

# 河西走廊东段不同生境对沙米形态结构 及生物量分配的影响

姜生秀, 赵鹏

(甘肃省治沙研究所, 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室(培育基地), 甘肃兰州 730070)

**摘要:**为揭示荒漠地区1 a生植物对环境变化的响应机制及适应策略,于2020年以甘肃民勤县、武威市和古浪县生境的沙米为对象,对其形态结构、生物量分配及与环境因子的相关性进行了研究,结果表明:(1)古浪县年均气温、年均日照时数和土壤日均温度均最低,分别为6.81℃、2 669 h和16.22℃,武威市均最高,分别为8.58℃、2 873.4 h和22.94℃;古浪县土壤含水量、土壤粉粒和土壤速效磷均最高,分别为4.53%、17.51%和6.81 g·kg<sup>-1</sup>,民勤县均最小,分别为1.46%、7.19%和5.55 g·kg<sup>-1</sup>;古浪县沙米株高、冠幅及根长均最高,分别为70.63、54.24 cm和96.15 cm,民勤县均最小,分别为62.40、46.77 cm和86.31 cm。(2)古浪县沙米根生物量和质量分数及根冠比均最高,分别为7.56 g、15.98%和0.291;不同生境根-茎、根-叶、根-花、叶-茎、花-茎和花-叶生物量均是 $\alpha < 1$ 的异速生长关系。(3)3个生境中,株高和根、茎、叶、花生物量均呈显著或极显著正相关,与根冠比呈显著或极显著负相关;根生物量、根冠比与年均气温、土壤日均温度呈极显著负相关,与土壤有机质、全氮、含水量、粉粒呈显著或极显著正相关;年均日照时数、年太阳总辐射和叶、花生物量之间呈显著或极显著负相关。由此说明,古浪县生境土壤含水量和肥力较好,沙米生长良好。沙米的形态特征与个体生物量间协同变化,沙米地下生物量积累速率大于地上生物量,生殖器官大于营养器官。

**关键词:**沙米;环境因子;形态特征;生物量;河西走廊

**中图分类号:**Q948.12 **文献标志码:**A

## Morphological structure and biomass allocation of *Agriophyllum squarrosum* in different habitats of east section of Hexi Corridor

JIANG Shengxiu, ZHAO Peng

(State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating,  
Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** To reveal the response mechanism and adaptation strategies of annual plants to environmental change in desert areas, the morphological structure, biomass allocation and its correlation with environmental factors of *A. squarrosum* in Minqin, Wuwei and Gulang were studied. The results showed that (1) The average annual temperature, sunshine duration and soil average daily temperature in Gulang were the lowest, which were 6.81℃, 2 669 h and 16.22℃, respectively, while Wuwei was the highest, which were 8.58℃, 2 873.4 h and 22.94℃, respectively. Soil water content, soil silt and soil available phosphorus in Gulang were the highest, which were 4.53%, 17.51% and 6.81 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, while Minqin was the lowest, which were 1.46%, 7.19% and 5.55 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. Gulang had the highest plant height, crown width and root length which were 70.63 cm, 54.24 cm and 96.15 cm, respectively, while Minqin were the lowest, which were 62.40 cm, 46.77 cm and 86.31 cm, respectively. (2) The biomass, mass fraction and root-shoot ratio of Gulang were the highest, which were 7.56g, 15.98% and 0.291. The biomass of root-stem, root-leaf, root-flower, leaf-stem, flower-stem and flower-leaf showed allometric relationships with  $\alpha < 1$  in different habitats. (3) Plant height was significantly positively cor-

related with root, stem, leaf and flower biomass, and significantly negatively correlated with root-shoot ratio in the three habitats. The root biomass and root shoot ratio were negatively correlated with average annual temperature and soil average daily temperature, and positively correlated with soil organic matter, total nitrogen, water content and silt. There were significant or extremely significant negative correlations between annual sunshine duration, annual total solar radiation and leaf and flower biomass. Therefore, the soil moisture content and fertility of Gulang habitat was better, and the growth of *A. squarrosus* was better. The morphological characteristics of *A. squarrosus* showed a trend of synergetic change with individual biomass. The accumulation rate of underground biomass was higher than that of aboveground biomass, and that of reproductive organs were higher than that of vegetative organs.

**Keywords:** *A. squarrosus*; environmental factors; morphological character; biomass; Hexi Corridor

植物形态结构和生物量分配特征是植物和环境共同作用的结果,是植物生长发育规律及其对环境变化响应的直接体现<sup>[1]</sup>。生物量分配是指植物生长发育过程中所同化的资源用于根、茎、叶、花、果等各器官的比例,也就是各器官累积的资源在总资源中所占的比例<sup>[2]</sup>。植物在不同的生境条件下其生长特性与生物量分配规律也不同<sup>[3]</sup>。植物在其生长过程中,不同器官中的生物量分配不是固定的,这不仅是植物自身生长特性的体现,也反映了器官生物量分配对土壤水分、养分、光照、温度的响应<sup>[4]</sup>。例如在土壤水分或养分含量低的情况下,植物通过促进根系的伸长生长来增加根系生物量的分配<sup>[5]</sup>;在光照资源缺乏而土壤水分和养分充足时,植物快速生长,株高的增加会使更多的生物量分配到地上部分以增加光合作用<sup>[6]</sup>。因此,研究不同生境条件下植物形态特征、生物量分配和二者相关性有助于理解全球变化背景下环境因子对植物生长发育、生活史进程、种群稳定性及分布的影响。

沙米(*Agriophyllum squarrosus*)属藜科(Chenopodiaceae)沙蓬属(*Agriophyllum*)一年生植物,具有抗干旱和盐碱、耐贫瘠和风蚀沙埋等特性,适应能力强,是流动沙丘恢复过程中的主要先锋物种<sup>[7]</sup>。因其独特的生理生态特性,在流动沙丘上易定居、而且生长速度极快,分布比较集中密集,当其覆盖度达到70%以上时,对风沙流就能达到很好的控制效果,从而流动沙丘被固定、不被风蚀<sup>[8]</sup>。另外,沙米种子富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、粗纤维和灰分,营养价值极高,可加工成食品供人食用<sup>[9]</sup>。骆驼和山羊喜食嫩茎叶,是良好的饲用植物。国内外有关沙米的研究报道甚多,多集中在种子萌发<sup>[10-11]</sup>、幼苗生长<sup>[12]</sup>、生理生化<sup>[13-14]</sup>、形态结构<sup>[8,11]</sup>及营养价值<sup>[7,12]</sup>等方面,但是沙米生物量分配特性以及这些特性与环境因子的关系还不清楚。因此,本文研究甘肃民勤、武威和古浪3个不同生境下沙米形态特征和生物量分配及其与环境之间的

相关性,将有助于了解荒漠地区1 a生植物对环境变化的响应机制及适应策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘的甘肃省武威市长城乡、民勤县西沙窝和古浪县海子滩,民勤县西沙窝属于典型的温带大陆性荒漠气候,年均气温7.4℃,极端低温-30.8℃,极端高温40.0℃,年均降雨量113.2 mm。武威市长城乡属于典型的温带半荒漠大陆性气候,年均气温7.7℃,年均降雨量139.9 mm,年均蒸发量2 486 mm。古浪县海子滩属于典型的温带半荒漠大陆性气候,海拔1 620 m,年均气温6.8℃,年均降雨量为170 mm,主要集中在7—9月,年均蒸发量为2 807 mm。武威、民勤和古浪年均降雨量和年均气温均存在较大差异,因此选择这3个生境作为研究区域。

### 1.2 样地设置与采样

选择流动沙丘作为试验样地,在3个生境中根据沙丘走向在植被分布相对均匀处设置1 m×1 m的3个样方。样品采集工作于2020年6—9月进行,于沙米开花末期,在每个小样方内分别选择沙米20~30株,将每株沙米的根、茎、叶、花分离出来,置于80℃烘箱内烘干称重,并计算根冠比。在每个小样方内利用对角线取样法采集0~30 cm的混合土样,再将土样风干,带回进行理化分析,采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量;采用重铬酸钾稀释热法测定土壤有机质;采用钼锑抗比色法测定速效磷含量。剔除土壤样品的杂物,过筛后分别测定并计算土壤砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、粘粒(<0.002 mm)含量。在每个小样方用土钻取0~5、5~10、10~20、20~30 cm层土壤样品,带回实验室用烘干法测量每层土壤含水量,最后将各土层的含水量合在一起求平均值。土壤日均温度由土壤温度计测得,在每个小样方地表下10 cm处放置1个

温度计,每 0.5 h 测定 1 次温度,连续监测 24 h,最后取其平均值。收集 2020 年 3 个生境的气象资料,得到年均气温、年均日照时数和年太阳总辐射数据。

### 1.3 数据处理

利用 Excel 2007 软件对实验数据进行整理和统计。采用 Prism 5.0 软件进行方差分析和显著性检验。植物形态与生物量指标间进行 Pearson 相关性分析。异速生长关系采用  $Y = \beta \cdot X^\alpha$  模型进行研究,将两边取对数后(以 10 为底数)转化为  $\lg y = \lg \beta + \alpha \lg x$ ,其中  $\beta$  为标准化常数, $\alpha$  为异速生长指数, $\alpha = 1$  为等速关系, $\alpha \neq 1$  为异速生长关系。根据 Warton 等<sup>[15]</sup>方法对  $\alpha$  进行异质性检验,如果  $\alpha$  没有异质性,则给出一个共同的斜率;若  $\alpha$  不同,则异速生长关系完全不同。采用标准化主轴估计(Standardized major axis estimation, SMA)方法确定相关生长模型的参数,使用 SMAR-TR 软件完成等速生长检验、共同斜率检验及  $\alpha$  的方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生境中主要环境因子

由表 1 可以看出,武威年均气温最高,为 8.58℃,和民勤之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),但二者均显著高于古浪( $P < 0.05$ );武威年均日照时数最

高(2 873.4 h)、民勤次之(2 833.0 h)、古浪最小(2 669.0 h),但三者之间无显著性差异( $P > 0.05$ );民勤年太阳总辐射最高(6 330 MJ·m<sup>-2</sup>),显著高于武威和古浪( $P < 0.05$ );不同生境土壤日均温度之间存在显著性差异( $P < 0.05$ ),武威最高、民勤次之、古浪最低;古浪土壤含水量和土壤粉粒均最高,分别为 4.53% 和 17.51%,均显著高于武威和民勤( $P < 0.05$ ),武威土壤含水量和土壤粉粒均显著高于民勤( $P < 0.05$ );3 个生境的土壤粘粒和土壤砂粒之间均无显著性差异( $P > 0.05$ );土壤有机质和土壤全氮在不同生境变化趋势一致,均是古浪最高、民勤次之、武威最低,且 3 个生境之间均差异显著( $P < 0.05$ );古浪土壤速效磷最高(6.81 g·kg<sup>-1</sup>),显著高于武威和民勤( $P < 0.05$ ),而武威和民勤之间无显著性差异( $P > 0.05$ )。整体来看,3 个生境相比,古浪气温较低,日照时数和太阳辐射较小,但土壤含水量较好,土壤肥力最佳;民勤太阳辐射最高,土壤含水量最小;武威和民勤土壤肥力接近。

### 2.2 不同生境下沙米的形态特征

由表 2 可以看出,不同生境沙米株高、冠幅之间均存在显著性差异( $P < 0.05$ ),古浪株高最大(70.63 cm)、武威次之(67.59 cm)、民勤最小(62.40 cm),冠幅和株高的变化趋势具有一致性,株高越大,冠幅

表 1 不同生境中主要环境因子

Table 1 The main environmental factors in different habitats

生境 Habitat	环境因子 Environmental factor					
	年均气温 Annual mean temperature/℃	年均日照时数 Annual mean sunshine hours/h	年太阳总辐射 Annual total solar radiation/(MJ·m <sup>-2</sup> )	土壤日均温度 Soil average daily temperature/℃	土壤含水量 Soil water content/%	土壤粘粒 Soil clay/%
民勤 Minqin	8.20±0.821a	2833.0±186.243a	6330±163.192a	19.00±3.753b	1.46±0.418c	3.29±2.291a
武威 Wuwei	8.58±1.105a	2873.4±147.022a	5878±147.386b	22.94±4.377a	2.67±0.945b	3.32±6.670a
古浪 Gulang	6.81±1.273b	2669.0±128.243a	5590±218.741b	16.22±2.615c	4.53±1.175a	3.22±2.102a
生境 Habitat	环境因子 Environmental factor					
	土壤粉粒 Soil silt/%	土壤砂粒 Soil sand/%	土壤有机质 Soil organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮 Soil total N /(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤速效磷 Soil available P /(g·kg <sup>-1</sup> )	
民勤 Minqin	7.19±4.744c	78.25±15.342a	3.33±0.104b	0.29±0.009b	5.55±0.425b	
武威 Wuwei	10.55±7.650b	78.99±16.340a	2.49±0.092c	0.16±0.008c	5.72±0.231b	
古浪 Gulang	17.51±12.744a	79.65±8.841a	4.05±0.115a	0.35±0.022a	6.81±0.566a	

注:数值为均值±标准差,同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: The data are represented by mean ± standard deviation. Different letters indicate significant differences among different column at  $P < 0.05$  level. The same below.

表 2 不同生境下沙米的形态特征

Table 2 Morphological characteristics of *A. squarrosus* in different habitats

生境 Habitat	株高/cm Height	冠幅/cm Crown	基径/mm Base diameter	根长/cm Root length
民勤 Minqin	62.40±0.962c	46.77±1.029c	21.35±0.878a	86.31±1.315c
武威 Wuwei	67.59±0.704b	50.10±0.704b	22.36±0.669a	90.75±1.108b
古浪 Gulang	70.63±0.358a	54.24±0.768a	20.62±1.014a	96.15±1.246a

越大;基径在 3 个生境中无显著性差异( $P > 0.05$ );古浪沙米根长最大(96.15 cm)、武威次之(90.75 cm)、民勤最小(86.31 cm),3 个生境之间均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。由此说明,古浪生境下沙米生长状态良好。

### 2.3 不同生境下沙米生物量及其分配特征

由表 3 可以看出,古浪沙米根生物量最大(7.56 g),显著高于武威和民勤( $P < 0.05$ ),比武威和民勤

表3 不同生境条件下沙米各器官生物量、总生物量及根冠比

Table 3 Biomass of different organs, total biomass and root/shoot ration of *A. squarrosus* in different habitats

生境 Habitat	根生物量/g Root biomass	茎生物量/g Stem biomass	叶生物量/g Leaf biomass	花生物量/g Flower biomass	总生物量/g Total biomass	根冠比 Root-shoot ratio
民勤 Minqin	4.43±0.771b	35.17±0.731a	20.82±1.000b	20.98±0.280a	81.40±1.014b	0.198±0.057b
武威 Wuwei	4.41±1.302b	32.42±0.499a	19.80±0.783b	21.62±0.235a	78.25±1.311c	0.199±0.056b
古浪 Gulang	7.56±1.135a	32.27±0.761a	25.23±0.115a	23.01±0.251a	88.07±1.520a	0.291±0.036a

分别高出 41.67% 和 41.40%，武威和民勤之间无显著性差异 ( $P>0.05$ )；古浪沙米具有较高的根冠比 (0.291)，武威次之 (0.199)、民勤最小 (0.198)；武威沙米叶生物量较小 (19.80 g)，和民勤之间无显著性差异 ( $P>0.05$ )，但二者均显著小于古浪 ( $P<0.05$ )；茎和花生物量在 3 个生境之间均无显著性差异 ( $P>0.05$ )；总生物量古浪最高 (88.07 g)、民勤次之 (81.40 g)、武威最小 (77.25 g)。

同一生境下，民勤和武威各器官生物量质量分数均表现为茎>花>叶>根，古浪表现为茎>叶>花>根。茎的质量分数均最高，民勤、武威和古浪茎生物量分配比分别为 43.21%、40.67% 和 33.68%；根生物量分配比古浪最高 (15.98%)、武威次之 (5.71%)、民勤最小 (5.44%)；不同生境中叶生物量分配比相近；武威花生物量分配比为 27.98%，民勤和古浪分别为 25.77% 和 24.01% (图 1)。

## 2.4 不同生境下沙米器官生物量间相关生长关系

由图 2 和表 4 (见 253 页) 可以看出，3 个生境沙米根-茎、根-叶和根-花生物量均呈  $\alpha<1$  的异速生长关系，即根生物量积累速率大于茎、叶和花生物量的积累速率，进一步等速生长检验表明，沙米在不同生境中根-茎生物量  $\alpha$  有显著性差异 ( $P=0.0248$ )，不存在共同斜率，根-叶生物量  $\alpha$  无显著性差异 ( $P=0.1708$ )，存在共同斜率 ( $\alpha=0.0788$ )，根-花生物量  $\alpha$  无显著性差异 ( $P=0.0997$ )，存在共同斜率 ( $\alpha=0.074$ )；3 个生境沙米叶-茎生物量 ( $P=0.2476$ ) 及花-茎生物量 ( $P=0.6259$ )  $\alpha$  均无显著性差异，均存在共同斜率 ( $\alpha=0.1501$  和  $\alpha=0.0784$ )，且均是  $\alpha<1$  的异速生长关系，即叶和花生物量积累速率均大于茎；不同生境沙米花-叶生物量  $\alpha$  有显著性差异 ( $P=0.0373$ )，不存在共同斜率，且均是  $\alpha<1$  的异速生长关系，即花的生物量积累速率大于叶的生物量积累速率。由此说明，沙米生长过程中地下部生物量积累速率大于地上部生物量，在地上部生物量中，生殖器官生物量积累速率大于营养器官生物量。

## 2.5 不同生境下沙米形态与个体生物量间的相关性

由表 5 (见 253 页) 可以看出，株高和根、茎生物量在 3 个生境中均呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，和叶、

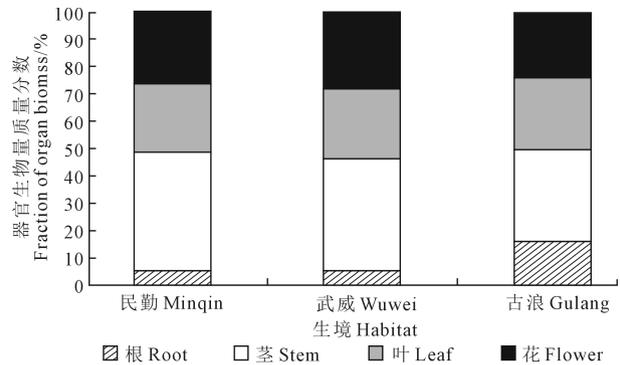


图1 不同生境中沙米各器官生物量百分比

Fig.1 Biomass partitioning of *A. squarrosus* organs in different habitats

花生物量在民勤和武威均呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，在古浪呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，民勤 ( $r=-0.742$ ) 和武威株高与根冠比呈显著负相关 ( $r=-0.698$ )，古浪呈极显著负相关 ( $r=-0.852, P<0.01$ )，表明随着沙米植株的增大根冠比呈减小的趋势；根长与根生物量在民勤呈极显著正相关 ( $r=0.902, P<0.01$ )，在武威 ( $r=0.752$ ) 和古浪呈显著正相关 ( $r=0.635$ )，3 个生境中根长与茎、叶、花生物量之间均无显著相关性，与根冠比仅在古浪呈显著负相关 ( $r=-0.772, P<0.05$ )；冠幅与根、茎生物量在 3 个生境中相关性均不显著，而与叶生物量及根冠比均呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，与花生物量均呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。由此说明，不同生境沙米的形态特征与个体生物量间具有协同变化的趋势。

## 2.6 器官生物量与环境因子的相关性

逐步回归分析表明 (表 6, 见 254 页)，年均气温和土壤日均温度均极显著影响沙米根生物量和根冠比 (负相关,  $P<0.01$ )，均显著影响茎生物量 (正相关,  $P<0.05$ )，即气温和土壤温度越低，沙米植株根生物量和根冠比越大，茎生物量就越小；年均日照时数、年太阳总辐射和叶生物量之间均呈显著负相关 ( $P<0.05$ )，和花生物量间均呈极显著负相关 ( $P<0.01$ )。土壤含水量与总生物量、根生物量及根冠比均呈显著正相关 ( $P<0.05$ )；土壤有机质对总生物量、叶和花生物量具有显著影响 (正相关,  $P<0.05$ )、对根生物量和根冠比具有极显著影响 (正相关,  $P<0.01$ )；土壤全氮和总生物量、根和叶生物量及根冠

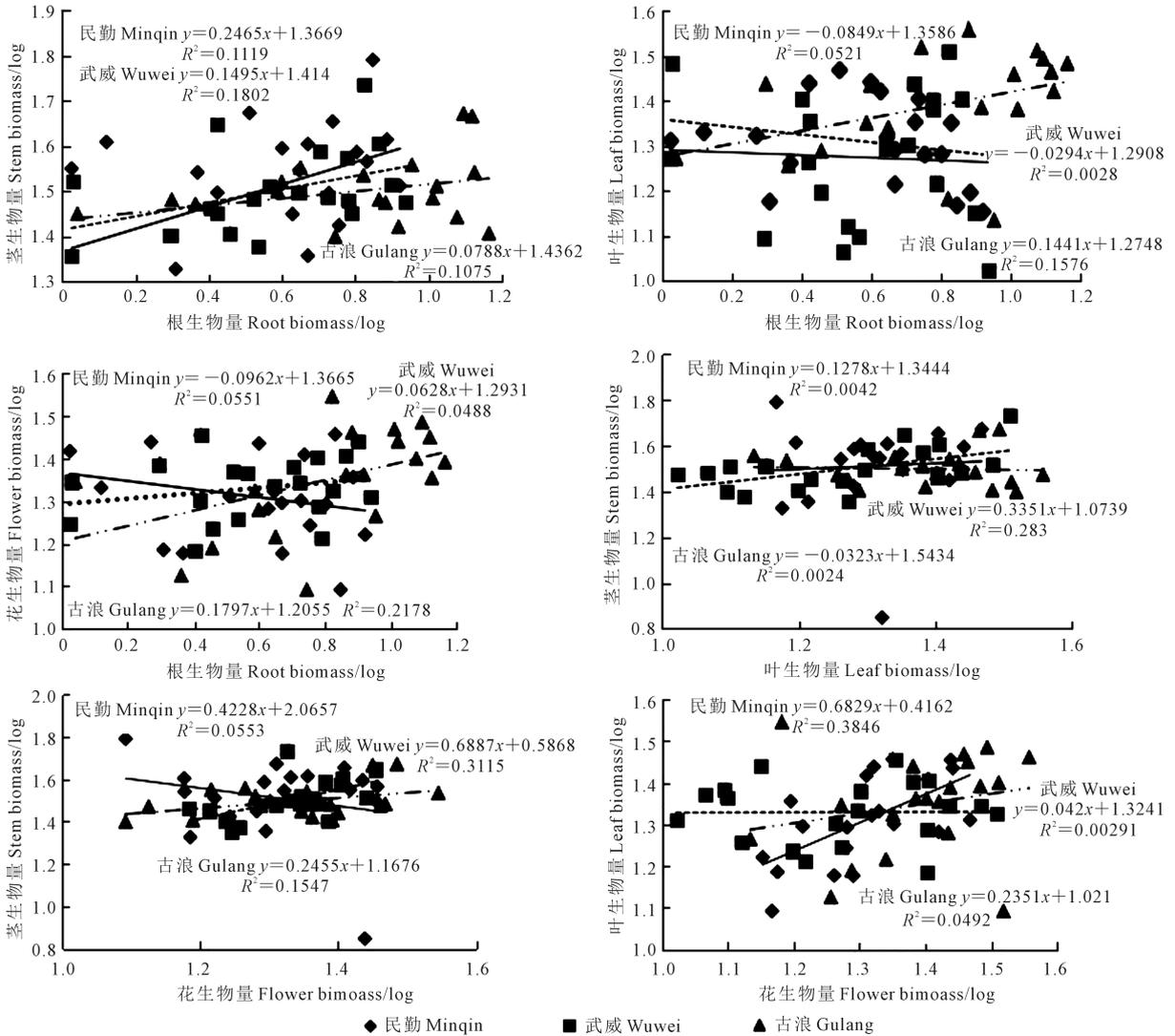


图 2 不同生境沙米叶、茎、根、花生生物量之间的异速生长关系

Fig.2 Allometric relationships between leaf, stem, root and flower biomass of *A. squarrosus* in different habitats

比之间均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；土壤粉粒与根、叶生物量及根冠比之间均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；除此之外，土壤速效磷、土壤粘粒和土壤砂粒对沙米各器官生物量均不产生显著影响。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同生境沙米形态特征差异

植物经过长期的历史进化，逐渐形成了独特的生长发育及繁殖策略，以增强其对异质生境的适应性<sup>[16]</sup>。在甘肃民勤、武威和古浪 3 个生境中，光照、气温、土壤水分、养分和温度等环境因子存在较大的差异，对植物的生长动态产生了较大的影响。不同生境条件下沙米株高、冠幅与根长均表现为古浪 > 武威 > 民勤，基径在 3 个生境中无显著性差异 ( $P > 0.05$ )，结合 3 个生境的环境因子来看，古浪土壤含水量 (4.53%)、土壤粉粒 (17.51%)、土壤有机质 (4.05 g ·

kg<sup>-1</sup>) 和土壤全氮 (0.35 g · kg<sup>-1</sup>) 及土壤速效磷 (6.81 g · kg<sup>-1</sup>) 均最高，武威土壤含水量 (2.67%)、土壤粉粒 (10.55%) 及土壤速效磷 (5.72 g · kg<sup>-1</sup>) 均高于民勤 (1.46%、7.19% 和 5.55 g · kg<sup>-1</sup>)，间接表明了古浪土壤肥力最好，土壤有机质分解及矿化过程更快，能够较快地促进植物生长发育；另外，土壤养分和水分共同作用影响沙米植株的生长。沙米的株高也与其对光的竞争有关，在本研究中，年均日照时数和年太阳总辐射古浪最低 (2 669 h 和 5 590 MJ · m<sup>-2</sup>)，沙米通过增加其高度使其对光的捕获能力增强<sup>[17]</sup>。有研究表明，植物在外部形态结构及生长特性方面都能表现出对环境的适应性。洪岚等<sup>[18]</sup> 研究发现，薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 在光照充分的开阔地中能获得更高的生长量。黄迎新等<sup>[19]</sup> 研究表明，土壤养分和水分的增加有利于沙米的生长，并且土壤养分对沙米

生长的影响最大。王艳莉等<sup>[20]</sup>发现,不同生境中砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)的生长不仅受水分和养分条件的影 响,还与群落中植物水分利用竞争相关。上述结论和本研究结果一致。

表 4 不同生境沙米叶、茎、根、花生量间的拟合参数、等速生长检验及共同斜率检验  
Table 4 Fitting parameters, isometric growth test and common slope test of leaf, stem, root and flower biomass of *A. squarrosus* in different habitats

参数 Parameter	生境 Habitat	相关生长指数 Correlation growth index		等速生长检验 Constant growth test	
		$R^2$	$\alpha$ (95%置信区间 95% confidence interval)	$F$	$P$
根-茎 Root-stem	民勤 Minqin	0.1119	0.2465(-0.0973,0.5903)	2.268	0.1494
	武威 Wuwei	0.1802	0.1495(-0.0084,0.3073)	3.955	0.0621
	古浪 Gulang	0.1075	0.0788(-0.0336,0.1912)	2.169	0.1581
	共同斜率检验 Common slope test	0.0838	-	5.309	0.0248
根-叶 Root-leaf	民勤 Minqin	0.0521	-0.0849(-0.2643,0.0944)	0.989	0.3330
	武威 Wuwei	0.0028	-0.0294(-0.3059,0.2471)	0.0498	0.8258
	古浪 Gulang	0.1576	0.1576(-0.0208,0.3092)	3.368	0.0831
	共同斜率检验 Common slope test	0.0321	0.0788(-0.0349,0.1927)	1.923	0.1708
根-花 Root-flower	民勤 Minqin	0.0551	-0.0962(-0.2934,0.1010)	1.051	0.3189
	武威 Wuwei	0.0488	0.0628(-0.0745,0.2000)	0.9234	0.3493
	古浪 Gulang	0.2178	0.1797(0.0110,0.3483)	5.013	0.0380
	共同斜率检验 Common slope test	0.0461	0.074(-0.0147,0.1643)	2.800	0.0997
叶-茎 Leaf-stem	民勤 Minqin	0.0042	0.1278(-0.8508,1.106)	0.0753	0.7869
	武威 Wuwei	0.2583	0.335(0.0709,0.5992)	7.106	0.0158
	古浪 Gulang	0.0024	-0.032(-0.3597,0.2950)	0.0431	0.8380
	共同斜率检验 Common slope test	0.0229	0.1501(-0.1072,0.4074)	1.346	0.2476
花-茎 Flower-stem	民勤 Minqin	0.0553	-0.4228(-1.288,0.4427)	1.053	0.3183
	武威 Wuwei	0.3115	0.6887(0.1895,1.204)	8.327	0.0098
	古浪 Gulang	0.1547	0.2455(-0.0387,0.5297)	3.295	0.0862
	共同斜率检验 Common slope test	0.0041	0.0784(-0.2478,0.4084)	0.2402	0.6259
花-叶 Flower-leaf	民勤 Minqin	0.3846	0.6829(0.2551,1.111)	11.25	0.0035
	武威 Wuwei	0.0029	0.042(-0.2474,0.2559)	0.0012	0.9722
	古浪 Gulang	0.0492	0.2351(-0.2769,0.7471)	0.9307	0.3475
	共同斜率检验 Common slope test	0.0726	-	4.544	0.0373

注:-表示不存在共同斜率。

Note: - indicates that there is no common slope.

表 5 不同生境沙米株高、冠幅、根长与个体生物量间的相关性分析(样本量  $n=9$ )  
Table 5 Correlation between plant height, crown width, root length and individual biomass of *A. squarrosus* in different habitats(Sample size  $n=9$ )

生物量 Biomass/g	民勤 Minqin			武威 Wuwei			古浪 Gulang		
	株高 Height	根长 Root length	冠幅 Crown	株高 Height	根长 Root length	冠幅 Crown	株高 Height	根长 Root length	冠幅 Crown
根生物量 Root biomass	0.755 *	0.902 **	0.364	0.652 *	0.752 *	0.463	0.664 *	0.635 *	0.402
茎生物量 Stem biomass	0.645 *	0.264	0.445	0.765 *	0.104	0.536	0.752 *	0.539	0.521
叶生物量 Leaf biomass	0.752 *	0.403	0.742 *	0.623 *	0.369	0.756 *	0.823 **	0.558	0.778 *
花生量 Flower biomass	0.664 *	0.510	0.823 **	0.786 *	0.260	0.924 **	0.875 **	0.470	0.904 **
根冠比 Root-shoot ratio	-0.742 *	-0.250	0.669 *	-0.698 *	-0.536	0.658 *	-0.852 **	-0.772 *	0.723 *

注 Note: \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ .下同。The same below.

表 6 器官生物量与环境因子的相关性分析(样本量  $n=9$ )Table 6 Correlation analysis between organ biomass and environmental factors (Sample size  $n=9$ )

环境因子 Environmental factor	总生物量 Total biomass	根生物量 Root biomass	茎生物量 Stem biomass	叶生物量 Leaf biomass	花生物量 Flower biomass	根冠比 Root-shoot ratio
年均气温 Annual mean temperature	0.334	-0.908 **	0.761 *	0.403	0.441	-0.798 **
年均日照时数 Annual mean sunshine hours	0.553	0.117	0.571	-0.687 *	-0.868 **	0.363
年太阳总辐射 Annual total solar radiation	0.527	-0.248	0.208	-0.662 *	-0.927 **	0.227
土壤日均温度 Soil average daily temperature	-0.256	-0.972 **	0.731 *	0.334	0.351	-0.822 **
土壤含水量 Soil watercontent	0.687 *	0.769 *	-0.104	0.550	0.519	0.706 *
土壤有机质 Soil organic matter	0.685 *	0.802 **	0.551	0.697 *	0.701 *	0.872 **
土壤全氮 Soil total nitrogen	0.626 *	0.753 *	0.361	0.682 *	0.446	0.713 *
土壤速效磷 Soil available phosphorus	0.347	0.208	0.356	0.331	0.242	0.160
土壤粘粒 Soil clay	0.453	0.517	0.206	0.100	0.232	0.103
土壤粉粒 Soil silt	0.536	0.677 *	0.571	0.621 *	0.305	0.614 *
土壤砂粒 Soil sand	0.308	0.557	0.531	0.207	0.183	0.106

### 3.2 不同生境下沙米生物量分配特征及其与形态、环境因子的相关性

植物生物量体现了其在生长发育过程中对外界养分的吸收、积累、利用的能力<sup>[21]</sup>。影响生物量分配的生物和非生物因素有降水量、养分含量、土壤质地、植被类型等,其中温度是影响植物生物量分配非常重要的环境因子<sup>[22]</sup>。根系作为植物个体的重要组成部分,具有吸收水分、营养物质和储存的作用<sup>[15]</sup>。本研究发现,3个生境中根生物量在古浪最高(7.56 g)、民勤次之(4.43 g)、武威最小(4.41 g),且古浪沙米具有较高的根冠比(0.291),而年均气温和土壤日均温度古浪均最低(6.81℃和16.22℃),武威均最高(8.58℃和22.94℃)。马冰等<sup>[23]</sup>研究发现,降温处理过的幼苗株高、叶面积、地上部生物量分配相对较小,而表现出将更多的资源分配给根部,这与本研究结果类似。经逐步回归分析发现,年均气温和土壤日均温度均极显著影响沙米根生物量和根冠比(负相关,  $P<0.01$ ),这是因为植物为了适应低温环境,通过对地上部分生长一定程度的弱化,将更多光合产物分配到地下部分,使得古浪沙米有更高的根冠比,提高了植物根系对水分及养分的吸收能力,另一方面,在低温环境中,植物根系生物量的损失速率相对较低,这也同样有利于根系生物量的累积,导致较高的根冠比<sup>[24]</sup>。3个生境中茎的生物量古浪(32.27 g)略小于武威和民

勤(32.42 g和35.17 g),这可能是因为古浪温度较低,植物蒸腾作用较小,减小茎的生物量可以更好地适应较低的蒸腾拉力下的水分和养分需求。逐步回归分析也表明,年均气温和土壤日均温度与茎生物量呈显著正相关( $P<0.05$ )。叶生物量古浪最大(25.23 g)、民勤次之(20.82 g)、武威最小(19.80 g),花生物量古浪最大(23.01 g)、武威次之(21.62 g)、民勤最小(20.98 g),这是因为年均日照时数和年太阳总辐射古浪均最小(2 669 h和5 590 MJ·m<sup>-2</sup>),武威年均日照时数最大(2 873.4 h),民勤年太阳总辐射最大(6 330 MJ·m<sup>-2</sup>)。有研究表明,当植物幼苗生长受到光照条件的限制,植物将更多的资源分配到地上部分,通过增加其高度、叶分配和比叶面积来获取更多的光照资源用以提高其光竞争能力和生存适合度<sup>[25]</sup>,而强光和高温对花序的生长发育具有阻碍作用,造成花序发育中止或者败育<sup>[18]</sup>。逐步回归分析也表明,年均日照时数和年太阳总辐射与花生物量呈极显著负相关( $P<0.01$ )、与叶生物量呈显著负相关( $P<0.05$ )。

在本研究中,土壤粉粒(0.002~0.05 mm)与根、叶生物量及根冠比之间均呈显著正相关( $P<0.05$ ),土壤粘粒和土壤砂粒对沙米各器官生物量均不产生显著影响。Wang等<sup>[22]</sup>研究发现,在草地生态系统中,植物在土壤砂粒(0.05~2 mm)含量较高的地方其根冠比也较高,而在粘粒(<0.002 mm)含量较

高的地方根冠比较低,后者的土壤含水量和养分含量较低而孔隙度较高而使得氧气含量相对充足,植物为了获取更多水分及养分而促进根系生长,这与本研究结果并不完全一致。Muller等<sup>[26]</sup>研究表明,根冠比与土壤养分呈负相关,而王艳莉等<sup>[20]</sup>研究发现,土壤水分和养分与根冠比呈正相关。本研究表明,土壤含水量与总生物量、根生物量及根冠比均呈显著正相关( $P < 0.05$ ),土壤有机质对总生物量、叶和花生物量具有显著影响(正相关, $P < 0.05$ )、对根生物量和根冠比具有极显著影响(正相关, $P < 0.01$ ),土壤全氮和总生物量、根和叶生物量及根冠比之间均呈显著正相关( $P < 0.05$ ),这就说明当土壤养分或水分吸收受到限制时,将更多的物质能量分配给根系生长。

除了环境因素外,植物大小对沙米的器官生物量分配也产生了显著影响。在不同生境条件下,株高和根、茎、叶、花生物量间均呈显著或极显著正相关,表明这些指标间具有明显的协同生长关系。株高与根冠比呈显著或极显著负相关,说明地下部生物量的分配比例随地上部形态指标增大有减小的趋势,这与陶冶等<sup>[27]</sup>关于短命植物生物量分配研究结果一致。

### 3.3 不同生境沙米叶、茎、根和花生物量的异速生长关系

当植物的光合产物向其不同部分的分配关系成非线性比例时,即表现为植物的异速生长关系,它能反映出植物在不同环境下的生长策略<sup>[24]</sup>。在本研究中,3个生境沙米根-茎、根-叶、根-花、叶-茎、花-茎和花-叶生物量均是 $\alpha < 1$ 的异速生长关系,说明沙米生长过程中根生物量积累速率大于茎、叶、花、叶、花生物量积累速率大于茎,花生物量积累速率大于叶,即沙米倾向于将更多的生物量分配到根部,提高对营养物质和水分的吸收速率以更好地适应干旱荒漠环境。营养器官与生殖器官的生物量分配反映了植物在有性繁殖和无性繁殖之间的资源分配策略<sup>[18]</sup>,在地上生物量中,生殖器官生物量积累速率大于营养器官生物量积累速率,有利于其繁殖生长,这也是其对干旱环境适应的具体体现。根-茎和花-叶生物量 $\alpha$ 有显著性差异,均不存在共同斜率,根-叶、根-花、叶-茎、花-茎生物量 $\alpha$ 均无显著性差异,均存在共同斜率,表现出同一植物在不同环境下的趋同适应。

### 参考文献:

- [1] 史元春, 赵成章, 宋清华, 等. 兰州北山刺楸枝叶性状的坡向差异性[J]. 植物生态学报, 2015, 39(4): 362-370.  
SHI Y C, ZHAO C Z, SONG Q H, et al. Slope-related variations in twig and leaf traits of *Robinia pseudoacacia* in the northern mountains of Lanzhou [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(4): 362-370.
- [2] 肖遥, 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 929-940.  
XIAO Y, TAO Y, ZHANG Y M. Biomass allocation and leaf stoichiometric characteristics in four desert herbaceous plants during different growth periods in the Gurbantunggüt Desert, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 929-940.
- [3] 许振柱, 周广胜. 不同温度条件下土壤水分对羊草幼苗生长特性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 256-260.  
XU Z Z, ZHOU G S. Effects of soil moisture on growth characteristics of *Leymus chinensis* seedlings under different temperature conditions [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 256-260.
- [4] 程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等. 植物代谢速率与个体生物量关系研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2312-2320.  
CHENG D L, ZHONG Q L, LIN M Z, et al. The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2312-2320.
- [5] SHAN L S, ZHANG X M, WANG Y K, et al. Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the Tarim Desert Highway, Xinjiang, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 93-101.
- [6] FALSTER D S, WESTOBY M. Plant height and evolutionary games [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 18(7): 337-343.
- [7] 赵杰才, 赵鹏善, 赵昕, 等. 沙米(*Agriophyllum squarrosum*)生物学特性、营养价值及驯化可行性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 636-643.  
ZHAO J C, ZHAO P S, ZHAO X, et al. Biological characters, nutrient value and domestication feasibility of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 636-643.
- [8] 齐凯, 安晓亮, 叶世河. 沙米生长特性调查[J]. 内蒙古林业科技, 2010, 36(1): 19-21, 35.  
QI K, AN X L, YE S H. Growth characteristics of *Ariophyllum squarrosum* [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2010, 36(1): 19-21, 35.
- [9] CHEN G X, ZHAO J C, ZHAO X. A psammophyte *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.: a potential food crop [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2014, 61(3): 669-676.
- [10] 崔建垣, 李玉霖, 赵哈林, 等. 不同环境条件对沙米种子萌发的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(5): 996-1000.  
CUI J Y, LI Y L, ZHAO H L, et al. Effects of temperature, water potential and burial depth on germination of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(5): 996-1000.
- [11] 魏林源, 马全林, 张晓娟, 等. GA3处理对流动沙丘先锋植物沙米(*Agriophyllum squarrosum*)种子萌发的影响[J]. 西北林学院学

- 报, 2016, 31(1): 107-113.
- WEI L Y, MA Q L, ZHANG X J, et al. Effect of GA3 treatment on the germination of *Agriophyllum squarrosum*, a pioneering species on the mobile sand dunes[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 107-113.
- [12] 陈文, 马瑞君, 王桔红. 盐和 PEG 模拟干旱胁迫对沙米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 113-119.
- CHEN W, MA R J, WANG J H. Effect of salt and drought simulated by PEG on seed germination and seedling growth of *Agriophyllum squarrosum*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4): 113-119.
- [13] 赵哈林, 曲浩, 周瑞莲, 等. 沙埋对沙米幼苗生长及生理过程的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3367-3372.
- ZHAO H L, QU H, ZHOU R L, et al. Effects of sand burial on growth and physiological process of *Agriophyllum squarrosum* seedlings in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3367-3372.
- [14] 曲浩, 赵哈林, 周瑞莲, 等. 沙埋对两种一年生藜科植物存活及光合生理的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 79-85.
- QU H, ZHAO H L, ZHOU R L, et al. Effects of sand burial on survival and photosynthesis characteristics of two Chenopodiaceae annuals[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(1): 79-85.
- [15] WARTON D I, WRIGHT I J, FALSTER D S, et al. Bivariate line-fitting methods for allometry[J]. Biological Reviews, 2006, 81(2): 259-291.
- [16] 周天阳, 高景, 贺俊东, 等. 高山草地环山样带异质坡向上 3 种植物的株高、叶片性状与生物量分配[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(3): 425-433.
- ZHOU T Y, GAO J, HE J D, et al. Plant height, leaf traits, and biomass allocation of three species at heterogeneous slope aspects along a transect in an alpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(3): 425-433.
- [17] 侯兆疆, 赵成章, 李钰, 等. 不同坡向高寒退化草地狼毒株高和枝条数的权衡关系[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 281-288.
- HOU Z J, ZHAO C Z, LI Y, et al. Trade-off between height and branch numbers in *Stellera chamaejasme* on slopes of different aspects in a degraded alpine grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3): 281-288.
- [18] 洪岚, 刘梦佼, 沈浩, 等. 两种生境中薇甘菊种群的生物量生殖分配[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(5): 598-605.
- HONG L, LIU M J, SHEN H, et al. Reproductive allocation of biomass in *Mikania micrantha* populations from two habitats[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2010, 28(5): 598-605.
- [19] 黄迎新, 赵学勇, 张洪轩, 等. 沙米表型可塑性对土壤养分、水分和种群密度变化的响应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2593-2598.
- HUANG Y X, ZHAO X Y, ZHANG H X, et al. Responses of *Agriophyllum squarrosum* phenotypic plasticity to the changes of soil nutrient and moisture contents and population density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12): 2593-2598.
- [20] 王艳莉, 齐欣宇, 杨昊天, 等. 不同生境下砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)形态结构及生物量分配特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 756-764.
- WANG Y L, QI X Y, YANG H T, et al. Morphological structure and biomass allocation of *Echinops gmelini* in different habitats[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 756-764.
- [21] 张磊, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 四种荒漠植物生物量分配对土壤因子的响应及异速生长分析[J]. 广西植物, 2019, 39(9): 1201-1211.
- ZHANG L, LYU G H, JIANG L M, et al. Response of four species of desert plant biomass distribution to soil factors and allometric growth analysis[J]. Guihaia, 2019, 39(9): 1201-1211.
- [22] WANG L M, LI L H, CHEN X, et al. Biomass allocation patterns across China's terrestrial biomes[J]. PLoS One, 2014, 9(4): e93566.
- [23] 马冰, 卜海燕, 葛文静, 等. 生境和降温对高寒草甸 6 种优势禾本科植物幼苗生长和生物量分配的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2912-2917.
- MA B, BU H Y, GE W J, et al. Effects of habitat and cooling on seedling growth and biomass allocation of six Gramineae species in an alpine meadow[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 2912-2917.
- [24] WU J B, HONG J T, WANG X D, et al. Biomass partitioning and its relationship with the environmental factors at the alpine steppe in northern Tibet[J]. PLoS One, 2013, 8(12): e81986.
- [25] NAVAS M L, GARNIER E. Plasticity of whole plant and leaf traits in *Rubia peregrina* in response to light, nutrient and water availability[J]. Acta Oecologica, 2002, 23(6): 375-383.
- [26] MÜLLER I, SCHMID B, WEINER J. The effect of nutrient availability on biomass allocation patterns in 27 species of herbaceous plants[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2000, 3(2): 115-127.
- [27] 陶冶, 张元明. 准噶尔荒漠 6 种类短命植物生物量分配与异速生长关系[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 38-48.
- TAO Y, ZHANG Y M. Biomass allocation patterns and allometric relationships of six ephemeroïd species in Junggar Basin, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 38-48.