

高寒地区燕麦 (*Avena sativa* L.) 人工草地生物量分配对施肥和混播措施的响应

刘文辉^{1,2}, 张英俊^{1,3*}, 师尚礼¹, 孙建⁴, 魏小星²

(1 甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070;

2 青藏高原优良牧草种质资源研究省级重点实验室 / 青海省畜牧兽医科学院, 青海西宁 810016;

3 中国农业大学草地研究所, 北京 100094; 4 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 【目的】了解高寒地区燕麦人工草地生物量分配格局对燕麦品种、施肥措施和混播水平的响应机制, 为高寒地区人工草地建植提供依据。【方法】采用“三因素四水平”正交试验设计, 包括 4 个燕麦品种, 分别为青燕 1 号、林纳、青海 444、青海甜燕麦; 4 种施肥措施, 分别为不施任何肥料 (CK₀)、尿素 75 kg/hm² + 磷酸二铵 150 kg/hm² (NP)、有机肥 1500 kg/hm² (OM) 和尿素 37.5 kg/hm² + 磷酸二铵 75 kg/hm² + 有机肥 750 kg/hm² (NP + OM); 4 个箭筈豌豆混播水平, 分别为 0、45、60、75 kg/hm², 在燕麦拔节期、抽穗期、开花期和乳熟期分别对各处理燕麦和箭筈豌豆各器官生物量进行了测定。【结果】燕麦人工草地地上生物量以青燕 1 号 (85.57%)、尿素 + 磷酸二铵 + 有机肥处理 (84.91%) 和 0 kg/hm² 混播水平 (85.81%) 时分配比例最高; 地下生物量以林纳 (18.04%)、不施肥 (16.02%) 和 30 kg/hm² 混播水平 (16.29%) 时分配比例最高。茎、叶、穗和根生物量分配比例分别为 44%~48%、19%~24%、17%~22% 和 14%~18%。茎、叶、穗和地下生物量分配随季节分别呈增加、先降后增、增加和下降的变化趋势; 在各因素影响下, 燕麦生长前期以叶生长为主, 中、后期以茎生长为主, 而箭筈豌豆在生长前期以根生长为主, 中、后期以叶生长为主。燕麦生物量分配在整个生育期处于优势地位, 地上生物量分配始终高于地下, 表现为异速生长关系。茎和地下生物量分配在生长前期和后期分别受施肥措施和品种的影响; 叶生物量分配在整个生育期受混播水平的影响; 燕麦穗生物量分配主要受品种和混播水平的影响。【结论】品种、施肥措施和箭筈豌豆混播水平均对高寒地区燕麦人工草地生物量分配具有显著影响, 选用青燕 1 号品种, 单播, 配施尿素 37.5 kg/hm²、磷酸二铵 75 kg/hm²、有机肥 750 kg/hm² 时地上生物量分配最高; 选用林纳, 并混播 30 kg/hm² 的箭筈豌豆, 采用不施肥措施时地下生物量分配最高。

关键词: 高寒地区; 燕麦品种; 施肥; 混播; 生物量分配

Effect of variety, fertilization and mixture sowing on oat biomass allocation in the alpine cultivated pasture

LIU Wen-hui^{1,2}, ZHANG Ying-jun^{1,3*}, SHI Shang-li¹, SUN Jian⁴, WEI Xiao-xing²

(1 Pratacultural College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau/Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xining 810016, China; 3 Institute of Grassland Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 4 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: 【Objectives】 This study focused on the response of biomass allocation of oat artificial grassland in alpine region to oat variety, fertilization and common vetch mixture level for providing a theoretical basis to establish the artificial grassland. 【Methods】 According to the orthogonal design of three factors (variety, fertilization and legume mixture) and four levels, there were four oat varieties, namely *Avena sativa* L. cv. Qingyan No.1, *A. sativa* L. cv. Lena, *A. sativa* L. cv. Qinghai 444 and *A. sativa* L. cv. Qinghai, four fertilization

收稿日期: 2016-05-11 接受日期: 2016-08-16

基金项目: “现代农业产业技术体系建设专项资金”(CARS-35-41); 农业部“青藏高原牧草种质资源保护利用”项目(070401); 青海省饲草产业科技创新平台建设资助。

作者简介: 刘文辉(1979—), 男, 青海贵德人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事牧草栽培和育种方面的研究。

Tel: 0971-8210200; E-mail: qhliuwenhui@163.com. *通信作者 Tel: 010-62734593; E-mail: zhangyj@cau.edu.cn

measures, including without applying any fertilizers (CK₀), 75 kg/hm² urea + 150 kg/hm² NH₄H₂PO₄(NP), 1500 kg/hm² organic manure (OM) and 37.5 kg/hm² urea + 75 kg/hm² NH₄H₂PO₄ + 750 kg/hm² organic manure (NP + OM), and four common vetch mixture levels with 0 kg/hm², 45 kg/hm², 60 kg/hm² and 75 kg/hm². Different organ biomass of oats and common vetch were measured at the jointing, heading, flowering and milk stages of oats respectively. 【 **Results** 】 The aboveground biomass allocation of the oat artificial grassland was the highest under the fertilization of 37.5 kg/hm² urea + 75 kg/hm² NH₄H₂PO₃ + 750 kg/hm² organic manure (NP + OM) (84.91%) with the *A. sativa* cv. Qingyan No.1 (85.57%) without common vetch mixing (85.81%), while the underground biomass allocation was the highest under the common vetch mixture level 30 kg/hm² (16.29%) with the *A. sativa* cv. Lena (18.04%) without fertilization (16.02%). The ranges of the biomass allocation rates of stems, leaves, ears and roots were 44%–48%, 19%–24%, 17%–22% and 14%–18% respectively. The biomass allocation rates were changed with the growth stages: increasing, decreasing at the beginning and increasing later, increasing, and decreasing for stem, leaf, ear and root respectively. Under the influence of various factors, it was the oat's leaves that played a dominant role in the early growing period, and the stems took place in the mid-late period. The common vetch's root biomass, on the contrary, was leading at the beginning and its leaves took place in the mid-late period. Obviously, the biomass allocation of the oats played a significant role in the whole growing process. Meanwhile, there was a relationship defined as the allometric growth relationship, in other words, the aboveground biomass was always higher than the underground biomass in the whole growth period. The stem and root biomass allocation at the early and late growth stages were affected by the fertilization and variety separately, while the level of mixed sowing in the whole growth period affected the leaf growth, and the fertilization and the mixture level mainly influenced the ear biomass allocation. 【 **Conclusions** 】 It was variety, fertilization and the common vetch mixture level that significantly affected the biomass allocation in the alpine region. The highest aboveground biomass allocation was under the fertilization of 37.5 kg/hm² urea + 75 kg/hm² NH₄H₂PO₃ + 750 kg/hm² organic manure with the *A. sativa* cv. Qingyan No.1 without common vetch, and the highest belowground biomass allocation was the treatment without fertilization with the *A. sativa* L. cv. Lena mixed with common vetch of 30 kg/hm².

Key words: alpine area; oat variety; fertilization; mixture sowing; biomass allocation

植物响应环境条件的变化是通过调节各器官的生物量分配,以最大化地获取光、营养和水等受限资源。生物量分配格局的可塑性贯穿植物的整个生活史,决定着植物在不同环境中获取资源的能力^[1]。植物在整个生长发育过程中,不同功能器官对资源的利用始终存在着竞争,植物只有通过优化资源分配以适应环境变化,才能维持其生存。

建立优质、高产的人工草地是解决青藏高原高寒地区草畜季节性供求矛盾、保护生态环境和促进草地畜牧业可持续发展的关键措施之一。青藏高原地区一年生人工草地建设主要以燕麦 (*Avena sativa* L.) 单播、燕麦与箭筈豌豆 (*Vicia sativa* L.) 混播为主。禾本科和豆科牧草的混播草地以较高的生产力、较好的营养搭配和经济有效的氮素来源而长期受到人们的重视。混播草地的生长动态,尤其是生物量的积累和分配动态变化是草地群落内竞争力大小的具体参考指标。在燕麦人工草地的研究方面,国内外科研人员从燕麦单播^[2]、燕麦与箭筈豌豆混播的品种

选择^[3]、混播组合^[4]、施肥水平^[5]、光能转化效率^[6]、生产性能^[7]以及营养组成^[8]等方面进行的深入而细致的理论研究和生产实践^[6],有效促进了燕麦人工草地初级生产力的提高。以往的大量研究多集中在单一因素(品种、肥料、密度)确定最优化分配格局,忽略了植物生长过程中各器官间生物量的分配格局对草地生态和生产方面的影响。本研究以青藏高原燕麦人工草地建植过程中选用的4个燕麦品种为研究对象,采用不同的施肥措施和箭筈豌豆混播比例,建立燕麦与箭筈豌豆混播人工草地,从草地生态和生产方面研究植物各器官资源分配的动态变化,以了解植物生物分配格局对品种、施肥措施和混播水平的响应机制。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014年在青海省海北州西海镇(36°59.36'E、

100°52.848'N) 进行。海拔 3156 m, 气候寒冷潮湿, 无绝对无霜期, 年平均气温 0.5℃, 年降水量 369.1 mm, 且多集中在 7、8、9 三个月, 年蒸发量为 1400 mm, 全年日照时数在 2980 h, 平均无霜期为 93 d 左右。土壤为栗钙土, pH 值 8.43, 全氮 (N) 1.56 g/kg, 全磷 (P₂O₅) 1.39 g/kg, 全钾 (K₂O) 22.06 g/kg, 碱解氮 88.77 mg/kg, 速效磷 2.2 mg/kg, 速效钾 168.2 mg/kg, 有机质 32.48 g/kg。

1.2 试验材料与方法

本试验为品种、施肥和箭筈豌豆混播水平三因素四水平正交试验设计[L₁₆(4³), 表 1], 共 16 个处理, 完全随机区组排列, 3 次重复。燕麦品种 4 个, 分别为青燕 1 号 (A₁)、林纳 (A₂)、青海 444 (A₃) 和青海甜燕麦 (A₄); 施肥措施 4 个, 分别为不施任何肥料 (B₁)、尿素 75 kg/hm² + 磷酸二铵 150 kg/hm² (B₂)、有机肥 1500 kg/hm² (B₃) 和尿素 37.5 kg/hm² + 磷酸二铵 75 kg/hm² + 有机肥 750 kg/hm² (B₄); 箭筈豌豆混播水平 4 个, 分别为 0 kg/hm² (C₁)、45 kg/hm² (C₂)、60 kg/hm² (C₃) 和 75 kg/hm² (C₄)。试验小区面积为 20m² (4 m × 5 m), 小区间隔 0.5 m。试验选用肥料

为尿素, 磷酸二铵 (N 16%、P₂O₅ 46%), 有机肥 (有机质 > 40%、N + P₂O₅ + K₂O 25%)。

燕麦播量按 600 × 10⁴ plant/hm² 保苗数计算, 根据种子用价计算得青燕 1 号、林纳、青海 444 和青海甜燕麦的实际播量分别为 154.5 kg/hm²、150.0 kg/hm²、183.0 kg/hm² 和 216.0 kg/hm², 撒播, 燕麦与箭筈豌豆 5 月 14 日同时播种, 播深 3~4 cm。肥料在播种前一次性施入。出苗后, 人工除草 1 次。分别于燕麦拔节期 (6 月 15 日)、抽穗期 (7 月 15 日)、开花期 (8 月 15 日) 和乳熟期 (9 月 15 日) 在各试验小区选取 1 m × 1 m 的样方 (3 次重复), 连同地下部分挖出, 燕麦和箭筈豌豆按根、茎、叶、穗 (燕麦) 分开, 带回实验室, 洗净地下生物量, 置于 85℃ 烘箱中烘 3 h 后分别称重。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 对数据进行初步整理, 用 SPSS for Windows 11.5 进行方差分析, 采用 Duncan 法在 0.05 水平上进行多重比较。用 Sigmaplot 10.0 进行绘图。

相关生长是以幂函数的形式描述生物个体大小

表 1 正交试验试验设计方案 L₁₆(4³)
Table 1 The orthogonal experiment design L₁₆(4³)

处理 Treatment	品种 Variety	施肥 Fertilization (kg/hm ²)			混播水平 (kg/hm ²) Vetch mixture
		尿素 Urea	磷酸二铵 NH ₄ H ₂ PO ₄	有机肥 Organic manure	
A ₁ B ₁ C ₁	青燕 1 号 Qingyan No.1	0	0	0	0
A ₁ B ₂ C ₂		75	150	0	45
A ₁ B ₃ C ₃		0	0	1500	60
A ₁ B ₄ C ₄		37.5	75	750	75
A ₂ B ₁ C ₂	林纳 Lena	0	0	0	45
A ₂ B ₂ C ₁		75	150	0	0
A ₂ B ₃ C ₄		0	0	1500	75
A ₂ B ₄ C ₃		37.5	75	750	60
A ₃ B ₁ C ₃	青海 444 Qinghai 444	0	0	0	60
A ₃ B ₂ C ₄		75	150	0	75
A ₃ B ₃ C ₁		0	0	1500	0
A ₃ B ₄ C ₂		37.5	75	750	45
A ₄ B ₁ C ₄	青海甜燕麦 Qinghai	0	0	0	75
A ₄ B ₂ C ₃		75	150	0	60
A ₄ B ₃ C ₂		0	0	1500	45
A ₄ B ₄ C ₁		37.5	75	750	0

注 (Note): A、B、C 分别代表品种、施肥措施和混播水平 Represent variety, fertilization and mixture level, respectively.

和其它属性间的关系^[8], 可用 $\text{Log}Y = a \text{Log}X + b$ 表示(其中 Y 为地上生物量, X 为地下生物量, a 为异速生长指数, b 为异速生长常数)。根据 a 值的不同, 地上和地下生物量生长关系存在 3 种形式: $a = 1.0$, 表现为等速生长, 即地上和地下生物量增加速率相等; $a > 1.0$, 表现为地上生物量积累速率高于地下; $a < 1.0$, 表示地下生物量积累速率高于地上。利用标准主轴法 (standardized major axis, SMA) 计算异速生长方程的指数 a , 和 95% 置信区间 (CI) 及决定系数 (R^2)^[9]。

2 结果与分析

2.1 生物量构件分配模式

2.1.1 品种、施肥措施和混播水平对各器官生物量分配的影响 表 2 显示, 品种因素影响下, 地上总生物量分配比例以青燕 1 号 (85.57%) 和青海甜燕麦 (85.62%) 最高, 地下生物量以林纳 (18.04%) 和青海 444 (17.29%) 分配比例最高; 施肥措施影响下, 地上以尿素 + 二铵 + 有机肥 (84.91%) 和尿素 + 二铵 (84.42%) 最高, 地下以不施肥 (17.14%) 和有有机肥 (16.02%) 最高; 混播因素影响下, 地上以 0 kg/hm² 最高 (85.81%), 地下以 30 kg/hm² 最高 (16.29%)。在 3 个因素影响下, 茎、叶、穗和根生物量分配比例分

别为 44%~48%、19%~24%、17%~22% 和 14%~18%。

2.1.2 生物量分配季节动态 表 3 显示, 在 3 个因素影响下, 燕麦人工草地总茎生物量分配随生育期的推进而显著增加, 至开花-乳熟期最大 (约为 44%~48%), 其中燕麦和箭筈豌豆茎生物量分配比例分别在开花期最大 (41.43%~41.63%) 和乳熟期最大 (7.23%~10.48%)。总叶、燕麦叶生物量分配比例在拔节期最大, 平均分别达 49.56%~50.67% 和 46.77%~47.53%。总叶生物量分配比例显著下降至开花期后, 在乳熟期有所增加, 而燕麦叶生物量分配比例显著下降至乳熟期, 箭筈豌豆叶生物量分配比例随生育期的推进显著增加, 至乳熟期最大 (8.12%~11.67%)。穗分配比例则从开花期-乳熟期呈显著增加; 总根、燕麦根和箭筈豌豆根生物量分配比例均在拔节期最大, 分别为 36.10%~37.02%、4.42%~6.27% 和 41.02%~43.20%, 从拔节到乳熟期呈显著下降趋势。

2.1.3 生物量分配策略 从分配策略来看 (表 3), 在 3 个因素影响下, 拔节期、抽穗期、开花期、乳熟期 4 个时期燕麦生物量分配比例分别为叶 > 根 > 茎、茎 > 叶 > 根、茎 > 穗 > 叶 > 根、茎 > 穗 > 叶 > 根; 拔节期以叶和根生物量为主, 抽穗期后, 茎生物量

表 2 不同措施对开花期生物量构件分配比例的影响 (%)

Table 2 Effect of different treatments on the biomass allocation ratio at the flowering stage

因素 Factor	水平 Level	茎 Stem			叶 Leaf			穗 Ear	地上生物量 Aboveground biomass	根 Root		
		燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总茎 Total	燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总叶 Total			燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总根 Total
品种 Variety	A ₁	43.74 a	4.47 ab	48.21 a	17.34 bc	5.52 a	22.86 a	17.67 b	85.57 a	11.76 b	2.67 ab	14.43 c
	A ₂	39.37 b	6.27 a	45.64 b	17.03 bc	5.43 a	22.46 a	17.59 b	81.96 b	14.84 a	3.20 a	18.04 a
	A ₃	40.30 ab	4.51 ab	44.82 b	18.45 a	5.60 a	24.04 a	17.10 b	82.71 b	14.41 a	2.88 ab	17.29 b
	A ₄	42.29 a	3.35 b	45.64 b	16.79 c	4.06 b	20.85 b	21.53 a	85.62 a	12.18 b	2.20 b	14.38 c
施肥 Fertilizer	B ₁	41.37 a	5.04 a	46.40 a	16.61 a	5.92 a	22.53 a	17.53 c	82.86 b	13.70 a	3.44 a	17.14 a
	B ₂	42.05 a	4.13 b	46.18 a	17.70 a	4.67 b	22.37 a	18.71 b	84.42 a	13.00 ab	2.57 b	15.58 b
	B ₃	41.49 a	5.12 a	46.61 a	17.18 a	5.55 a	22.73 a	17.96 c	83.98 ab	13.39 a	2.63 b	16.02 a
	B ₄	41.30 a	4.06 b	45.36 a	17.75 a	4.46 b	22.21 a	20.06 a	84.91 a	12.75 b	2.33 b	15.09 b
混播 Mixture	C ₁	45.27 a		45.27 a	19.27 a		19.27 c	21.27 a	85.81 a	14.19 a		14.19 c
	C ₂	41.12 b	3.53 c	44.65 a	16.92 b	3.77 c	20.69 bc	18.37 ab	83.71 c	13.56 ab	2.73 a	16.29 a
	C ₃	40.51 b	4.38 b	44.89 a	16.53 b	4.91 b	21.44 ab	18.63 ab	84.96 b	12.46 b	2.58 a	15.04 b
	C ₄	39.62 b	5.42 a	45.03 a	16.88 b	6.23 a	23.11 a	16.64 b	84.79 b	12.57 b	2.64 a	15.21 b

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示水平间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different among levels at the 0.05 level.

表 3 不同措施对生物量构件分配比例的季节变化 (%)

Table 3 Effect of different treatments on the biomass allocation ratio in the growth period

因素 Factor	生育期 Growth stage	茎 Stem			叶 Leaf			穗 Ear	地上总生物量 Total aboveground biomass	根 Root		
		燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总茎 Total	燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总叶 Total			燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总根 Total
品种 Variety	拔节期 Jointing	7.86 c	1.96 c	9.81 c	47.53 a	3.14 c	50.67 a		57.64 b	36.10 a	6.27 a	42.36 a
	抽穗期 Heading	33.21 b	5.75 b	38.95 b	30.51 b	6.78 b	37.30 b		71.73 ab	22.72 b	5.56 a	28.28 b
	开花期 Flowering	41.43 a	4.65 b	46.08 a	17.40 c	5.15 b	22.55 c	18.47 b	83.97 a	13.30 c	2.74 b	16.04 c
	乳熟期 Milk	36.71 ab	10.48 a	47.19 a	14.71 c	11.66 a	26.38 c	20.12 a	87.59 a	10.17 c	2.24 b	12.42 c
施肥 Fertilizer	拔节期 Jointing	7.85 c	1.91 c	9.76 c	46.77 a	3.06 b	49.83 a		56.80 c	37.02 a	6.18 a	43.20 a
	抽穗期 Heading	33.70 b	5.72 b	39.42 b	30.28 b	6.74 b	37.02 b		71.94 b	22.53 b	5.54 a	28.07 b
	开花期 Flowering	41.55 a	4.59 b	46.14 a	17.31 c	5.15 b	22.46 c	18.57 b	84.04 ab	13.21 c	2.74 b	15.96 c
	乳熟期 Milk	36.78 ab	10.41 a	47.19 a	14.67 c	11.67 a	26.34 c	20.22 a	87.67 a	10.09 c	2.24 b	12.33 c
混播 Mixture	拔节期 Jointing	8.05 c	1.37 c	9.41 c	47.35 a	2.21 b	49.56 a		58.98 c	36.60 a	4.42 a	41.02 a
	抽穗期 Heading	34.15 b	4.05 b	38.19 b	30.55 b	4.78 b	35.33 b		73.52 b	22.56 b	3.93 a	26.48 b
	开花期 Flowering	41.63 a	3.33 b	44.96 a	17.40 c	3.73 b	21.13 c	18.73 b	84.82 a	13.20 c	1.99 b	15.18 c
	乳熟期 Milk	37.35 ab	7.23 a	44.58 a	14.96 c	8.12 a	23.08 c	20.58 a	88.23 a	10.21 c	1.56 b	11.77 c

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different among treatments at the 0.05 level.

所占比例最大。4 个时期箭筈豌豆生物量分配比例分别为根 > 叶 > 茎、叶 > 茎 > 根、叶 > 茎 > 根、叶 > 茎 > 根；拔节期箭筈豌豆根生物量分配最大，随后叶生物量占据主导地位。4 个时期总生物量分配比例分别为叶 > 根 > 茎、茎 > 叶 > 根、茎 > 叶 > 穗 > 根、茎 > 叶 > 穗 > 根；总生物量分配比例在拔节期和抽穗期与燕麦生物量分配比例一致，开花期和乳熟期茎生物量占主导地位，其次为叶和穗生物量。

2.2 三个因素对生物量分配的差异性分析

表 4 显示，3 个因素对地上和地下总生物量分配的差异性均达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P < 0.01$)。拔节期对地上和地下总生物量的影响大小为施肥措施 > 品种 > 混播水平；而其余时期均表现为品种 > 混播水平 > 施肥措施。

总茎、燕麦茎、箭筈豌豆茎生物量分配在拔节期施肥措施对其影响最大，其余时期品种对总茎和

箭筈豌豆茎影响最大；抽穗期品种对燕麦茎影响最大，开花-乳熟期混播水平对燕麦茎影响最大。叶生物量分配在整个生育期均表现为混播水平对其的影响最大，混播水平是影响叶生物量分配的关键因素。穗生物量分配在开花期受品种影响最大，在乳熟期受混播水平影响最大。

地下总生物量分配在拔节期受施肥措施影响最大，其它时期受品种影响最大；燕麦根生物量分配在乳熟期以混播水平对其的影响最大，其它时期以品种影响最大；箭筈豌豆根生物量分配在拔节和乳熟期受品种影响最大，而在抽穗和开花期受施肥措施水平影响最大。

2.3 相关生长关系分析

2.3.1 施肥措施下的相关生长关系 图 1 显示，不施肥处理在开花期、尿素+磷酸二铵+有机肥处理在抽穗期和乳熟期，燕麦人工草地地下与地上生物量间

表 4 不同措施对地上、地下生物量分配的差异性分析

Table 4 Effect of different measures on the aboveground and underground biomass allocation

生育期 Growth stage	因素 Factor	地上生物量 Aboveground biomass						地下生物量 Under-ground biomass				
		茎 Stem			叶 Leaf			穗 Ear	地上总生物量 Total biomass	燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	地下总生物量 Total biomass
		燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总茎 Total	燕麦 Oat	箭筈豌豆 Vetch	总叶 Total					
拔节期 Jointing	品种 Variety	5.91*	5.30	2.17	12.81**	6.35*	9.19*		3.65*	2.87*	84.80**	3.65*
	施肥 Fertilization	7.41*	1.50	4.22*	14.70**	2.091	6.94*		7.17*	2.54	62.60**	7.17*
	混播 Mixture	0.59	4.42	1.54	41.13**	9.35*	8.77*		2.58*	0.58	6.75*	2.58*
抽穗期 Heading	品种 Variety	23.67**	9.70*	18.62**	1.85	99.67**	4.32*		29.66**	11.24**	25.91*	29.68**
	施肥 Fertilization	3.75*	10.45*	1.83	0.73	100.20**	0.17		8.10*	2.08	25.96*	8.10*
	混播 Mixture	8.17*	3.41	0.80	12.90**	120.56**	2.63*		2.57*	13.42**	3.50	2.57*
开花期 Flowering	品种 Variety	4.50*	9.75*	4.25*	2.70*	81.66**	4.89*	6.77*	14.84**	8.17*	19.90*	14.84**
	施肥 Fertilization	0.23	2.19	0.26	1.36	102.79**	0.15	1.78	2.84*	0.70	31.00**	2.84*
	混播 Mixture	7.65*	8.55*	0.39	7.46*	331.79**	9.55*	4.85*	3.66*	3.22*	2.33	3.66*
乳熟期 Milk	品种 Variety	17.56**	81.94**	1.36	0.90	3.05*	3.00*	39.99**	12.86**	7.06*	84.18**	12.86**
	施肥 Fertilization	3.26*	12.45*	0.81	3.58*	1.67	0.36	11.32**	3.66*	1.80	46.89**	3.66*
	混播 Mixture	77.43**	13.03*	1.36	23.58**	6.37*	23.33**	52.67**	4.36*	18.28**	4.16	4.36*

注 (Note): **— $P < 0.01$; *— $P < 0.05$.

均表现为等速生长 ($P > 0.05$), 各施肥处理在其余时期表现为异速生长 ($P < 0.05$)。拔节期不施肥、尿素+磷酸二铵和有机肥三个处理下的斜率小于 1, 表明地下生物量积累速率高于地上; 抽穗期、开花期和乳熟期各施肥处理的斜率大于 1, 表明地上生物量积累速率大于地下, 这与上述研究结果一致。

2.3.2 混播处理下的相关生长关系 图 2 显示, 开花期箭筈豌豆混播 45 kg/hm^2 和拔节、抽穗、开花期混播 75 kg/hm^2 时, 燕麦人工草地地下与地上生物量间表现为等速生长 ($P > 0.05$), 而其余各时期各混播水平下则表现为异速生长 ($P < 0.05$)。拔节期混播 45 kg/hm^2 和 75 kg/hm^2 的斜率小于 1, 表明地下生物量积累速率高于地上, 抽穗期、开花期和乳熟期各混播处理的斜率大于 1, 表明地上生物量积累速率大于地下, 这与上述研究结果一致。

3 讨论

3.1 3 种措施对生物量分配的影响

目前许多学者在玉米^[10]、燕麦^[11]等生物量分配方面的研究均提出, 品种对生物量分配具有显著影响, 本研究也得出了一致的结论。4 个燕麦品种中青燕 1 号和青海甜燕麦具有较高的地上生物量分配比例, 而林纳和青海 444 具有较高的地下生物量分配比例, 这与品种的遗传性状有关。青燕 1 号通过增加茎生物量分配, 青海甜燕麦通过叶和穗生物量分配的增加实现较高的地上生物量分配。

施肥通过增加土壤养分含量来影响植物对肥料的吸收、利用和转化。赵宏魁等^[12]研究指出, 施肥对提高燕麦人工草地地上生物量的分配效果高于地下; 寇明科等^[13]指出, 有机和无机肥配施可有效提高

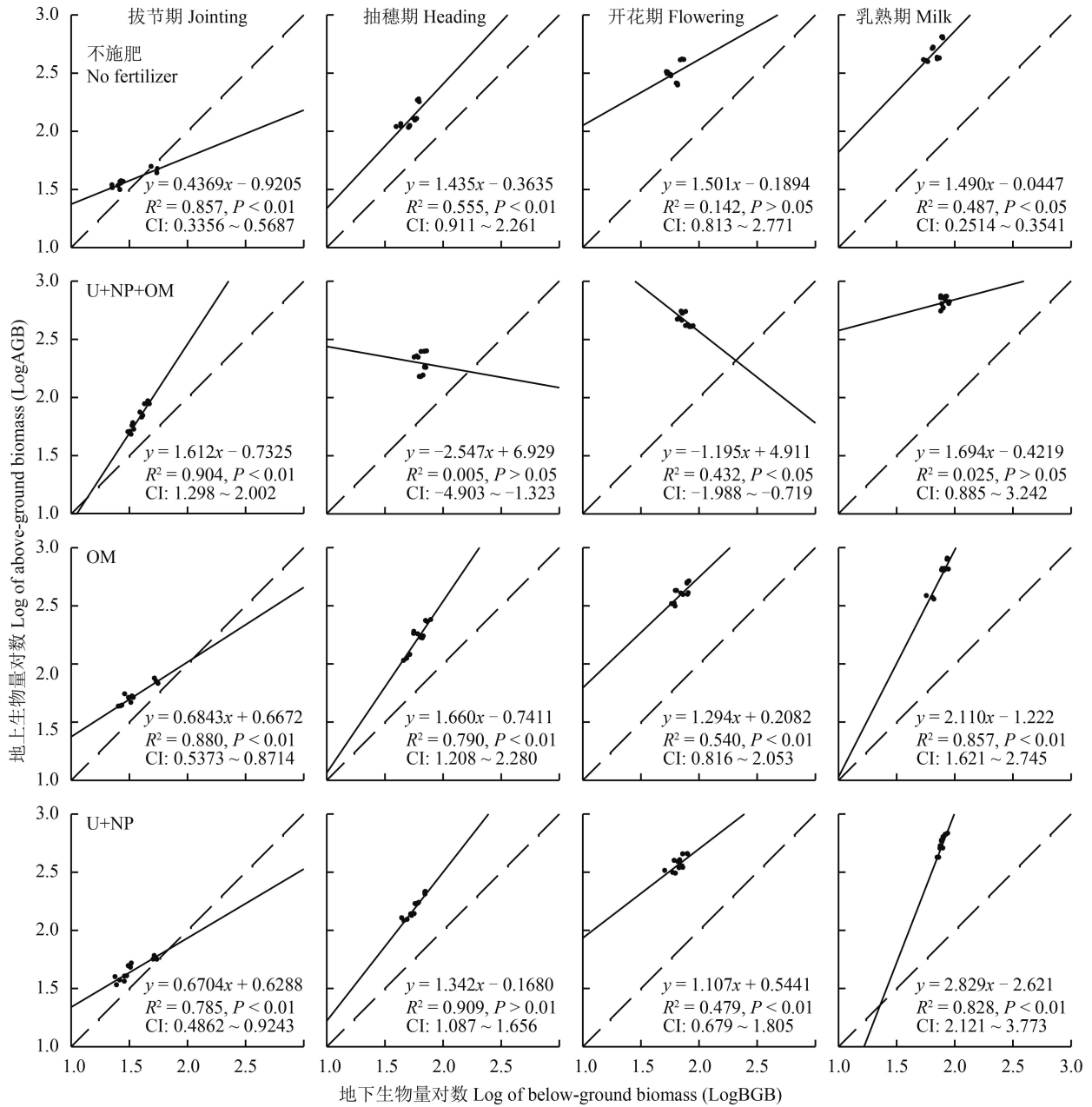


图 1 不同施肥措施下地上、地下生物量生长关系

Fig. 1 The relationship between aboveground and underground biomass under different fertilizations

[注 (Note) : U—尿素 Urea; NP—磷酸二铵 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; OM—有机肥 Organic manure.]

燕麦与箭筈豌豆混播人工草地地上生物量。本研究发现, 施肥措施显著影响燕麦人工草地地上、地下生物量分配, 地上生物量分配以尿素 + 磷酸二铵 + 有机肥处理和尿素 + 磷酸二铵处理最高; 地下生物量分配以不施肥和单施有机肥处理最高。施肥通过增加地上部分的生物量, 进而减少地下根系分配比例^[14]; 但在低养分下, 植物相对更多地分配到根系以增强必要的养分补充^[15]。

密度是影响燕麦人工草地生物量分配的重要因素^[16]。本研究发现, 箭筈豌豆混播水平显著影响燕麦

人工草地各器官生物量的分配, 地上生物量分配以单播燕麦最高, 地下生物量分配以 $30 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 混播水平最高。燕麦单播时, 减少了与箭筈豌豆在光照、温度、水分等方面的竞争, 燕麦地上各器官所占比例较高, 随着混播比例的增加, 燕麦与箭筈豌豆竞争加剧, 抑制了燕麦的生长, 从而减少了地上生物量的分配。

3.2 生物量分配策略

燕麦人工草地在品种、施肥和混播措施的影响下, 为更好地适应环境, 实现自身适合度最大化,

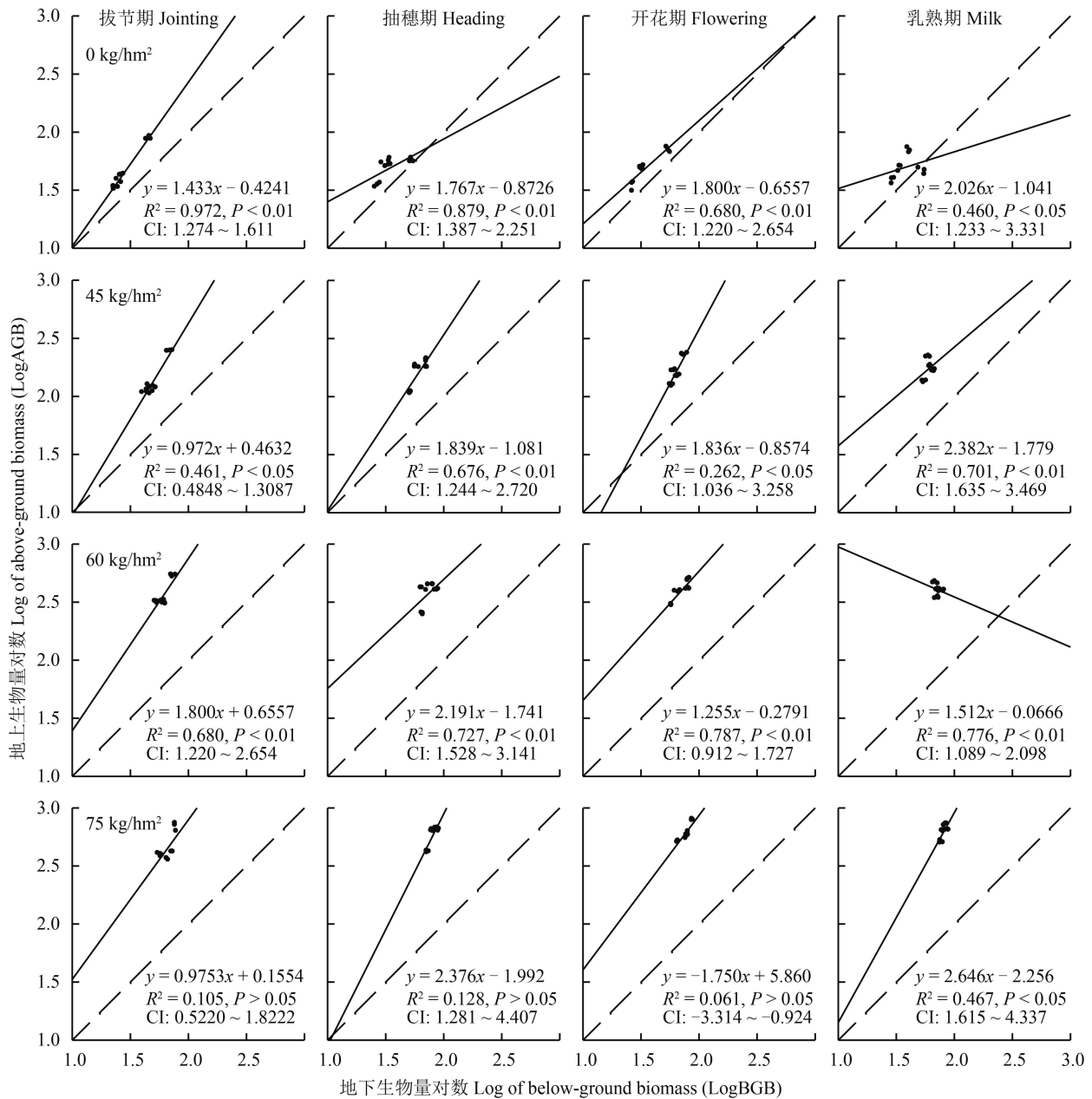


图 2 不同混播措施下地上、地下生物量生长关系

Fig. 2 The relationship between aboveground and underground biomass under different mixture levels

最终保持植物的持续生存和繁衍, 各器官的资源分配方面都存在“此消彼长”的关系^[17]。本研究中, 生长前期, 燕麦以叶生长为主, 中、后期以茎生长为主, 箭筈豌豆生长前期以根生长为主, 中、后期以叶生长为主。由于燕麦所占比重大于箭筈豌豆, 燕麦和箭筈豌豆各器官生物量分配最终导致总生物量分配表现为生长前期以叶为主, 中、后期以茎为主。根系在各器官生物量分配中始终处于最低。

根据 Donald 的理论, 在发生竞争的种群中, 占有更多有限资源的植物会以其它植物的牺牲为代价^[18]。本研究发现, 不同燕麦品种、肥料配比和箭筈豌豆

混播水平下建植的混播草地中, 燕麦在混播群落中始终处于优势地位, 这与张雪洲等^[19]的研究结果一致。Weiner 和 Thomas^[20]将竞争分为单侧竞争和双侧竞争。当光资源受限时, 植物分配更多的资源给茎和叶的生长, 表现为“不对称”的单侧竞争; 而营养受限时, 植物往往增大根的产量, 表现为“对称”的双侧竞争^[21]。本研究中, 燕麦、箭筈豌豆和总生物量地上部分生长高于地下部分的生长, 地上部分对资源的竞争始终处于主导地位, 表明在整个生育期植物一直处于对光资源的竞争上, 燕麦混播群落不受营养的限制, 这与宋清华等^[22]、张静等^[16]、雷占兰

等^[23]的研究结果一致。

3.3 地上和地下生物量相关生长关系

本研究发现,不同施肥措施下,以不施肥处理在开花期、尿素+磷酸二铵+有机肥处理在抽穗期和乳熟期燕麦人工草地地上、地下生物量表现为等速生长,其余时期均表现为异速生长,且地上生物量积累速率大于地下;不同混播措施下,以开花期 45 kg/hm² 混播水平和拔节期、抽穗期、开花期 75 kg/hm² 混播水平下地上、地下生物量表现为等速生长,其余时期为异速生长,且在拔节期表现为地下生物量高于地上,其余时期地上生物量积累高于地下。

3.4 三个因素对生物量分配的差异

很多研究^[24-26]提出,生物量构建分配模式不仅受土壤营养、水热条件等环境因子的影响,在一定程度上还受水肥管理等措施的影响。本研究发现,品种、施肥措施和混播水平均能显著影响燕麦人工草地各器官的生物量分配,且 3 个因素对生物量分配影响的大小不同。施肥措施和品种主要影响生长前期和后期的生物量分配。其中茎生物量分配在整个生长前期受施肥措施影响最大,中、后期受品种影响最大;混播水平是影响叶和穗生物量分配的关键因素;地下生物量分配在生长前期和后期分别受施肥措施和品种影响最大。本研究采用正交试验设计的方法讨论了品种、施肥措施和混播水平对高寒地区燕麦人工草地各器官生物量分配的影响,受试验设计的限制,未考虑 3 个因素间的交互效应。

4 结论

品种、施肥措施和箭筈豌豆混播水平均能显著改变燕麦人工草地生物量分配格局。茎生物量分配在生长前期主要受施肥措施的影响,后期受品种的影响;叶生物量分配在整个生育期受混播水平的影响;穗生物量分配主要受品种和混播措施的影响;地下生物量分配在前期和后期分别受施肥措施和品种影响最大。

燕麦人工草地生长前期以叶为主,中后期以茎为主。在品种(青燕 1 号和青海 444)、施肥措施(尿素+二铵+有机肥处理和尿素+二铵)和不混播条件下燕麦人工草地上生物量分配最高。

燕麦、箭筈豌豆和总生物量地上部分生长高于地下部分的生长,地上部分对资源的竞争始终处于主导地位。整个生育期多表现为异速生长关系。

参 考 文 献:

- [1] Poorter H, Remkes C, Lambers H. Carbon and nitrogen economy of 24 wild species differing in relative growth rate[J]. *Plant Physiology*, 1990, 94(2): 621-627.
- [2] 田福平, 时永杰, 周玉雷, 等. 燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对生物量的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(20): 29-32.
Tian F P, Shi Y J, Zhou Y L, et al. Effect of different mixture proportion of oat and common vetch on biomass[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(20): 29-32.
- [3] 王桃. 高寒牧区 36 种燕麦营养生态特性及其生产效能评价[D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2010.
Wang T. Evaluation on nutritional and ecological characteristics and productive efficiency[D]. Lanzhou: MS Thesis of Lanzhou University, 2010.
- [4] 马春晖, 韩建国. 高寒地区燕麦及其混播草地最佳刈割期的研究[J]. *塔里木农垦大学学报*, 2000, 12(3): 15-19.
Ma C H, Han J G. The studies on the optimal harvest time of oat and vetch in both monoculture and mixture in high-cold area[J]. *Journal of Tarim University of Agricultural Reclamation*, 2000, 12(3): 15-19.
- [5] 杨丽娜, 赵桂琴, 侯建杰. 播期、肥料种类及其配比对燕麦生长及产量的影响[J]. *中国草地学报*, 2013, 35(4): 47-51, 60.
Yang L N, Zhao G Q, Hou J J. Effects of seeding dates, fertilizers and their ratio on oat growth and yield[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(4): 47-51, 60.
- [6] 陈功, 张自和, 胡自治. 高寒地区一年生人工草地地上生物量动态及光能转化效率[J]. *草业学报*, 2003, 12(1): 69-73.
Chen G, Zhang Z H, Hu Z Z. Herbage yield dynamics and solar energy conversion of annual cultivated grassland in Xining City[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(1): 69-73.
- [7] 崔莹. 燕麦和箭筈豌豆混播对人工草地生产性能及土壤性质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2014.
Cui Y. Effect on production performance and soil properties of artificial grassland with mixed sowing oats and common vetch [D]. Lanzhou: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2014.
- [8] 韩文轩, 方精云. 幂指数异速生长机制模型综述[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 951-960.
Han W X, Fang J Y. Review on the mechanism models of allometric scaling laws: 3/4 vs. 2/3 power[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(4): 951-960.
- [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): 1340-1348.
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): 1340-1348.
- [10] 宋创业, 郭柯, 刘高焕. 播期对浑善达克沙地青贮玉米产量及生物量分配的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 865-868.
Song C Y, Guo K, Liu G H. Effect of sowing date on yield and phytomass allocation of silage maize in Hunshandak sandy land[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 865-868.
- [11] 刘佳. 水分状况对裸燕麦生物量分配和产量形成的影响[D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2011.
Liu J. Effects of water condition on the biomass allocation and yield formation of naked oats[D]. Lanzhou: MS Thesis of Lanzhou

- University, 2011.
- [12] 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]. 草业科学, 2016, 33(2): 249–258.
Zhao H K, Ma Z, Zhang C H, *et al.* The reproductive allocation of *Avena sativa* under different planting densities and nitrogen addition treatments[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(2): 249–258.
- [13] 寇明科, 王安碌, 张生璨, 等. 不同施肥处理对提高高寒人工混播草地产草量的试验研究[J]. 草业科学, 2003, 20(4): 14–15.
Kou M K, Wang A L, Zhang S C, *et al.* Study on the effects of different fertilizer treatments on mixed grassland yield in Luqu, Gannan Autonomous Region[J]. Pratacultural Science, 2003, 20(4): 14–15.
- [14] Coyle D, Coleman M D, Aubrey D P. Above and below-ground biomass accumulation, production, and distribution of sweetgum and loblolly pine grown with irrigation and fertilization [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38(6): 1335–1348.
- [15] Haynes B E, Gower S. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin[J]. Tree Physiology, 1995, 15(5): 1134–1140.
- [16] 张静, 赵成章. 高寒山区混播草地燕麦和毛苕子生物量分配格局对组分密度比的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 266–270.
Zhang J, Zhao C Z. Distribution patterns of the biomass of *Avena sativa* and *Vicia villosa* in response to the component density ratio of the grass species in a mixed-seeding grassland in alpine region of Qilian Mountains, Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 23(2): 266–270.
- [17] 张大勇. 植物生活史进化与繁殖生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 430.
Zhang D Y. Plant life history evolution and reproductive ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004. 430.
- [18] 刘琳, 徐炳成, 李凤民, 等. 土壤水分对两个冬小麦品种产量和竞争能力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3442–3449.
Liu L, Xu B C, Li F M, *et al.* Effects of soil water contents on competitive abilities and yield of two winter wheat cultivars[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3442–3449.
- [19] 张学洲, 李学森, 张丽萍, 等. 复种初岛燕麦+中晚六号混播效应的动态研究[J]. 草业科学, 2010, 27(11): 101–108.
Zhang X Z, Li X S, Zhang L P, *et al.* Yield and quality of mixed-sowing pasture of *Avena sativa* and *Pisum sativum*[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(11): 101–108.
- [20] Weiner J, Thomas S C. Size variability and competition in plant monocultures[J]. Oikos, 1986, 47(2): 211–222.
- [21] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 密度制约决定的植物生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2011, (8): 1579–1589.
Li L, Zhou D W, Sheng L X. Density dependence-determined plant biomass allocation pattern[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, (8): 1579–1589.
- [22] 宋清华, 赵成章, 史元春, 等. 祁连山北坡混播草地密度制约下燕麦和毛苕子比根长分布格局[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 497–503.
Song Q H, Zhao C Z, Shi Y C, *et al.* Spatial distribution patterns of specific root lengths of *Avena sativa* L. and *Vicia villosa* Roth in mixed-sowing grassland under density dependence in northern slope of Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 497–503.
- [23] 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.
Lei Z L, Zhou H K, Liu Z H, *et al.* The growth performance and reproductive allocation of *Avena sativa* under density and nitrogen interaction[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(6): 1110–1119.
- [24] 张莉, 王长庭, 刘伟, 等. 不同建植期人工草地优势种植物根系活力、群落特征及其土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 185–194.
Zhang L, Wang C T, Liu W, *et al.* Relationships of dominant species root activity, plant community characteristics and soil micro-environment in artificial grassland over different cultivation periods[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(5): 185–194.
- [25] 毛伟, 李玉霖, 崔夺, 等. 沙质草地不同生活史植物的生物量分配对氮素和水分添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 125–133.
Mao W, Li Y L, Cui D, *et al.* Biomass allocation response of species with different life history strategies to nitrogen and water addition in sandy grassland in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(2): 125–133.
- [26] 雷占兰, 周华坤, 刘泽华, 等. 密度氮肥交互处理下垂穗披碱草生长与生殖特性[J]. 中国草地学报, 2014, 36(2): 12–19.
Lei Z L, Zhou H K, Liu Z H, *et al.* The growth and reproductive characteristics of *Elymus nutans* under the interaction between different planting density and nitrogen application[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(2): 12–19.