

三江源区适宜的小黑麦和饲用豌豆混播比例及施肥方法

冯廷旭¹, 林伟山², 向雪梅², 李 菲², 张 琳², 魏希杰¹, 德科加^{1*}

(1 青海大学, 青海西宁 810016; 2 青海省畜牧兽医科学院, 青海西宁 810016)

摘要:【目的】三江源区地处青藏高原, 是中国母亲河的发源地, 也是牦牛等典型牲畜的重要草场。探索适宜的施肥方法和牧草作物混播比例, 旨在提高牧草产量, 减轻生态重要地区天然草场的放牧压力。【方法】于2022年在三江源地区进行了小黑麦和饲用豌豆的田间试验, 试验材料为小黑麦品种‘青饲麦1号’和饲用豌豆品种‘青建1号’。设置3个施肥处理: 不施肥(A_1)、单施氮肥(尿素 75 kg/hm^2 , A_2)、氮磷配合施用(尿素 75 kg/hm^2 和 过磷酸钙 300 kg/hm^2 , A_3); 每个施肥处理下, 分别设小黑麦和豌豆混合播种比例 $70:30$ (B_1)、 $50:50$ (B_2) 和 $30:70$ (B_3)。在豌豆盛花期刈割前, 调查小黑麦和饲用豌豆株高、叶片形态指标(面积、周长、长度、宽度), 及生物量和营养品质。【结果】与不施肥处理 A_1 相比, 施肥处理(A_2 和 A_3)显著提高了牧草的鲜重和干重、蛋白质产量以及两种作物的株高和叶面积。 A_2 和 A_3 处理在上述指标上没有显著差异, 但 A_3 处理叶宽的增幅显著高于 A_2 。 A_2 和 A_3 处理对两种牧草粗蛋白、可溶性糖、中性和酸性洗涤纤维含量均无显著影响, 但 A_2 处理增加了粗脂肪含量。小黑麦和饲用豌豆的播种比例对两种作物的鲜重、干重、蛋白质产量和株高没有显著影响, 但降低小黑麦播种比例增加了饲草粗脂肪和可溶性糖含量, 显著降低了中性与酸性洗涤纤维含量。播种比例与施肥有显著的交互作用, A_3B_1 的牧草鲜重和干重最高, 分别比其他处理高 $36.09\%\sim 180.08\%$ 和 $62.27\%\sim 281.59\%$, 叶面积和蛋白质、可溶性糖含量也最高。 A_3B_1 处理的小黑麦叶片周长比 A_1B_1 、 A_1B_2 和 A_1B_3 处理分别高 15.76% 、 40.29% 和 54.51% , 饲用豌豆叶面积比 A_1B_1 、 A_1B_2 和 A_1B_3 处理分别提高 20.31% 、 14.06% 和 64.65% , 饲草中性洗涤纤维含量分别比 A_1B_1 、 A_1B_2 和 A_1B_3 处理增加了 7.15% 、 27.14% 和 17.89% 。【结论】氮磷配施可显著提高牧草生产性能、叶片形态和牧草质量。小黑麦和饲用豌豆按 $70:30$ 的比例混合播种, 牧草生产性能、叶片形态和质量均优于其他处理。因此, 在高寒地区, 建议推广小黑麦和饲用豌豆按 $70:30$ 的比例混合播种, 并配施氮、磷肥。

关键词: 三江源地区; 禾豆混播比例; 氮磷配施; 叶片形态; 饲草产量; 饲草品质

Optimum fertilization method and mixed seeding ratio of *Triticale*/*Pisum sativa* in grassland of Sanjiangyuan area

FENG Ting-xu¹, LIN Wei-shan², XIANG Xue-mei², LI Fei², ZHANG Lin², WEI Xi-jie¹, DE Ke-jia^{1*}
(1 Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2 Qinghai Academy of Animal Husbandry and Veterinary Science, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: 【Objectives】Sanjiangyuan region is located in the Qinghai-Tibetan Plateau, where is the birthplace of mother river of China, and also is the vital grassland for yaks and other typical livestock. Approaching exploring the suitable fertilization methods and mixed sowing ratio of forage crops was aiming to increase the forage yield, and reduce grazing pressure on natural grassland in the ecologically important area. 【Methods】A field experiment with split design was carried out on Sanjiangyuan area in 2022, the rye (*Triticale*) cultivar ‘Qingsimai 1#’ and forage pea (*Pisum sativa* L.) cultivar ‘qingjian 1#’ were used as test materials. Three fertilization methods were setup, as: no fertilization (A_1), application of urea 75 kg/hm^2 (A_2), combined application of urea 75 kg/hm^2 and $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 300 kg/hm^2 (A_3). Under each fertilization treatment, rye and forage pea were

收稿日期: 2024-02-01 接受日期: 2024-06-02

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2022YFD1602302); 青海省科技厅项目(K9922050)。

联系方式: 冯廷旭 E-mail: fengtingxu141377@163.com; * 通信作者 德科加 E-mail: 1162157948@qq.com

respectively mixed sown in ratio of 70 : 30 (B_1), 50 : 50 (B_2), and 30 : 70 (B_3). The plant height, and leaf morphological indicators (area, length, width, perennial length) of rye and forage pea were measured before cutting at full blooming stage of forage pea, and the forage grass was weighed and the nutrition quality was determined. **【 Results 】** Compared with A_1 , fertilization (A_2 and A_3) significantly increased the fresh and dry weights, the protein yield of forage grass, and the plant heights and leaf areas of both crops. A_2 and A_3 did not exhibit significant differences in above indexes, but A_3 increased more than A_2 did in leaf width of two crops ($P < 0.05$). A_2 and A_3 treatments had similar crude protein, soluble sugar, neutral and acid detergent fiber content, but A_2 treatment increased gross fat content. The seeding ratios of rye and forage peas did not significantly affect the fresh and dry weights, protein yields and plant heights of the two crops, however, the decreased rye ratio led to a gradual increase in crude fat and soluble sugar content but a significant decrease in neutral versus acidic detergent fibre content of forage grass. Seeding ratio and fertilization showed significant interactions, A_3B_1 exhibited the highest fresh and dry weight of forage, which were 36.09%–180.08% and 62.27%–281.59% higher than the other treatments, and the highest leaf area and protein, soluble sugar content. Compared with A_1B_1 , A_1B_2 , and A_1B_3 , A_3B_1 increased leaf perimeter of rye by 15.76%, 40.29%, and 54.51%, leaf area of forage pea by 20.31%, 14.06%, and 64.65%, and neutral detergent fibre content of forage grass by 7.15%, 27.14%, 17.89%, respectively. **【 Conclusions 】** Fertilization, especially nitrogen and phosphorous combined application, could significantly improve forage production performance, leaf morphology and forage quality. And rye and forage peas show the best forage production performance, leaf morphology and quality under mixed seeding ratio ratio of 70 : 30. Therefore, this mixing ratio under nitrogen and phosphorus combined fertilization is recommended as suitable cultivation technology in Sanjiangyuan area.

Key words: Sanjiangyuan area; mixed seeding ratio of rye and forage pea; NP combined application; leaf morphology; forage yield; forage quality

我国草地面积较大的 5 个省区分别为西藏自治区、青海省、内蒙古自治区、甘肃省、新疆维吾尔自治区。我国草地面积在世界范围内排名第二，拥有 293 万 km^2 的天然草地^[1]。草地作为陆地生态系统重要的一部分，包含天然草地、半人工草地和人工草地，其作用主要体现在生态与生产两个方面^[2]：一是作为生态环境安全的重要屏障，在调节气候、涵养水源等方面有举足轻重的地位；二是发展草地畜牧业的重要基础与依据。由于人类对天然草地的过度开发与利用，且对各种肉类、奶制品、动物皮毛等产品需求量也日益增加，追求巨大的经济效益，使牲畜的数量不受限制的增加^[3]。加之气候变化等因素，导致天然草地的土地退化、沙化、黑土滩、荒漠化的问题越来越严重。针对草地退化我国学者借鉴美国、新西兰、澳大利亚等农业发达国家的成熟经验，提出了建植人工草地用以减少对天然草地的过度开发利用，缓解天然草地过度退化现状的饲草补给方案^[4]。

据第三次全国国土调查数据，截止到 2019 年底，我国人工草地面积为 $5.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，大部分分布

于半干旱与干旱地区^[5-6]，人工草地建设是缓解天然草地饲草短缺的有效方法之一^[7]。但是单一种植的禾本科饲草虽有较好的产量与适口性，饲草品质却相对较差。豆科饲草则与禾本科饲草性质刚好相反，饲草产量相对较低，但豆科饲草的固氮作用和能够提供优质的蛋白质，弥补了禾本科饲草品质较低的不足，而且在单播禾本科与豆科草地中种内竞争较强，对土壤养分及自然资源的空间分布利用效率相对较低，大面积倒伏、产量降低等问题时有发生。人工草地中禾豆混播建植不仅可以缓解天然草地的放牧压力，而且可以利用不同生态位的空间分布格局来提高产量，为牲畜在冬春两季饲草短缺时进行补饲，减少饲草匮乏时牲畜的死亡率^[8]。许多学者研究指出，禾豆混播建植体系的运用在提高饲草产量同时还能提高饲草品质^[9]。

叶片作为植物直接接受光照的器官，将光能转化形成化学能储存在有机物中，植物经过长期的进化适应不同程度的强弱光照，但过强或者过弱的光照也会损伤植物^[10]。植物通过对叶片形态结构调整来适应不同光强，Aleric 等^[11]研究指出，遮阴条件下叶

片会比正常光照下叶片变得大而薄, 植物会通过增加叶片面积来增加捕光效率。Terashima 等^[12]研究表明, 植物形态结构的变化对 CO₂ 的固定和运输也有影响, 进而影响植物的光合作用及产物。通过对植物叶片面积、叶长、叶宽、叶周长等性状进行分析, 能更好的理解植物对环境的响应和适应能力。陈超等^[13]认为, 植物对光环境的适应不仅体现在形态结构的变化, 叶片的化学计量特征也能反映其生态策略。碳、氮、磷元素是植物生长发育的最基本元素, 这些元素在植物体内的含量反映了植物对于养分的吸收与利用, Xie 等^[14]研究表明, 叶片中的氮元素主要存在于可溶性蛋白与类囊体蛋白中, 磷元素则会影响植物的代谢功能及叶片中的氮、磷含量, 与光合作用能力及非结构性碳水化合物 (non-structural carbohydrate, NSC) 的合成有密切联系。Myers 等^[15]也指出, NSC 是植物主要的能量来源, 因此植物对氮、磷等元素的吸收影响叶片光合作用, 对提高植物品质也有一定的作用。但在高寒地区人工草地中, 叶片形态特征的变化对饲草品质的影响报道较少, 而且外源养分的添加是否能提高叶片面积等也有待进一步试验验证。基于以上情况, 本研究以小黑麦与饲用豌豆不同混播比例进行建植, 并进行不同施肥配比处理, 探究一年生禾豆混播草地叶片形态、产量与品质对施肥的响应。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青海省玉树州称多县青海大学三江源生态系统教育部野外科学观测站称多子站 (33° 24'30"N, 97°18'00"E), 海拔 4 270 m, 该地区属典型高原大陆性气候, 冬季漫长, 气候寒冷, 该地区年平均气温为-14.2℃~11.4℃, 最高温度为 24.1℃, 最低温度为-26.6℃, 四季不分明, 只有冷热两季, 0℃ 以上为热季, 0℃ 以下为冷季, 无绝对无霜期, 全年有霜日数约为 260 d, 日照时数 2650.5 h, 年均降水量为 406.00 mm, 降水主要分布在 6—10 月, 约占全年降水的 83.79%。试验小区土壤为高山草甸土, 虽然腐殖质含量丰富, 但因分解不良而土壤肥力不高。土壤 pH 6.92, 有机质 23.6 g/kg, 全氮 9.50 g/kg, 速效氮 14.0 mg/kg, 全磷 8.20 g/kg, 速效磷 7.0 mg/kg, 全钾 13.50 g/kg, 速效钾 76.5 mg/kg。试验地无灌溉条件, 前茬作物均为小黑麦+饲用豌豆混播。

1.2 试验材料

本试验供试小黑麦品种为‘青饲麦 1 号’, 饲用豌豆品种为‘青建 1 号’, 均由青海省畜牧兽医科学院草原研究所提供, 氮肥为尿素 (含 N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12%)。

1.3 试验设计

试验 2022 年 6 月 22 日开始, 于 2022 年 9 月 25 日收获。采用裂区试验设计, 主区为施肥处理, 记为 A₁ (不施肥)、A₂ (单施氮肥)、A₃ (氮磷配施), 副区为小黑麦+饲用豌豆混播比例, 记为 B₁ (70 : 30)、B₂ (50 : 50)、B₃ (30 : 70)。各处理设 3 次重复, 整个生育期间不再进行施肥及灌溉。小区面积为 15 m² (3 m×5 m)。

播种前对试验地进行了翻耕耙耱, 次日进行播种, 播种方法为同行条播, 播深 3~4 cm, 各小区均人工开沟 10 行, 行距为 30 cm, 在开沟播种的同时进行施肥。每行内禾本科与豆科播量按计算的各单播处理播量分别播入 (表 1 所示)^[16], 如小黑麦+饲用豌豆混播体系中, 小黑麦播量=单播小黑麦 300.01 kg/hm²×70%=210.01 kg/hm²; 饲用豌豆播量=单播饲用豌豆 75.34 kg/hm²×30%=22.60 kg/hm²。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 产量 于 2022 年 9 月 25 日, 在各处理随机

表 1 试验各处理施肥量和播种比例 (量)
Table 1 The fertilizer application amount and seeding ratios (amount) of rye and forage pea in each treatment

施肥处理 Fertilization treatment	尿素-过磷酸钙 Urea-Ca(H ₂ PO ₄) ₂ (kg/hm ²)	播量比例 Seeding ratio	播量 (kg/hm ²) Seeding amount	
			小黑麦 Triticale	饲用豌豆 Pisum sativa L.
A ₁	0-0	B ₁	210	22.6
		B ₂	150	37.7
		B ₃	90	52.7
A ₂	75-0	B ₁	210	22.6
		B ₂	150	37.7
		B ₃	90	52.7
A ₃	75-300	B ₁	210	22.6
		B ₂	150	37.7
		B ₃	90	52.7

注: A₁、A₂、A₃分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。B₁、B₂、B₃ 分别代表禾豆混播比例为70 : 30、50 : 50、30 : 70。
Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. B₁, B₂, and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70.

选取 3 个远离边行的 1 m 样段, 与地面齐平进行刈割, 称取饲草鲜重, 将鲜草置于烘箱中烘干, 称取干重。

1.4.2 株高 在收割饲草前, 利用卷尺测量每块试验地禾本科与豆科植株自然生长高度。

1.4.3 叶片形态特征调查 于 2022 年 9 月 20 日, 对每块试验地小黑麦与饲用豌豆饲草进行叶片形态指标采集工作, 分别采集叶片面积、周长、长度、宽度 4 项指标, 利用 Yaxin-1241 叶面积仪将采集的叶片进行扫描分析, 并记录实验数据。

1.4.4 营养成分测定 在每小区随机选取 1 m 的样段, 齐地刈割, 将饲草茎秆、叶片烘干粉碎后, 采用凯氏定氮法测定粗蛋白 (crude protein, CP) 含量, 采用索氏浸提法测定粗脂肪 (EE) 含量, 采用范式纤维法测定酸性洗涤纤维 (acid detergent fiber, ADF) 和中性洗涤纤维 (neutral detergent fiber, NDF) 含量。

1.4.5 粗蛋白产量 粗蛋白产量为植物干草产量与粗蛋白含量的乘积。

1.5 数据处理

用 Microsoft Excel 2016 进行数据的汇总, 用 IBM SPSS 23.0 对数据进行主效应及双因素交互作用

的一般线性模型 (GLM) 双因素方差分析, 处理间差异采用 Duncan 多重比较检验。利用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对饲草生产性能的影响

2.1.1 不同施肥处理对产量的影响 氮磷配施处理 (A_3) 的饲草鲜重、干重、粗蛋白产量、小黑麦株高、饲用豌豆株高比不施肥处理 (A_1) 分别提高 86.06%、97.70%、115.75%、38.42%、68.02% ($P<0.05$); 单施氮肥处理 (A_2) 比 A_1 处理分别平均提高了 67.23%、82.98%、121.48%、45.50%、77.66% ($P<0.05$)。 A_2 与 A_3 处理间各指标均无显著差异 (图 1)。

2.1.2 不同施肥处理对小黑麦饲草叶片形态的影响 氮磷配施处理 (A_3) 的小黑麦饲草叶片面积、周长、长度、宽度比不施肥处理 (A_1) 分别平均增加了 56.15%、33.73%、43.15%、6.31%; 单施氮肥处理 (A_2) 各指标比 A_1 分别平均增加了 45.35%、16.14%、27.46%、41.07%; 除 A_3 处理的叶片周长大于 A_2 外, 其余指标两处理间无显著差异 (图 2)。

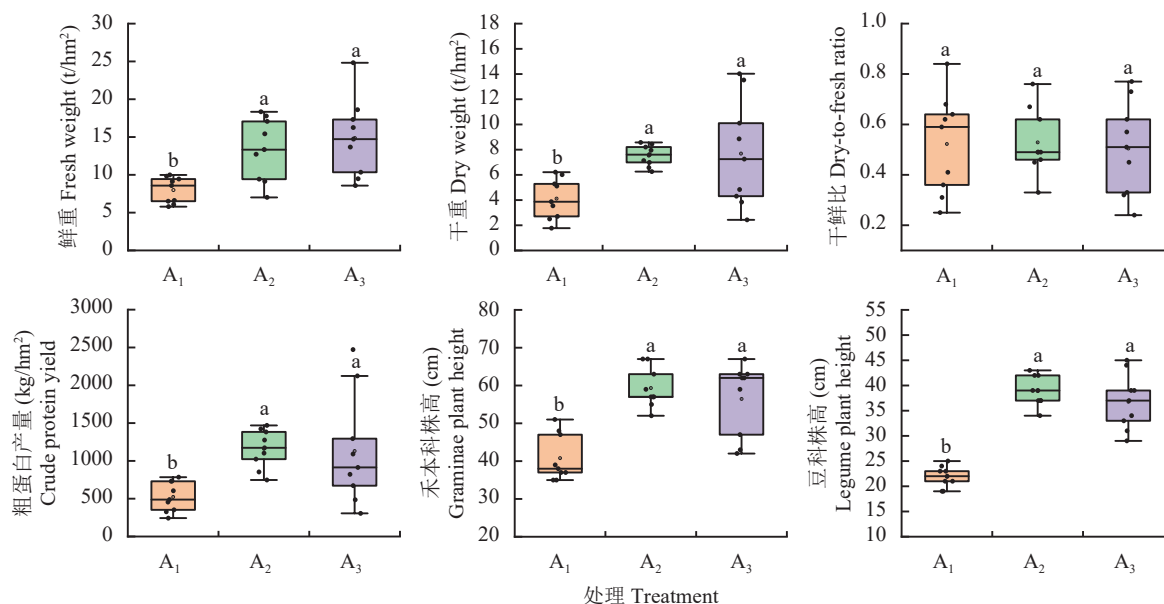


图 1 施肥处理对饲草生产性能的影响

Fig. 1 Growth indexes of forage crops under different fertilization treatments

注: A_1 、 A_2 、 A_3 分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。箱上不同小写字母表示不同施肥处理间在 0.05 水平差异显著。箱式图中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 箱体的上下框分别是数据的上四分位数和下四分位数, 箱体外上下短线分别代表数据的最大值与最小值。

Note: A_1 , A_2 , and A_3 indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum, respectively.

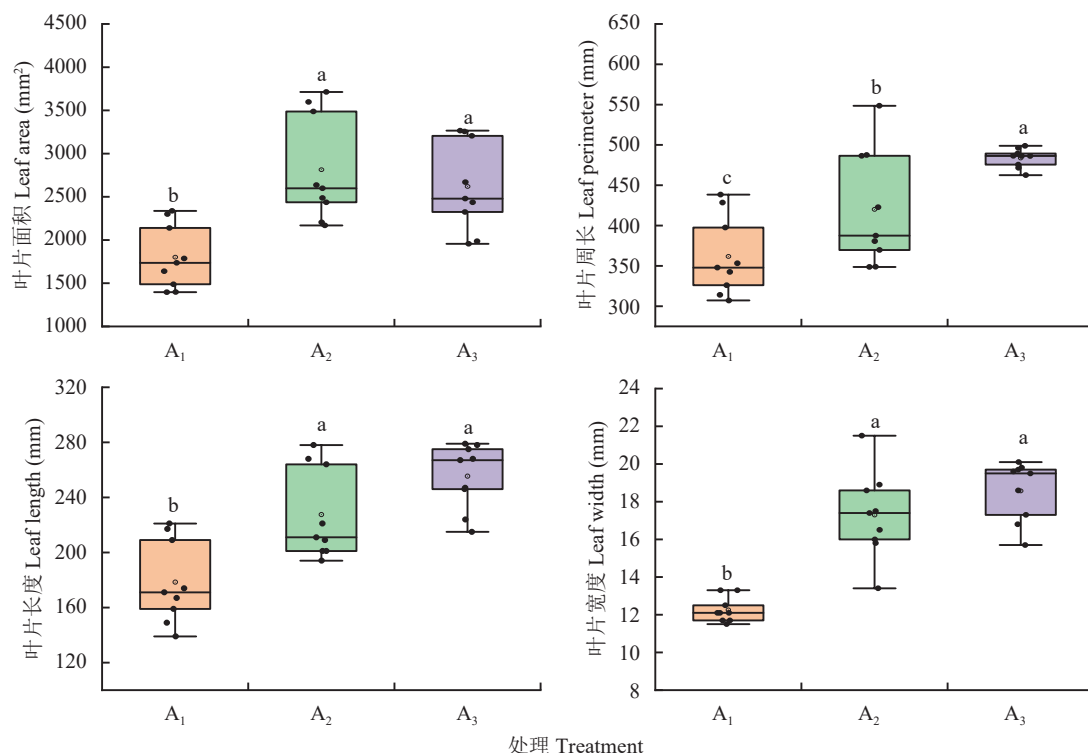


图2 施肥处理对小黑麦叶片形态的影响

Fig. 2 Leaf morphology of *Triticale* under different fertilization treatments

注: A₁、A₂、A₃ 分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。箱上不同小写字母表示不同施肥处理间在 0.05 水平差异显著。箱式图中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 箱体的上下框分别是数据的上四分位数和下四分位数, 箱体外上下短线分别代表数据的最大值与最小值。

Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum, respectively.

2.1.3 不同施肥处理对饲用豌豆叶片形态的影响

氮磷配施处理 (A₃) 的饲用豌豆饲草叶片面积、周长、长度、宽度比不施肥处理 (A₁) 分别增加 30.54%、78.10%、25.26%、81.04% ($P < 0.05$), 叶片面积、宽度比单施氮肥处理 (A₂) 分别增加 15.44%、29.36% ($P < 0.05$); A₂ 处理的饲用豌豆饲草叶片周长、长度、宽度比 A₁ 处理分别增加 62.03%、19.24%、32.44% (图 3, $P < 0.05$)。

2.2 不同施肥处理对饲草品质的影响

不施肥处理 (A₁) 处理饲草的中性洗涤纤维 (NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF)、粗蛋白含量略低于氮磷配施处理 (A₃), 粗脂肪、可溶性糖含量与 A₃ 也无显著差异。单施氮肥 A₂ 处理的饲草粗脂肪含量分别显著高于 A₁ 和 A₃ 16.71%、29.08% (图 4, $P < 0.05$)。

2.3 混播比例对饲草生产性能的影响

2.3.1 混播比例对产量的影响 小黑麦与饲用豌豆

混播比例为 70 : 30 (B₁)、50 : 50 (B₂)、30 : 70 (B₃) 处理间的饲草鲜重、干重、粗蛋白产量、饲用豌豆株高均无显著性差异 (图 5), 表明混播比例对饲草的总产量和蛋白产量无显著影响。

2.3.2 混播比例对小黑麦叶片形态的影响

混播比例为 70 : 30 处理 (B₁) 的小黑麦叶片面积较比例为 50 : 50 (B₂)、30 : 70 (B₃) 的处理分别增加了 40.37%、31.89%, 叶片周长分别增加了 17.44%、20.80%, 但叶片长度、宽度与 B₂、B₃ 处理的差异未达到显著水平 (图 6)。

2.3.3 混播比例对饲用豌豆叶片形态的影响

饲用豌豆叶片形态中, 小黑麦与饲用豌豆混播比例为 50 : 50 (B₂) 处理叶面积高于 70 : 30 (B₁)、30 : 70 (B₃) 处理, 叶片周长则为混播比例 70 : 30 处理 (B₁) 高于 50 : 50 (B₂)、30 : 70 (B₃) 处理, 叶片长度与宽度则为 30 : 70 (B₃) 高于 70 : 30 (B₁)、50 : 50 (B₂) 处理, 但各处理间的差异未达显著水平 (图 7)。

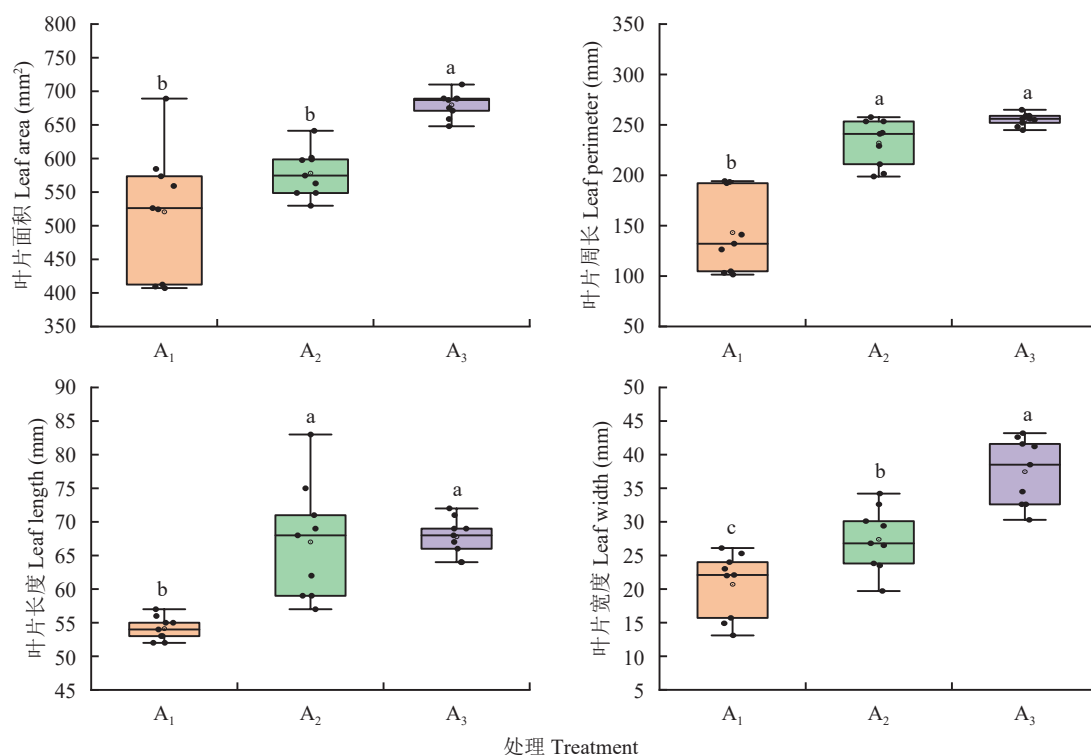


图3 施肥处理对豆科饲草叶片形态的影响

Fig. 3 Leaf morphology of *Pisum sativa* L. under different fertilization treatments

注: A₁、A₂、A₃ 分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。箱上不同小写字母表示不同施肥处理间在 0.05 水平差异显著。箱式图中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 箱体的上下框分别是数据的上四分位数和下四分位数, 箱体外上下短线分别代表数据的最大值与最小值。

Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum data, respectively.

2.4 不同混播比例处理对饲草养分的影响

小黑麦与饲用豌豆混播比例为 70:30 (B₁) 处理的饲草中性和酸性洗涤纤维 (NDF、ADF) 含量均高于混播比例 50:50 (B₂)、30:70 (B₃) 处理, NDF 含量分别提高了 22.37%、13.24% ($P<0.05$), ADF 含量分别提高了 34.49%、15.35% ($P<0.05$)。B₂ 处理饲草粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖含量最高, 粗脂肪含量比 B₁ 处理提高 17.23% ($P<0.05$), 可溶性糖含量比 B₁、B₃ 处理分别提高 70.25%、22.87% (图 8, $P<0.05$)。

2.5 施肥×混播比例交互作用对饲草生产性能的影响

双因素方差分析表明, 施肥处理、施肥与混播比例交互作用对饲草干鲜比无显著性影响, 对其他生产性能指标的影响均达显著性水平 (表 2, $P<0.05$)。混播比例对小黑麦株高影响显著 ($P<0.05$), 对其他生产性能指标均无显著性影响。施肥与混播比例交互

作用下, 氮磷配施+混播比例 70:30 处理 (A₃B₁) 的饲草鲜重、干重、粗蛋白产量、饲用豌豆株高相较于其他处理均有明显提升, 饲草鲜重提高幅度为 36.09~180.08%, 与各处理间多差异显著 ($P<0.05$)。饲草干重提高幅度为 62.27~281.59% ($P<0.05$)。饲草粗蛋白产量提高幅度为 37.71~302.77% ($P<0.05$)。豆科饲草株高比 A₁B₁ 处理提高 116.93%, 与各处理间差异多显著 ($P<0.05$)。小黑麦株高则为 A₃B₂ 处理最优, 与其他各处理差异多显著 ($P<0.05$), 比 A₁B₂ 提高 76.16%。

2.6 施肥×比例交互作用对饲草叶片形态的影响

饲草叶片形态特征测定结果表明, 施肥处理对小黑麦与饲用豌豆叶片形态特征均存在显著性影响 (表 3, $P<0.05$)。混播比例对饲用豌豆叶片长度、宽度以及小黑麦叶片宽度无显著影响, 对其他指标影响显著 ($P<0.05$)。施肥与混播比例交互作用对饲用豌豆叶片长度无显著影响, 对其他指标均显著 ($P<0.05$)。

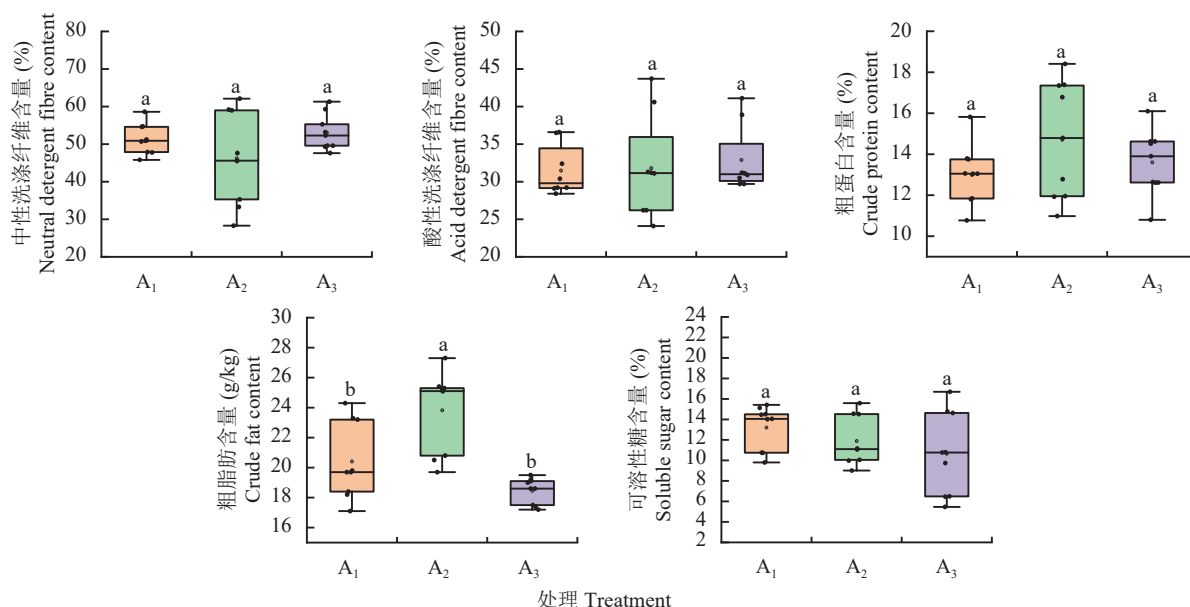


图 4 施肥处理对饲草营养品质的影响

Fig. 4 Nutrition quality of forage grass under different fertilization treatments

注: A₁、A₂、A₃ 分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。箱上不同小写字母表示不同施肥处理间在 0.05 水平差异显著。箱式图中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 箱体的上下框分别是数据的上四分位数和下四分位数, 箱体外上下短线分别代表数据的最大值与最小值。

Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum data, respectively.

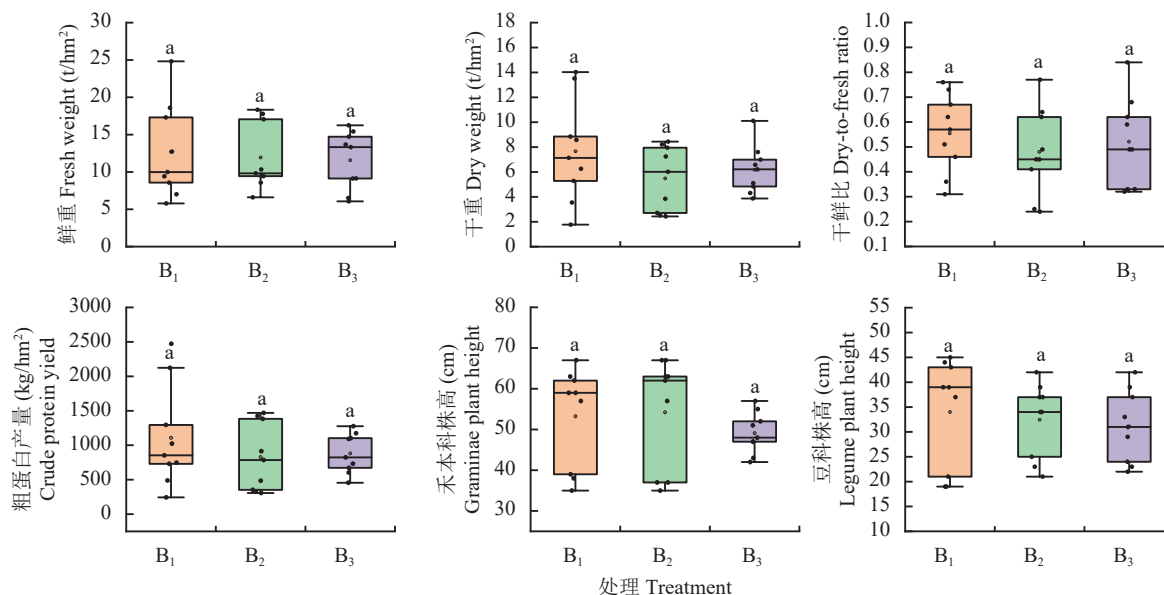


图 5 混播比例对饲草生产性能的影响

Fig. 5 Production performance under different seeding ratios of forage crops

注: B₁、B₂、B₃ 分别代表禾豆混播比例为 70 : 30、50 : 50、30 : 70。箱上不同小写字母表示混播比例处理间在 0.05 水平差异显著。箱体中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 上下框分别是数据的上下四分位数, 箱体外上下短线分别为数据的最大值与最小值。

Note: B₁, B₂, and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum data, respectively.

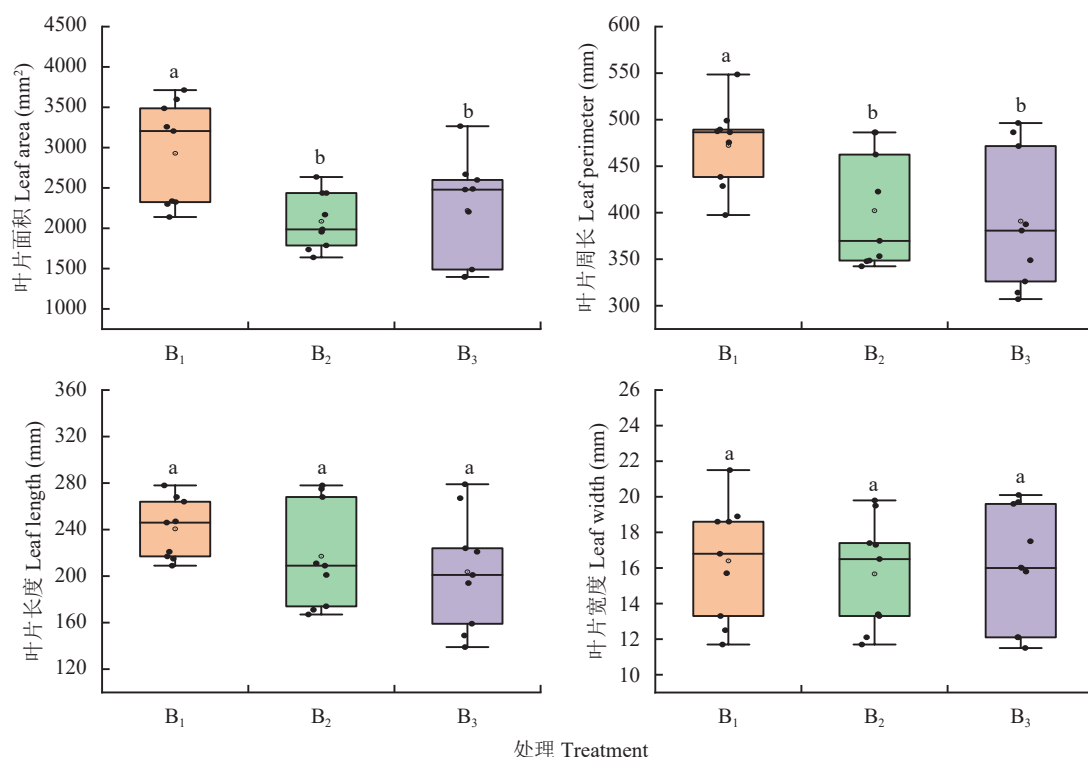


图 6 混播比例对小黑麦叶片形态的影响

Fig. 6 Leaf morphology of *Triticale* under different seeding ratios of forage crops

注: B₁、B₂、B₃ 分别代表禾豆混播比例为 70 : 30、50 : 50、30 : 70。箱上不同小写字母表示混播比例处理间在 0.05 水平差异显著。箱体中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 上下框分别是数据的上四分位数, 箱体外上下短线分别为数据的最大值与最小值。

Note: B₁, B₂, and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum data, respectively.

单施氮肥+混播比例 70 : 30 处理 (A₂B₁) 的小黑麦叶片面积与周长相比其他处理有较明显优势, 小黑麦叶片面积提高幅度为 22.89%~152.06% ($P<0.05$); 叶片周长提高幅度为 20.41%~60.71% ($P<0.05$)。A₃B₁ 处理的小黑麦叶片周长比 A₁B₁、A₁B₂ 和 A₁B₃ 分别高 15.76%、40.29% 和 54.51%, 饲用豌豆叶面积比 A₁B₁、A₁B₂ 和 A₁B₃ 分别提高 20.31%、14.06% 和 64.65%。氮磷配施+混播比例 50 : 50 处理 (A₃B₂) 的饲用豌豆叶片面积与小黑麦叶片长度相较其他处理有较大提高, 饲用豌豆叶片面积提高幅度为 16.65%~68.39% ($P<0.05$)。小黑麦叶片长度提高幅度为 15.96~83.67% ($P<0.05$)。氮磷配施+混播比例 70 : 30 处理 (A₃B₁) 饲用豌豆叶片周长最优, 相比其他处理的提升幅度为 14.54%~152.18% ($P<0.05$)。单施氮肥+混播比例 50 : 50 处理 (A₂B₂) 饲用豌豆叶片长度最优, 显著高于不施肥处理 (A₁B₁、A₁B₂、A₁B₃) ($P<0.05$)。氮磷配施下+混播比例

30 : 70 处理 (A₃B₃) 小黑麦与饲用豌豆叶片宽度最优, 小黑麦叶片宽度最高可比 A₁B₃ 处理提高 66.39%, 最低比 A₃B₁ 处理提高 16.27%, 差异均显著 ($P<0.05$)。饲用豌豆叶片宽度最高可比 A₁B₃ 处理提高 191.49%, 最低比 A₃B₁ 处理提高 30.80%, 差异均显著 ($P<0.05$)。

2.7 施肥×混播比例交互作用对饲草养分的影响

饲草品质测定结果表明, 施肥处理、施肥与混播比例交互作用对饲草 ADF 含量无显著影响, 对其他品质指标均有显著性影响 (表 4, $P<0.05$)。混播比例对饲草 CP 含量无显著影响, 对其他品质指标均影响显著 ($P<0.05$)。单施氮肥+混播比例 70 : 30 处理 (A₂B₁) 的饲草 NDF、ADF 含量最高, 其中饲草 NDF 含量最高比 A₂B₂ 处理提高 86.07%, 最低比 A₃B₃ 处理提高 14.99%, 差异均显著 ($P<0.05$); 饲草 ADF 含量比 A₂B₂ 处理提高了 35.75%, 差异显著 ($P<0.05$)。A₃B₁ 处理的饲草中性洗涤纤维含量分

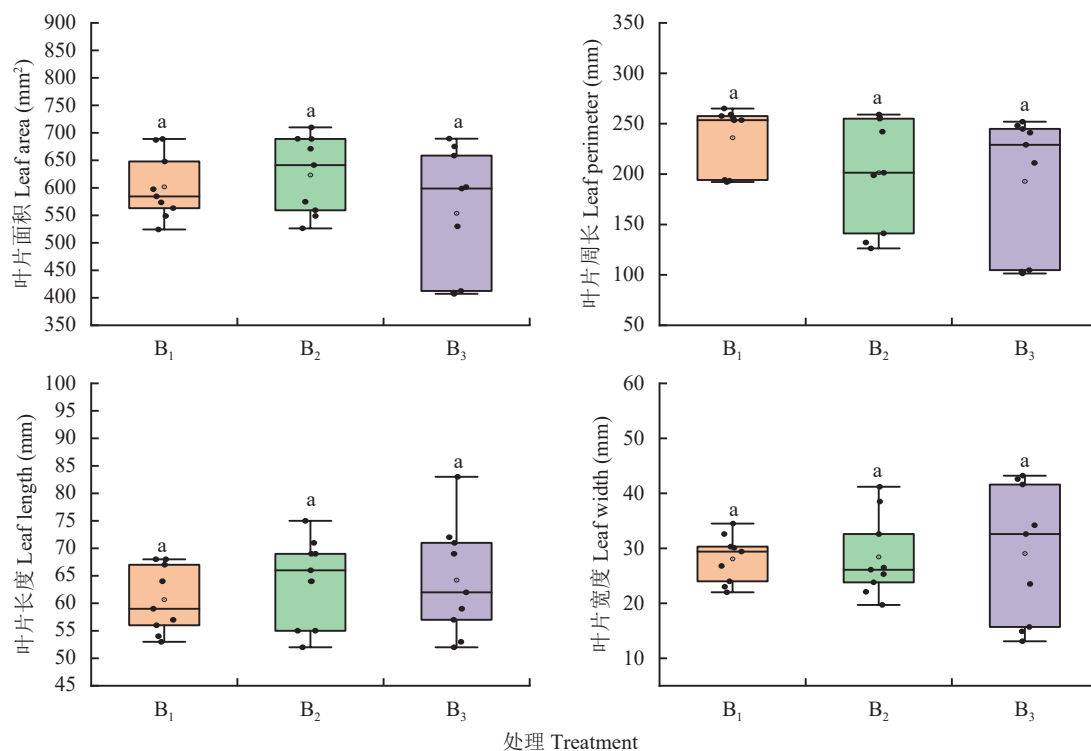


图 7 混播比例对饲用豌豆叶片形态的影响

Fig. 7 Leaf morphology of *Pisum sativa* L. under different seeding ratios of forage crops

注: B_1 、 B_2 、 B_3 分别代表禾豆混播比例为 70 : 30、50 : 50、30 : 70。箱上不同小写字母表示混播比例处理间在 0.05 水平差异显著。箱体中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 上下框分别是数据的上下四分位数, 箱体外上下短线分别为数据的最大值与最小值。

Note: B_1 , B_2 , and B_3 indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70. Different lowercase letters above the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum data, respectively.

别比 A_1B_1 、 A_1B_2 和 A_1B_3 增加了 7.15%、27.14% 和 17.89%。单施氮肥+混播比例 50 : 50 处理 (A_2B_2) 饲草粗蛋白与粗脂肪含量均为最优, 饲草粗蛋白含量最高比 A_3B_2 处理提高 40.35%, 最低比 A_3B_1 处理提高 21.46%, 差异均显著 ($P < 0.05$); 粗脂肪含量最高比 A_3B_2 处理提高 49.71%, 最低比 A_1B_2 处理提高 10.17%, 差异均显著 ($P < 0.05$)。氮磷配施+混播比例 50 : 50 处理 (A_3B_2) 饲草可溶性糖含量最优, 最高比 A_3B_1 提高 150.55%, 最低比 A_2B_3 提高 38.36%, 差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 施肥处理对混播饲草产量、叶片形态特征及饲草品质的影响

外源养分的添加主要目的是获得较高的目标产量、相应的饲草品质并提高土壤肥力^[17]。但是过量的氮肥施用造成的环境问题也普遍存在。不可否认的

是氮肥在恢复草地生产力、提高饲草品质等方面有重要的贡献。宋建超等^[18]指出, 施氮能显著增加垂穗披碱草的干草产量, 本研究也表明单施氮肥处理饲草鲜、干草产量分别为 13.36、7.53 t/hm², 分别比不施肥处理鲜、干草产量显著提高了 97.70%、82.89%。仁增旺姆等^[19]研究表明, 施磷肥也能够提高垂穗披碱草的产量; 林伟山等^[20]也认为, 磷元素是草地除氮元素之外影响植物生产及产量的另一个重要元素。本试验中氮磷配施处理下, 饲草鲜、干草产量分别为 14.86、8.13 t/hm², 比单施氮肥处理饲草鲜重提高了 11.26%, 饲草干重提高了 8.04%, 比不施肥处理鲜、干草产量分别显著提高了 86.06%、97.70%。但饲草粗蛋白产量以单施氮肥处理最高, 比不施肥处理显著提高了 121.48%, 比氮磷配施处理显著提高了 2.66%, 饲草株高也均以单施氮肥处理最高。形成这一结果的原因可能在于, 混播草地中禾本科饲草生长需要大量氮元素, 而豆科饲草通过固氮效应固定了大气中的游离氮素, 促进了植物的生长发育。

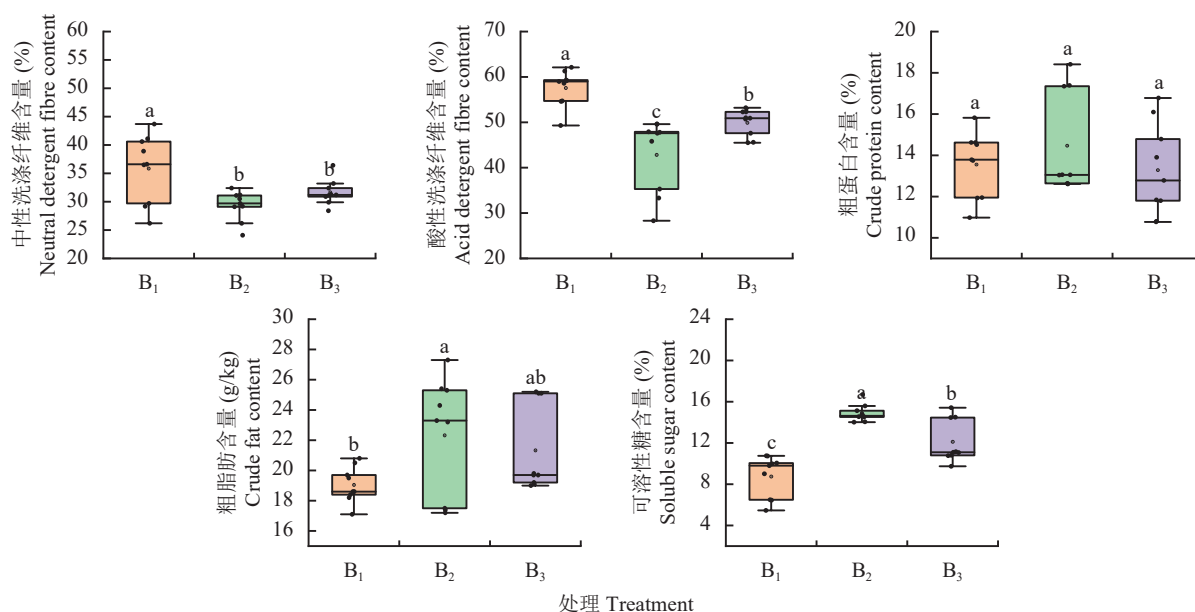


图 8 混播比例对饲草营养品质的影响

Fig. 8 Nutrition quality of forage crops under different seeding ratios

注: B₁、B₂、B₃ 分别代表禾豆混播比例为 70 : 30、50 : 50、30 : 70。箱上不同小写字母表示混播比例处理间在 0.05 水平差异显著。箱体中的中间线表示数据的中位数, 空心圆点指平均数, 实心黑点表示数据分布大小, 上下框分别是数据的上下四分位数, 箱体外上下短线分别为数据的最大值与最小值。

Note: B₁, B₂ and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70. Different lowercase letters on the boxes indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The middle lines, hollow dots and solid black dots inside the box plots indicate the median data, mean, and the size of the data distribution, the upper and lower frames of the box are the upper and lower quartile of the data, and the short lines above and below the box represent the maximum and minimum data, respectively.

磷元素参与植物光合作用, 而且能促进植物根系生长^[21]。因此, 本研究认为, 两种不同元素对于植物生长发育的作用可能不同, 氮素可能更有利于促进饲草生长发育时高度与品质等方面的提升, 而磷元素可能更有利于促进饲草根系的发育以及相关抗逆性等方面的提升^[22]。这一观点可从饲草叶片形态特征和饲草养分数据中得到证实。本研究中氮磷配施处理下禾本科叶片周长、叶片长度、叶片宽度以及豆科饲草的叶片面积、周长、长度、宽度均为最高, 饲草养分含量也表明了氮磷配施处理饲草中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量较高, 分别为 32.67%、53.72%, 单施氮肥的饲草粗蛋白、粗脂肪含量则更高, 分别为 14.71%、23.82 g/kg。Balabanli 等^[23]研究也表明, 施氮能提高饲草的粗蛋白含量, 降低中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量。马绍楠等^[24]结果表明, 饲草中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量与粗纤维的含量呈正相关关系, 植物粗纤维是细胞壁的主要组成成分, 在植物中起着支撑作用, 对植物的抗倒伏性有重要作用。因此, 综合以上饲草产量等试验结果, 氮磷配施相比单施氮肥与不施肥处理饲草有更好的生产性能。

3.2 混播比例对混播饲草产量、叶片形态特征及饲草品质的影响

研究表明, 豆科饲草与禾本科饲草进行混播建植时能有效提高饲草产量与品质, 豆科饲草的攀援特性需借助禾本科饲草植物的高度向上、向四周扩张, 实现自己的生态优势^[25]。有研究^[26-27]表明, 在禾豆混播建植中, 不同的混播比例提质增产效应是不同的, 当禾本科比例较大时饲草产量等有较大优势。本研究也有相似结果, 以 70 : 30 的混播比例建植时, 饲草鲜、干草产量、粗蛋白产量达到最大值, 分别为 12.69、7.66、110.85 t/hm², 显著优于 50 : 50、30 : 70 混播比例处理。而且小黑麦叶片形态指标也表现出相同结论。但是饲用豌豆的叶片形态则无相同的结论, 30 : 70 处理的饲用豌豆叶片长度、宽度达到最大值。主要的原因: 在混播建植时小黑麦饲草占比较大时, 植物的高度能够获取更多水热资源, 加之豆科饲草的固氮效应提供部分养分供给, 为小黑麦的生长提供了良好的养分供给环境, 从而提高了禾本科植物的地上生物量^[28]。而饲用豌豆比例较大时, 小黑麦植物株高会降低, 加之豆科植物叶片宽大, 密集之处会遮挡部分阳光投

表 2 施肥和混播比例对饲草生产性能的交互作用

Table 2 Interaction of fertilization and seeding ratios on forage production performance

处理 Treatment	鲜重 (t/hm ²) Fresh weight	干重 (t/hm ²) Dry weight	干鲜比 Dry to fresh weight ratio	粗蛋白产量 (kg/hm ²) Crud protein yield	小黑麦株高 (cm) <i>Triticale</i> height	饲用豌豆株高 (cm) <i>Pisum sativa</i> L. height
A ₁ B ₁	8.11±1.23 e	3.53±1.01 c	0.43±0.10 a	497.45±140.35 d	37.33±1.20 d	19.67±0.67 d
A ₁ B ₂	8.62±1.01 de	3.74±1.14 c	0.43±0.11 a	487.98±148.59 d	36.33±0.67 d	23.00±1.15 d
A ₁ B ₃	7.23±0.95 e	5.0±0.68 bc	0.70±0.07 a	597.80±80.24 d	48.67±1.20 c	23.00±0.58 d
A ₂ B ₁	9.72±1.66 de	7.32±0.68 bc	0.63±0.09 a	874.92±80.10 cd	61.00±3.06 a	39.67±1.76 ab
A ₂ B ₂	17.73±0.37 ab	8.20±0.14 bc	0.52±0.05 a	1425.49±24.86 b	62.33±2.91 a	37.67±2.33 b
A ₂ B ₃	12.63±1.85 cd	7.05±0.30 bc	0.44±0.05 a	1184.02±50.46 bc	54.67±1.45 b	39.33±1.45 ab
A ₃ B ₁	20.25±2.32 a	13.47±2.42 a	0.66±0.08 a	1963.09±349.45 a	61.33±1.20 a	42.67±1.86 a
A ₃ B ₂	9.46±0.51 de	4.51±1.43 bc	0.49±0.15 a	568.92±180.25 d	64.00±1.53 a	36.67±1.45 b
A ₃ B ₃	14.88±0.75 bc	6.42±1.85 bc	0.42±0.10 a	862.21±122.43 cd	44.00±1.53 c	31.00±1.15 c
方差分析 Analysis of variance (ANOVA)						
施肥 (A) Fertilization	22.13*	9.54*	0.06	15.34*	91.75*	117.87*
混播比例 (B) Seeding ratio	0.55	2.90	0.48	2.64	6.75*	2.87
A×B	12.72*	5.10*	2.19	10.96*	24.49*	7.46*

注: A₁、A₂、A₃分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。B₁、B₂、B₃分别代表禾豆混播比例为70 : 30、50 : 50、30 : 70。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), *表示变量效应达到0.05显著水平。

Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. B₁, B₂, and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), and * indicates variable effect at 0.05 significant level.

射, 小黑麦获得的光照不充足, 导致株高较低, 影响了叶片形态与产量^[29], 这也与试验所选择的豆科品种有关, 本试验选择的是饲用豌豆, 植物的茎秆、叶片相比其他研究中混播建植选择的箭筈豌豆品种更为宽大^[30], 对于攀附禾本科的压力也相对更大。张春艳等^[31]研究表明, 当豆科饲草的建植比例较大时, 饲草的品质会较好, 粗蛋白、粗脂肪含量等逐渐增加, 本试验结果与之相似但也有差异, 本试验结果表明, 70 : 30 处理的饲草中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量较高, 但 50 : 50 处理的粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖含量则表现出比 30 : 70 处理更好的结果, 这可能是试验地的气候导致。本试验位于海拔 4270 m 的高寒地区, 气候条件相对较差, 而且试验在 6 月下旬开展, 9 月下旬便已经收获, 导致生育期较短, 植物积累的养分相对较少。加上试验地区土地相对贫瘠, 豆科比例较大时能固定的土壤氮素养分较少, 部分供给禾本科生长发育后自身积累的养分会降低, 也可能是原因之一。

3.3 施肥×混播比例交互作用对混播饲草产量、叶片形态特征及饲草品质的影响

人工草地的建植是高寒地区草地生态恢复与缓解退化草地的重要途径之一。董晓兵等^[32]指出, 添加肥料可以改善土壤养分, 促进牧草生长。施建军等^[33]也认为, 施肥是提高草地生产力、恢复草地生态平衡的有效措施。刚永和等^[34]认为, 饲草产量的高低是衡量禾豆混播最佳比例的重要指标之一, 但二者交互作用下是否提高人工草地饲草产量和品质并不明确。本研究结果表明, 交互作用下, 氮磷配施+混播比例 70 : 30 处理饲草鲜、干重均最高, 分别为 20.25、13.47 t/hm², 分别高出不施肥、单施氮肥+混播比例 70 : 30 处理 149.69%、108.33%, 饲草粗蛋白产量也分别显著高出不施肥、单施氮肥处理 302.77%、124.38%。饲草株高结果也显示了氮磷配施的饲草生产性能优于不施肥处理。相似的结果也在叶片形态特征中表现出来, 如单施氮肥+混播比例 70 : 30 处理的禾本科叶片面积与禾本科叶片周长为最高, 氮磷配施+混播比例 70 : 30 处理豆科叶片周长最高,

表 3 施肥和混播比例对饲草叶片形态的交互作用

Table 3 Interaction of fertilization and seeding ratios on forage leaf morphology

处理 Treatment	叶面积 Leaf area (mm ²)		周长 Leaf perimeter (mm)		叶长 Leaf length (mm)		叶宽 Leaf width (mm)	
	小黑麦	饲用豌豆	小黑麦	饲用豌豆	小黑麦	饲用豌豆	小黑麦	饲用豌豆
	<i>Triticale</i>	<i>Pisum sativa</i> L.	<i>Triticale</i>	<i>Pisum sativa</i> L.	<i>Triticale</i>	<i>Pisum sativa</i> L.	<i>Triticale</i>	<i>Pisum sativa</i> L.
A ₁ B ₁	2258.70±60.59 d	560.77±18.50 b	421.50±12.33 b	193.23±0.61 c	215.67±3.53 cd	54.33±0.88 c	12.50±0.46 d	23.00±0.58 e
A ₁ B ₂	1720.30±43.13 ef	591.50±49.76 b	347.80±3.12 cd	133.17±4.31 d	170.67±2.03 e	54.00±1.00 c	12.37±0.48 d	24.50±1.22 de
A ₁ B ₃	1428.00±30.06 f	409.77±1.51 c	315.80±5.52 d	103.10±0.95 e	149.00±5.77 e	54.00±1.53 c	11.90±0.20 d	14.57±0.77 f
A ₂ B ₁	3599.43±65.39 a	569.77±14.52 b	507.53±20.49 a	254.83±1.38 a	270.00±4.16 a	61.33±3.38 bc	19.67±0.92 a	28.77±1.00 cd
A ₂ B ₂	2413.57±135.36 cd	588.20±27.58 b	380.33±22.04 c	214.07±14.04 b	207.00±3.06 d	71.67±1.76 a	15.77±1.21 c	23.33±1.98 e
A ₂ B ₃	2429.93±117.31 cd	576.57±23.39 b	372.33±11.93 c	227.00±8.72 b	205.33±8.09 d	68.00±7.55 ab	16.43±0.54 c	30.10±3.33 c
A ₃ B ₁	2928.87±302.45 b	674.67±13.35 a	487.93±6.76 a	260.00±2.65 a	236.00±10.50 bc	66.33±1.20 ab	17.03±0.85 bc	32.47±1.21 bc
A ₃ B ₂	2126.17±155.55 de	690.00±11.27 a	478.37±7.93 a	256.67±1.20 a	273.67±2.96 a	66.33±1.45 ab	18.87±0.79 ab	37.43±2.54 ab
A ₃ B ₃	2804.27±237.01 bc	674.37±8.90 a	484.80±7.18 a	248.27±2.08 a	256.67±16.70 ab	70.67±0.88 ab	19.80±0.15 a	42.47±0.47 a
方差分析 Analysis of variance (ANOVA)								
施肥 (A) Fertilization	36.27*	37.05*	71.80*	306.01*	75.97*	19.89*	67.60*	72.35*
混播比例 (B) Seeding ratio	25.77*	7.27*	37.49*	46.04*	17.43*	1.34	0.82	0.24
A×B	4.45*	5.54*	9.27*	14.67*	15.22*	1.23	6.10*	11.14*

注：A₁、A₂、A₃分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。B₁、B₂、B₃分别代表禾豆混播比例为70：30、50：50、30：70。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), *表示变量效应达到0.05显著水平。

Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. B₁, B₂, and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70：30, 50：50, and 30：70. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), and * indicates variable effect at 0.05 significant level.

氮磷配施+混播比例 50：50 处理豆科叶片面积与禾本科叶片长度表现较优，而氮磷配施+混播比例 30：70 处理下禾本科与豆科叶片宽度则表现较优。Li 等^[35]与 Zhu 等^[36]研究均表明，施氮增加叶片叶绿素含量，延长叶片的功能期。因此，不同混播比例下，养分的添加提高了叶片形态特征，促进了饲草对水、热等自然光资源的利用效率，也能够间接提高饲草产量与品质。在饲草品质各指标中，单施氮肥+混播比例 70：30 处理的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量最高，单施氮肥+混播比例 50：50 处理的粗蛋白、粗脂肪含量则最高，这也表明同一氮肥条件下，豆科饲草占比较大时，饲草品质也相对较好。冯廷旭等^[37]也指出，随着豆科饲草占比的增加，饲草中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量会逐渐降低，粗蛋白含量逐渐增加，这与本试验结果相似，本试验中随着豆科饲草的比例增加中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量整体呈现逐渐降低的趋势，但

饲草粗蛋白含量则无明显规律性变化，粗脂肪含量整体呈逐渐增加趋势。这可能与本试验建植时间有关，本试验在 9 月下旬便进行了刈割收获，此时豆科饲草进入开花期，会大量消耗养分，这也导致了豆科饲草占比较大时，粗蛋白含量相对较低。也有可能与试验地的气候有关，还需要进一步试验探究。

4 结论

本试验位于青海省三江源地区的高寒草地，结果表明施肥处理比不施肥处理的饲草生产性能、叶片特征及饲草养分品质均有所提高，其中氮磷配施处理下饲草鲜、干重比不施肥处理分别显著提升 86.06%、97.70%，粗蛋白产量、饲草叶片形态特征也有明显提高。交互作用下，氮磷配施+混播比例 70：30 的处理饲草鲜、干重分别为 20.25 t/hm²、13.47 t/hm²，生产性能显著优于不施肥处理 134.91%~

表 4 施肥和混播比例对饲草营养品质的交互效应
Table 4 Interaction of fertilization and seeding ratio on forage nutrition quality

处理 Treatment	中性洗涤纤维 (%) Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 (%) Acid detergent fiber	粗蛋白 (%) Crud protein	粗脂肪 (g/kg) Crude fat	可溶性糖 (%) Soluble sugar
A ₁ B ₁	55.97±1.32 b	34.10±2.45 ab	14.45±0.68 b	17.90±0.40 e	10.43±0.31 bc
A ₁ B ₂	47.17±0.68 ef	30.23±1.08 ab	13.05±0.01 bc	23.60±0.35 b	14.40±0.37 a
A ₁ B ₃	50.87±0.09 cd	30.40±1.15 ab	11.47±0.35 c	19.73±0.03 cd	14.46±0.02 a
A ₂ B ₁	60.10±1.00 a	36.83±5.39 a	11.62±0.32 c	20.33±0.33 c	9.68±0.34 c
A ₂ B ₂	32.30±2.08 g	27.13±2.07 b	17.72±0.35 a	26.00±0.65 a	14.89±0.35 a
A ₂ B ₃	45.57±0.03 f	31.23±0.03 ab	14.78±1.15 b	25.13±0.03 a	11.11±0.02 b
A ₃ B ₁	59.97±0.67a	36.57±3.49 a	14.59±0.03 b	18.90±0.30 d	6.13±0.34 d
A ₃ B ₂	48.93±0.67 de	30.47±0.43 ab	12.62±0.01 bc	17.37±0.09 e	15.37±0.67 a
A ₃ B ₃	52.27±0.03 c	30.97±0.07 ab	13.60±1.54 bc	19.10±0.06 d	10.77±0.02 b
方差分析 Analysis of variance (ANOVA)					
施肥 (A) Fertilization	14.22*	0.04	4.53*	216.23*	35.49*
混播比例 (B) Seeding ratio	65.96*	5.06*	2.29	82.72*	204.44*
A×B	12.89*	0.48	11.32*	49.92*	21.92*

注: A₁、A₂、A₃分别指不施肥、单施氮肥、氮磷配施处理。B₁、B₂、B₃分别代表禾豆混播比例为70 : 30、50 : 50、30 : 70。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), *表示变量效应达到0.05显著水平。
Note: A₁, A₂, and A₃ indicate no fertilization, applying nitrogen fertilizer, and applying nitrogen and phosphorus together. B₁, B₂, and B₃ indicate the seeding ratio of rye and forage pea at 70 : 30, 50 : 50, and 30 : 70. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), and * indicates variable effect at 0.05 significant level.

180.08%, 优于单施氮肥处理 14.21%~108.33%, 饲草叶片形态特征也表现较优。综合以上结果, 一年生禾豆混播草地中单施氮肥对饲草养分与叶片形态特征有显著提高。氮磷配施+混播比例 70 : 30 的处理小黑麦、饲用豌豆饲草产量与叶片形态特征较优, 适宜在三江源地区推广建植。

参 考 文 献:

[1] 方精云, 耿晓庆, 赵霞, 等. 我国草地面积有多大?[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1731-1739.
Fang J Y, Geng X Q, Zhao X, *et al.* How many areas of grasslands are there in China?[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1731-1739.

[2] Fuhlendorf S D, Davis C A, Elmore R D, *et al.* Perspectives on grassland conservation efforts: Should we rewild to the past or conserve for the future?[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2018, 373: 20170438.

[3] 修丽娜, 冯琦胜, 梁天刚, 任继周. 2001—2009年中国草地面积动态与人类活动的关系[J]. 草业科学, 2014, 31(1): 66-74.
Xiu L N, Feng Q S, Liang T G, Ren J Z. Spatial and temporal distribution of grassland and human occupancy condition in China from 2001 to 2009[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(1): 66-74.

[4] 才璐, 罗珠珠, 王林林, 等. 基于Meta-analysis研究中国北方苜蓿土壤水分和养分效应[J]. 中国草地学报, 2021, 43(2): 64-74.
Cai L, Luo Z Z, Wang L L, *et al.* Effect of soil moisture and nutrients on alfalfa in Northern China based on Meta-analysis[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(2): 64-74.

[5] 任继周, 林慧龙. 农区种草是改进农业系统、保证粮食安全的重大步骤[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 1-9.
Ren J Z, Lin H L. Promoting pratacuture development in arable region to ameliorate the farming system and insure food security in China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(5): 1-9.

[6] 方精云, 白永飞, 李凌浩, 等. 我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 155-164.
Fang J Y, Bai Y F, Li L H, *et al.* Scientific basis and practical ways for sustainable development of China's pasture regions[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 155-164.

[7] 龙建廷, 许赵佳, 苗彦军. 我国五大牧区人工草地建植技术研究进展[J]. 中国草食动物科学, 2022, 42(6): 54-59.
Long J T, Xu Z J, Miao Y J. Research progress of artificial grassland construction technology in five pastoral areas in China[J]. China Herbivore Science, 2022, 42(6): 54-59.

[8] 冯廷旭, 德科加, 向雪梅, 魏希杰. 一年生禾豆混播人工草地产量及品质影响因素的研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2021, 51(4): 49-54.
Feng T X, De K J, Xiang X M, Wei X J. Research progress on the

- factors affecting the yield and quality of annual grass and bean mixed sown artificial grassland[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2021, 51(4): 49–54.
- [9] 崔国文, 李冰, 王明君, 等. 西藏人工草地的发展现状、存在问题及解决途径[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2015, (21): 137–138.
- Cui G W, Li B, Wang M J, *et al.* Development status, problems and solutions of artificial grassland in Tibet[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2015, (21): 137–138.
- [10] 逯永满. 新疆阿勒泰地区黄耆属和棘豆属分类及叶表皮特征研究[D]. 新疆乌鲁木齐: 新疆大学硕士学位论文, 2010.
- Lu Y M. Classification and leaf epidermal characters of the genera *Acanthopanax* and *Echinoderma* in Altay region, Xinjiang[D]. Wulumuqi, Xinjiang: MS Thesis of Xinjiang University, 2010.
- [11] Aleric K M, Kirkman L K. Growth and photosynthetic responses of the federally endangered shrub, *Lindera melissi-folia* (Lauraceae), to varied light environments[J]. American Journal of Botany, 2005, 92(4): 682–689.
- [12] Terashima I, Hanba Y T, Tholen D, Niinemets Ü. Leaf functional anatomy in relation to photosynthesis[J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 108–116.
- [13] 陈超, 罗光宇, 金则新, 等. 光照强度对景宁木兰幼苗叶片形态结构、化学计量特征和非结构性碳水化合物化合物的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 46(6): 1307–1315.
- Chen C, Luo G Y, Jin Z X, *et al.* Effects of light intensities on leaf morphological structure, stoichiometry and non-structural carbohydrates of *Magnolia sinostellata* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 46(6): 1307–1315.
- [14] Xie H T, Yu M K, Cheng X G. Leaf non-structural carbohydrate allocation and C: N: P stoichiometry in response to light acclimation in seedlings of two subtropical shade-tolerant tree species[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 124: 146–154.
- [15] Myers J A, Kitajima K. Carbohydrate storage enhances seedling shade and stress tolerance in a neotropical forest[J]. Journal of Ecology, 2007, 95: 383–395.
- [16] 刘晓英, 陈琴. 牧草混播技术简介[J]. 草业与畜牧, 2010, (11): 61–62.
- Liu X Y, Chen Q. Introduction to pasture mixing technology[J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2010, (11): 61–62.
- [17] 文雅, 周培, 张忠雪, 等. 施氮和灌溉互作对垂穗披碱草生物量及构成要素的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(2): 330–338.
- Wen Y, Zhou P, Zhang Z X, *et al.* Effects of irrigation quantity and nitrogen application rate on *Elymus nutans* biomass and its components[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(2): 330–338.
- [18] 宋建超, 杨航, 鱼小军, 等. 氮磷肥配施对高寒区垂穗披碱草产量及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 731–742.
- Song J C, Yang H, Yu X J, *et al.* Effect of combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer on the forage yield and nutritional quality of *Elymus nutans* in alpine region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3): 731–742.
- [19] 仁增旺姆, 姜丽丽, 汪诗平, 贾书刚. 氮磷添加对垂穗披碱草人工草地生产生态功能的影响分析[J]. 高原科学研究, 2020, 4(3): 55–61.
- Renzen W M, Jiang L L, Wang S P, Jia S G. The effect of nitrogen and phosphorus addition on ecological and produce function of *Elymus nutans* artificial grassland[J]. Plateau Science Research, 2020, 4(3): 55–61.
- [20] 林伟山, 德科加, 张琳, 等. 氮、磷添加对青藏高寒草甸土壤碳氮磷化学计量特征影响的Meta分析[J]. 草地学报, 2022, 30(12): 3345–3354.
- Lin W S, De K J, Zhang L, *et al.* Meta-analysis of the effects of nitrogen and phosphorus addition on the stoichiometric characteristics of soils carbon, nitrogen and phosphorus in Tibetan Alpine Meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(12): 3345–3354.
- [21] Bunemann E, Oberson A, Frossard E. Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [22] 舒锴, 柯浚, 辛莹, 等. 青藏高原多稳态高寒草甸生态系统蒸散特征对比研究[J]. 草原与草坪, 2019, 39(6): 83–88.
- Shu K, Ke X, Xin Y, *et al.* Comparative study of evapotranspiration characteristics of multi-stable alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. Grassland and Turf, 2019, 39(6): 83–88.
- [23] Balabanli C, Albayrak S, Yuksek O. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on the quality and yield of native rangeland[J]. Turkish Journal of Field Crops, 2010, 15(2): 164–168.
- [24] 马绍楠, 许贵善, 崔凯, 等. 反刍动物常用饲料中CF、NDF、ADF的关联性分析[J]. 饲料工业, 2018, 39(21): 52–59.
- Ma S N, Xu G S, Cui K, *et al.* Correlation analysis of CF, NDF and ADF in ruminant feedstuffs[J]. Feed Industry, 2018, 39(21): 52–59.
- [25] 张海星. 禾/豆间作与施氮对河西地区饲草作物产量、品质及水氮利用的影响[D]. 甘肃兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2021.
- Zhang H X. Effects of grass/legume intercropping and nitrogen application on forage crop yield, quality and water and nitrogen utilization in Hexi region[D]. Lanzhou, Gansu: MS Thesis of Lanzhou University, 2021.
- [26] 方伟. 高寒地区不同禾豆混播组合与比例对牧草产量及品质的影响[J]. 青海草业, 2022, 31(4): 1–8.
- Fang W. Effects of different mixtures and proportions of legume-grass mixtures on productivity and quality in alpine cold region[J]. Qinghai Prataculture, 2022, 31(4): 1–8.
- [27] 何玮, 张新全, 杨春华. 刈割次数、施肥量及混播比例对牛鞭草和白三叶混播草地牧草品质的影响[J]. 草业科学, 2006, 23(4): 39–42.
- He W, Zhang X Q, Yang C H. The effects of cutting frequency, seeding rates and nitrogen fertilizer on the yield and quality of mixture pasture of *Hemarthria compressa* and *Trifolium repens*[J]. Pratacultural Science, 2006, 23(4): 39–42.
- [28] 李建伟. 高寒山区不同播量的11种牧草(组合)生长和品质特性研究[D]. 甘肃兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2012.
- Li J W. Growth and quality characteristics of 11 species of forage grasses (combinations) with different sowing rates in alpine mountains[D]. Gansu Lanzhou: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2012.
- [29] Yu Q, Shen Y M, Wang Q Y. Light deficiency and waterlogging affect chlorophyll metabolism and photosynthesis in *Magnolia sinostellata*[J]. Trees-Structure and Function, 2019, 33: 11–22.
- [30] 张筠钰, 吴晓娟, 吴宛萍, 等. 施氮对箭筈豌豆/燕麦间作系统叶性态和土壤矿质氮含量的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(11):

- 52–61.
Zhang Y Y, Wu X J, Wu W P, *et al.* Effects of nitrogen application on leaf traits and soil mineral nitrogen content in arrow end pea/oat intercropping system[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(11): 52–61.
- [31] 张春艳, 庄克章, 吴荣华, 等. 鲁南地区饲用燕麦品种适用性评价[J]. 饲料研究, 2021, 44(10): 98–101.
Zhang C Y, Zhuang K Z, Wu R H, *et al.* Adaptability evaluation of forage oat varieties in southern Shandong Province[J]. Feed Research, 2021, 44(10): 98–101.
- [32] 董晓兵, 郝明德, 郭胜安, 等. 施肥对羊草产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1935–1942.
Dong X B, Hao M D, Guo S A, *et al.* Fertilization effects on hay yield and quality of *Leymus chinensis*[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(10): 1935–1942.
- [33] 施建军, 马玉寿, 董全明, 等. “黑土型”退化草地人工植被施肥试验研究[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 25–31.
Shi J J, Ma Y S, Dong Q M, *et al.* Studies of fertilizer application on the artificially vegetated "black soil type" degenerated grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(2): 25–31.
- [34] 刚永和, 张海博, 牛勇, 等. 青海东部农业干旱区不同播种方式对紫花苜蓿农艺性状和生产性能的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(2): 327–334.
Gang Y H, Zhang H B, Niu Y, *et al.* Effects of different sowing methods on the agronomic and productive properties of alfalfa in the agricultural arid area of Eastern Qinghai[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(2): 327–334.
- [35] Li J, Hu W S, Lu Z F, *et al.* Imbalance between nitrogen and potassium fertilization influences potassium deficiency symptoms in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaves[J]. Crop Journal, 2022, 10(2): 565–576.
- [36] Zhu K Y, Yan J Q, Shen Y, *et al.* Deciphering the morpho-physiological traits for high yield potential in nitrogen efficient varieties (NEVs): A japonica rice case study[J]. Integrated Agriculture, 2022, 21(4): 947–963.
- [37] 冯廷旭, 德科加, 向雪梅, 等. 高寒地区燕麦与豌豆不同混播组合和比例对饲草产量及品质的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 487–494.
Feng T X, De K J, Xiang X M, *et al.* Effects of different mixtures and proportions of *Avena sativa* and pea on forage yield and quality in alpine cold region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(2): 487–494.