

不同株高野生无芒雀麦表型特征 及生物量分配研究

刘文昊, 靳瑰丽*, 宫珂, 韩万强, 吴雪儿

(新疆农业大学 草业与环境科学学院, 新疆草地资源与重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 株高的分化是植物对环境长期适应性的结果, 通过研究植物表型及生物量分配对株高大小的响应规律有助于了解种质资源多样性。该研究以野生无芒雀麦(*Bromus inermis*)为研究材料, 通过方差分析、变异系数及线性回归模型等分析方法对小株、中株、大株3种株高无芒雀麦的8个表型性状指标以及各构件生物量进行测定分析, 以探讨株高差异对表型及生物量分配的影响。结果表明: (1) 随着株高的增加分蘖数减少46.7%, 而茎粗、茎节数、穗长以及小穗长均不同程度增加, 且表型性状中分蘖数变异程度最大(106.32%)。 (2) 各构件生物量变异程度与株高之间无显著关系, 但小株将更多生物量投入到叶和地下器官中, 中株和大株则投入到穗和茎器官中; 地上、地下生物量之间呈线性增长关系。 (3) 除小穗宽及根长外, 其他表型性状、穗生物量及地上生物量存在显著的大小依赖效应($P < 0.05$)。

关键词: 无芒雀麦; 株高; 表型特征; 生物量分配

中图分类号: Q944.2; Q949.71⁺4.2

文献标志码: A

Phenotype Characteristics and Biomass Allocation of Wild *Bromus inermis* with Different Plant Heights

LIU Wenhao, JIN Guili*, GONG Ke, HAN Wanqiang, WU Xueer

(College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Xinjiang, Urumqi 830052, China)

Abstract: The differentiation of plant height is the result of long-term adaptability of plants to environment. It is helpful to understand the diversity of germplasm resources by studying the response of plant phenotype and biomass distribution to plant size. Based on the research materials of wild *Bromus inermis*, we studied 8 phenotypic traits and biomass of 3 species of small, medium and large plants, and investigated the effect of plant height difference on phenotype and biomass distribution by ANOVA, coefficient of variation and linear regression model. The results show: (1) with the increase of plant height, the number of tillers decreased by 46.7%, stem diameter, number of stem nodes, panicle length and spikelet length were the opposite, and the variation of tiller number among these phenotypic traits was the greatest can reach 106.32%. (2) There was no significant relationship between the biomass variation of each component and plant height. The small plants put more biomass into leaf and underground organs, medium and large plants put into panicle and stem organs. There is a linear growth relationship between aboveground

收稿日期: 2020-08-20; 修改稿收到日期: 2020-12-11

基金项目: 国家牧草产业体系项目(CARS-34)

作者简介: 刘文昊(1995—), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事牧草种质资源研究。E-mail: 840465448@qq.com

* 通信作者: 靳瑰丽, 副教授, 研究方向为草地资源与生态。E-mail: jguili@126.com

and underground biomass. (3) In addition to spikelet width and root length, other phenotypic traits, panicle biomass and aboveground biomass have size-dependent effects ($P<0.05$).

Key words: *Bromus inermis*; plant height; phenotypic characteristics; biomass allocation

无芒雀麦(*Bromus inermis*)为禾本科(Gramineae)雀麦属多年生草本植物。在中国主要分布于黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山西、山东、江苏、陕西、甘肃、青海、新疆、西藏、云南、四川、贵州等省区,新疆主要分布在天山北坡 1 500~2 400 m, 80.766°~92.986°E, 43.074°~48.701°N 的范围内,且多分布于草甸草原,也是良好的栽培牧草^[1],近年来对其建立豆禾混播草地^[2]、抗逆性^[3]以及遗传多样性^[4]等方面进行了诸多研究。无芒雀麦作为良好的野生牧草种质资源,对其表型及繁殖分配的研究具有重要意义。

株高是反映植物生长状况的主要功能性状之一^[5],即使处于同一居群的植株也会存在很大差异^[6]。植物生长的适应性可塑反应在个体间存在着不同步性,并且依赖于个体的大小差异^[7]。野生居群经过长期的自然选择和适应,表型会产生明显的分化,各性状在群体内均有丰富的遗传变异^[8]。生物量是植物积累能量的主要体现,其在各器官中的分配是植物对环境适应的结果,反映了植物的生长策略^[9]。植物的生物量在不同构件间分配的方式是其生物学的一个基本方面,它可能会随着植物个体的大小而发生变化^[10-11]。因此目前许多学者基于不同植物个体大小下繁殖分配的差异进行研究^[12-13],结果表明繁殖分配与植物个体之间具有大小依赖性,即个体大小对植物的生物量分配产生重要影响。这些变化都会使得植物在面对复杂多变的环境时选择最优的生存策略。

在前期研究调查中我们在不同区域内均发现无芒雀麦植株的高矮有差异,这种表型可塑性是否与个体大小有关?不同株高大小下生物量分配是否有

所不同?生殖分配是否具有大小依赖性?这些问题是探讨无芒雀麦是否为了应对环境变化而表现出不同的遗传分化的基础。因此本研究以野生无芒雀麦为试验材料,研究不同株高之间表型及生物量的差异,分析株高差异下的资源分配规律,为无芒雀麦的合理利用及进一步了解其遗传多样性提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

材料采集地在新疆乌鲁木齐县南山种羊场谢家沟(87°25'~87°33'E, 43°07'~43°47'N),地势南高北低、东高西低,属典型中温带大陆性气候,四季分明,昼夜温差大,年均降水量 350~500 mm,蒸发量为 2 616.9 mm,年平均气温 3.3℃,极端最高温度 42℃,极端最低温度为-41.5℃,年均无霜期 179 d,年均日照时数为 2 813.5 h,年均风速 6.3 m/s,多盛行西北风。无芒雀麦群落主要植物信息见表 1。

1.2 试验材料与方法

2018 年 8 月于无芒雀麦完熟期进行大样本取样,在样地内设置 3 条间隔大于 10 m 的平行样带,每个样带选取株高相对一致、距离大于 5 m 的无芒雀麦单株,根据草甸草地植株株高的大小,将采集的植株平均分成大株、中株、小株 3 种类型(表 2),每类植株在不同样带内随机取样,各株高类型选取 33 株,共取样 99 株,挖出整株植株,将每株根系上的土壤清洗干净后自然风干。根据《无芒雀麦种质资源描述规范和数据标准》^[14]用卷尺测量最长生殖枝高度、根长及穗长;统计分蘖数及最长生殖枝的茎节数;用电子游标卡尺测量生殖枝倒数第二节茎粗、小穗长及小穗宽。

表 1 无芒雀麦群落主要植物信息

Table 1 Community information of *Bromus inermis*

物种 Species	高度 Height/cm	盖度 Coverage/%	密度 Density/(plant·m ⁻²)	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	重要值 Important value
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	102.27±12.41	46.33±11.72	296.67±5.77	944.18±410.49	0.302
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	106.15±8.21	5.00±0.00	129.33±161.40	195.07±253.37	0.215
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	57.50±21.59	3.33±3.22	14.67±8.33	150.98±235.41	0.091

注:重要值=(相对高度+相对盖度+相对密度+相对生物量)/4
Note: Important value = (relative height + relative coverage + relative density + relative biomass)/4

称取每株植株的总量,并精细地按构件分为茎、叶、穗、根,置于千分之一分析天平上称重,再分别测定茎、叶、穗和根的总量,并进行以下计算:

营养分配(%)=(茎重+叶重+根重)/全株总生物量×100;

生殖分配(%)= 穗重/全株总生物量×100;

地上分配(%)=(茎重+叶重+穗重)/全株总生物量×100;

地下分配(%)= 根重/全株总生物量×100^[15]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行预处理及变异系数(CV)的计算,SPSS 20.0 统计分析软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),对经方差分析显著的数据采用多重比较(LSD)检验确定各组数据之间的差异,采用线性回归方程 $y = ax + b$ 对数据进行拟合,Sigma Plot 14.0 绘图软件进行图表绘制。

$CV(\%) = \text{标准差} / \text{平均值} \times 100$ 。

2 结果与分析

2.1 不同株高无芒雀麦表型特征分析

2.1.1 表型特征方差分析 不同株高无芒雀麦表型性状之间存在差异(图 1),大株茎粗显著高于其他两种株高,而分蘖数与之相反($P < 0.05$);小株茎节数及小穗长显著低于其他两种株高($P < 0.05$);随着株高的增加,穗长逐渐增大,且 3 个处理间差异显著($P < 0.05$);在小穗宽及根长上 3 种株高之间不存在显著差异($P > 0.05$)。

2.1.2 表型特征变异性分析 由表 3 可以看出,不同株高的无芒雀麦其表型性状的变异程度各不相同,小株的变异范围从 16.86%(小穗宽)到 106.32%(分蘖数),中株变异的范围从 15.56%(小穗长)到 96.97%(分蘖数),大株变异的范围从 13.93%(茎节数)到 106.08%(分蘖数)。

表 2 不同株高无芒雀麦基本参数

Table 2 Basic parameters of different strains of *Bromus inermis*

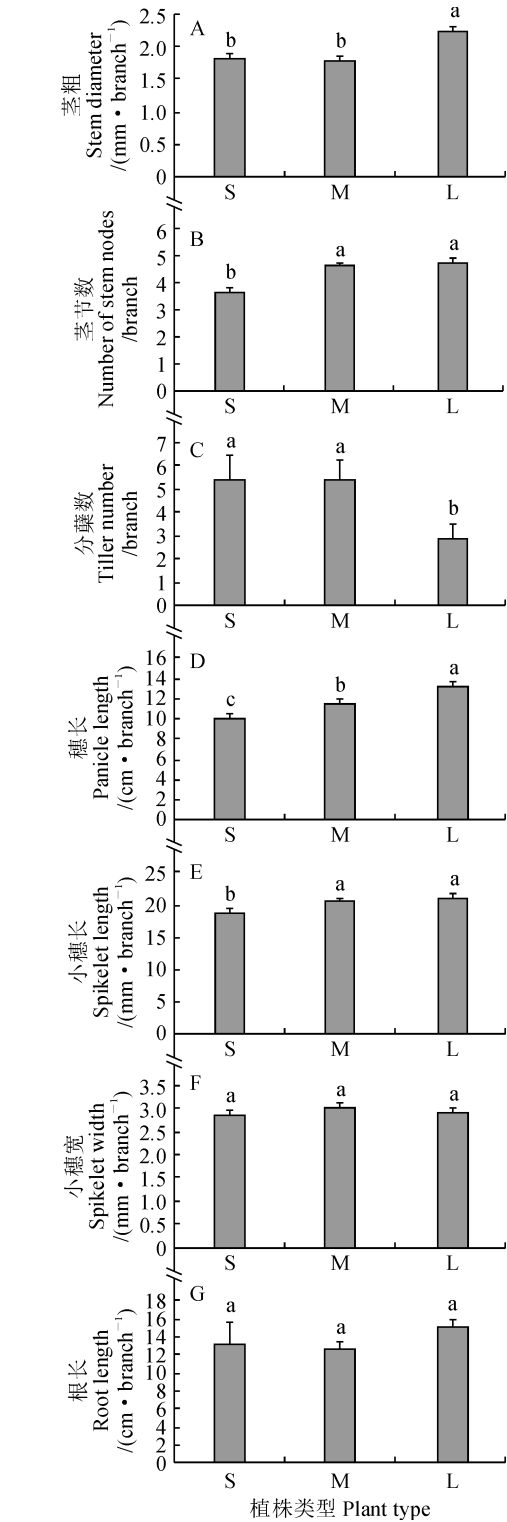
植株类型 Plant type	最大值 Max/cm	最小值 Min/cm	平均值 Average/cm	P		标准差 SD	变异系数 CV
				0.05	0.01		
小株 Small-strain	63.80	36.30	49.50	c	C	7.78	15.72
中株 Medium-strain	102.70	62.20	77.98	b	B	12.67	16.25
大株 Large-strain	138.20	79.50	96.91	a	A	12.83	13.24
平均 Average	101.57	53.33	74.80			11.09	15.07

注:L. 大株 M. 中株;S. 小株。下同
None: L. Large-strain;M. Medium-strain; S. Small-strain. The same as below

表 3 不同株高无芒雀麦表型性状变异性分析

Table 3 Variability analysis of phenotypic characters of different strains of *Bromus inermis*

性状 Trait	变异系数 CV/%		
	小株 Small-strain	中株 Medium-strain	大株 Large-strain
分蘖数 Tiller number	106.32	96.97	106.08
茎粗 Stem diameter	30.36	29.38	27.41
茎节数 Number of stem nodes	22.27	16.23	13.93
根长 Root length	96.22	32.69	34.62
穗长 Panicle length	25.88	23.91	20.87
小穗长 Spikelet length	18.07	15.56	15.42
小穗宽 Spikelet wide	16.86	21.59	18.13
平均变异 Average variation	41.46	31.57	31.21



S. 小株; M. 中株; L. 大株; 不同小写字母表示同一指标在不同株高间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同株高无芒雀麦表型性状比较
S. Small-strain; M. Medium-strain. L. Large-strain. Different letters in the figure indicate significant differences between different plant heights ($P < 0.05$). The same as below

Fig. 1 Phenotypic traits of different strains of *Bromus inermis*

可见, 3 种株高无芒雀麦变异程度最大的性状均为分蘖数, 但变异程度最小的性状并不相同; 分蘖数的变异系数小株 > 大株 > 中株; 在茎粗、茎节数、穗长及小穗长指标上, 变异系数小株 > 中株 > 大株; 小株在根长上的变异程度明显高于其他 2 种株高, 达到 96.22%; 各性状指标的平均变异系数呈现小株 > 中株 > 大株的趋势。

2.2 不同株高无芒雀麦构件生物量特征

2.2.1 生物量方差分析 不同株高无芒雀麦各构件生物量之间存在差异(图 2)。根、叶及总生物量上, 3 种株高间不存在显著差异 ($P > 0.05$); 小株的茎及地上生物量显著少于其他 2 种株高 ($P < 0.05$); 穗生物量随着株高增加而逐渐增大, 且 3 个株高间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2.2 生物量变异分析 不同株高无芒雀麦各构件生物量的变异程度不同(表 4)。小株的变异范围在 57.15%(根)到 110.87%(穗)之间, 中株的变异范围在 44.72%(根)到 117.05%(穗)之间, 大株的变异范围在 46.26%(根)到 110.02%(叶)之间。

可以看出无论株高大小, 根生物量变异程度最小; 小株及中株穗生物量的变异程度最大, 大株的叶生物量变异系数最大; 总生物量变异表现出中株 > 小株 > 大株的趋势, 分别为 97.77%、90.34%、66.60%, 偏矮小的植株在生物量上更具有可塑性。

2.3 不同株高无芒雀麦构件生物量分配

2.3.1 构件生物量分配 小、中、大 3 种株高的地上、地下生物量占总生物量的比例分别是 45.17%、53.83%、52.53% 和 54.83%、46.17% 和 47.47%, 小株的地下生物量占比多于地上生物量, 而中株及大株的地下生物量占比少于地上生物量; 在地上生物

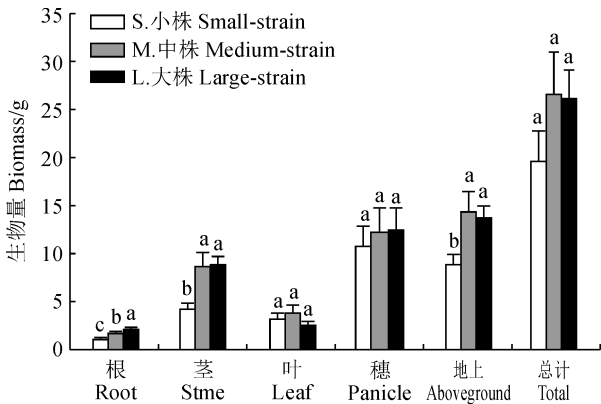


图 2 不同株高单株无芒雀麦生物量比较
Fig. 2 Biomass comparison of different single strains of *Bromus inermis*

表 4 不同株高无芒雀麦生物量变异性分析

Table 4 Variability analysis of biomass of different strains of *Bromus inermis*

性状 Trait	变异系数 CV/%		
	小株 Small-strain	中株 Medium-strain	大株 Large-strain
穗生物量 Panicle biomass	110.87	117.05	109.86
茎生物量 Stem biomass	78.22	105.33	57.24
叶生物量 Leaf biomass	97.38	109.81	110.02
根生物量 Root biomass	57.15	44.72	46.26
地上生物量 Aboveground biomass	74.53	87.81	51.77
总生物量 Total biomass	90.34	97.77	66.60

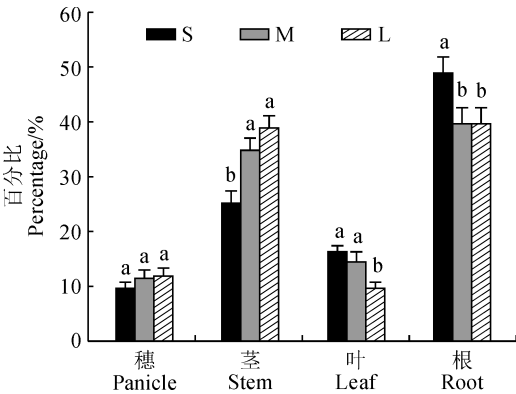


图 3 不同株高无芒雀麦各构件生物量分配
Fig. 3 Biomass allocation of different strains of *Bromus inermis*

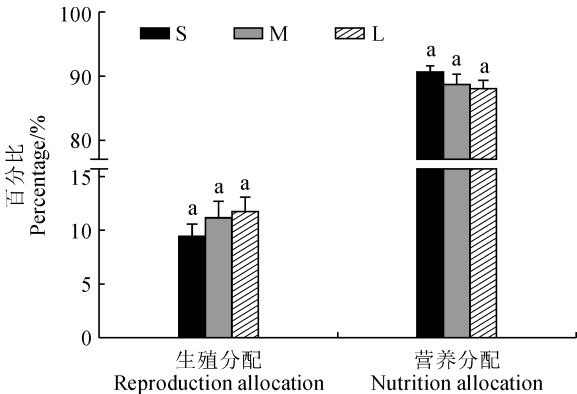


图 4 不同株高无芒雀麦营养及生殖分配
Fig. 4 Nutritional and reproductive distribution of different strains of *Bromus inermis*

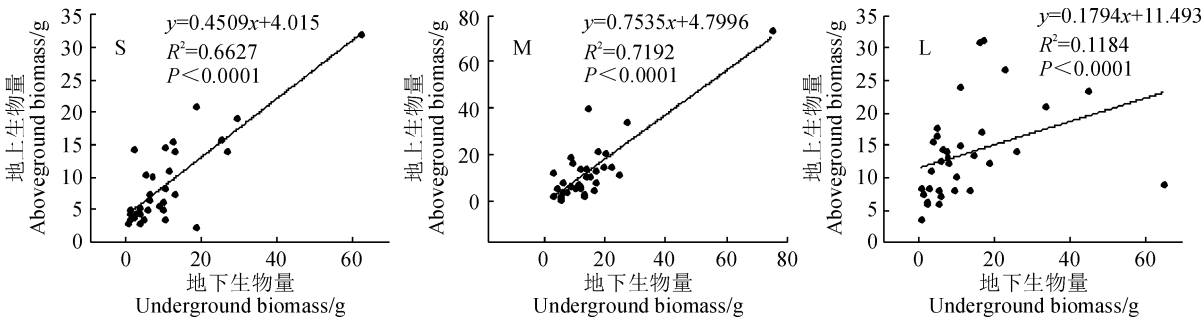


图 5 地下生物量与地上生物量关系散点图
Fig. 5 Scatter plot of relationship between underground biomass and aboveground biomass

量分配中,小株的茎、叶、穗生物量占比分别为 22.32%、16.62% 和 6.24%,中株为 32.58%、14.77%和 6.48%,大株为 33.86%、10.01%和 8.66%(图 3),随着株高增加,植株将更多的资源投入到地上部分。

随着株高增加,穗生物量占总生物量的比例增加但不存在显著差异($P>0.05$);小株对茎的分配

显著小于其他 2 种株高,而根的分配与之相反($P<0.05$);大株对叶的分配显著少于小株及中株($P<0.05$)。

无芒雀麦对营养生长的分配投入高于生殖生长,将较多资源用于植物营养器官的生长(图 4)。株高对生殖及营养分配存在影响,但并不显著($P>0.05$)。无论个体大小植株都尽力保证其生殖分配;

株高越大,植株对生殖分配的投入越多,对营养分配的投入越少。

2.3.2 地上与地下生物量的关系 3种株高的无芒雀麦地上生物量及地下生物量符合线性回归方程 $y = ax + b$ (图5),且地上生物量及地下生物量表现出同时增长或衰退的趋势。其中,中株的判定系数 R^2 最大,为 0.719 2,小株与大株的判定系数 R^2 分别是 0.662 7 和 0.118 4,即在地上及地下生物量相关性上,中株>小株>大株。

3 讨 论

表型分化不仅可以反映生存环境的质量,也可以反映出物种对于环境的忍受力^[16]。我们在同一天然居群中发现无芒雀麦在株高这一性状上具有非常明显的分化,这可能是植物为经过长期自然选择与适应的不同表现,蒋林峰等^[17]研究同样表明性状在相同生境的反应不同。具有强表型可塑性的植物,同种植物也会产生某些性状较大程度的变异,从而形成复杂的种内多型现象^[18],本研究中同一生境下大株无芒雀麦的茎粗及分蘖数与其他2种株高相比差异显著,小株茎节数及小穗长显著低于其他中株及大株,穗长小株<中株<大株都证明了无芒雀麦具有较高的表型可塑性。变异是物种进化的基础,变异系数的大小可间接反映出植物表型多样性的丰富程度,变异系数越大,说明植物的表型多样性越丰富^[19]。不同株高的无芒雀麦表型性状的变异程度各不相同,这可能与其为异花授粉植物的特性有关^[20]。在所测的8个表型性状指标中,分蘖数是变异程度最大的指标,这与宫珂等^[1]对无芒雀麦表型性状研究得到的结果相一致。一般来说,营养性状对不同生境的反应比生殖性状更为敏感,更容易发生变异。所以,营养性状的变异系数常高于生殖性状的变异系数^[21]。本研究中小中大株高营养性状的平均变异系数(63.79%、43.82%、45.51%)明显高于生殖性状(20.27%、20.35%、18.14%),与刘龙昌等^[22]研究结果相一致。小株的平均变异最大,说明小株比起其他2种株高具有更大的遗传潜力。本研究中无芒雀麦的表型特征的变异范围为13%至106%,其他学者的研究大多在10%至40%^[23-24],其中祁娟等^[25]对野生居群的研究中变异系数较大达到77%,表明野生居群无芒雀麦具有丰富的表型多样性。

植株在生长发育过程中,为了适应环境,会协调各种功能之间的资源分配,即将有限的资源按一定

比例分配到茎、叶、根等器官中,这反映了植株的生存策略^[26]。同一物种由于其个体发育大小差异,生物量分配比例发生改变^[27]。侯勤正等^[28]研究发现湿生扁蕾(*Gentianopsis paludosa*)的繁殖投资存在大小依赖效应,个体大小依赖的繁殖投资差异是对生境长期适应和进化的结果,本研究结果同样发现,随着株高增加,植物可用于分配调控的资源就越多。无芒雀麦的生物量分配整体呈现出根>茎>叶>穗的情况,说明无芒雀麦作为多年生牧草,在自身资源分配及调控中更重视地下部分的发育与积累,并不完全依赖于种子繁殖。植物生物量分配格局的差异是生理及表型因素共同作用的结果,受到个体大小以及可利用资源等因素的共同作用,且随着植株高度增加,生物量在不同器官中的分配也存在差异^[28]。较大植株通过减少根、叶的生物量分配,增大茎生物量分配,而保证茎和穗占有充足的资源;小株则以减少茎的生物量分配,增大根和叶的生物量分配,从而优先保证与大株拥有相同的根、叶生物量,但穗和茎生物量下降。在3个株高等级中,小株对根及叶的投入多于其他两种株高,大株则对穗及茎的分配最多,生殖分配呈现大株>中株>小株,营养分配呈现小株>中株>大株。植物之间的大小变化通常会在对光的竞争中增加,因为大个体可能会掩盖并抑制较小个体的生长^[29-30]。有研究表明,当光照受到限制时,植物会将生物量优先分配到叶^[31],本研究中个体小的小株无芒雀麦在群落中易被遮掩密集的枝叶所掩盖,因此通过加强对地下及叶器官的投资来达到繁殖更新的目的,而个体较大的大株可以吸收到充足的光,因此会增加对茎及穗的投入。通过对无芒雀麦地下、地上生物量关系研究发现,3种株高等级的无芒雀麦地上、地下生物量关系均呈现同时增长及衰退的趋势,中株的二者关系比其他2种株高更为明显。

4 结 论

(1)无芒雀麦除小穗宽及根长外,其他性状均受到个体大小的制约,表现为随着株高增大,茎粗、茎节数、穗长及小穗长增大,分蘖数减少;变异程度同样表现出对个体大小的依赖,表现为小株>中株>大株;3个株高无芒雀麦都具有较强的表型可塑性,小株具有更高的表型多样性。

(2)穗生物量及地上生物量都表现出对植株个体大小的依赖;在对生物量的分配上,无芒雀麦除穗,其他根、茎、叶生物量分配均受到个体大小的制

约,主要体现在对营养器官分配的调节上;大植株通过减少根、叶投资而增大茎生物量,从而也保证了有

性繁殖获取更多养分,小株则相反;地上与地下生物量之间呈线性增长关系。

参考文献:

[1] 宫珂,靳瑰丽,李陈建,等. 天山北坡野生无芒雀麦的表型性状[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(9): 2 615-2 621.
GONG K, JIN G L, LI C J, *et al.* Phenotypic traits of *Bromus inermis* on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(9): 2 615-2 621.

[2] 邝肖,季婧,梁文学,等. 北方寒区紫花苜蓿/无芒雀麦混播比例和刈割时期对青贮品质的影响[J]. 草业学报, 2018, **27**(12): 187-198.
KUANG X, JI J, LIANG W X, *et al.* Effects of mixed sowing ratio and mowing period of *Medicago sativa* and *Bromus inermis* on silage quality in cold regions of North China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(12): 187-198.

[3] 田小霞,毛培春,孟林,等. 无芒雀麦苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(10): 156-161.
TIAN X X, MAO P C, MENG L, *et al.* Determination of indicators for salt-tolerant evaluation and comprehensive evaluation of salt-tolerant at the seedlings of *Bromus inermis* [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(10): 156-161.

[4] 郝裕辉,李瑶,唐凤,等. 29 份无芒雀麦种质资源农艺性状的遗传多样性[J]. 草业科学, 2020, **37**(9): 1 770-1 778.
HAO Y H, LI Y, TANG F, *et al.* Genetic diversity of agronomic characteristics of 29 *Bromus inermis* germplasms[J]. *Pratacultural Science*, 2020, **37**(9): 1 770-1 778.

[5] 翟偲涵,王平,盛连喜. 竞争条件下植物功能性状的表型可塑性研究进展[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017, **18**(4): 538-546.
ZHAI S H, WANG P, SHENG L X. Phenotypic plasticity of plant functional traits in competition environments[J]. *Journal of Beihua University* (Natural Science), 2017, **18**(4): 538-546.

[6] 刘英,白龙,雷家军. 辽宁省野古草野生居群表型性状多样性研究[J]. 草业学报, 2015, **24**(12): 164-170.
LIU Y, BAI L, LEI J J. Phenotypic variation of wild *Arundinella hirta* populations from Liaoning Province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(12): 164-170.

[7] 陈书燕,张甲林,贾鹏,等. 光竞争条件下邻域效应对植物高生长可塑性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, **45**(6): 76-81.
CHEN S Y, ZHANG J L, JIA P, *et al.* Impact of neighborhood effects on adaptive plasticity of plant height under light competition environment[J]. *Journal of Lanzhou University* (Natural Science), 2009, **45**(6): 76-81.

[8] 梁小玉,张新全,白史旦,等. 菊苣主要表型性状的多元统计分析[J]. 草业学报, 2013, **22**(6): 257-267.
LIANG X Y, ZHANG X Q, BAI S Q, *et al.* Multiple statistical analysis of the phenotypic characters of *Cichorium intybus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, **22**(6): 257-267.

[9] 杨昊天,李新荣,刘立超,等. 荒漠草地 4 种灌木生物量分配特征[J]. 中国沙漠, 2013, **33**(5): 1 340-1 348.
YANG H T, LI X R, LIU L C, *et al.* Biomass allocation patterns of four shrubs in desert grassland[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, **33**(5): 1 340-1 348.

[10] SCHMID B, WEINER J. Plastic relationships between reproductive and vegetative mass in *Solidago altissima* [J]. *Evolution*, 1993, **47**(1): 61.

[11] SAMSON D A, WERK K S. Size-dependent effects in the analysis of reproductive effort in plants[J]. *The American Naturalist*, 1986, **127**(5): 667-680.

[12] 陈林,李月飞,苏莹,等. 荒漠草原不同土壤生境猪毛蒿个体大小依赖的繁殖分配[J]. 草业学报, 2018, **27**(12): 79-93.
CHEN L, LI Y F, SU Y, *et al.* Size-dependent reproductive allocation of *Artemisia scoparia* in different habitats on the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(12): 79-93.

[13] 刘尊驰,刘华峰,赵丹,等. 紫翅猪毛菜、钠猪毛菜不同个体大小繁殖分配差异及随海拔的变化[J]. 生态学报, 2015, **35**(18): 5 957-5 965.
LIU Z C, LIU H F, ZHAO D, *et al.* Influence of altitude and difference of different-sized individuals on reproductive allocation in *Salsola affinis* C. A. Mey. and *Salsola nitraria* Pall[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 5 957-5 965.

[14] 李志勇,师文贵. 无芒雀麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.

[15] 郝虎东. 无芒雀麦资源分配及其繁殖数量特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
HAO H D. Studies on Resource Allocation and Quantitative Trait of Reproduction of *Bromus inermis* Leyss[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.

[16] 李阳,魏继平,马红媛. 不同种源羊草表型差异性研究[J/OL]. 生态学报, 2020, **40**(4): 1-9.
LI Y, WEI J P, MA H Y. Variations of phenotypic chromatrics in *Leymus chinensis* among different procedurals[J/OL].

Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(4): 1-9.

[17] 蒋林峰, 张新全, 付玉凤, 等. 中国主要鸭茅品种农艺性状变异研究[J]. 草业学报, 2015, **24**(3): 142-154.

JIANG L F, ZHANG X Q, FU Y F, *et al.* Agronomic trait variation of some main orchardgrass (*Dactylis glomerata*) cultivars in China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(3): 142-154.

[18] 张怀山, 夏曾润, 代立兰, 等. 中型狼尾草种质资源表型性状的多样性[J]. 西北农业学报, 2014, **23**(12): 51-59.

ZHANG H S, XIA Z R, DAI L L, *et al.* Phenotypic diversity of *Pennisetum longissimum* var. *intermedium* Germplasm resources[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, **23**(12): 51-59.

[19] BACILIERI R, DUCOUSSO A, KREMER A. Genetic, morphological, ecological and phenological differentiation between *Quercus petraea* (MATT.) LIEBL. and *Quercus robur* L. in a mixed stand of Northwest of France[J]. *Silvae Genetica*, 1995, **44**(1): 1-10.

[20] XIE W G, ZHANG X Q, CAI H W, *et al.* Genetic diversity analysis and transferability of cereal EST-SSR markers to orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.)[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2010, **38**(4): 740-749.

[21] 邢毅, 赵祥, 董宽虎, 等. 不同居群达乌里胡枝子形态变异研究[J]. 草业学报, 2008, **17**(4): 26-31.

XING Y, ZHAO X, DONG K H, *et al.* a study on morphological variation of different populations of *Lespedeza davurica*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, **17**(4): 26-31.

[22] 刘龙昌, 杜改改, 司卫杰, 等. 不同生境小花山桃草自然种群表型变异与协变[J]. 草业学报, 2015, **24**(7): 41-51.

LIU L C, DU G G, SI W J, *et al.* Phenotypic variation and covariation in natural populations of the exotic weed *Gaura parviflora* in different habitat[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(7): 41-51.

[23] 顾晓燕, 郭志慧, 张新全, 等. 短芒披碱草异位保护群体的表型多样性研究[J]. 草业学报, 2015, **24**(5): 141-152.

GU X Y, GUO Z H, ZHANG X Q, *et al.* Phenotypic variations in seven ex-situ conservation populations of *Elymus breviaristatus*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(5): 141-152.

[24] 孙铭, 符开欣, 范彦, 等. 15份多花黑麦草优良引进种质的表型变异分析[J]. 植物遗传资源学报, 2016, **17**(4): 655-662.

SUN M, FU K X, FAN Y, *et al.* Analysis of phenotypic variations in 15 introduced elite germplasm of *Lolium multiflorum* lam[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, **17**(4): 655-662.

[25] 祁娟, 曹文侠, 闫伟红. 披碱草属野生居群表型多样性及其与环境关系研究[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(5): 1 027-1 033.

QI J, CAO W X, YAN W H. Phenotypic diversity and environment relations of wild *Elymus* populations[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(5): 1 027-1 033.

[26] 张大勇. 理论生态学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[27] 张春萍. 八种旱生灌木植物功能性状及生长分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.

ZHANG C P. Study on Functional Traits and Growth Analysis of Eight Xerophytic Shrubs[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

[28] 侯勤正, 叶广继, 马小兵, 等. 青藏高原不同生境下湿生扁蕾(*Gentianopsis paludosa*)个体大小依赖的繁殖分配[J]. 生态学报, 2016, **36**(9): 2 686-2 694.

HOU Q Z, YE G J, MA X B, *et al.* Size-dependent reproductive allocation of *Gentianopsis paludosa* in different habitats of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(9): 2 686-2 694.

[29] 程远峰, 国庆喜, 李晓娜. 东北天然次生林下木树种的生物量器官分配规律[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(11): 2 146-2 154.

CHENG Y F, GUO Q X, LI X N. Biomass allocation of understory plants in a secondary forest in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(11): 2 146-2 154.

[30] THOMAS W S C. Size variability and competition in plant monocultures[J]. *Oikos*, 1986, **47**(2): 211-222.

[31] WEINER J. The influence of competition on plant reproduction[J]. *Plant Reproductive Ecology*, 1988, 228-245.

(编辑: 潘新社)