (C_1, C_2, C_3) with nine of the 27 available treatment combinations implemented. The three fertilizer treatments were: $A_1=N, 44.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $P, 83.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$,

收稿日期:2024-09-23;改回日期:2025-01-09

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA26040101)资助。

作者简介:马文艳(2000—),女,青海互助人,在读硕士。E-mail: mawy4729@163.com; 李杰东(2001—),男,宁夏中卫人,在读硕士。E-mail: 2676623107@qq.com。 ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wangdx@qhu.edu.cn

$A_2=N$, $44.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and P , $41.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $A_3=N$, $89.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, P : $41.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. The three PAC treatments were 60 , 75 and $90\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ PAC for B_1 , B_2 and B_3 , respectively, and the three seeding rates were calculated to deliver 2.5 , 3.5 and $4.5\text{ live seeds}\cdot\text{ha}^{-1}$ for C_1 , C_2 and C_3 , respectively. Agronomic traits, individual plant biomass, forage yield, and nutritional quality indicators were analyzed for each combination of treatments. The results revealed that the total plant biomass, stem biomass, crude protein, calcium, and phosphorus content were significantly higher with the A_3 level of fertilizer than with the A_1 and A_2 levels of fertilizer. As the concentration of PAC increased, the seedling number, spike number, tiller survival rate, sub-spike internode length, plant height, center of gravity height, lodging rate, and ash content increased, and total plant biomass, root biomass, and leaf biomass decreased. As the seeding rate increased, the stem number, spike number, center of gravity height, root biomass, and neutral detergent fiber content increased, whereas the grain number per plant, sub-spike internode length, spike length, plant height, spike position height, total plant biomass, spike biomass, and acid detergent fiber content decreased. Among the nine treatment combinations, the $A_3B_1C_3$ treatment resulted in the highest stem number, second and third internode length, stem diameter, stem wall thickness, crude protein, ether extract, calcium, and phosphorus content, along with the lowest acid detergent fiber content. The $A_3B_2C_1$ treatment resulted in the highest spike position, total plant biomass, stem biomass, and spike biomass. The results of a range analysis indicated that fertilizer application had the greatest impact on oat yield and quality at the flowering stage, followed by the water-retention agent, while seeding rate had the smallest effect. A multivariate evaluation using the membership function method identified the optimal combination for oat yield and quality performance as $A_3B_1C_3$; i. e., a fertilizer ratio of N : $89.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, P : $41.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, K : $41.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, application of PAC at $60.00\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, and a seeding rate of $157.05\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. These findings provide a theoretical basis and technical guidance for sustainable and high-efficiency oat cultivation in the Hulunbuir region.

Key words: oats (*Avena sativa*); fertilizer application; water retention agent; sowing quantity; agronomic traits; grass yield; nutritional quality

呼伦贝尔草原是我国北方草原的主要代表和绿色生态屏障,是典型的草原畜牧业养殖区,饲养家畜以冬季舍饲夏季放牧的方式为主^[1]。由于受到气候环境变化和过度放牧的影响,该地区天然草场出现大面积的退化现象,导致天然牧草供需不足,严重制约了当地畜牧业的发展^[2]。因此探究适合该地区的饲草高效栽培方案对缓解饲草供需矛盾意义重大,也是促进该地区畜牧业发展的有效途径。

燕麦(*Avena sativa*)属禾本科(Gramineae)一年生植物,具有适应性强、耐贫瘠、抗寒和抗旱等优点,且蛋白质、矿质元素等营养物质丰富,是高寒牧区公认的稳产、高产、优质的饲草种类^[3]。肥料是禾本科作物正常生长的必要元素,也是作物产量和品质的重要限制因子^[4],尤其是在土壤贫瘠和水资源匮乏的地区,肥料调控对提高作物的产量和品质起着至关重要的作用^[5-7]。保水剂能够改善土壤物理性质,促进养分吸收利用,进而促进植物生长发育^[8-9]。肥料与保水剂配合施用可以显著提高土壤含水量,同时提高水肥利用率^[10-11]。此外,播种量也是影响禾本科作物产量和品质的主要因素之一^[12],播种量影响植株密度,进而影响作物生长发育^[13],在一定的范围内,合理密植有利于提高牧草种间竞争,促进牧草产量的增加。但如果超过限度,植株间密度过大,种内竞争呈现优势地位,会降低光合效率,减少干物质积累,导致单位面积植株产量与品质下降^[14-15]。适当施肥、施保水剂和适量播种量均能有效提高燕麦草产量,但具体最高产量下的施肥量、保水剂浓度和播种量并不统一,这是由于燕麦适应性广,不同品种在不同环境条件下的最佳施肥量、保水剂浓度及播种量也不同。近年来,呼伦贝尔地区针对燕麦产量低、水肥利用率低等突出问题的研究主要集中在优良品种筛选,不同混播比例对燕麦产量性能的影响^[16-18],肥料配施对燕麦综合生产性能的影响^[19-20]等方面。目前尚未报道关于多因素互作对燕麦综合生产性能影响方面的研究。

本研究针对呼伦贝尔地区燕麦生产中面临的水肥利用效率不高和草产量低等问题,设计正交试验,研究肥料、保水剂、播种量3个因素互作对‘青海444’燕麦生产性能和营养成分的影响,确定各因素耦合的高效栽培技术方案,形成呼伦贝尔地区燕麦抗寒抗旱绿色生态栽培技术体系,以期为该地区燕麦的高效栽培提供科学的理论依

据,对该地区燕麦增产潜力挖掘和优质生产具有重要的理论借鉴和实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

特泥河试验站位于呼伦贝尔陈巴尔虎旗(49°21′ N,119°45′ E),属于温带大陆性气候,年均温小于 0℃,海拔 650 m,降水主要集中在 7、8 月,平均年降水量达 320 mm,土壤为黑壤土,土壤氮、磷、钾含量分别为 2.73 g·kg⁻¹、46.20 g·kg⁻¹、242.00 g·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试燕麦为‘青海 444’,是该地区饲草主栽品种,产量高,由青海省西宁市湟中天兴草业有限公司生产;氮、磷、钾肥分别为:尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P₂O₅≥12%)、硫酸钾(K₂O≥45%);选择抗旱型保水剂,粉末状,主要成分为聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM),来自中国科学院上海应用物理研究所。

1.3 试验设计

采用正交试验设计,综合考虑肥料、保水剂和播种量 3 个试验因素对‘青海 444’生产性能的影响。研究设计 3 个因素,各因素设 3 个水平,3 因素分别为:肥料(A)、保水剂(B)和播种量(C),播种量由每 hm² 保苗 250 万株、350 万株和 450 万株计算,其中肥料设 3 个水平为:A₁(N₁P₂K₁)、A₂(N₁P₁K₁)和 A₃(N₂P₁K₁);保水剂设 3 个水平为:B₁(60.00 kg·hm⁻²)、B₂(75.00 kg·hm⁻²)和 B₃(90.00 kg·hm⁻²);播种量设 3 个水平为:C₁(87.15 kg·hm⁻²)、C₂(122.10 kg·hm⁻²)、C₃(157.05 kg·hm⁻²)。选择 L₉(3⁴)正交表(表 1),9 个处理,重复 3 次,共 27 个小区,各小区面积 3 m×5 m=15 m²,行距 20 cm,种 15 行,各处理随机排列,播种方式为条播,播深 3~4 cm,小区和重复间隔 50 cm。肥料作为基肥于播种前一次性施入。保水剂与种子充分混合均匀后随种子一并施入,于 2022 年 5 月上旬播种,完成播种后喷灌 2 h,其余生育期靠雨养。

1.4 群体性状测量

在幼苗出齐后划定有代表性的固定样点 2 个,样点长 1 m,一般为 2 行,考察样点内苗数;于拔节初在固定样点内考察茎数;于扬花初期,齐地刈割 1 m² 燕麦,去除非燕麦成分后称重,测定鲜草产量,在称完鲜重的燕麦中称取 500 g 鲜草样品,放入网袋,置于烘箱中,105℃ 30 min,65℃ 烘干至恒重,测定干草重量,计算干鲜比,最后将干燥样粉碎,过 1 mm 筛,采用 FOSS 公司生产的 NIR System 5000 近红外光谱分析仪扫描分析粉末品质,测定粗蛋白、粗脂肪、灰分、钙、磷、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量;此外,在固定样点取 5 株完整燕麦,清洗干净,擦干表面水分后分别称重测定总生物量(根、茎、叶和穗生物量之和,g)和各器官生物量(g);于灌浆初期在固定样点取 5 株,测量株高[植株主茎基部至顶部长度(不带芒),cm]、重心高度[将茎秆(带叶、叶鞘及穗)中部左右位置放于支点上,调节茎秆位置,直至茎秆平衡在支点上,茎秆基部至平衡支点距离为重心高度,cm]、第 2(3)节长[燕麦基部向上量取第 2(3)节长度为第 2(3)节长,cm]、穗下节间长[穗基部向下至第 1 个节点的长度为穗下节间长,cm]、茎粗[测量第 2 节长和第 3 节长最粗的位置,求取平均值为茎粗,mm]和茎壁厚[在测量茎粗的位置用游标卡尺测量茎秆厚度求均值为茎壁厚,mm];于早熟期在固定样点内考察穗数,并计算分蘖成穗率(分蘖成穗率=穗数/茎数×100%),在样点内取 5 株,测量穗长(主茎穗基部至顶端的长度为穗长,cm)、单株粒数(单株所有穗的籽粒数为单株粒数,粒·株⁻¹);于燕麦晚熟期统计倒伏率(倒伏植株占整个小区植株的比率,%),待收割脱粒,籽粒自然风干后随机取样 2 份,每份 200 粒,如果 2 份样品重量相差不超过 0.5 g,则取平均值,否则继续取第 3 份样品直到 2

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design scheme (kg·hm⁻²)

处理组合 Treatment combination	因素 Element				
	A			B	C
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
A ₁ B ₁ C ₁	44.00	83.00	41.00	60.00	87.15
A ₁ B ₂ C ₂	44.00	83.00	41.00	75.00	122.10
A ₁ B ₃ C ₃	44.00	83.00	41.00	90.00	157.05
A ₂ B ₁ C ₂	44.00	41.00	41.00	60.00	122.10
A ₂ B ₂ C ₃	44.00	41.00	41.00	75.00	157.05
A ₂ B ₃ C ₁	44.00	41.00	41.00	90.00	87.15
A ₃ B ₁ C ₃	89.00	41.00	41.00	60.00	157.05
A ₃ B ₂ C ₁	89.00	41.00	41.00	75.00	87.15
A ₃ B ₃ C ₂	89.00	41.00	41.00	90.00	122.10

个样品重量相差不到0.5 g为止,后换算成千粒重,计算籽粒产量(籽粒产量=苗数×单株粒数×千粒重)。

1.5 数据处理与分析

采用SPSS 24.0软件进行差异显著性分析及多重比较。利用隶属函数值法对燕麦生产性能、营养成分的各项性状数据进行综合评价。计算公式如下:

$$X_{(i)} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$W_{(i)} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=1}^n [X_{(i)} \times W_{(i)}] \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, n$; $X_{\min}$ 表示第*i*个综合指标的最小值; $X_{\max}$ 表示第*i*个综合指标的最大值; $X_{(i)}$ 表示第*i*个综合指标。 $W_{(i)}$ 表示第*i*个综合指标在所有综合指标中所占的权重; P_i 表示第*i*个综合指标的贡献率。 D 值为各处理下的综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 肥料、保水剂和播种量对燕麦群体植株的影响

2.1.1 肥料、保水剂和播种量各因素水平对燕麦群体植株的影响 A_1 (N:44.00 kg·hm⁻², P:83.00 kg·hm⁻²)水平下燕麦的穗数、重心高度和茎壁厚最大,倒伏率最低, A_3 (N:89.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平下茎数、第二节长、第三节长、穗位高和茎粗均最大,其中茎数和第二节长显著高于 A_2 (N:44.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平($P<0.05$,表2)。

随着保水剂浓度的升高,燕麦的苗数、穗数、分蘖成穗率、穗下节长、株高、重心高度和倒伏率均呈上升趋势,且 B_3 (90.00 kg·hm⁻²)浓度下穗数显著高于 B_1 (60.00 kg·hm⁻²)和 B_2 (75.00 kg·hm⁻²)水平(表2)。

随着燕麦播种量的增加,燕麦的茎数、穗数和重心高度呈上升趋势,其中 C_3 (157.05 kg·hm⁻²)水平下茎数和穗数显著高于 C_1 (87.15 kg·hm⁻²)水平($P<0.05$);单株粒数、穗下节长、穗长、株高和穗位高呈下降趋势,

表2 肥料、保水剂和播种量各因素水平对燕麦群体和植株性状的影响

指标 Index	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3
苗数 Number of seedlings (万苗 Ten thousand seedling·hm ⁻²)	324.63±14.16a	360.95±26.13a	318.33±18.96a	321.67±17.79a	330.93±22.94a	351.31±21.79a	350.94±20.89a	323.15±18.35a	329.82±23.43a
茎数 Number of stems (万茎 Ten thousand stems·hm ⁻²)	499.92±16.30ab	485.83±9.20b	532.90±17.19a	508.07±20.75a	494.36±11.18a	516.21±14.34a	473.60±13.37b	510.29±15.72ab	534.75±11.37a
穗数 Panicle number (万穗 Ten thousand ears·hm ⁻²)	445.26±17.90a	437.31±17.04a	441.37±21.81a	429.52±15.45b	436.00±21.99b	458.44±17.62a	397.65±15.82b	452.68±17.64a	473.62±12.01a
分蘖成穗率 Percentage of tillering to head (%)	0.89±0.03a	0.90±0.02a	0.83±0.03a	0.85±0.03a	0.88±0.03a	0.89±0.02a	0.84±0.03a	0.89±0.02a	0.89±0.03a
单株粒数 Number of grains per plant (粒·株 ⁻¹ Grain·plant ⁻¹)	43.87±3.12a	45.11±4.50a	37.64±3.80a	40.29±3.78a	43.86±3.64a	42.47±4.49a	50.06±4.30a	39.97±2.38ab	36.59±3.46b
第二节长 Second section length (cm)	24.51±0.91ab	23.90±0.55b	27.11±1.16a	25.62±1.26a	25.17±0.91a	24.73±0.86a	24.80±1.15a	24.49±0.73a	26.23±1.07a
第三节长 Third section length (cm)	46.49±1.24a	47.19±1.11a	49.69±1.85a	48.49±1.39a	46.68±1.18a	48.20±1.83a	48.38±1.20a	46.40±1.45a	48.59±1.74a
穗下节长 Subear length (cm)	47.87±1.07a	49.84±2.00a	47.29±1.02a	47.31±1.03a	48.13±1.32a	49.56±1.87a	51.13±1.61a	47.47±1.19ab	46.40±1.03b
穗长 Panicle length (cm)	17.22±0.44a	17.96±0.61a	17.42±0.30a	17.98±0.42a	16.60±0.36a	18.02±0.48a	18.22±0.47a	17.24±0.49a	17.13±0.38a
株高 Plant height (cm)	117.98±1.53a	118.38±2.74a	118.31±2.80a	116.38±2.06a	118.58±2.51a	119.71±2.53a	121.13±2.13a	118.07±2.35a	115.47±2.38a
穗位高 Ear height (cm)	100.76±1.48a	100.42±2.32a	100.80±2.75a	98.40±1.80a	101.98±2.44a	101.69±2.23a	102.91±2.14a	100.82±2.13a	98.33±2.16a
重心高度 Height of center of gravity (cm)	40.76±1.57a	39.33±1.39a	39.76±1.17a	38.71±1.27a	39.58±0.95a	41.56±1.68a	39.76±1.68a	39.84±1.09a	40.24±1.35a
茎粗 Thick stem (mm)	4.30±0.08a	4.19±0.12a	4.46±0.06a	4.43±0.10a	4.18±0.08a	4.33±0.10a	4.41±0.10a	4.24±0.08a	4.29±0.11a
茎壁厚 Stem wall thickness (mm)	1.03±0.04a	0.92±0.05a	1.01±0.05a	1.02±0.05a	0.94±0.05a	1.00±0.05a	1.04±0.04a	0.95±0.04a	0.98±0.06a
倒伏率 Lodging rate (%)	0.49±0.08a	0.71±0.08a	0.66±0.09a	0.51±0.12a	0.65±0.07a	0.70±0.06a	0.54±0.11a	0.68±0.07a	0.63±0.08a

注:不同小写字母表示不同处理组合间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatment combinations ($P<0.05$). The same below.

其中, $C_1(87.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平下燕麦的单株粒数和穗下节长显著高于 $C_3(157.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平(表 2)。

2.1.2 肥料、保水剂和播种量的组合处理对燕麦群体植株的影响 由表 3 可知, 9 个处理组合中 $A_3B_1C_3$ 处理下燕麦的茎数显著高于 $A_1B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_3C_1$ 和 $A_3B_2C_1$ 处理 ($P < 0.05$), 第二节长显著高于 $A_1B_1C_1$ 、 $A_2B_2C_3$ 、 $A_2B_3C_1$ 和 $A_3B_3C_2$ 处理 ($P < 0.05$), 茎粗显著高于 $A_2B_2C_3$ 处理 ($P < 0.05$); $A_1B_3C_3$ 处理下穗数显著高于 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_2B_3C_1$ 、 $A_3B_1C_3$ 和 $A_3B_2C_1$ 处理 ($P < 0.05$), 分蘖成穗率显著高于 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_2B_2C_3$ 、 $A_2B_3C_1$ 、 $A_3B_1C_3$ 和 $A_3B_2C_1$ 处理 ($P < 0.05$); $A_1B_1C_1$ 处理下单株粒数显著高于 $A_3B_1C_3$ 和 $A_3B_2C_1$ 处理 ($P < 0.05$), 且此处理下的倒伏率显著低于 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_3C_1$ 、 $A_3B_2C_1$ 和 $A_3B_3C_2$ 处理 ($P < 0.05$); $A_2B_3C_1$ 处理下穗下节长显著高于 $A_3B_1C_3$ 处理 ($P < 0.05$), 穗长显著高于 $A_1B_2C_2$ 、 $A_1B_3C_3$ 、 $A_2B_2C_3$ 和 $A_3B_2C_1$ 处理 ($P < 0.05$)。

2.2 肥料、保水剂和播种量对燕麦产量的影响

2.2.1 肥料、保水剂和播种量各因素水平对燕麦单株生物产量的影响 $A_3(N: 89.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}, P: 41.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平下单株总生物量和茎秆生物量显著高于 $A_1(N: 44.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}, P: 83.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 和 $A_2(N: 44.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}, P: 41.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平, 说明适当增施氮肥有助于燕麦增产(表 4)。

随着保水剂浓度的升高, 燕麦单株总生物量、根系生物量和叶片生物量呈下降趋势, 其中 $B_1(60.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 保水剂水平处理下的根系生物量显著高于 $B_2(75.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 和 $B_3(90.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平 ($P < 0.05$), 且根系生物量的 F 值达到显著水平, 说明保水剂对燕麦根部生物量有显著影响(表 4)。

随着播种量的增加, 燕麦单株总生物量和穗部生物量均呈下降趋势, 而根系生物量呈上升趋势, 其中 $C_1(87.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 播种量下的单株总生物量显著高于 $C_3(157.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平 ($P < 0.05$), 穗部生物量显著高于 $C_2(122.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 和 $C_3(157.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ ($P < 0.05$); 且单株总生物量和穗部生物量的 F 值达到显著水平, 说明不同播种量对单株总生物量和穗部生物量影响显著(表 4)。

表 3 肥料、保水剂和播种量处理组合对燕麦群体和植株性状的影响

指标 Index	Table 3 Effects of fertilizer, water retaining agent and sowing amount treatment combination on oat population and plant traits								
	$A_1B_1C_1$	$A_1B_2C_2$	$A_1B_3C_3$	$A_2B_1C_2$	$A_2B_2C_3$	$A_2B_3C_1$	$A_3B_1C_3$	$A_3B_2C_1$	$A_3B_3C_2$
苗数 Number of seedlings (万苗 Ten thousand seedlings $\cdot \text{hm}^{-2}$)	337.97 $\pm$ 16.40a	291.28 $\pm$ 12.02a	344.64 $\pm$ 31.37a	344.64 $\pm$ 28.60a	362.43 $\pm$ 39.15a	375.77 $\pm$ 35.37a	282.38 $\pm$ 16.85a	339.08 $\pm$ 26.43a	333.53 $\pm$ 24.30a
茎数 Number of stems (万茎 Ten thousand stems $\cdot \text{hm}^{-2}$)	471.38 $\pm$ 38.24c	500.29 $\pm$ 27.16abc	528.08 $\pm$ 13.66abc	481.39 $\pm$ 22.48bc	504.73 $\pm$ 7.29abc	471.36 $\pm$ 12.80c	571.44 $\pm$ 12.82a	478.05 $\pm$ 22.48bc	549.20 $\pm$ 22.32ab
穗数 Panicle number (万穗 Ten thousand ears $\cdot \text{hm}^{-2}$)	402.45 $\pm$ 4.77d	441.36 $\pm$ 27.95cd	533.64 $\pm$ 8.08a	489.17 $\pm$ 13.19abc	490.28 $\pm$ 11.65abc	462.49 $\pm$ 32.39bcd	446.92 $\pm$ 20.60bcd	394.67 $\pm$ 32.61d	515.85 $\pm$ 24.34ab
分蘖成穗率 Percentage of tillering to head (%)	0.83 $\pm$ 0.02cd	0.88 $\pm$ 0.04bcd	0.97 $\pm$ 0.02a	0.92 $\pm$ 0.02ab	0.80 $\pm$ 0.05d	0.82 $\pm$ 0.01cd	0.82 $\pm$ 0.06cd	0.82 $\pm$ 0.04cd	0.91 $\pm$ 0.11abc
单株粒数 Number of grains per plant (粒 $\cdot \text{株}^{-1}$ Grains $\cdot \text{plant}^{-1}$)	61.93 $\pm$ 1.43a	59.93 $\pm$ 1.85ab	59.80 $\pm$ 0.72ab	59.07 $\pm$ 2.56ab	58.40 $\pm$ 0.76ab	59.67 $\pm$ 2.15ab	43.53 $\pm$ 0.95c	54.00 $\pm$ 2.87b	58.47 $\pm$ 3.43ab
第二节长 Second section length (cm)	22.80 $\pm$ 1.51b	24.60 $\pm$ 1.25ab	26.13 $\pm$ 0.76ab	24.67 $\pm$ 0.94ab	23.17 $\pm$ 0.77b	23.87 $\pm$ 1.37b	29.40 $\pm$ 1.24a	27.73 $\pm$ 1.67ab	24.20 $\pm$ 1.54b
第三节长 Third section length (cm)	45.53 $\pm$ 1.85a	45.40 $\pm$ 1.79a	48.53 $\pm$ 1.61a	47.33 $\pm$ 1.51a	44.63 $\pm$ 1.12a	49.60 $\pm$ 2.86a	52.60 $\pm$ 1.52a	50.00 $\pm$ 1.96a	46.47 $\pm$ 2.39a
穗下节长 Subear length (cm)	49.20 $\pm$ 1.38ab	47.27 $\pm$ 1.64ab	47.13 $\pm$ 0.98ab	47.93 $\pm$ 0.96ab	47.27 $\pm$ 1.63ab	54.33 $\pm$ 2.62a	44.80 $\pm$ 1.14b	49.87 $\pm$ 1.60ab	47.20 $\pm$ 1.42ab
穗长 Panicle length (cm)	18.27 $\pm$ 0.51ab	16.40 $\pm$ 0.57b	17.00 $\pm$ 0.52b	17.80 $\pm$ 0.57ab	16.53 $\pm$ 0.75b	19.53 $\pm$ 0.79a	17.87 $\pm$ 0.36ab	16.87 $\pm$ 0.66b	17.53 $\pm$ 0.56ab
株高 Plant height (cm)	117.20 $\pm$ 2.07a	119.07 $\pm$ 1.34a	117.67 $\pm$ 1.84a	117.33 $\pm$ 2.08a	114.13 $\pm$ 2.63a	123.67 $\pm$ 3.83a	114.60 $\pm$ 1.97a	122.53 $\pm$ 2.15a	117.80 $\pm$ 3.32a
穗位高 Ear height (cm)	98.93 $\pm$ 2.13a	102.67 $\pm$ 1.38a	100.67 $\pm$ 1.74a	99.53 $\pm$ 1.77a	97.60 $\pm$ 2.36a	104.13 $\pm$ 3.56a	96.73 $\pm$ 2.00a	105.67 $\pm$ 2.25a	100.27 $\pm$ 3.11a
重心高度 Height of center of gravity (cm)	39.87 $\pm$ 1.68a	38.87 $\pm$ 1.48a	43.53 $\pm$ 1.82a	38.87 $\pm$ 1.13a	39.80 $\pm$ 1.24a	39.33 $\pm$ 2.35a	37.40 $\pm$ 1.35a	40.07 $\pm$ 1.92a	41.80 $\pm$ 1.39a
茎粗 Thick stem (mm)	4.54 $\pm$ 0.15ab	4.14 $\pm$ 0.11ab	4.21 $\pm$ 0.10ab	4.15 $\pm$ 0.13ab	4.05 $\pm$ 0.12b	4.36 $\pm$ 0.16ab	4.59 $\pm$ 0.08a	4.34 $\pm$ 0.14ab	4.44 $\pm$ 0.14ab
茎壁厚 Stem wall thickness (mm)	1.08 $\pm$ 0.06a	0.99 $\pm$ 0.05a	1.01 $\pm$ 0.10a	0.90 $\pm$ 0.07a	0.83 $\pm$ 0.08a	1.03 $\pm$ 0.07a	1.10 $\pm$ 0.06a	1.00 $\pm$ 0.07a	0.94 $\pm$ 0.06a
倒伏率 Lodging rate (%)	0.22 $\pm$ 0.15b	0.57 $\pm$ 0.07ab	0.68 $\pm$ 0.03ab	0.76 $\pm$ 0.14a	0.66 $\pm$ 0.16ab	0.70 $\pm$ 0.18a	0.55 $\pm$ 0.22ab	0.72 $\pm$ 0.14a	0.73 $\pm$ 0.13a

表4 肥料、保水剂和播种量各因素水平对燕麦单株生物量的影响

Table 4 Effects of fertilizer, water retaining agent and seeding amount on biomass per plant of oat (g)

因素水平 Factor level	单株总生物量 Total biomass per plant	根系生物量 Root biomass	茎秆生物量 Stem biomass	叶片生物量 Blade biomass	穗部生物量 Panicle biomass
A ₁	3.01±0.06b	0.33±0.02a	1.22±0.04b	0.21±0.02a	1.25±0.02a
A ₂	2.98±0.16b	0.37±0.04a	1.17±0.06b	0.21±0.02a	1.24±0.08a
A ₃	3.43±0.12a	0.33±0.03a	1.51±0.07a	0.24±0.02a	1.36±0.09a
F	4.46	0.50	9.14	1.17	0.83
显著性 Significance	*	NS	**	NS	NS
B ₁	3.22±0.07a	0.40±0.04a	1.31±0.05a	0.23±0.02a	1.29±0.02a
B ₂	3.14±0.22a	0.31±0.02b	1.31±0.11a	0.22±0.02a	1.30±0.11a
B ₃	3.06±0.07a	0.30±0.02b	1.27±0.06a	0.21±0.01a	1.26±0.07a
F	0.34	3.35	0.08	0.12	0.06
显著性 Significance	NS	*	NS	NS	NS
C ₁	3.34±0.15a	0.32±0.03a	1.34±0.09ab	0.21±0.02a	1.48±0.07a
C ₂	3.20±0.04ab	0.35±0.04a	1.40±0.04a	0.24±0.02a	1.21±0.03b
C ₃	2.88±0.15b	0.36±0.03a	1.16±0.07b	0.21±0.02a	1.15±0.05b
F	3.84	0.52	3.15	0.99	10.44
显著性 Significance	*	NS	NS	NS	**

注: **表示不同处理下指标的F值达到极显著水平($P<0.01$); *表示不同处理下指标的F值达到显著水平($P<0.05$); NS表示无显著差异,下同。

Note: ** indicated that the F value of the index reached a very significant level under different treatments ($P<0.01$); * indicated that F value of indexes under different treatments reached a significant level ($P<0.05$); NS indicates no significant difference. The same below.

2.2.2 肥料、保水剂和播种量组合处理对燕麦单株生物产量的影响 肥料、保水剂和播种量水平组合对燕麦单株生物量的影响如表5所示, A₃B₂C₁处理下的燕麦单株总生物量(3.84 g)、茎秆生物量(1.64 g)和穗部生物量(1.67 g)均最大,且显著高于其余处理,其中茎秆生物量和穗部生物量对单株总生物量的贡献率分别为42.71%和43.49%;单株总生物量、茎秆生物量和穗部生物量F值达到极显著水平($P<0.01$),说明不同的肥料、保水剂和播种量处理组合对燕麦的单株总生物量、茎秆生物量和穗部生物量有极显著影响。

表5 肥料、保水剂和播种量间的处理组合对燕麦单株生物量的影响

Table 5 Effects of fertilizer, water retaining agent and seeding amount treatment combination on biomass per plant of oat (g)

处理组合 Treatment combination	单株总生物量 Total biomass per plant	根系生物量 Root biomass	茎秆生物量 Stem biomass	叶片生物量 Blade biomass	穗部生物量 Panicle biomass
A ₁ B ₁ C ₁	2.97±0.11cd	0.32±0.05ab	1.19±0.03cd	0.17±0.02b	1.29±0.02c
A ₁ B ₂ C ₂	3.18±0.03bcd	0.32±0.04ab	1.33±0.05bc	0.27±0.02a	1.26±0.03c
A ₁ B ₃ C ₃	2.89±0.09d	0.34±0.03ab	1.13±0.07cd	0.21±0.01ab	1.20±0.03c
A ₂ B ₁ C ₂	3.34±0.03b	0.46±0.09a	1.37±0.05bc	0.24±0.01a	1.28±0.03c
A ₂ B ₂ C ₃	2.39±0.10e	0.31±0.04ab	0.96±0.03d	0.16±0.01b	0.97±0.04d
A ₂ B ₃ C ₁	3.21±0.16bc	0.33±0.05ab	1.18±0.07cd	0.22±0.02ab	1.48±0.11b
A ₃ B ₁ C ₃	3.36±0.06b	0.42±0.05ab	1.38±0.11bc	0.27±0.04a	1.29±0.05c
A ₃ B ₂ C ₁	3.84±0.12a	0.29±0.06ab	1.64±0.17a	0.25±0.02a	1.67±0.12a
A ₃ B ₃ C ₂	3.09±0.01bcd	0.27±0.02b	1.50±0.04b	0.21±0.02ab	1.11±0.02cd
F	19.02	1.51	6.30	3.41	11.17
显著性 Significance	**	NS	**	*	**

2.2.3 肥料、保水剂和播种量各因素水平对燕麦草产量和籽粒产量的影响 A_2 (N:44.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平和 A_3 (N:89.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平下燕麦干草产量和干鲜比显著高于 A_1 (N:44.00 kg·hm⁻², P:83.00 kg·hm⁻²)水平(图1A), A_1 (N:44.00 kg·hm⁻², P:83.00 kg·hm⁻²)和 A_3 (N:89.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平下籽粒产量显著高于 A_2 (N:44.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)(图1B),说明增施氮有助于饲草增产。

随着保水剂浓度的升高和播种量的增加,燕麦籽粒产量均呈上升趋势,且保水剂对燕麦鲜草产量和干草产量的变化有显著影响(图1A,B)。

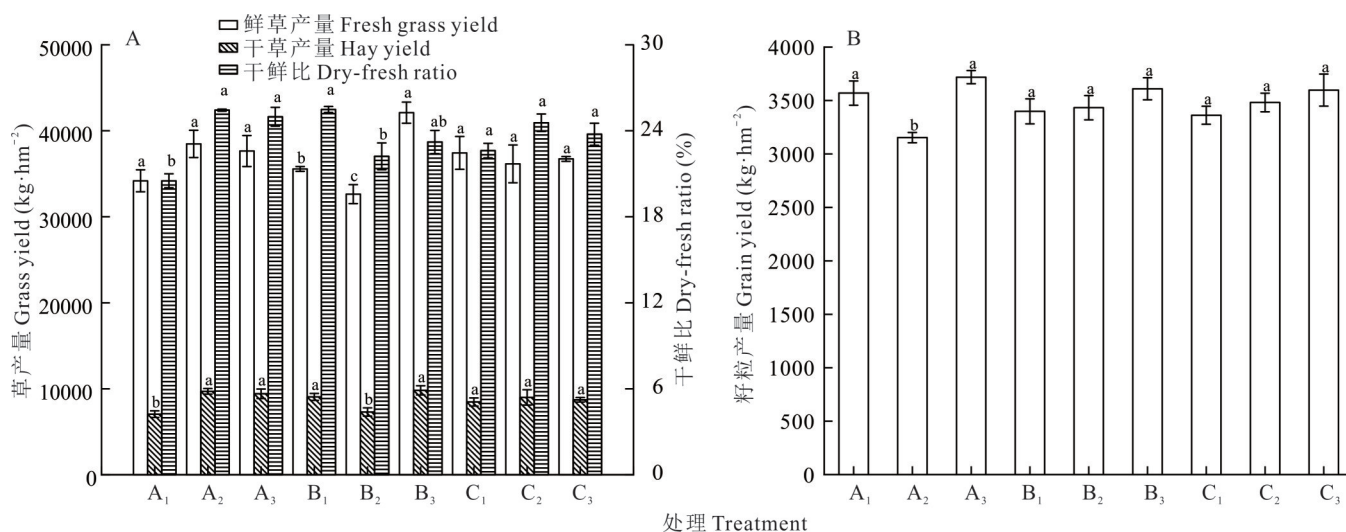


图1 不同处理水平下燕麦草和籽粒产量差异

Fig. 1 Differences in grass and grain yield of oat under different treatment levels

不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatment ($P < 0.05$). The same below.

2.2.4 肥料、保水剂和播种量组合处理对燕麦草产量和籽粒产量的影响 扬花期 $A_2B_3C_1$ 和 $A_3B_3C_2$ 处理下的鲜草产量分别为 44555.60 和 44255.45 kg·hm⁻², 显著高于其余处理($P < 0.05$), $A_3B_3C_2$ 处理下的干草产量最大(11194.26 kg·hm⁻²), 显著高于 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_1B_3C_3$ 、 $A_2B_2C_3$ 、 $A_3B_1C_3$ 和 $A_3B_2C_1$ ($P < 0.05$); $A_2B_1C_2$ 处理下的干鲜比为 29.33%, 显著高于其余处理($P < 0.05$, 图2A)。 $A_1B_3C_3$ 和 $A_3B_1C_3$ 处理下成熟期燕麦的籽粒产量为 3922.60 和 3856.60 kg·hm⁻², 显著高于 $A_1B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_2B_2C_3$ 和 $A_2B_3C_1$ ($P < 0.05$, 图2B)。燕麦鲜草产量、干草产量、干鲜比和成熟期籽粒产量的 F 值均达到极显著水平($P < 0.01$, 表6), 说明不同组合处理对燕麦的草产量和籽粒产量有显著影响。

2.3 肥料、保水剂和播种量对燕麦营养品质的影响

2.3.1 肥料、保水剂和播种量各因素水平对燕麦营养品质的影响 A_3 (N:89.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平下燕麦粗蛋白、粗脂肪、灰分、钙和磷含量均高于 A_1 (N:44.00 kg·hm⁻², P:83.00 kg·hm⁻²)和 A_2 (N:44.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平, 而酸性洗涤纤维含量最低, 说明 A_3 (N:89.00 kg·hm⁻², P:41.00 kg·hm⁻²)水平下燕麦营养品质较高, 且施肥对燕麦粗蛋白、钙和磷含量有极显著影响(表7)。

随着保水剂浓度的升高, 燕麦灰分含量逐渐增加, B_3 (90.00 kg·hm⁻²)水平下的灰分含量显著高于 B_1 (60.00 kg·hm⁻²)水平($P < 0.05$), 其余营养指标均无显著变化(表7)。

播种量对燕麦各项营养指标无显著影响(表7)。

2.3.2 肥料、保水剂和播种量组合处理对燕麦营养品质的影响 由表8可知, $A_3B_1C_3$ 组合处理下燕麦的粗蛋白含量、粗脂肪含量、钙含量、磷含量均最高, 酸性洗涤纤维含量最低, 其中, $A_3B_1C_3$ 组合处理下燕麦的粗蛋白含量比 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_1B_3C_3$ 、 $A_2B_1C_2$ 和 $A_2B_2C_3$ 组合处理分别高 27.40%、48.24%、45.08%、47.17% 和 48.06%, 且

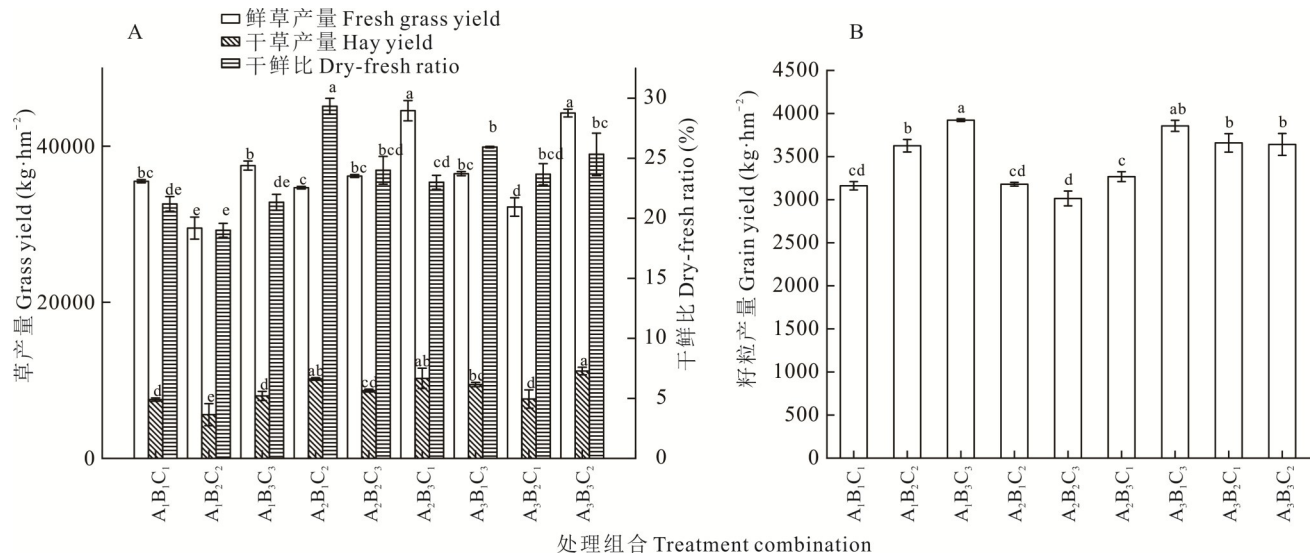


图2 肥料、保水剂和播种量间的处理组合对燕麦草和籽粒产量的影响

Fig. 2 Effects of fertilizer, water retaining agent and seeding amount treatment combination on grass and grain yield of oat

表6 肥料、保水剂和播种量间的不同水平处理和组合处理下各产量指标的分差分析

Table 6 Variance analysis of each yield index under different horizontal treatments and combined treatments among fertilizer, water retaining agent and seeding amount

处理 Treatment	显著性 Significance	鲜草产量 Fresh grass yield	干草产量 Hay yield	干鲜比 Dry-fresh ratio	籽粒产量 Grain yield
组合 Combination	<i>F</i>	37.97	22.27	11.62	19.30
	显著性 Significance	**	**	**	**
A	<i>F</i>	2.10	11.23	12.23	13.51
	显著性 Significance	NS	**	**	**
B	<i>F</i>	25.10	7.31	2.83	1.04
	显著性 Significance	**	*	NS	NS
C	<i>F</i>	0.14	0.19	0.82	1.12
	显著性 Significance	NS	NS	NS	NS

差异显著 ($P < 0.05$), 钙含量显著高于 A₁B₁C₁、A₁B₂C₂、A₂B₁C₂ 和 A₂B₂C₃ 组合处理 ($P < 0.05$); 磷含量显著高于 A₁B₂C₂、A₂B₁C₂ 和 A₂B₂C₃ 组合处理 ($P < 0.05$)。不同的肥料、保水剂和播种量组合处理对燕麦的粗蛋白和钙含量有显著影响。

2.4 燕麦扬花期产量和品质指标的极差分析和隶属函数分析

产量和品质是判断饲草性能的重要指标, 试验对所测定的鲜草产量、干草产量、干鲜比、成熟期籽粒产量、粗蛋白、粗脂肪、灰分、钙、磷、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量等 11 个产量和品质指标进行极差分析和隶属函数分析, 综合考虑肥料、保水剂、播种量 3 个因素对‘青海 444’燕麦生产性能、营养品质的影响。

将测定的 11 个产量和品质指标的极差值进行标准化后相加, 得到肥料、保水剂和播种量 3 个试验因素的总极差值, 各因素对燕麦的综合影响大小由总极差值大小决定, 3 个因素的总极差值由大至小依次是: A > B > C (表 9), 即肥料为最主要因素, 保水剂为次要因素, 播种量的影响最低。

计算 11 个指标综合评价, 得到 9 个组合处理生产性能、营养品质的综合排序, 9 个处理排序为: A₃B₁C₃ > A₃B₂C₂ > A₂B₃C₁ > A₁B₃C₃ > A₃B₂C₁ > A₁B₁C₁ > A₂B₁C₂ > A₂B₂C₃ > A₁B₂C₂ (表 10), 其中 A₃B₁C₃ 处理组合的平均隶属函数值为 0.78, 综合排名第一, 即该地区在肥料: N₂P₁K₁ (N: 89.00 kg·hm⁻², P: 41.00 kg·hm⁻², K: 41.00 kg·hm⁻²), 保水剂: 60.00 kg·hm⁻², 播种量: 157.05 kg·hm⁻² 时综合性状表现最好。

表 7 肥料、保水剂和播种量不同因素水平下燕麦的营养品质差异

Table 7 Difference of nutritional quality of oats under different factors of fertilizer, water retaining agent and sowing amount (%)

因素水平 Factor level	粗蛋白含量 Crude protein content	粗脂肪含量 Crude fat content	灰分含量 Ash content	钙含量 Calcium content	磷含量 Phosphorus content	酸性洗涤纤维含量 Acid detergent fiber content	中性洗涤纤维含量 Neutral detergent fiber content
A ₁	8.76±0.44b	3.28±0.08a	8.20±0.59a	0.22±0.02b	0.32±0.00b	37.52±0.62a	68.07±0.85a
A ₂	8.83±0.46b	3.37±0.04a	7.92±0.29a	0.18±0.01b	0.32±0.00b	37.55±0.75a	69.08±0.83a
A ₃	11.46±0.45a	3.45±0.07a	8.77±0.40a	0.27±0.02a	0.35±0.00a	37.29±0.97a	68.66±0.93a
F	11.79	1.70	0.93	8.39	7.69	0.03	0.34
显著性 Significance	**	NS	NS	**	**	NS	NS
B ₁	10.05±0.63a	3.39±0.07a	7.74±0.17b	0.21±0.02a	0.33±0.01a	36.85±0.58a	68.55±0.63a
B ₂	8.91±0.57a	3.33±0.04a	8.08±0.42ab	0.21±0.02a	0.32±0.01a	38.37±1.07a	68.99±1.07a
B ₃	10.09±0.60a	3.38±0.08a	9.08±0.56a	0.25±0.01a	0.33±0.00a	37.15±0.49a	68.27±0.87a
F	1.24	0.26	2.79	1.29	0.92	1.12	0.18
显著性 Significance	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C ₁	9.92±0.28a	3.39±0.03a	8.21±0.48a	0.22±0.01a	0.33±0.00a	37.67±0.94a	67.72±0.97a
C ₂	9.49±0.66a	3.28±0.03a	8.14±0.32a	0.21±0.01a	0.33±0.01a	37.53±0.62a	68.97±0.64a
C ₃	9.64±0.81a	3.43±0.10a	8.54±0.55a	0.24±0.02a	0.33±0.01a	37.17±0.79a	69.12±0.91a
F	0.12	1.54	0.21	0.83	0.45	0.10	0.81
显著性 Significance	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

表 8 肥料、保水剂和播种量间的不同处理组合下燕麦营养品质差异

Table 8 Difference of nutritional quality of oats under different treatment combinations of fertilizer, water retaining agent and seeding amount (%)

处理组合 Treatment combination	粗蛋白含量 Crude protein content	粗脂肪含量 Crude fat content	灰分含量 Ash content	钙含量 Calcium content	磷含量 Phosphorus content	酸性洗涤纤维含量 Acid detergent fiber content	中性洗涤纤维含量 Neutral detergent fiber content
A ₁ B ₁ C ₁	9.60±0.41b	3.33±0.03a	7.33±0.13a	0.19±0.02cd	0.33±0.01abc	37.67±0.61a	67.63±0.40a
A ₁ B ₂ C ₂	8.25±0.74b	3.21±0.03a	7.50±0.21a	0.20±0.01bcd	0.31±0.01c	37.77±1.56a	68.10±1.03a
A ₁ B ₃ C ₃	8.43±1.04b	3.31±0.26a	9.77±1.52a	0.27±0.01ab	0.33±0.01abc	37.12±1.29a	68.49±2.68a
A ₂ B ₁ C ₂	8.31±0.40b	3.24±0.04a	7.76±0.31a	0.17±0.02d	0.32±0.01bc	37.20±1.40a	69.63±1.80a
A ₂ B ₂ C ₃	8.26±1.18b	3.39±0.05a	7.71±0.34a	0.17±0.01d	0.32±0.01bc	38.73±1.68a	70.48±1.01a
A ₂ B ₃ C ₁	9.93±0.18ab	3.37±0.02a	8.30±0.84a	0.21±0.02abcd	0.33±0.00abc	36.72±0.98a	67.14±0.94a
A ₃ B ₁ C ₃	12.23±0.67a	3.51±0.17a	8.13±0.30a	0.28±0.05a	0.35±0.01a	35.67±0.77a	68.39±0.59a
A ₃ B ₂ C ₁	10.23±0.80ab	3.38±0.05a	9.01±1.14a	0.26±0.02abc	0.34±0.00abc	38.60±2.89a	68.40±3.14a
A ₃ B ₃ C ₂	11.91±0.38a	3.38±0.06a	9.17±0.51a	0.26±0.01abc	0.35±0.00a	37.60±0.34a	69.18±0.18a
F	4.71	1.05	1.30	3.79	2.41	0.41	0.40
显著性 Significance	**	NS	NS	**	NS	NS	NS

3 讨论

3.1 氮磷肥料配施对燕麦生产性能的影响

作物产量和品质不仅受到品种自身遗传物质的影响,还受到播种密度^[13]、水肥管理^[11]等多种因素的影响。由于生长环境存在差异,不同作物生长发育对水肥和播种密度等因素的需求存在差异。肥料通过提供作物的营养生长和生殖生长所必需的矿质元素达到高产优质^[19]。在土壤肥力较低时,更容易获得较高的肥料利用效率^[20],Liu 等^[21]和 Wang 等^[22]研究表明肥料配施可通过提高土壤肥力有效提高作物产量和产量可持续性。徐正辉等^[23]研究发现氮、磷肥混施显著提高了老芒麦(*Elymus sibiricus*)的鲜草产量和干草产量。粗蛋白、酸性洗涤纤维和中

性洗涤纤维含量是评价饲草营养品质的重要指标,饲草品质与酸性洗涤纤维含量和中性洗涤纤维含量呈负相关,酸性洗涤纤维含量和中性洗涤纤维含量越低,则消化率就相对越高^[24];相同施肥量下,燕麦粗蛋白含量随施氮量的增加呈先增加后降低趋势,且施氮 75.00 kg·hm⁻²处理粗蛋白含量最高^[25]。王亚士等^[26]研究表明,‘边锋’和‘梦龙’燕麦品种均以氮磷混合施肥量为 300.00 kg·hm⁻² (N 91.50 kg·hm⁻²+P₂O₅ 63.00 kg·hm⁻²)时效果较好,此时产草量最大。本研究中,A₂(N: 44.00 kg·hm⁻², P: 41.00 kg·hm⁻²)施肥水平下的鲜草产量、干草产量和干鲜比最高、A₃(N: 89.00 kg·hm⁻², P: 41.00 kg·hm⁻²)水平下的粗蛋白、粗脂肪、灰分、钙和磷含量最高,酸性洗涤纤维含量最低,这与前人的结论略有不同,其原因是两者选取的燕麦品种不同,材料自身的蛋白质含量有区别,试验地区不同,原土壤肥力不同,因此最佳施肥量有所差别。

3.2 保水剂对燕麦生产性能的影响

保水剂是含有大量强亲水性官能团的高分子电解质,当保水剂与水接触时,亲水基团就会同水分子结合成水凝胶,锁住大量水分^[27],从而抑制了土壤水分的蒸发和流失,提高土壤含水量,土壤干旱缺水时,保水剂则会释放水分子,让土壤保持水分,从而保证植物根系需水,刺激根系生长^[28];与此同时,当土壤养分充足时保水剂表面的官能团也能与土壤中的 NH₄⁺、NO₃⁻和 K⁺等养分离子结合,减少养分的流失,当养分缺乏时,保水剂释放养分离子供给植物,从而提高肥料利用率^[29]。Lu等^[30]研究表明,使用保水剂能提高燕麦的种子产量和地上部分生物量。

3.3 播种量对燕麦生产性能的影响

在人工饲草群体中播种量会影响饲草群体的密度和结构,合理的种植密度可以优化群体间个体生长的环境条件,有利于饲草干物质的积累,提高饲草产量和品质^[31]。武慧娟等^[32]发现不同播种量下植株分蘖数和有效分蘖数存在显著差异;本研究中随着播种量的增加,燕麦穗长、株高、穗位高等指标均呈下降趋势。播种量低,植株赖以生存的光、水、肥等资源充足,燕麦通过调节自身的分蘖能力平衡群体结构,播种量过高,资源供不应求,燕麦则降低分蘖数调节群体结构,随着播种量的增加,燕麦鲜草产量和干草产量呈先增大后减小的变化趋势^[33]。本研究中燕麦的干草产量、干鲜比和籽粒产量随播种量变化趋势与前人一致,说明群体干物质积累存在一定的密度效应,群体密度过大,个体所吸收到的水分、光照、肥料等资源不足,会降低个体分蘖和生长能力,群体干物质积累量降低,从而导致减产^[34-36]。本研究中随着播种量的增加,粗蛋白、粗脂肪、灰分、钙等物质含量先减小后增加。牧草营养价值的高低直接影响其饲喂效果,粗蛋白含量越高,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量越低,饲料品质和饲喂效果越好^[37]。

表9 产量指标和品质指标的极差分析

Table 9 Range analysis of yield index and quality index

指标 Index	A	B	C
鲜草产量 Fresh grass yield (kg·hm ⁻²)	0.37	1.00	0.00
干草产量 Hay yield (kg·hm ⁻²)	1.00	0.93	0.00
干鲜比 Dry-fresh ratio (%)	1.00	0.48	0.00
籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	0.00	1.00	0.34
粗蛋白含量 Crude protein content (%)	1.00	0.33	0.00
粗脂肪含量 Crude fat content (%)	1.00	0.00	0.86
灰分含量 Ash content (%)	0.48	1.00	0.00
钙含量 Calcium content (%)	1.00	0.09	0.00
磷含量 Phosphorus content (%)	1.00	0.15	0.00
酸性洗涤纤维含量 Acid detergent fiber content (%)	0.00	1.00	0.18
中性洗涤纤维含量 Neutral detergent fiber content (%)	0.42	0.00	1.00
总极差值 Total range	7.27	5.99	2.39

表10 产量指标和品质指标隶属函数分析

Table 10 Membership function analysis of output index and quality index

处理组合 Treatment combination	平均隶属函数值 Average membership function value	综合排名 Comprehensive ranking
A ₁ B ₁ C ₁	0.34	6
A ₁ B ₂ C ₂	0.20	9
A ₁ B ₃ C ₃	0.55	4
A ₂ B ₁ C ₂	0.33	7
A ₂ B ₂ C ₃	0.22	8
A ₂ B ₃ C ₁	0.59	3
A ₃ B ₁ C ₃	0.78	1
A ₃ B ₂ C ₁	0.50	5
A ₃ B ₃ C ₂	0.71	2

3.4 多因素互作对燕麦生产性能的影响

播种量是调控作物群体结构的重要因素^[38],养分是实现植物优质高产的必要物质,保水剂能够改善土壤物理性质,促进养分吸收利用,进而促进植物生长发育。任昱鑫^[39]研究发现施氮量和播种量交互作用下,施氮量为 $240.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、播种量为 $300.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时有利于‘藏饲1号’小黑麦(*Triticale*)的营养生长,平均干草产量($14.05\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和综合评价价值均最高。而施氮量为 $120.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、播种量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时有利于‘藏饲1号’小黑麦的生殖生长,其中籽粒产量($10.53\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和综合评价价值均最高。马力等^[40]发现保水剂与氮肥配施时,相同的氮肥处理下,随着保水剂用量的增加,燕麦的穗长、穗粒数、小穗数和穗重均呈上升趋势。毛思帅等^[41]研究表明,施用保水剂和肥料配施能显著提高沙地燕麦的产量、粗蛋白含量和相对饲用价值,且在 $60.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 保水剂和 $375.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 肥料组合处理下,燕麦的品质最优,本研究结果与其相似。播种量决定播种密度,播种密度调控行距,田露等^[42]采用围绕滴灌带缩小行距到 15 cm 带状种植,配合施用 $22.50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 保水剂的种植方式调节燕麦根系和叶片衰老,延缓衰老进程,对滴灌燕麦生物产量和籽粒产量的形成具有促进作用。本研究中根据极差分析得出,肥料是影响燕麦产量和品质的最主要因素,保水剂为次要因素,播量的影响最低,并且 $A_3B_1C_3$ 组合处理,即该地区在肥料: $N_2P_1K_1$ ($N:89.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $K:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),保水剂: $60.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播种量: $157.05\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时燕麦综合性状表现最佳。可见不同的饲草品种、不同的生长环境、不同的因素水平及组合对产量和品质的影响不同。

4 结论

在本研究范围内,肥料是影响燕麦生产性能和营养品质的最主要因素,其次是保水剂和播种量;燕麦的产量和品质的综合表现最佳组合为肥料: $N_2P_1K_1$ ($N:89.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $K:41.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),保水剂: $60.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播量: $157.05\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,该结果可为呼伦贝尔地区燕麦的绿色高效栽培提供理论依据和技术指导,适宜在该地区推广。

参考文献 References:

- [1] Song J C, Gao J, Zhong Z F, *et al.* Analysis of grassland development status in Hulunbuir area. *Yunnan Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2024(6): 31–33.
宋建成, 高建, 钟振福, 等. 呼伦贝尔地区草原发展现状分析. *云南畜牧兽医*, 2024(6): 31–33.
- [2] Pan Q M, Xue J G, Tao J, *et al.* Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in northern China. *Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1642–1650.
潘庆民, 薛建国, 陶金, 等. 中国北方草原退化现状与恢复技术. *科学通报*, 2018, 63(17): 1642–1650.
- [3] Yan H G, Deng D, Zhou P P, *et al.* Dissecting the genetic basis of grain weight and size in common oat by genome-wide association study. *Journal of Cereal Science*, 2023, 114(10): 3811.
- [4] Uma D, Dheeraj P, Pawan K, *et al.* Effect of nitrogen fertilizers on yield and quality of oats: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 2019, 7(2): 1999–2005.
- [5] Liu Y. Study on grassland planting structure in typical pastoral areas of western China based on ecological water demand. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
刘雨. 基于生态需水的西部典型牧区草地种植结构研究. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [6] Zhang Y. Effects of water and nitrogen regulation on water, nitrogen and salt transport and oat water consumption in saline-alkali soil. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
张毅. 水氮调控对盐碱地水氮盐分布和燕麦耗水特性的影响. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [7] Kebede G, Worku W, Jifar H, *et al.* Effects of fertilizer levels and varieties on fodder yield productivity, nutrient use efficiency, and profitability of oat (*Avena sativa* L.) in the central highlands of Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, 16(10): 1161.
- [8] Huang W, Lai H Q, Du J X, *et al.* Effect of polymer water retaining agent on physical properties of silty clay. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, 9(1): 47.
- [9] Yang Y H, Wu J C, Zhao S W. Effects of different macromolecule absorbent resins on the moisture characteristics of major soil type on Loess Plateau. *Asian Journal of Chemistry*, 2014, 26(17): 5755–5760.

- [10] Xu Y, Gao Y, Li W, *et al.* Effects of compound water retention agent on soil nutrients and soil microbial diversity of winter wheat in saline-alkali land. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2023, 10(2): 4118.
- [11] Fu H Z, Wang Y F, Zhu Z Z, *et al.* Effects of water retention agent combined with nitrogen fertilizer on physical and chemical properties of drought resistance in cigar tobacco. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(6): 88–95.
付宏喆, 王亚飞, 朱治忠, 等. 保水剂与氮肥配施对雪茄烟抗旱性相关理化性状的影响. *山东农业科学*, 2024, 56(6): 88–95.
- [12] John F, Brendan B, John S. The effect of nitrogen timing and rate on radiation interception, grain yield and grain quality in autumn sown oats. *Field Crops Research*, 2019, 231(1): 130–140.
- [13] Xiao X J, Zhou Q P, Chen Y J, *et al.* Effect of seeding rate on production performance and photosynthetic characteristics of *Avena sativa* cv. LENA in alpine pastoral regions. *Pratacultural Science*, 2017, 34(4): 761–771.
肖雪君, 周青平, 陈有军, 等. 播种量对高寒牧区林纳燕麦生产性能及光合特性的影响. *草业科学*, 2017, 34(4): 761–771.
- [14] Li X X, He Y Y, Yang W H, *et al.* Effects of different water conditions and plant density on the growth and interspecific competition of *Hemarthria compressa* and *Cynodon dactylon*. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3046–3058.
李晓雪, 贺燕燕, 杨文航, 等. 不同水分处理和密度配置对牛鞭草与狗牙根生长与种间竞争的影响. *生态学报*, 2018, 38(9): 3046–3058.
- [15] Zhao B W, Zhan Y, Fang J Q, *et al.* Mixing ratios effects on production performance and quality in oat and common vetch intercropping systems. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3): 81–90.
赵保文, 詹圆, 方嘉琪, 等. 混播比例对燕麦与箭筈豌豆生产性能的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(3): 81–90.
- [16] Ren B C, Liu P, Zhang J W, *et al.* Effect of plant density and nitrogen rate on yield, nitrogen uptake and use efficiency of summer maize hybrids with different plant height. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 269–277.
任佰朝, 刘鹏, 张吉旺, 等. 种植密度和施氮量对不同株高夏玉米产量和氮素利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 269–277.
- [17] Dumcam E G, O'sullivan C A, Roper M M, *et al.* Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(3): 364–373.
- [18] Liu M, Liu W H, Liu K Q, *et al.* Seed yield response of 'Qingyin No. 1' oats to nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers in the alpine zone. *Pratacultural Science*, 2024, 41(2): 345–355.
刘慢, 刘文辉, 刘凯强, 等. 高寒区'青引1号'燕麦种子产量对氮、磷、钾肥的响应. *草业科学*, 2024, 41(2): 345–355.
- [19] Zhang R, Bai G S. Application and development prospect of the super absorbent polymer in agricultural production. *Journal of Agriculture*, 2012, 2(7): 37–42, 78.
张蕊, 白岗栓. 保水剂在农业生产中的应用及发展前景. *农学学报*, 2012, 2(7): 37–42, 78.
- [20] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, *et al.* Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6): 1096–1103.
- [21] Liu B, Wang X Z, Ma L, *et al.* Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2021, 269(15): 116143.
- [22] Wang J F, Yang X Y, Huang S M, *et al.* Long-term combined application of organic and inorganic fertilizers increases crop yield sustainability by improving soil fertility in maize-wheat cropping systems. *Journal of Integrative Agriculture*, 2025, 24(1): 290–305.
- [23] Xu Z H, Yu H Y, Yang H, *et al.* The effect of nitrogen and phosphorus fertilizer combined application on the yield and nutrition value in vegetative growth and reproductive growth stages of local *Elymus sibiricus*. *China Feed*, 2024(19): 137–145.
徐正辉, 俞慧云, 杨浩, 等. 营养及生殖生长关键期氮磷肥配施对老芒麦产草量及营养价值的影响. *中国饲料*, 2024(19): 137–145.
- [24] Tian L H, Wang D D, Shen Y Y. Advances in utilisation of dual-purpose Triticeae crops. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2015, 24(2): 185–193.
田莉华, 王丹丹, 沈禹颖. 麦类作物粮饲兼用研究进展. *草业学报*, 2015, 24(2): 185–193.
- [25] Du C M. Combined application of nitrogen and phosphorus on the growth and development of oats and dry matter accumulation. Shenyang: Liaoning University, 2021.
杜春明. 氮磷配施对燕麦生长发育及干物质积累的影响. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
- [26] Wang Y S, Cao H, Peng Z K, *et al.* Effects of different nitrogen and phosphorus application rates on the growth of summer-sown forage oats. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2024, 3(2): 174–178.

- 王亚士, 曹宏, 彭正凯, 等. 不同氮磷肥施用量对夏播饲用燕麦生长的影响. 寒旱农业科学, 2024, 3(2): 174—178.
- [27] Wang Y F, Bi H M. Research on the application and development of super absorbent polymers. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2006(5): 77—80.
- 王亚飞, 毕红梅. 保水剂的应用现状及发展前景. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006(5): 77—80.
- [28] Howard D D, Oosterhuis M, Holman M, *et al.* Programmed slow release soil fertilizer to meet cotton nitrogen and potassium requirements. Proceedings, 1998, 1(1): 672—673.
- [29] Dang X L, Zhang Y L, Huang Y. Research status and prospect on application of water holding agents in agriculture. Chinese Journal of Soil Science, 2006(2): 2352—2355.
- 党秀丽, 张玉龙, 黄毅. 保水剂在农业上的应用与研究进展. 土壤通报, 2006(2): 2352—2355.
- [30] Lu T, Liu J H, Zhang S, *et al.* Effects of strip cropping with reducing row spacing and super absorbent polymer on yield and water productivity of oat (*Avena sativa* L.) under drip irrigation in Inner Mongolia, China. Scientific Reports, 2022, 12(1): 11441.
- [31] Zhou Q P, Yan H B, Liang G L, *et al.* Analysis of the forage and grain productivity of oat cultivars. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(10): 120—130.
- 周青平, 颜红波, 梁国玲, 等. 不同燕麦品种饲草和籽粒生产性能分析. 草业学报, 2015, 24(10): 120—130.
- [32] Wu H J, Ma L X, Geng X L, *et al.* Effects of different sowing rates and row spacing on forage yield, seed yield and agronomic traits of 'Xiayan No. 1'. China Herbivore Science, 2023, 43(2): 23—27, 36.
- 武慧娟, 马隆喜, 耿小丽, 等. 不同播量和行距对“夏燕1号”牧草产量、种子产量及农艺性状的影响. 中国草食动物科学, 2023, 43(2): 23—27, 36.
- [33] Chen Y Y, Jiang Z, Zhang X, *et al.* Effects of sowing rate and method on the yield and quality of *Avena sativa* L. cv. *Magnum*. Journal of Grassland and Forage Science, 2023(3): 19—26.
- 陈芸莹, 姜臻, 张新, 等. 播量与播种方式对四川阿坝地区燕麦牧草产量和品质的影响. 草学, 2023(3): 19—26.
- [34] Fang Q, Wang H G, Ma B W. Effect of planting density and nitrogen application rate on population quality and yield formation of super high-yielding winter wheat. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(3): 367.
- 房琴, 王红光, 马伯威. 密度和施氮量对超高产冬小麦群体质量和产量形成的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 367.
- [35] Yang W J, Jia Y H, Shi S B. Effect of sowing date and planting density on growth and yield of spring wheat Xinchun 26. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(7): 913.
- 杨卫君, 贾永红, 石书兵. 播期和密度对春小麦品种新春26号生长及产量的影响. 麦类作物学报, 2016, 36(7): 913.
- [36] Lu H D, Xue J Q, Hao Y C. Effects of planting densities on the yields and forage nutritive values of different corn (*Zea mays* L.) varieties. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(4): 865—870.
- 路海东, 薛吉全, 郝引川. 密度对不同类型青贮玉米饲用产量及营养价值的影响. 草地学报, 2014, 22(4): 865—870.
- [37] Chen X, Jiang W R, Gao M Y. Comparative study on feeding effect of different roughages alfalfa hay and rice straw on *Hu* sheep. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(11): 5285—5292.
- 陈希, 姜婉茹, 高铭谣. 不同粗饲料苜蓿干草和稻秸对湖羊饲喂效果的比较研究. 动物营养学报, 2020, 32(11): 5285—5292.
- [38] Wang J M, Zhang R, Tian Y P, *et al.* Effect of sowing date and sowing amount on yield and quality of common wheat variety Zhongmai 895. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(11): 1375—1381.
- 汪娟梅, 张睿, 田永平, 等. 播期播量对小麦中麦895产量和品质的影响. 麦类作物学报, 2020, 40(11): 1375—1381.
- [39] Ren Y X. Studies on the regulation of fertilization and planting density on the growth of triticale and soil physical and chemical properties in the valley area of Tibet. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
- 任昱鑫. 施肥和种植密度对西藏河谷区小黑麦生长及土壤理化特性的调控作用研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [40] Ma L, Zhou Q P, Yan H B, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and super absorbent polymers on yield of *Avena sativa* cv. Qingyan No. 1. Pratacultural Science, 2014, 31(10): 1929—1934.
- 马力, 周青平, 颜红波, 等. 氮肥与保水剂配施对青燕1号燕麦产量的影响. 草业科学, 2014, 31(10): 1929—1934.
- [41] Mao S S, Robiul I M, Jia P F, *et al.* Effects of different superabsorbent polymer and fertilization rates on forage oat (*Avena sativa* L.) production in sandland. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(2): 308—313.
- 毛思帅, Robiul I M, 贾鹏飞, 等. 保水剂和施肥量对沙地燕麦生产的影响. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 308—313.
- [42] Tian L, Liu J H, Mi J Z, *et al.* Impact of planting spacing and soil amendment with water absorbent on root and leave senescence traits of drip irrigated oat. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 1—9.
- 田露, 刘景辉, 米俊珍, 等. 缩行带状种植和保水剂对滴灌燕麦根系和叶片衰老特性的影响. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 1—9.