

种植密度对陇东地区饲用燕麦生产性能及光合特性的影响

毛丽^{1,2}, 曹宏^{1,3,4*}, 柴守玺^{1,2**}, 张晓燕^{3,4}, 彭正凯^{3,4}, 李茜^{3,4}

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 陇东学院农林科技学院, 甘肃 庆阳 745000; 4. 陇东旱地作物种质改良及产业化协同创新中心, 甘肃 庆阳 745000)

摘要:【目的】探明不同种植密度对饲用燕麦农艺性状、草产量及光合特性的影响,以及陇东地区饲用燕麦的最适种植密度。【方法】以燕麦中熟品种梦龙和晚熟品种爱沃为试验材料,在陇东黄土高原旱作区进行了300万株/hm²(D1)、375万株/hm²(D2)、450万株/hm²(D3)、525万株/hm²(D4)、600万株/hm²(D5)、675万株/hm²(D6)6个种植密度的田间对比试验。【结果】随种植密度增加,2个饲用燕麦品种的生长天数缩短,株高、茎粗、单株分蘖数呈下降趋势;2个饲用燕麦品种开花期叶面积指数随密度增加先升高后降低,叶绿素含量随密度增加而下降,中熟品种梦龙的各项光合参数均在D1下最高,晚熟品种爱沃的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度在D2下最高,胞间CO₂浓度在D1下最高;2个饲用燕麦品种的鲜、干草产量均随密度增加先升高后降低,中熟品种梦龙的鲜、干草产量在D4下最高,分别为22 878.1和9 867.78 kg/hm²,晚熟品种爱沃的鲜、干草产量在D3下最高,分别为20 852.09和8 129 kg/hm²。【结论】在陇东地区春播的情况下,选择中熟品种梦龙为宜,其获得饲草高产的种植密度为525万株/hm²,晚熟品种爱沃获得饲草高产的种植密度为450万株/hm²。

关键词:种植密度;燕麦;生产性能;光合特性;陇东地区

中图分类号:S544.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)01-0080-09

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.010



随着“草牧业”和“粮改饲”等政策的推进,燕麦(*Avena sativa*)作为优质粮草兼饲用作物被列为人工草地建设饲草料的主推草(饲)种^[1]。其籽实和茎叶富含多种营养物质,可加工成优质精饲料或做青贮鲜草和调制青干草供家畜食用^[2-4]。近年来,由于我国禁

牧政策的实施,国内大型奶业企业对优质燕麦饲草需求量增大,燕麦干草大量进口^[5]。因此,燕麦优质高产栽培对我国畜牧业可持续发展具有十分重要的作用^[6]。陇东地区作为我国传统农牧交错区和甘肃省现代草食畜产业主要生产区域,以草畜转化为主,大力发展以陇东苜蓿、饲用燕麦、专用青贮玉米为主的草产业^[7-8]。自2017年以来,燕麦的生产由家庭小规模逐渐发展为龙头企业带动的机械化规模化生产,其种植面积逐年增大,2020年底,面积已经到达1万hm²^[9]。

为提高饲用燕麦优质高产,诸多学者在燕麦品种的选育^[10-12]和栽培措施^[13-15]等方面进行了研究。优化种植密度是提高作物产量的重要措施^[16],合理的种植密度可优化作物群体结构,植株能够充分利用光温水肥资源,从而提高产量^[17]。目前,陇东地区有关饲用燕麦的研究仅见梁万鹏等^[18]关于品种引选和王亚

收稿日期:2023-12-15;**修回日期:**2024-07-05

基金资助:甘肃省科技厅青年基金项目(23JRRM0758);陇东学院博士基金项目(XYBYZK2230);庆阳市科技支撑计划(QY2021A-N002)

作者简介:毛丽(1998-),女,甘肃嘉峪关人,硕士研究生。

E-mail:1002939014@qq.com

*通信作者,研究方向为作物育种与栽培。

E-mail:caoh207@163.com

**通信作者,研究方向为作物栽培及生理生态研究。E-mail:sxchai@126.com

士等^[19]关于燕麦播期、施肥量的报道。因此,本研究选取燕麦中熟品种梦龙和晚熟品种爱沃,通过分析不同种植密度对燕麦生产性能及光合特性的影响,筛选不同熟期高产优质饲用燕麦最适种植密度,为陇东地区饲用燕麦高产优质栽培管理提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省庆阳市陇东学院西峰旱作农业试验站(107°27' E, 35°25' N, 海拔 1 421 m),该区年均气温 7~10℃,年日照 2 250~2 600 h,年无霜期 140~180 d,年降水量 480~660 mm,≥10℃年积温 2 600~2 750℃,属于旱半干旱气候区。试验地前茬作物为燕麦,0~20 cm 耕层土壤的 pH 值为 7.23,有机质含量 12.28 g/kg,全氮含量 0.94 g/kg,全磷含量

0.89 g/kg,碱解氮含量 38.41 mg/kg,速效磷含量 16.33 mg/kg,速效钾含量 162.18 mg/kg。2023 年试验期间月平均气温和月总降水量如图 1 所示。

1.2 试验材料

选择燕麦中熟品种梦龙和晚熟品种爱沃作为本次试验材料,品种信息详情见表 1。

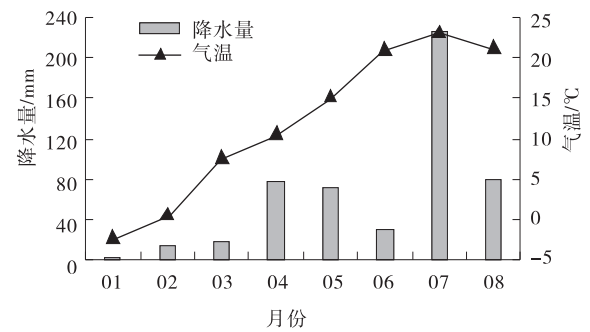


图 1 试验区 2023 年月平均气温和月总降水量

Fig. 1 Monthly average temperature and total monthly precipitation in the experimental area in 2023

表 1 供试燕麦品种信息

Table 1 The information of oat varieties in the experiment

品种	千粒重/g	净度/%	发芽率/%	生育期/d	原产地	种子来源
梦龙 Magnum	38.68	99.48	96	104	美国	西安百绿草业有限公司
爱沃 Everleaf 126	30.51	99.70	91	125	美国	北京正道种业有限公司

1.3 试验设计

本试验采用裂区设计,以品种为主区,设中熟和晚熟 2 个品种,以种植密度为副区,设 6 个密度,分别为 300 万株/hm² (D1)、375 万株/hm² (D2)、450 万株/hm² (D3)、525 万株/hm² (D4)、600 万株/hm² (D5)、675 万株/hm² (D6),3 次重复,共 36 个小区。小区面积为 15 m² (3 m×5 m),行距为 20 cm,小区间距为 50 cm,试验地四周设保护行,2023 年 3 月 26 日趁墒人工开沟条播,每一处理实际播种量根据各品种发芽率和净度计算所得(表 2),播种前施底肥磷酸二铵(N≥18%,P₂O₅≥46%) 325 kg/hm² 和复合肥(N:P:K=15:15:15) 232 kg/hm²,试验期间不追肥,苗期人工除草 1 次。

1.4 测量项目及方法

1.4.1 物候期 记载燕麦从出苗到乳熟各物候期的时间,以每小区 50% 的植株达到某一物候期为鉴别标准,并计算出苗期到饲草收获期(乳熟期)的生长天数。

1.4.2 农艺性状指标 乳熟期在每小区中间 3 行内

表 2 不同品种各密度播种量

Table 2 Each density seeding amount of different varieties

品种	种植密度/(万株·hm ⁻²)	播种量/(g·m ⁻²)
梦龙 Magnum	300(D1)	13.33
	375(D2)	16.67
	450(D3)	20.00
	525(D4)	23.33
	600(D5)	26.67
	675(D6)	30.00
爱沃 Everleaf 126	300(D1)	10.53
	375(D2)	13.13
	450(D3)	15.80
	525(D4)	18.40
	600(D5)	21.07
	675(D6)	23.67

选取 10 株燕麦,分别测定株高、茎粗、单株分蘖数。

1.4.3 光合特性 开花期每小区取中间 3 行内选取 10 株测定叶面积(LA),采用长宽系数法^[20],计算公式为:

$$LA=0.73\times\text{叶长}\times\text{叶宽}$$

叶面积指数(LAI)计算公式为:

$$LAI=(LA\times 1m^2\text{植株数})/1m^2$$

于开花期 9:00—11:30,每小区选取 5 片代表性旗叶,采用手持式叶绿素仪 (SPAD-502 Plus) 进行 SPAD 值测定;采用 Yaxin-1101 光合作用测定仪对净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)进行测定,3 次重复,结果取平均值。

1.4.4 草产量 乳熟期每小区取中间 3 行取 1 m² 样段,齐地刈割称取鲜重,其平均值为鲜草产量。另取鲜草 500 g 左右,阳光下失水后置于 65 ℃烘箱烘至恒重,冷却至室温后称取干重,根据鲜干比(植株鲜重/植株干重)计算干草产量。

表 3 种植密度对燕麦物候期及生长天数的影响

Table 3 Effects of planting density on phenological periods and growth days of oats

品种	种植密度	物候期/(月—日)							生长天数/d
		出苗期	分蘖期	拔节期	孕穗期	抽穗期	开花期	乳熟期	
梦龙 Magnum	D1	4—11	5—4	5—22	6—3	6—19	6—28	7—7	87
	D2	4—11	5—4	5—22	6—3	6—19	6—27	7—7	87
	D3	4—11	5—2	5—22	6—3	6—17	6—27	7—5	85
	D4	4—11	5—2	5—22	6—3	6—17	6—25	7—4	84
	D5	4—11	5—2	5—19	6—1	6—17	6—25	7—2	82
	D6	4—11	5—2	5—19	6—1	6—16	6—25	7—2	82
爱沃 Everleaf 126	D1	4—9	5—6	5—20	6—16	6—28	7—5	7—16	98
	D2	4—9	5—6	5—20	6—16	6—28	7—5	7—16	98
	D3	4—9	5—4	5—20	6—15	6—26	7—4	7—16	98
	D4	4—9	5—2	5—19	6—14	6—25	7—3	7—14	96
	D5	04—12	5—2	5—18	6—14	6—25	7—1	7—13	92
	D6	04—12	05—02	5—18	6—14	6—25	7—1	7—13	92

2.2 种植密度对饲用燕麦农艺性状的影响

2.2.1 种植密度对饲用燕麦株高的影响 2 个饲用燕麦品种的株高均随密度增加呈降低趋势(图 2),并以 D1 最高,其中梦龙 D1 株高为 102.63 cm,除 D3 外,与其他处理差异显著($P<0.05$);爱沃 D1 株高为 92.6 cm,与 D5、D6 差异显著($P<0.05$),但与 D2、D3、D4 差异不显著。同一种植密度下,除 D5 外,梦龙的株高显著高于爱沃($P<0.05$)。

2.2.2 种植密度对饲用燕麦茎粗的影响 2 个饲用燕麦品种的茎粗均随密度增加而减小(图 3),以 D1 最大,其中梦龙 D1 茎粗 4.76 mm,与各处理差异均显著($P<0.05$);爱沃 D1 茎粗 6.12 mm,与 D5、D6 差异显著($P<0.05$),但与 D2、D3、D4 差异不显著。同一种植密度下,梦龙的茎粗均显著低于爱沃($P<0.05$)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 进行基础数据整理统计和制图,采用 SPSS 27.0 对各指标数据进行方差分析,并用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 种植密度对饲用燕麦物候期及生长天数的影响

除苗期外(表 3),不同种植密度下 2 个饲用燕麦品种的物候期均随密度增加而提前,生长天数随密度增加逐渐缩短。梦龙在低密度(D1、D2)下生长天数为 87 d,而在高密度(D5、D6)下为 82 d,相差 5 d;爱沃在低密度(D1、D2、D3)下生长天数为 98 d,而在高密度(D5、D6)下为 92 d,相差 6 d。

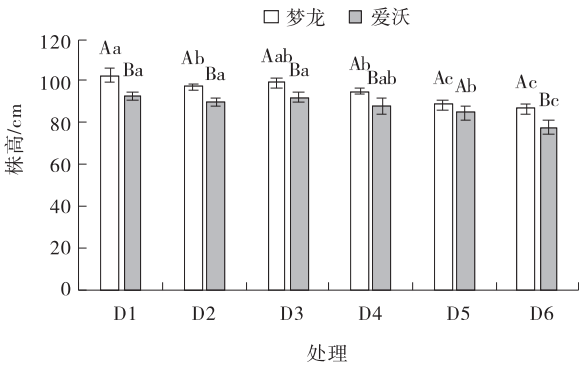


图 2 种植密度对燕麦株高的影响

Fig. 2 Effects of planting density on plant height of oats

注:不同大写字母表示相同种植密度下不同品种间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一品种在不同种植密度间差异显著($P<0.05$),下同。

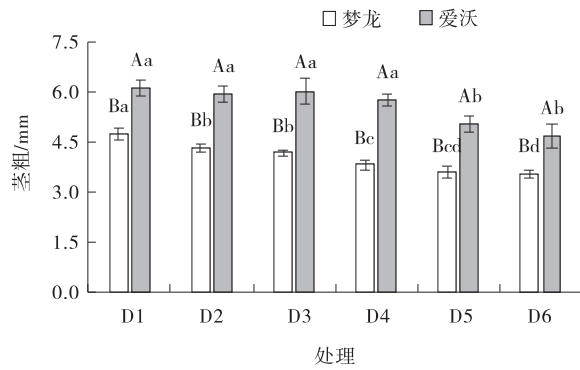


图3 种植密度对燕麦茎粗的影响

Fig. 3 Effects of planting density on the stem diameter of oats

2.2.3 种植密度对饲用燕麦单株分蘖数的影响 2个饲用燕麦品种的单株分蘖数均随密度增加而减少(图4),并以D1最多,其中梦龙D1单株分蘖数为2.61个,除D2外,与其他处理差异显著($P<0.05$);爱沃D1单株分蘖数为2.23个,除D2外,与其他处理差异显著($P<0.05$)。同一种植密度下,梦龙的单株分蘖数在D2、D3下显著高于爱沃($P<0.05$)。

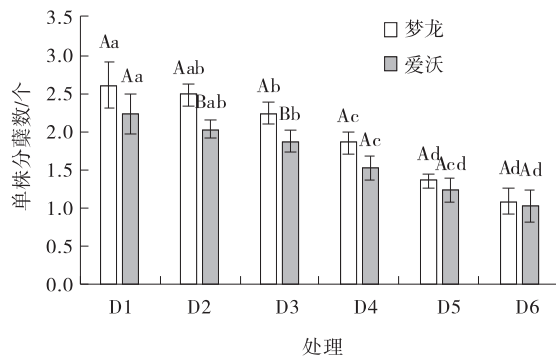


图4 种植密度对燕麦单株分蘖数的影响

Fig. 4 Effects of planting density on number of tillers of oats

2.3 种植密度对饲用燕麦开花期光合特性的影响

2.3.1 种植密度对饲用燕麦叶面积指数的影响 2个饲用燕麦品种开花期的叶面积指数均随密度增加先升高后降低(图5),梦龙以D4叶面积指数最大,为4.78,与D1、D2、D6差异显著($P<0.05$),但与D3、D5差异不显著;爱沃以D5叶面积指数最大,为5.92,与D1、D2差异显著($P<0.05$),但与D3、D4、D6差异不显著。同一种植密度下,除D1外,梦龙的叶面积指数显著低于爱沃($P<0.05$)。

2.3.2 种植密度对饲用燕麦叶绿素含量的影响 2个饲用燕麦品种开花期的叶绿素含量均随密度增加

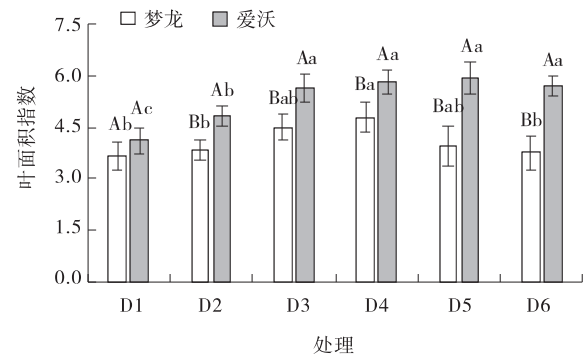


图5 种植密度对燕麦叶面积指数的影响

Fig. 5 Effects of planting density on leaf area index of oats

而降低(图6),并以D1最高,其中梦龙D1叶绿素含量为55.07,除D2外,与其他处理差异显著($P<0.05$);爱沃D1叶绿素含量为60.82,与D4、D5、D6差异显著($P<0.05$),但与D2、D3差异不显著。同一种植密度下,梦龙的叶绿素含量均显著低于爱沃($P<0.05$)。

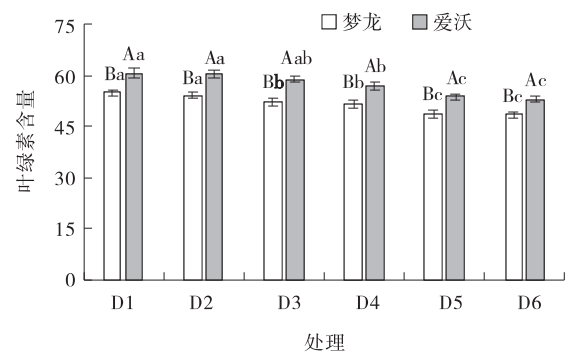


图6 种植密度对燕麦叶绿素含量的影响

Fig. 6 Effects of planting density on chlorophyll content of oats

2.3.3 种植密度对饲用燕麦光合参数的影响 种植密度、品种及二者交互显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)影响燕麦开花期的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度(表4)。2个饲用燕麦品种的各项光合参数整体上随密度增加而下降,梦龙在D1下4个光合参数值最高,其中,净光合速率、蒸腾速率和气孔导度较其他处理分别提高了28.01%~102.48%、11.57%~78.57%和3.44%~41.49%,与各处理差异均显著($P<0.05$),胞间 CO_2 浓度较其他处理提高3.08%~38.21%,除D3外,与其他处理差异显著($P<0.05$);爱沃在D2下净光合速率、蒸腾速率和气孔导度最高,较其他处理分别提高了11.97%~50.12%、3.57%~47.46%和16.36%~75.37%,其中,净光合速率和气孔导度与各处理差异均显著($P<$

0.05),蒸腾速率除D1外,与其他处理差异显著($P<0.05$),胞间CO₂浓度在D1下最高,较其他处理提高了0.55%~11.21%,除D3外,与其他处理差异显著($P<0.05$)。

同一种植密度下,除D1外,梦龙的净光合速率显著低于爱沃,而蒸腾速率在D1、D3、D4下显著高于爱沃,除D2外,气孔导度显著高于爱沃,且胞间CO₂浓度在D1、D2、D3、D4也显著高于爱沃($P<0.05$)。

表4 种植密度对燕麦光合参数的影响
Table 4 Effects of planting density on photosynthetic parameters of oats

品种	种植密度	净光合速率 P_n / [$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	蒸腾速率 T_r / [$\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	气孔导度 G_s / [$\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	胞间CO ₂ 浓度 C_i / ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
梦龙 Magnum	D1	9.78±0.70 ^{Aa}	6.75±0.27 ^{Aa}	160.46±1.55 ^{Aa}	346.27±9.85 ^{Aa}
	D2	7.64±0.56 ^{Bb}	5.81±0.55 ^{Ab}	153.90±0.20 ^{Ab}	324.60±8.50 ^{Abc}
	D3	7.14±0.16 ^{Bb}	6.05±0.19 ^{Ab}	155.12±0.94 ^{Ab}	335.93±6.25 ^{Ab}
	D4	6.29±0.23 ^{Bc}	5.60±0.32 ^{Ab}	136.51±1.95 ^{Ac}	316.87±10.54 ^{Ac}
	D5	4.96±0.09 ^{Bd}	3.78±0.09 ^{Bc}	129.28±0.48 ^{Ad}	287.67±6.03 ^{Ad}
	D6	4.83±0.14 ^{Bd}	3.95±0.28 ^{Ac}	113.41±1.48 ^{Ac}	250.53±12.22 ^{Be}
爱沃 Everleaf 126	D1	10.86±0.17 ^{Ab}	5.88±0.15 ^{Ba}	142.27±3.60 ^{Bb}	313.53±4.01 ^{Ba}
	D2	12.16±0.79 ^{Aa}	6.09±0.06 ^{Aa}	165.55±4.64 ^{Aa}	304.93±2.44 ^{Bb}
	D3	10.05±0.41 ^{Ac}	5.44±0.31 ^{Bb}	135.51±3.39 ^{Bb}	311.80±3.34 ^{Ba}
	D4	9.16±0.36 ^{Ad}	4.74±0.33 ^{Bc}	111.57±4.11 ^{Bc}	291.33±5.12 ^{Bc}
	D5	8.48±0.21 ^{Ade}	4.35±0.21 ^{Ad}	105.25±1.73 ^{Bc}	283.60±3.14 ^{Ad}
	D6	8.10±0.07 ^{Ac}	4.13±0.11 ^{Ad}	94.40±1.60 ^{Bd}	281.93±3.63 ^{Ad}
F值					
D		97.965**	77.186**	159.331**	71.954**
V		521.147**	5.754*	123.870**	28.626**
D×V		12.055**	8.232**	15.682**	16.841**

注:同列不同大写字母表示相同种植密度下不同品种间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一品种在不同种植密度间差异显著($P<0.05$)。D 种植密度;V 品种;D×V 种植密度与品种互作。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。下同。

2.4 种植密度对饲用燕麦草产量的影响

种植密度、品种及二者互作均极显著($P<0.01$)影响燕麦的草产量(表5)。2个饲用燕麦品种的鲜草产量和干草产量均随密度增加先升高后降低。梦龙的鲜草产量在D4下最高,为22 878.1 kg/hm²,较其他处理增产4.69%~31.23%,除D3外,与其他处理差异显著($P<0.05$);爱沃的鲜草产量在D3下最高,为20 852.09 kg/hm²,较其他处理增产4.95%~44.57%,除D2外,与其他处理差异显著($P<0.05$)。

梦龙的干草产量在D4下最高,为9 867.78 kg/hm²,较其他处理增产6.88%~55.29%,与各处理差异均显著($P<0.05$);爱沃的干草产量在D3下最高,为8 129 kg/hm²,较其他处理增产11.64%~47.72%,与各处理差异均显著($P<0.05$)。

同一种植密度下,梦龙的鲜草产量在D4、D5、D6下较爱沃显著提高了25.01%、26.39%、30.35%($P<0.05$),干草产量在D3、D4、D5、D6下显著提高了

13.57%、50.19%、35.22%、43.09%($P<0.05$)。总体看,除低密度(D1、D2)外,其他密度下梦龙草产量比爱沃高。

2.5 饲用燕麦干草产量与农艺性状的相关性分析

2个饲用燕麦品种在不同种植密度下的干草产量与株高均为正相关(表6),与茎粗、单株分蘖数随种植密度增加由正相关变为负相关,但均不显著。其中梦龙在D3下干草产量与株高为显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 种植密度对饲用燕麦生产性能的影响

燕麦的生长发育受多种因素影响,是其自身对外界环境的适应性结果^[21]。种植密度是影响燕麦生长发育的重要因素之一^[22]。株高、茎粗、分蘖数等受种植密度的影响,一定程度上可以调控饲草产量^[23]。本研究结果表明,随密度增加,2个饲用燕麦品种的生长

表 5 种植密度对燕麦草产量的影响
Table 5 Effects of planting density on yield of oats

品种	种植密度	鲜草产量/(kg·hm ⁻²)	干草产量/(kg·hm ⁻²)
梦龙 Magnum	D1	17433.71±876.15 ^{Ad}	6354.59±319.36 ^{Be}
	D2	17883.94±820.09 ^{Bcd}	7030.54±322.39 ^{Ad}
	D3	21852.59±562.27 ^{Aa}	9232.28±237.55 ^{Ab}
	D4	22878.10±919.13 ^{Aa}	9867.78±396.44 ^{Aa}
	D5	19284.64±442.52 ^{Ab}	7820.31±179.45 ^{Ac}
	D6	18801.06±354.91 ^{Abc}	7874.64±148.65 ^{Ac}
爱沃 Everleaf 126	D1	19101.21±725.93 ^{Abc}	7049.15±241.24 ^{Ab}
	D2	19868.26±429.12 ^{Ab}	7281.68±261.33 ^{Ab}
	D3	20852.09±863.68 ^{Aa}	8129.00±93.73 ^{Ba}
	D4	18300.81±420.28 ^{Bc}	6570.17±349.26 ^{Bc}
	D5	15257.62±829.19 ^{Bd}	5783.49±92.08 ^{Bd}
	D6	14423.88±772.70 ^{Bd}	5503.11±192.04 ^{Bd}
F 值			
D		42.214 ^{**}	68.940 ^{**}
V		54.806 ^{**}	238.919 ^{**}
D×V		28.511 ^{**}	56.120 ^{**}

表 6 不同种植密度下燕麦干草产量与农艺性状的相关性分析
Table 6 Correlation analysis between hay yield and agronomic traits of oats under different planting densities

品种	种植密度	株高	茎粗	单株分蘖数
梦龙 Magnum	D1	0.969	0.957	0.858
	D2	0.915	0.930	0.610
	D3	0.985 [*]	0.948	0.796
	D4	0.834	0.759	0.920
	D5	0.793	-0.239	0.622
	D6	0.820	-0.440	-0.352
爱沃 Everleaf 126	D1	0.839	0.912	0.878
	D2	0.859	0.804	0.686
	D3	0.942	0.937	0.654
	D4	0.926	0.779	-0.131
	D5	0.765	0.305	-0.468
	D6	0.666	-0.118	-0.321

天数缩短,株高、茎粗、单株分蘖数呈下降趋势。这与付东青等^[24]和赵宏魁等^[25]的研究结果相似,同时说明低密度下,植株个体间竞争较小,拥有充足的光照和营养,因而发育较为健壮;反之,密度过高会使个体的生存空间变小,加剧竞争,单株因光照不足、营养缺乏而出现株高相对较矮、茎秆纤细、分蘖较少等发育不良的情况^[23],也会造成叶片光合效率降低,使植株体内营养元素加速向籽粒转移,提前进入乳熟期。但林志玲等^[26]研究认为,燕麦的株高在高密度下最大,这可能与密度设置、种植区域和品种差异有关。同一种植密度下,中熟品种梦龙的株高和单株分蘖数优于晚

熟品种爱沃,而茎粗不及晚熟品种爱沃,这是由品种自身的遗传特性决定的。

草产量是牧草株高、茎粗、分蘖数等产量构成因素的综合表现,同时也体现了牧草的生产力^[27]。本研究结果表明,2个饲用燕麦品种的鲜、干草产量均随密度增加先升高后降低,中熟品种梦龙和晚熟品种爱沃分别在525、450万株/hm²时草产量达到最高。而王雪莱等^[28]研究认为,白燕7号在较高密度(900万株/hm²)时可获得最高草产量。这说明虽然低密度下燕麦植株个体发育最好,但单位面积内群体数量小,难以形成较高草产量;高密度下,群体数量大,但单株

生产力弱,也不利于产量提升,只有在适宜密度下,个体与群体间才能得到均衡发展^[29],从而提高草产量。本研究表明,在陇东地区春播时中熟品种梦龙的产草性能比晚熟品种爱沃好,可能是因为不同熟性的燕麦对当地温度、光照等自然条件的适应程度不同^[30],这也说明不同饲用燕麦品种高产栽培的最适种植密度也不同。

燕麦草产量的形成除与自身基因特性有关,还会受到外界条件的影响,在不同栽培措施和环境条件下,草产量与农艺性状的相关关系并不一致^[31-32]。刘凯强等^[33]研究表明,不同播量下,燕麦的干草产量与株高、茎粗、分蘖数均为不同程度的负相关。亦有研究表明^[28],燕麦的干草产量在各密度下与株高、茎粗为正相关,而在高密度下与分蘖数为负相关,本研究结果与之相似。高密度下,草产量的形成并不完全由农艺性状决定,可能还与田间基本苗数量有关。本研究仅选择了3个农艺指标进行分析,对密度影响下构成草产量的主要因素还需进行多个性状与产量的相关性分析探讨。

3.2 种植密度对饲用燕麦开花期光合特性的影响

叶面积指数是反映作物群体大小的重要指标^[34]。本研究结果表明,2个饲用燕麦品种开花期叶面积指数随密度增加先增大后减小,这与张永丽等^[35]在小麦上的研究结果基本一致。密度过低导致群体叶面积减小,密度过高会加快下层叶片衰老,最终都会影响群体光合作用。叶绿素是影响叶片光合速率的重要因素^[36]。本研究结果表明,2个燕麦品种的叶绿素含量随密度增加而降低,与张向前等^[37]在小麦上的研究结果相似。可见,当种植密度增大,植株叶片间相互遮挡导致受光不良,从而降低叶绿素含量。

适宜的种植密度会增强小麦花后光合性能,延缓旗叶衰老,促进同化物合成^[38]。本研究结果表明,随密度增加,2个饲用燕麦品种的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO₂浓度呈下降趋势,这与张雪悦等^[39]在黑麦草上的研究结果基本一致。同一种植密度下,中熟品种“梦龙”的叶面积指数、叶绿素含量、净光合速率不及晚熟品种“爱沃”。这说明密度设置、遮荫程度或不同品种自身叶片厚度、叶绿素含量不同等导致其光合能力各异。燕麦在低密度下,单株光合能力强,但会造成田间漏光,群体光能利用率低;密度过

高时,田间荫蔽,只有上部叶片进行光合作用。因此,适当增加密度可以提高群体光合面积,使光能资源得到充分利用,有利于光合产物的生产与积累,从而提高草产量^[40]。

4 结论

在陇东地区春播条件下,中熟品种梦龙和晚熟品种爱沃获得饲草高产的最适种植密度分别为525、450万株/hm²,干草产量分别达到9 867.78、8 129 kg/hm²,综合考虑,建议选择中熟品种梦龙较好。

参考文献:

- [1] 麦丽亚·伊尔斯比克,沙吾列·沙比汗. 饲草饲料引种、育种与丰产栽培技术[J]. 湖北畜牧兽医,2020,41(2): 31-32.
- [2] 刘畅,葛翎. 燕麦化学成分及应用研究进展[J]. 中国野生植物资源,2020,39(2):56-59.
- [3] 赵桂琴,师尚礼. 青藏高原饲用燕麦研究与生产现状、存在问题与对策[J]. 草业科学,2004,21(11):17-21.
- [4] Ball D M, Collins M, Lacefield G D, *et al.* Understanding forage quality[J]. American Farm Bureau Federation Publication,2001,1(1):1-15.
- [5] 李天银. 甘肃河西地区饲燕麦丰产栽培技术[J]. 宁夏农林科技,2018,59(8):14-15+22.
- [6] 高阳,赵力兴,朱铁霞,等. 施氮量对科尔沁沙地燕麦生物量及物质分配规律的影响[J]. 草地学报,2018,26(5): 1168-1172.
- [7] 曹宏. 陇东旱地饲草高效实用生产技术[M]. 陕西:西北农林科技大学出版社,2020:17-23.
- [8] 曹宏,耿智广,李茜,等. 11个紫花苜蓿品种在庆阳南部的适应性[J]. 草业科学,2018,35(8):1937-1947.
- [9] 梁万鹏,李世恩,贺春贵,等. 庆阳市紫花苜蓿和燕麦推广利用现状[J]. 中国牛业科学,2021,47(4):82-83+88.
- [10] 陈彩锦,尚继红,师尚礼,等. 宁夏六盘山区7个饲用燕麦品种农艺性状、产量及品质的相关性研究[J]. 草原与草坪,2021,41(2):129-135.
- [11] 伍祥文,邵曦,阳廷伟,等. 7个饲用燕麦品种的引种试验[J]. 草学,2021(6):50-52+57.
- [12] Choudhary M, Prabhu G. Response of fodder oat (*Avena sativa* L.) varieties to irrigation and fertilizer gradient[J]. Range Management and Agroforestry, 2016, 37(2): 201-206.

- [13] 王寒冬,张永兰,王蕾,等. 不同栽培措施对青海东部山旱地饲用燕麦干草产量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(4):964—970.
- [14] Ioannis R, Ioanna K, Dimitrios B, *et al.* Nitrogen Uptake, Use Efficiency, and Productivity of *Nigella sativa* L. in Response to Fertilization and Plant Density[J]. Sustainability,2022,14(7):3842.
- [15] 王鑫,张玉霞,鲍青龙,等. 追施氮肥对饲用燕麦品种叶片生长及光合特性的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(6):132—138.
- [16] 周兰兰,何振富,李明军,等. 种植密度和有机肥施用量对小黑麦C6产量和品质的影响[J]. 饲料研究,2023,46(1):120—124.
- [17] 冯学颖,刘景辉,赵宝平,等. 宽幅条播和种植密度对燕麦光合特性及干物质积累量的影响[J]. 麦类作物学报,2022,42(12):1527—1534.
- [18] 梁万鹏,张金霞,施海娜,等. 燕麦在庆阳市北部旱作区生长适应性评价[J]. 饲料研究,2020,43(5):100—102.
- [19] 王亚士,曹宏,柴守玺,等. 播期和施肥量对陇东地区2种饲用燕麦生产性能和营养品质的影响[J]. 草原与草坪,2023,43(2):75—84.
- [20] 李雁鸣. 燕麦(*Avena* spp.)叶面积测定方法的初步研究[J]. 河北农业大学学报,1993,16(1):25—28.
- [21] 郑曦,魏臻武,武自念,等. 不同燕麦品种(系)在扬州地区的适应性评价[J]. 草地学报,2013,21(2):272—279.
- [22] 景芳,南铭,刘彦明,等. 品种和种植密度对燕麦饲草产量、品质和病害的影响[J]. 草地学报,2023,31(10):3174—3184.
- [23] 赵继秀,梁国玲,刘文辉,等. 播量对林纳燕麦草产量及光合特性的影响[J]. 青海大学学报,2022,40(5):32—40.
- [24] 付东青,王彦超,宋磊,等. 施氮量和种植密度对石河子复播早熟饲用燕麦生产性能的影响[J]. 草地学报,2021,29(10):2364—2371.
- [25] 赵宏魁,马真,张春辉,等. 种植密度和施氮水平对燕麦生物量分配的影响[J]. 草业学报,2016,33(2):249—258.
- [26] 林志玲,朱铁霞,李天琦,等. 种植密度对科尔沁沙地饲用燕麦产量和品质的影响[J]. 草地学报,2019,27(3):760—765.
- [27] 周青平,颜红波,梁国玲,等. 早熟高产燕麦新品种青燕1号选育报告[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2014,40(2):161—167.
- [28] 王雪莱,郭潇潇,郭伟,等. 种植密度对松嫩平原西部白燕7号生产性能及光合特性的影响[J]. 草业科学,2020,37(8):1568—1578.
- [29] 雷占兰,周华坤,刘泽华,等. 密度氮肥交互处理下高寒地区燕麦的生长特性与生殖分配[J]. 草业科学,2014,31(6):1110—1119.
- [30] 童永尚,刘耀峰,徐长林,等. 播期对半干旱区7个燕麦品种产量和品质的影响[J]. 草业科学,2021,38(11):2221—2236.
- [31] 武俊英,刘景辉,王怀栋,等. 不同燕麦品种产量及其与构成因素的相关性研究[J]. 作物杂志,2011,5:36—40.
- [32] 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[J]. 草业学报,2015,24(10):120—130.
- [33] 刘凯强,刘文辉,贾志锋,等. 不同播量、行距及播种方式对青燕1号燕麦饲草产量的影响[J]. 草地学报,2019,27(4):1060—1067.
- [34] 道日娜,薛海楠,王磊,等. 肥料与密度对春大麦抽穗期叶面积指数的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2017,32(3):233—237+257.
- [35] 张永丽,蓝岚,李雁鸣,等. 种植密度对杂种小麦C6—38/Py85—1群体生长和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报,2008,28(1):113—117.
- [36] Verma D, Gontia A, Jha A, *et al.* Study on leaf area index and leaf area duration of growth analytical parameters in Wheat, Barley, and Oat[J]. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2016, 9(5):827—831.
- [37] 张向前,陈欢,赵竹,等. 密度和行距对早播小麦生长、光合及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2015,35(1):86.
- [38] 于振文,岳寿松,沈成国,等. 不同密度对冬小麦开花后叶片衰老和粒重的影响[J]. 作物学报,1995,21(4):412.
- [39] 张雪悦,左师宇,田礼欣,等. 不同密度下越冬型黑麦草产量形成的光合特性差异[J]. 草业学报,2019,28(3):131—141.
- [40] 孟凯,李星月,贾振宇,等. 种植密度对内蒙古中部地区苜蓿生长、饲草产量及营养品质影响[J]. 草业学报,2019,28(7):73—81.

Effects of planting density on production performance and photosynthetic characteristics of forage oats in Longdong Region

MAO Li^{1,2}, CAO Hong^{1,3,4*}, CHAI Shou-xi^{1,2**}, ZHANG Xiao-yan^{3,4},
PENG Zheng-kai^{3,4}, LI Qian^{3,4}

(1. College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. College of Agriculture and Forestry, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China; 4. Collaborative Innovation Center for Longdong Dryland Crop Germplasm Improvement & Industrialization, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigates the influence of different planting density on agronomic traits, grass yield and photosynthetic characteristics of forage oats, and the optimum planting density of forage oats in the Longdong region. 【Method】 In this experiment, the medium-maturing variety Magnum and the late-maturing variety Everleaf 126 were used as the test materials. Six planting densities of 3 million plants/hm² (D1), 3.75 million plants/hm² (D2), 4.5 million plants/hm² (D3), 5.25 million plants/hm² (D4), 6 million plants/hm² (D5), 6.75 million plants/hm² (D6) were tested in the dryland area of the Loess Plateau in Longdong. 【Result】 As planting density increased, the growth duration of both forage oat varieties decreased, and the plant height, stem diameter, and the number of tillers per plant all showed a decreasing trend. The leaf area index at anthesis increased and then decreased with higher densities in two forage oat varieties. Chlorophyll content decreased with increasing density. All photosynthetic parameters of Magnum (medium-maturing variety) were highest at D1. Net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of the late-maturing variety Everleaf 126 were highest at D2, while the inter-cellular CO₂ concentration was highest at D1. Both fresh and hay yields of the two forage oat varieties increased and then decreased with higher planting densities. The fresh yield and hay yield of Magnum were highest at D4, with 22 878.1 kg/hm² and 9 867.78 kg/hm², respectively. For Everleaf 126, the highest yields occurred at D3, with 20 852.09 kg/hm² for fresh yield and 8 129 kg/hm² for hay yield. 【Conclusion】 In the case of spring sowing in the Longdong region, it is appropriate to choose the medium-maturing variety Magnum, which has a high yield of forage planting density of 5.25 million plants/hm², and the late-maturing variety Everleaf 126 to obtain a high yield of forage planting density of 4.5 million plants/hm².

Key words: planting density; oats; production performance; photosynthetic characteristics; Longdong region

(责任编辑:靳奇峰)