

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0600

李彩弟, 张春平, 俞 旻, 刘玉祯, 杨增增, 冯 斌, 张小芳, 张 雪, 杨晓霞, 董全民. 高寒地区不同饲草单播及混播综合效益评价. 草业科学, 2023, 40(7): 1875-1887.

LI C D, ZHANG C P, YU Y, LIU Y Z, YANG Z Z, FENG B, ZHANG X F, ZHANG X, YANG X X, DONG Q M. Comprehensive benefit evaluation of monocropping and mixed cropping of different forages in the alpine region. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1875-1887.

## 高寒地区不同饲草单播及混播综合效益评价

李彩弟, 张春平, 俞 旻, 刘玉祯, 杨增增, 冯 斌,  
张小芳, 张 雪, 杨晓霞, 董全民

(青海大学畜牧兽医科学院 / 青海省畜牧兽医科学院, 青海省高寒草地适应性管理重点实验室,  
三江源区高寒草地生态教育部重点实验室(青海大学)青海 西宁 810016)

**摘要:** 为筛选适合青海高寒牧区一年生饲用牧草品种及其种植模式, 于 2020 年在青海巴卡台农牧场开展了不同品种蚕豆 (*Vicia faba*)、饲用油菜 (*Brassica napus*) 单播及其与燕麦 (*Avena sativa*) 混播处理下的生产性能、营养品质、经济效益及土壤养分变化研究, 并进行综合效益评价。结果表明, 各处理饲草干草产量在  $1\,378.56 \sim 2\,836.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与燕麦混播提高了干草产量, 其中‘华油杂 62’+燕麦混播、‘饲油 2 号’+燕麦混播处理干草产量最高, 分别为  $2\,836.46$  和  $2\,668.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。‘青海 13 号’单播、‘2005-00’单播处理饲草粗蛋白含量达  $20.13\%$  和  $18.34\%$ , 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 与燕麦混播显著降低了饲草粗蛋白、粗灰分含量 ( $P < 0.05$ ), 提高了中性洗涤纤维含量, 而对粗脂肪和相对饲用价值无显著影响 ( $P > 0.05$ )。蚕豆单播处理  $0 \sim 20 \text{ cm}$  层土壤全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量显著高于油菜单播草地 ( $P < 0.05$ ), 油菜与燕麦混播虽提高了草地  $0 \sim 20 \text{ cm}$  层土壤总氮、总磷、硝态氮、铵态氮和有效磷含量, 但仍低于蚕豆单播草地。‘青海 13 号’+燕麦混播处理净经济效益最高, ‘2005-00’+燕麦混播处理次之, ‘华油杂 62’单播处理最低。综合分析结果表明, ‘2005-00’蚕豆单播和‘青海 13 号’蚕豆单播处理综合表现较好, 可进一步研究以在青海高寒地区推广应用。

**关键词:** 高寒地区; 一年生饲草; 生产性能; 营养品质; 土壤养分; 经济效益; 综合评价

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)07-1875-13

### Comprehensive benefit evaluation of monocropping and mixed cropping of different forages in the alpine region

LI Caidi, ZHANG Chunping, YU Yang, LIU Yuzhen, YANG Zengzeng, FENG Bin,  
ZHANG Xiaofang, ZHANG Xue, YANG Xiaoxia, DONG Quanmin

(Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River-Source (Qinghai University), Ministry of Education, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

**Abstract:** This study aimed to explore the annual forage crops and planting patterns suitable for alpine pastoral regions in Qinghai. In this study, different varieties of broad bean (*Vicia faba*) and rapeseed (*Brassica napus*) were sown in monocropping and mixed with oats (*Avena sativa*). Plot experiments were conducted at Qinghai Bakatai Farm in 2020 to measure the production performance, nutritional quality, economic benefits, and soil nutrients of each treatment, and evaluate

收稿日期: 2022-07-24 接受日期: 2022-11-09

基金项目: 青海省重大科技专项“青藏高原现代牧场技术研发与模式示范”(2018-NK-A2)

第一作者: 李彩弟 (1988-), 女, 甘肃会宁人, 在读博士生, 主要从事草地生态与环境保护研究。E-mail: licaidi7@163.com

通信作者: 董全民 (1971-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 博士, 主要从事高寒草地生态系统管理和草地生态畜牧业等方面的研究。

E-mail: qmdong@qhu.edu.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

the comprehensive benefit. The hay yields of the tested treatments were found to range from 1 378.56 to 2 792.94 g·m<sup>-2</sup>. Mixed cropping with oats increased hay yield, with the highest yields of 2 836.46 g·m<sup>-2</sup> and 2 668.79 g·m<sup>-2</sup> for the treatments of ‘Huayouza 62’ + oat and ‘Siyu 2’ + oat, respectively. The crude protein content of ‘Qinghai 13’ (20.13%) and ‘2005-00’ (18.34%) were significantly higher than that of other treatments ( $P < 0.05$ ). Mixed cropping with oat decreased the crude protein and crude ash but increased the neutral detergent fiber, with no significant effect on crude fat and relative forage value ( $P > 0.05$ ). Soils in the 0—20 cm layer with broad bean monocropping had higher total N, total P, nitrate N, ammonium N, and available P than soils with rapeseed monocropping. Although soils in the 0—20 cm layer with the rapeseed-oat mixtures had higher total N, total P, nitrate N, ammonium N, and available P than soils with rapeseed monocropping, these values were still lower than those of monocropping of broad bean. The values of net economic benefits were highest after ‘Qinghai 13’ + oat treatment and lowest after ‘Huayouza 62’ treatment. The multivariate data evaluation showed that ‘2005-00’ monocropping and ‘Qinghai 13’ monocropping performed excellently in the alpine region of Qinghai and could be further tested for promotion and utilization.

**Keywords:** alpine areas; annual forage; production performance; nutritional quality; soil nutrients; economic benefit; comprehensive evaluation

**Corresponding author:** DONG Quanmin E-mail: [qmdong@qhu.edu.cn](mailto:qmdong@qhu.edu.cn)

草地是全球范围内分布最广泛的植被类型之一, 约占陆地面积的 20%<sup>[1]</sup>, 具有重要的生态、生产、生活等功能, 在全球草地畜牧业发展及碳循环等方面发挥着不可替代的作用<sup>[2]</sup>。然而受气候变化和人类活动双重因素的影响, 全球草地生态系统目前正面临着巨大的退化压力<sup>[3]</sup>。我国约 40% 国土面积为天然草地, 但已有近 90% 的草地已经退化<sup>[4]</sup>。青藏高原拥有的约 1.28 亿 hm<sup>2</sup> 高寒草地, 构成了我国重要的碳汇和草地畜牧业生产基础<sup>[5]</sup>。近几十年来, 在放牧超载、人口数量增长等人类活动与全球气候变化的双重压力下, 青藏高原草地退化面积在 80% 以上<sup>[6]</sup>, 草地退化不仅会加剧草畜供需矛盾, 还严重威胁青藏高原生态安全屏障功能的发挥<sup>[7-8]</sup>。根据草地资源置换理论与“以小保大”原理<sup>[9-10]</sup>, 小面积的栽培草地生产优质饲草, 可以实现大面积天然草地的保护、恢复和适度利用。因此, 建植高产优质的一年生栽培草地增加饲草供给, 可减轻天然草地的过载放牧压力, 防止草地退化, 实现天然草地生态系统功能属性转移<sup>[11]</sup>, 保障生态安全与草地畜牧业的可持续发展<sup>[12]</sup>。

青藏高原肩负着国家生态安全屏障和草地畜牧业生产的双重使命, 饲草生产需兼顾生态安全和经济效益。目前, 青藏高原高寒地区一年生栽培草地建植主要以燕麦 (*Avena sativa*) 单播为主<sup>[13]</sup>, 饲草种类与种植方式相对单一。提高饲草种类多样性和种植方式多元化对栽培草地生产力提升、饲草营养均

衡、土壤养分积累和土壤环境改善有促进作用<sup>[14]</sup>。蚕豆 (*Vicia faba*) 全株含有丰富的粗蛋白、纤维素和微量元素等营养成分, 其根系能通过根瘤菌固定空气中的氮, 提高草地系统土壤氮含量、增加草地氮产量, 是优良的蛋白质饲草。传统油菜硫代葡萄糖苷含量高, 在芥子酶作用下会产生有毒物质, 家畜不喜食; 傅廷栋院士团队培育的“双低”(低芥酸、低硫代葡萄糖苷) 甘蓝型饲用油菜 (*Brassica napus*) 具有生长快、产量高和营养价值高等特点, 有很高的饲用价值<sup>[15]</sup>。但青藏高原高寒地区针对饲用油菜、蚕豆引种建植栽培草地的研究较少。

本研究引种两个华中地区饲用油菜品种和两个青海本地饲用蚕豆品种, 采用各饲草品种单播及各饲草品种与燕麦混播的方式分别建植栽培草地, 分析各处理下饲草的生产性能、营养品质、经济效益及土壤养分的差异, 采用 TOPSIS 多准则决策模型进行综合效益评价, 以期高寒地区一年生饲用牧草种植提供模式参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验地位于青藏高原东端的青海巴卡台农牧场 (36°15' N, 100°55' E), 海拔 3 300 m。该区属大陆性高原寒温带季风气候, 太阳辐射强, 昼夜温差大。全年平均气温在 -5~5 °C, 年最高气温 20.5 °C, 年

最低气温-18.7℃。年均降水量 250~450 mm, 主要集中在 7 月-10 月, 占全年降水量的 75% 以上; 年均蒸发量约为 1 400 mm。年日照时数 2 670.4~3 036 h; 年平均风速为 2.1 m·s<sup>-1</sup>。试验地土壤类型为栗钙土。

1.2 试验材料

供试饲草共 5 种, ‘青海 13 号’蚕豆、‘2005-00’蚕豆与‘青引 1 号’燕麦由青海大学农林科学院提供, ‘华油杂 62’油菜与‘饲油 2 号’油菜由华中农业大学提供。

1.3 研究方法

1.3.1 试验设计

试验设置 4 个单播处理: ‘青海 13 号’单播 (V<sub>1</sub>)、‘2005-00’单播 (V<sub>2</sub>)、‘华油杂 62’单播 (B<sub>1</sub>)、‘饲油 2 号’单播 (B<sub>2</sub>); 4 个混播处理: ‘青海 13 号’+ 燕麦混播 (VA<sub>1</sub>)、‘2005-00’+ 燕麦混播 (VA<sub>2</sub>)、‘华油杂 62’+ 燕麦混播 (BA<sub>1</sub>)、‘饲油 2 号’+ 燕麦混播 (BA<sub>2</sub>)。共 8 个处理 (表 1), 每个处理重复 3 次, 采取完全随机区组设计, 共 24 个小区; 小区面积为 5 000 m<sup>2</sup> (250 m × 20 m), 各小区间间距 2 m。采用撒播方式于 2020 年 5 月中旬播种, 播种同时混施有机肥、磷酸二铵和尿素, 有机肥、磷酸二铵和尿素施用量分别为 375、150、75 kg·hm<sup>-2</sup>。苗期除追施尿素 75 kg·hm<sup>-2</sup> 外再无除草、灌溉等其他田间管理措施。

1.3.2 野外观测、样品采集及指标测定

于 2020 年 9 月 10 日进行野外观测及样品采集。每个小区随机设置 3 个 1 m × 1 m 样方用于测定饲草高度、盖度及地上生物量。每个处理测定 9 个样方, 共计 72 个样方。测定高度时在每个样方

中随机选取 15 株测定其自然高度求其均值作为高度的原始数据, 随后将样方中的饲草齐地面刈割。将刈割的样品带回实验室, 先在 105℃ 下杀青 30 min, 随后在 70℃ 下烘干至恒重, 测定其干草产量 (hay yield)。将烘干后的样品粉碎用于营养品质的测定, 分别测定粗蛋白 (crude protein, CP)、粗脂肪 (crude fat, CF)、粗灰分 (crude ash, CA)、酸性洗涤纤维 (acid detergent fiber, ADF)、中性洗涤纤维 (neutral detergent fiber, NDF)。CP 含量采用凯氏定氮法测定; CF 含量采用 ANKOM XT15i 型全自动脂肪分析仪测定; CA 含量采用灰化法测定; ADF 和 NDF 含量采用范氏测定法测定。

在上述刈割后的样方中用直径 3.5 cm 的土钻采集 0-10、10-20、20-30 cm 土层土样, 各样方内 3 钻混合为 1 个样品, 每个小区 9 个土样, 共计 216 个土样。土样采集完成后将其分为两份, 一份鲜样用于铵态氮 (ammonium nitrogen, AN)、硝态氮 (nitrate nitrogen, NN) 的测定, 另一份阴干、碾碎、过筛用于土壤有机质 (soil organic matter, SOM)、全氮 (total nitrogen, TN)、全磷 (total phosphorus, TP)、速效磷 (available phosphorus, AP) 的测定。测定方法参照《土壤农化分析》<sup>[16]</sup>。

1.4 数据统计分析

相对饲用价值 (relative feeding value, RFV) 采用以下公式计算:

$$RFV = (DMI \times DDM) / 1.29;$$

$$DMI = 120 / NDF;$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF.$$

表 1 试验处理  
Table 1 Experimental treatment

| 种植方式<br>Sowing treatment | 播种组合<br>Sowing combination                                               | 编号<br>Code      | 播种量<br>Sowing rate/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|
| 单播<br>Monocropping       | ‘青海13号’蚕豆 <i>Vicia faba</i> ‘Qinghai 13’                                 | V <sub>1</sub>  | 225                                       |
|                          | ‘2005-00’蚕豆 <i>Vicia faba</i> ‘2005-00’                                  | V <sub>2</sub>  | 150                                       |
|                          | ‘华油杂62’油菜 <i>Brassica napus</i> ‘Huayouza 62’                            | B <sub>1</sub>  | 45                                        |
|                          | ‘饲油2号’油菜 <i>Brassica napus</i> ‘Siyou 2’                                 | B <sub>2</sub>  | 45                                        |
| 混播<br>Mixed cropping     | ‘青海13号’蚕豆 + 燕麦 <i>Vicia faba</i> ‘Qinghai 13’ + <i>Avena sativa</i>      | VA <sub>1</sub> | 112.5 + 300                               |
|                          | ‘2005-00’蚕豆 + 燕麦 <i>Vicia faba</i> ‘2005-00’ + <i>Avena sativa</i>       | VA <sub>2</sub> | 75.0 + 300                                |
|                          | ‘华油杂62’油菜 + 燕麦 <i>Brassica napus</i> ‘Huayouza 62’ + <i>Avena sativa</i> | BA <sub>1</sub> | 22.5 + 300                                |
|                          | ‘饲油2号’油菜 + 燕麦 <i>Brassica napus</i> ‘Siyou 2’ + <i>Avena sativa</i>      | BA <sub>2</sub> | 22.5 + 300                                |

式中： $DMI$  (dry matter intake, %) 为干物质采食量， $DDM$  (digestible dry matter, %) 为可消化干物质。

净经济效益 = 总经济效益 - 成本。

采用 Excel 2019 整理数据，采用 R 4.0.2 进行数据统计分析，对不同处理下饲草生产性能、营养品质、土壤养分、经济效益进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)，以及不同处理下不同土层土壤养分双因素方差分析 (Two-way ANOVA)，并检验其显著性；使用 randomForest 程序包进行土壤养分因子对饲草 RFV 变化的相对重要性大小排序；使用 plyr 包进行所有处理的多准则决策模型 TOPSIS 分析以进行综合评价。图形通过 Origin 2021 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同单播和混播处理下饲草生产性能变化

单播处理下，同一物种不同品种间干草产量、高度和盖度无显著差异 ( $P > 0.05$ )，不同物种间，蚕豆 ( $V_1$ 、 $V_2$ ) 干草产量高于油菜 ( $B_1$ 、 $B_2$ )，但差异不显著 ( $P > 0.05$ )，油菜植株高度高于蚕豆，盖度低于蚕豆 (图 1)。与燕麦混播对干草产量、高度和盖度的影响油菜大于蚕豆，油菜 + 燕麦混播处理 ( $BA_1$ 、 $BA_2$ ) 干草产量、盖度较油菜单播处理 ( $B_1$ 、 $B_2$ ) 显著提高 ( $P < 0.01$ )，蚕豆 + 燕麦混播处理 ( $VA_1$ 、 $VA_2$ ) 与蚕豆单播处理 ( $V_1$ 、 $V_2$ ) 间干草产量、高度、盖度均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。混播处理下，油菜 + 燕麦混播组

合 ( $BA_1$ 、 $BA_2$ ) 干草产量高于蚕豆 + 燕麦混播组合 ( $VA_1$ 、 $VA_2$ )；干草产量  $BA_1$  和  $BA_2$  处理之间、 $VA_1$  和  $VA_2$  处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。所有处理中  $BA_1$  干草产量最高，为  $2\,836.46\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  (图 1)。

2.2 不同单播和混播处理下饲草营养品质变化

不同处理饲草营养品质分析表明，单播条件下， $V_1$ 、 $V_2$  处理的粗蛋白含量分别是  $B_1$ 、 $B_2$  的 3 倍以上，且粗灰分含量均显著高于  $B_1$ 、 $B_2$  ( $P < 0.05$ )，其中  $V_1$  粗蛋白含量最高，为 20.13%， $B_1$  粗灰分含量最低，为 4.23%； $V_2$ 、 $B_1$  和  $B_2$  之间酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维含量及相对饲用价值没有显著差异 ( $P > 0.05$ ) (图 2)。种植方式影响了饲草粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维含量和相对饲用价值 (图 2)；相比单播，各饲草与燕麦混播处理降低了粗蛋白、粗灰分、酸性洗涤纤维含量，提高了中性洗涤纤维含量；与  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  相比， $VA_1$ 、 $VA_2$ 、 $BA_1$ 、 $BA_2$  处理粗蛋白含量降低了 57.5%、60.5%、42.2% 和 35.0%，酸性洗涤纤维降低了 14.3%、3.50%、8.58% 和 6.67%，粗灰分降低了 20.61%、19.01%、5.34% 和 49.14%，中性洗涤纤维提高了 3.0%、5.1%、11.8% 和 8.2%，其中  $B_1$  处理与  $BA_1$  处理之间粗脂肪、粗灰分、酸性洗涤纤维无显著差异 ( $P > 0.05$ )。混播处理中， $VA_1$  和  $VA_2$  处理饲草粗蛋白含量显著高于  $BA_1$  和  $BA_2$  ( $P < 0.05$ )，粗蛋白含量大小排序为  $VA_1 > VA_2 > BA_2 > BA_1$ ；各混播处理间粗脂肪、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维和相对饲用价值没有显著差

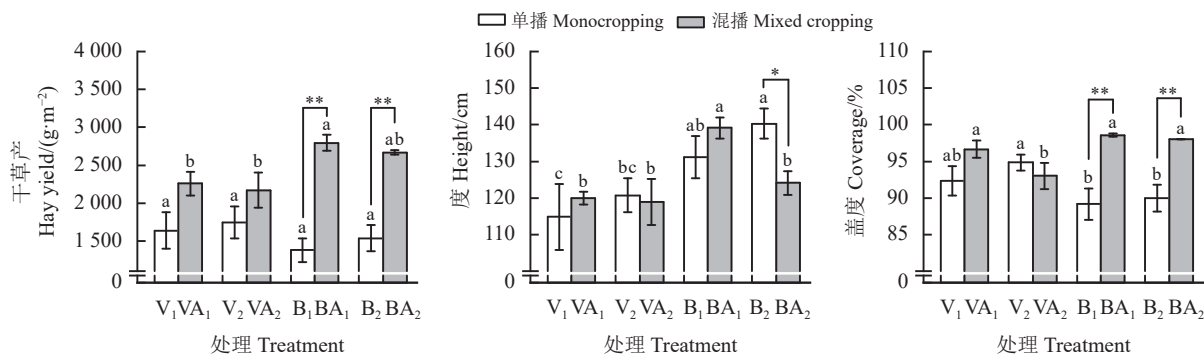


图 1 不同饲草单播及混播处理下饲草生产性能变化

Figure 1 Changes in forage production performance in different mono- and mixed cropping forage

$V_1$ 、 $VA_1$ 、 $V_2$ 、 $VA_2$ 、 $B_1$ 、 $BA_1$  同表 1。不同小写字母表示同一种植方式下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。\* 和 \*\* 分别表示单播与混播间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 和极显著 ( $P < 0.01$ )。下同图。

$V_1$ 、 $VA_1$ 、 $V_2$ 、 $VA_2$ 、 $B_1$ 、 $BA_1$ 、 $B_2$  和  $BA_2$  are present in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same planting pattern at 0.05 level; \* and \*\* indicate significant differences between the monocropping and mixed cropping at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. This is applicable for the following figures as well.



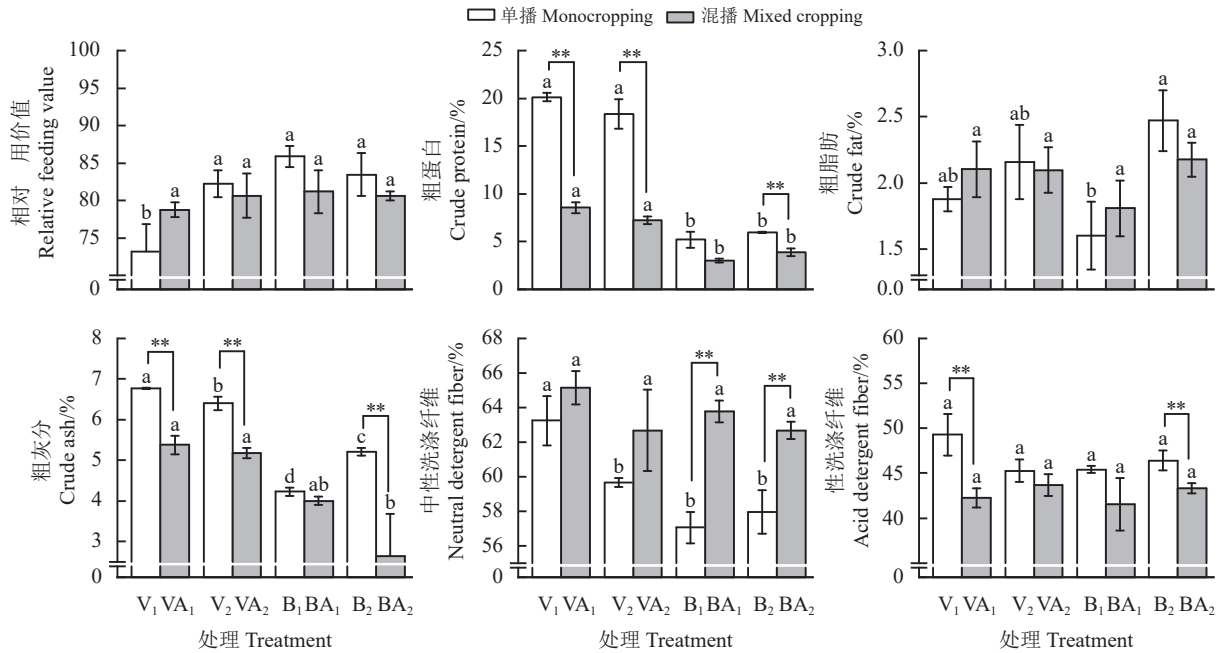


图 2 不同饲草品种单播及混播处理下饲草营养品质变化

Figure 2 Changes in forage nutritional quality in different mono- and mixed cropping forage

异 ( $P > 0.05$ )。所有处理中, 相对饲用价值、粗蛋白含量、粗脂肪含量最高的分别是  $B_1$ 、 $V_1$ 、 $B_2$ , 粗灰分、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量最低的分别是  $BA_2$ 、 $BA_1$ 、 $B_1$  (图 2)。

### 2.3 不同单播和混播处理下土壤养分特征

对不同种植方式下不同土层土壤养分含量进行双因素方差分析得出, 种植方式 (单播、与燕麦混播) 和土层 (0—10、10—20、20—30 cm) 及其二者的互作都对土壤有机质、总氮、总磷、硝态氮、铵态氮和速效磷含量有显著影响 ( $P < 0.01$ ) (图 3、图 4)。

单播方式下, 油菜单播处理 ( $B_1$ 、 $B_2$ ) 0—10、10—20 cm 土壤有机质含量显著高于蚕豆单播 ( $V_1$ 、 $V_2$ ) ( $P < 0.05$ ), 而其他养分含量远低于蚕豆单播 ( $V_1$ 、 $V_2$ ); 各单播处理土壤养分在 20—30 cm 土层下基本无明显差异 (图 3、图 4)。不同种植方式下不同深度的土壤养分含量不同; 与混播处理  $BA_1$ 、 $BA_2$  相比,  $B_1$ 、 $B_2$  处理在 0—10、10—20 和 20—30 cm 3 个土层中基本具有高的土壤有机质含量与低的全氮、全磷、硝态氮、铵态氮和速效磷含量,  $V_1$ 、 $V_2$  处理呈现与  $B_1$ 、 $B_2$  处理基本相反的现象; 其中  $V_1$  处理 0—10 cm ( $P < 0.01$ )、10—20 cm ( $P < 0.05$ ) 土层中土壤有机质含量显著低于  $VA_1$ , 全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量显著高于  $VA_1$  ( $P < 0.01$ ), 除 10—20 cm 土

层速效磷外,  $B_1$  和  $BA_1$  之间土壤养分的变化正好与以上结果相反;  $V_2$  与  $VA_2$  处理间、 $B_2$  与  $BA_2$  处理间, 除 20—30 cm 土层全磷和硝态氮外其他土层土壤养分含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。混播方式下,  $VA_1$  和  $BA_2$  处理 0—10 和 10—20 cm 土壤有机质含量显著高于  $VA_2$ 、 $BA_1$  ( $P < 0.05$ ), 但其他养分含量低于  $VA_2$ 、 $BA_1$ , 在 20—30 cm 土层, 各混播处理间土壤有机质含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但混播处理中  $VA_1$  全氮、全磷、硝态氮、速效磷含量显著高于其他混播处理 ( $P < 0.05$ )。所有处理中, 土壤有机质含量最高值出现在  $B_1$  处理 10—20 cm 土层, 土壤全氮、全磷、硝态氮、速效磷含量最高值均出现在  $VA_2$  处理 10—20 cm 土层, 土壤铵态氮含量最高值出现在  $V_2$  处理 0—10 cm 土层。各处理土壤养分含量在土层之间存在差异, 且部分处理的土层之间养分含量变化具有相同趋势, 其中  $V_1$ 、 $V_2$  处理下土壤总氮、总磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量随土层深度的增加呈下降趋势,  $B_2$  和  $VA_1$  处理呈相反趋势;  $VA_2$ 、 $BA_1$  处理下的土壤总氮、总磷、硝态氮含量随土层深度的增加呈增大后减小的趋势, 在 10—20 cm 土层达最大值,  $B_1$  处理下的土壤总氮、总磷、硝态氮、铵态氮和速效磷含量随土层深度的增加呈先减小后增大的趋势。

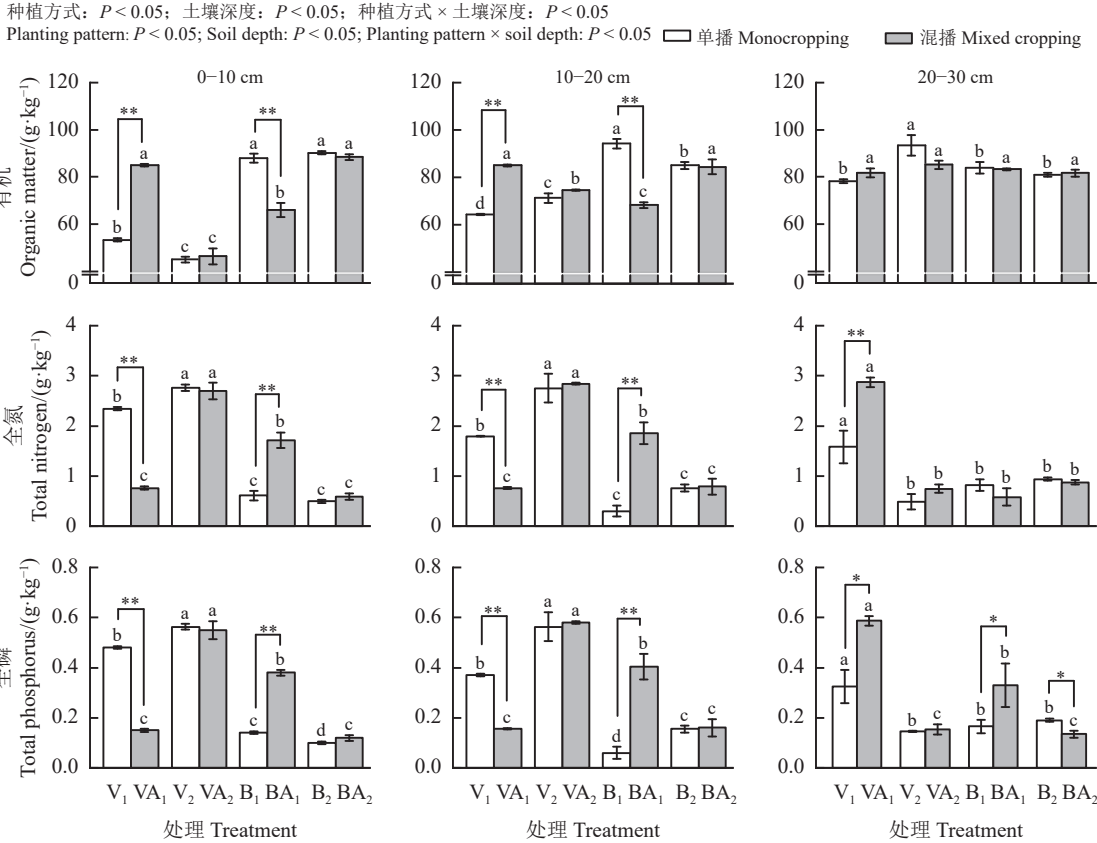


图 3 不同饲草品种单播及混播处理土壤有机质、全氮、全磷含量

Figure 3 Soil organic matter, total nitrogen, and total phosphorus content in different mono- and mixed cropping forage

2.4 不同种植方式下影响 RFV 的主要土壤养分因子

随机森林模型可以评估变量的重要性<sup>[17-19]</sup>。RFV 是反映饲草营养价值的一个综合指标,为进一步探讨土壤养分对 RFV 的影响在不同饲草种植方式间的变化,采用随机森林模型对单播及混播方式下土壤养分因子进行了相对重要性排序,分析其对 RFV 的影响程度,其中均方误差增量 (IncMSE, %) 值越大,因子越重要。由图 5 可知,在饲草单播种植方式下,土壤有机质、全磷、全氮是土壤养分因子对 RFV 变化贡献较高的因子;在各饲草与燕麦混播种植方式下,铵态氮、硝态氮和速效磷是土壤养分因子对 RFV 变化贡献较高的因子。

2.5 不同单播和混播处理经济效益分析

以研究区蚕豆干草 1.8 CNY·kg<sup>-1</sup>、油菜干草 0.5 CNY·kg<sup>-1</sup>、蚕豆 + 燕麦混合干草 2.1 CNY·kg<sup>-1</sup>、油菜 + 燕麦混合干草 1.1 CNY·kg<sup>-1</sup>、磷酸二铵 3.5 CNY·kg<sup>-1</sup>、尿素 2.3 CNY·kg<sup>-1</sup> 计算各处理的净经济效益。结果表明,除 V<sub>2</sub> 处理与 VA<sub>2</sub> 处理经济效益具有显著差异 ( $P < 0.05$ ) 外,各饲草单播和与燕麦混播间经济

效益差异极显著 ( $P < 0.01$ ) (图 6)。单播种植方式下, V<sub>2</sub> 处理经济效益显著高于 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 处理 ( $P < 0.05$ ), V<sub>1</sub> 和 V<sub>2</sub>、B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 处理经济效益间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 且 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 处理经济效益均为负值。在各饲草草种与燕麦混播播种植方式下, VA<sub>1</sub>、VA<sub>2</sub> 处理经济效益显著高于 BA<sub>1</sub>、BA<sub>2</sub> 处理 ( $P < 0.05$ )。所有处理中, VA<sub>1</sub> 处理经济效益最高, 为 27 248.3 元·hm<sup>-2</sup>。

2.6 多指标决策模型 TOPSIS 评价

采用 TOPSIS 综合评价模型对各单播和混播处理下饲草生产性能、营养品质、土壤养分含量和经济效益的综合效益进行评价分析 (图 7), 结果表明, 所有处理中 V<sub>2</sub> 处理贴近度值最高, B<sub>1</sub> 处理最低, 所有处理贴近度由高到低排序为 V<sub>2</sub> > V<sub>1</sub> > VA<sub>1</sub> > VA<sub>2</sub> > BA<sub>1</sub> > BA<sub>2</sub> > B<sub>2</sub> > B<sub>1</sub>, 分别为 0.720、0.689、0.636、0.630、0.431、0.318、0.254 和 0.116。因此, 从综合饲草的生产性能、营养品质、土壤养分和经济效益角度来看, ‘2005-00’ 蚕豆单播优于其他品种饲草单播及其与燕麦混播种植模式。

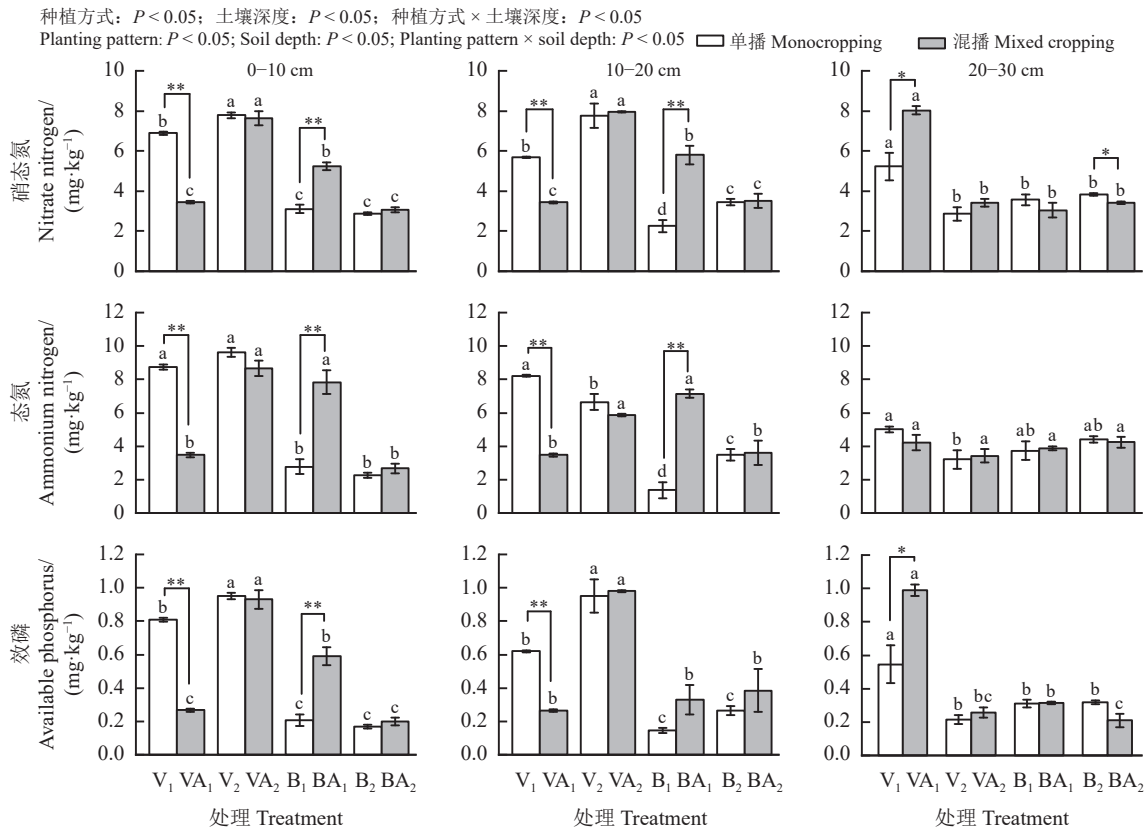


图 4 不同饲草品种单播及混播处理土壤硝态氮、铵态氮、速效磷含量  
Figure 4 Soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus content in different mono- and mixed cropping forage

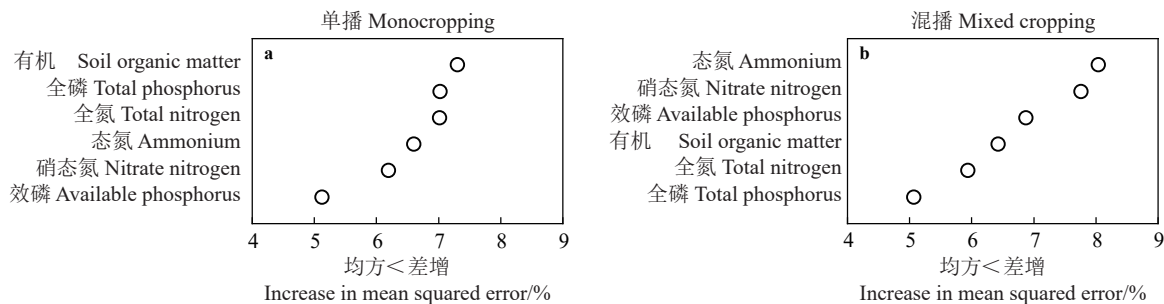


图 5 土壤养分对单播及混播饲草相对饲用价值 (RFV) 的重要性排序

Figure 5 Ranking of the importance of soil nutrients to the relative forage value (RFV) of mono- and mixed cropping forage

3 讨论

3.1 不同饲草品种单播和混播处理对饲草产量和营养品质的影响

饲草的产量是衡量其生产力和适应性的重要指标,栽培草地建设的首要目的便是提高产量。饲草混播体系可通过提高资源利用率、种间协同或竞争作用、生物多样性效应等提高生产力<sup>[20-22]</sup>。研究发现,混播较单播饲草干草产量可提高21.5%~79.0%<sup>[23]</sup>。

马妍琪<sup>[24]</sup>对青藏高原高寒牧区高产优质牧草的混播模式研究结果表明,蚕豆与燕麦混播后草产量高于燕麦单播和蚕豆单播。袁英良等<sup>[25]</sup>在吉林试验结果得出,油菜与燕麦混播组在3个生育期(抽薹期、盛花期、结荚期)的干草产量均高于油菜、燕麦单播。本研究中,混播干草产量均高于单播,这得益于燕麦叶片直立生长,蚕豆和油菜叶片水平生长,禾草须根系浅而密,豆草、油菜根系深而直,在蚕豆+燕麦、油菜+燕麦混播体系中,植株在茎叶

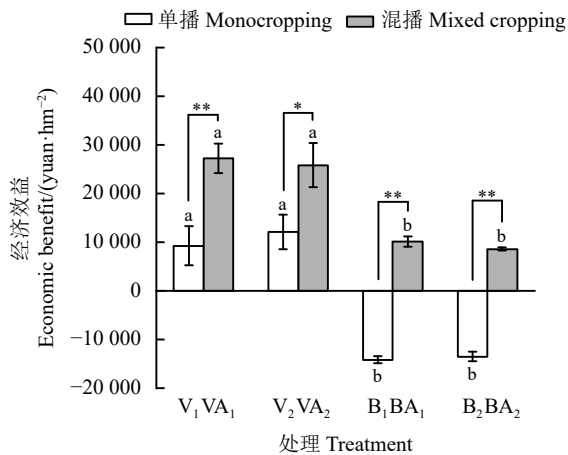


图 6 不同饲草品种单播及混播处理下经济效益  
Figure 6 The economic benefit of different mono- and mixed cropping forage

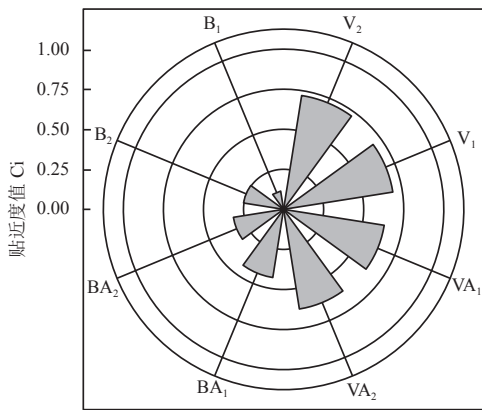


图 7 不同饲草品种单播及混播综合评价  
Figure 7 Comprehensive evaluation of different mono- and mixed cropping forage

空间分布、地下根系分布等方面实现了生态位互补，其分区获取地上光资源与地下土壤资源，能够充分利用空间提高光合作用能力及土壤养分吸收效率<sup>[26-27]</sup>，增加了饲草有机物的积累，提高了饲草产量。另外，干草产量存在物种差异，单播方式下蚕豆干草产量高于油菜，混播方式下油菜+燕麦体系干草产量高于蚕豆+燕麦体系。

营养品质是衡量饲草优质程度的重要方面，饲草所含营养成分的种类和数量决定了饲草的营养品质<sup>[28]</sup>。粗蛋白、粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维和粗灰分等营养成分是评价饲草品质的重要指标，粗脂肪、粗蛋白、粗灰分体现饲草的营养价值，酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维决定了牧草的采集率和消化率<sup>[29-30]</sup>，维持饲草较高的粗蛋白、粗脂肪和较低的粗纤维、粗灰分含量是提高饲草品质的

前提。相比一般饲草，豆科饲草具有蛋白含量高的优势<sup>[30]</sup>，本研究中蚕豆全株干草（‘青海 13 号’和‘2005-00’）粗蛋白含量远高于饲用油菜（‘华油杂 62’和‘饲油 2 号’）；蚕豆和油菜两个物种间相对饲用价值、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维基本没有显著差异，这与前人对反刍动物常用粗饲料营养价值的研究结果相似<sup>[31]</sup>。不同品种的豆科和芸苔属饲草营养成分含量不同<sup>[32-33]</sup>，且在与禾本科饲草混播时效果不同<sup>[34-35]</sup>。周娟娟等<sup>[36]</sup>研究结果发现，相比禾+豆混播及禾草单播，豆科单播有更高的粗蛋白、更低的粗纤维；王旺年等<sup>[37]</sup>研究结果认为油菜与禾草混播饲草粗蛋白含量显著低于油菜单播，还有研究发现，与油菜单播相比，油菜+燕麦混播降低了饲草酸性洗涤纤维、提高了中性洗涤纤维含量。本研究得到与以上研究一致的结果，‘青海 13 号’蚕豆、‘2005-00’蚕豆和‘饲油 2 号’油菜单播全株干草粗蛋白、粗灰分含量均分别显著高于与燕麦混播，且各饲草品种与燕麦混播降低了饲草粗灰分和酸性洗涤纤维含量、提高了中性洗涤纤维含量。

3.2 不同饲草品种单播及混播处理对土壤养分的影响

不同物种饲草在同一种植方式下草地土壤养分含量不同<sup>[38-39]</sup>。本研究发现，蚕豆单播草地 0—20 cm 土层土壤有机质含量显著低于油菜，全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量显著高于油菜，各饲草 20—30 cm 土层土壤养分含量基本没有明显差异。这可能与油菜根系在 0—20 cm 土层的分布量大于蚕豆<sup>[40-41]</sup>，而蚕豆具备与根瘤菌共生固氮和分泌根系分泌物提高土壤整体肥力的特性有关<sup>[42]</sup>。另外，4 种饲草单播草地的土壤养分垂直分布不一致，两种蚕豆单播草地土壤全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷垂直分布与大部分草地相似，即由表层向下逐渐减少<sup>[43]</sup>；两种饲料油菜单播草地全氮、全磷、硝态氮、速效磷含量在 20—30 cm 土层含量最高，这与油菜根系分布特点密切相关<sup>[41, 44]</sup>。蚕豆、饲料油菜与燕麦混播后，土壤养分含量出现不同物种趋同、同一物种趋异的现象，即‘2005-00’蚕豆+燕麦和‘华油杂 62’油菜+燕麦混播草地 0—20 cm 土层土壤有高的全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量和低的有机质含量，且在 0—30 cm 土层，除铵态氮和速效磷外其他养分含量随土壤深度增加呈先



增加后减小趋势,而‘青海13号’蚕豆+燕麦和‘饲油2号’油菜+燕麦混播草地0—20 cm土层土壤有高的有机质含量低的全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、速效磷含量。因此,从土壤养分高效利用与积累角度考虑,相比油菜,蚕豆单播更有利于土壤养分积累,尤其是‘2005-00’蚕豆;相比其他3种混播组合,‘2005-00’蚕豆+燕麦更有利于土壤养分积累。

饲草种植方式会影响土壤养分的高效利用与积累,因此,选择适宜的饲草种植方式是栽培草地优势获得及土壤养分含量提高的关键所在。已有研究表明,禾草与豆草混播体系、饲料油菜与其他饲草混播体系比单一饲草体系更有利于土壤有机质、氮素、磷素养分的积累与速效养分含量的提高<sup>[37,45-46]</sup>。本研究表明,相比‘青海13号’+燕麦混播,‘华油杂62’单播,‘青海13号’蚕豆单播,‘华油杂62’油菜+燕麦混播更有利于0—20 cm土层土壤总氮、总磷、硝态氮、铵态氮和速效磷积累,‘青海13号’蚕豆+燕麦混播,‘华油杂62’油菜单播更有利于0—20 cm土层土壤有机质的积累,‘2005-00’蚕豆和‘饲油2号’油菜两种饲草分别与燕麦混播后土壤养分变化不显著,且除‘青海13号’蚕豆外,各饲草单播与混播草地间20—30 cm土层土壤有机质、全氮、铵态氮、速效磷没有显著差异。因此,并不是任何混播草地都具有比单播草地土壤养分总量高和有效性提高的优势,这是因为植物生长在一起共享资源时就会出现不同程度的竞争或协同作用<sup>[47]</sup>,蚕豆可通过根瘤固氮体系提供自身生长所需80%的氮源<sup>[48]</sup>,固氮过程中蚕豆吸收的阳离子多于阴离子,根系在释放 $H^+$ 后造成的土壤酸化环境易于有机磷的活化<sup>[49]</sup>,提高了土壤氮素和磷素水平,而燕麦以1:1混播比例的加入建立了其与蚕豆对土壤养分的种间竞争关系,增加了地上植株对土壤氮素和磷素的消耗,使土壤氮素、磷素在蚕豆+燕麦混播系统低于蚕豆单播单播,这与周娟娟等<sup>[36]</sup>的研究结果类似。饲料油菜与燕麦生长在一起时,可能种间协同作用大于竞争作用,对土壤氮素、磷素的消耗量较单播少,表现为产草量高、土壤养分有效积累的混播优势,这与马乃娇<sup>[50]</sup>、王旺年等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。这种混播草地土壤养分变化的现象,除了与混播草种间的竞争或协同关系有关外,还涉及混播比例、植物密度等<sup>[51]</sup>,还需更进一步深入研究。综合以上研究结果来看,在青海高寒地区,蚕豆单播更有利于土壤

养分积累,尤其是‘2005-00’蚕豆更具优势。

### 3.3 不同饲草品种单播和混播处理综合评价

选择适宜的饲草草种及种植方式是高寒地区栽培草地建植的基础,在综合评价不同饲草草种及种植方式的优劣性时,要同时关注饲草的生产性能、营养品质、经济效益及饲草种植对土壤的影响等因素。TOPSIS法可以根据多项指标,充分利用原始数据客观地对多个方案进行综合比较分析,对样本及指标数量无严格限制,是农业生产中广泛应用的多指标综合评估方法<sup>[52-55]</sup>。本研究采用TOPSIS综合评价模型对单播和混播种植方式下饲草的生产性能等16个指标进行综合评价,结果表明‘2005-00’蚕豆单播,‘青海13号’蚕豆单播综合表现最优,兼顾了生产性能、经济效益、营养品质、土壤养分积累。随机森林对影响饲草RFV的土壤因子重要性排序分析结果表明,饲草单播时土壤有机质、总磷和总氮对RFV影响较大,混播时土壤速效养分铵态氮、硝态氮和速效磷对RFV影响较大。

## 4 结论

本研究将来自华中地区的‘华油杂62’油菜、‘饲油2号’油菜和青海当地的‘青海13号’蚕豆、‘2005-00’蚕豆在青海高寒地区进行单播及与燕麦混播种植以用作饲草,各参试蚕豆与油菜在单播及混播种植方式下均生长良好,具有在该地区用作一年生栽培草地建植草种的潜力,但在生产性能、营养品质等方面存在差异,混播饲草干草产量高于单播饲草,粗蛋白、粗灰分、中性洗涤纤维含量低于单播饲草,其中‘青海13号’蚕豆、‘2005-00’蚕豆单播饲草粗蛋白含量远高于其他单播、混播饲草,且‘青海13号’蚕豆、‘2005-00’蚕豆单播更有利于土壤0—30 cm土层土壤养分积累;‘青海13号’蚕豆+燕麦、‘2005-00’蚕豆+燕麦混播饲草净经济效益最高。利用TOPSIS综合评价模型对4种饲草单播及分别与燕麦混播方式进行综合效益分析,发现‘2005-00’蚕豆单播的综合表现最优,‘青海13号’蚕豆单播次之,可进一步深入试验进行推广种植;随机森林分析结果表明,蚕豆单播推广种植时,在土壤施肥方面应注重土壤有机质、总磷、总氮的施用,即施用有机肥更有利于蚕豆相对饲用价值的提升。

## 参考文献 References:

- [1] WANG Y, REN Z, MA P P, WANG Z M, NIU D C, FU H, ELSER J J. Effects of grassland degradation on ecological stoichiometry of soil ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of The Total Environment*, 2020, 722: 137910.
- [2] 赵亮, 李奇, 赵新全. 三江源草地多功能性及其调控途径. *资源科学*, 2020, 42(1): 78-86.  
ZHAO L, LI Q, ZHAO X Q. Multi-functionality and management of grassland in the Sanjiangyuan region. *Resources Science*, 2020, 42(1): 78-86.
- [3] GANG C C, ZHOU W, CHEN Y Z, WANG Z Q, SUN Z G, LI J L, QI J G, ODEH I. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [4] LIU Y Y, WANG Q, ZHANG Z Y, TONG L J, WANG Z Q, LI J L. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013. *Science of The Total Environment*, 2019, 690: 27-39.
- [5] WEI D, QI Y H, MA Y M, WANG X F, MA W Q, GAO T G, HUANG L, ZHAO H, ZHANG J X, WANG X D. Plant uptake of CO<sub>2</sub> outpaces losses from permafrost and plant respiration on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(33): e2015283118.
- [6] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.  
FU B J, OUYANG Z Y, SHI P, FAN J, WANG X D, ZHENG H, ZHAO W W, WU F. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [7] ZHOU W, LI J L, YUE T X. Remote Sensing Monitoring and Evaluation of Degraded Grassland in China: Accounting of Grassland Carbon Source and Carbon Sink. Singapore: Springer Singapore, 2020: 1-16.
- [8] WEN L, DONG S K, LI Y Y, WANG X X, LI X Y, SHI J J, DONG Q M. The impact of land degradation on the C pools in alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau. *Plant and Soil*, 2013, 368(1): 329-340.
- [9] 徐田伟, 赵新全, 张晓玲, 王循刚, 耿远月, 胡林勇, 赵娜, 毛绍娟, 刘宏金, 康生萍, 马力, 韩学平, 贾功雪, 赵亮, 董全民, 柴沙驼, 徐世晓. 青藏高原高寒地区生态草牧业可持续发展: 原理、技术与实践. *生态学报*, 2020, 40(18): 6324-6337.  
XU T W, ZHAO X Q, ZHANG X L, WANG X G, GENG Y Y, HU L Y, ZHAO N, MAO S J, LIU H J, KANG S P, MA L, HAN X P, JIA G X, ZHAO L, DONG Q M, CHAI S T, XU S X. Sustainable development of ecological grass-based livestock husbandry and Qinghai-Tibet Plateau alpine area: Principle, technology and practice. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6324-6337.
- [10] 方精云, 潘庆民, 高树琴, 景海春, 张文浩. “以小保大”原理: 用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复. *草业科学*, 2016, 33(10): 1913-1916.  
FANG J Y, PAN Q M, GAO S Q, JING H C, ZHANG W H. “Small vs. large area” principle: Protecting and restoring a large area of natural grassland by establishing a small area of cultivated pasture. *Pratacultural Science*, 2016, 33(10): 1913-1916.
- [11] 高树琴, 段瑞, 王弘晟, 李昂, 石岳, 景海春, 方精云. 北方农牧交错带在保障国家大粮食安全中发挥重要作用. *中国科学院院刊*, 2021, 36(6): 643-651.  
GAO S Q, DUAN R, WANG H S, LI A, SHI Y, JING H C, FANG J Y. Farming-pastoral ecotone of northern China plays important role in ensuring national food security. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(6): 643-651.
- [12] SHANG Z H, DEGEN A A, RAFIQ M K, SQUIRES V R. Carbon Management for Promoting Local Livelihood in the Hindu Kush Himalayan (Hkh) Region. Cham: Springer International Publishing, 2020: 211-228.
- [13] 田莉华, 周青平, 王加亭, 陈有军, 陈仕勇, 魏新春, 麦贤敏, 郑洲. 青藏高原草地畜牧业生产现状、问题及对策. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(2): 119-126.  
TIAN L H, ZHOU Q P, WANG J T, CHEN Y J, CHEN S Y, WEI X C, MAI X M, ZHENG Z. Situation, issues and solutions of the grassland animal husbandry of Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016, 42(2): 119-126.
- [14] 荀文龙, 李平, 张建波, 王婷, 马啸, 周俗, 白史且, 师尚礼. 多花黑麦草 + 箭筈豌豆混播草地上生物量和营养品质动态研究. *草地学报*, 2019, 27(2): 473-481.  
GOU W L, LI P, ZHANG J B, WANG T, MA X, ZHOU S, BAI S Q, SHI S L. Studies on the dynamics of above-ground biomass and nutritive value of annual ryegrass and common vetch mixtures. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(2): 473-481.

- [15] 汪波, 宋丽君, 王宗凯, 王积军, 熊明清, 甘丽, 刘芳, 张哲, 蒯婕, 傅廷栋, 周广生. 我国饲料油菜种植及应用技术研究进展. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 695-701.  
WANG B, SONG L J, WANG Z K, WANG J J, XIONG M Q, GAN L, LIU F, ZHANG Z, KUAI J, FU T D, ZHOU G S. Production and feeding technology of fodder-rapeseed in China. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 695-701.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 50-120.  
BAO S D. Analysis of Soil and Agricultural Chemistry (3rd Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 50-120.
- [17] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用: 以云南松分布模拟为例. 生态学报, 2014, 34(3): 650-659.  
ZHANG L, WANG L L, ZHANG X D, LIU S R, SUN P S, WANG T L. The basic principle of random forest and its applications in ecology: A case study of *Pinus yunnanensis*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 650-659.
- [18] 常晓敏, 余新晓, 贾国栋, 孙立博, 刘自强, 杨照国, 闫腾飞. 基于随机森林的不同径级树木死亡影响因子研究. 生态学报, 2019, 39(21): 8003-8009.  
CHANG X M, YU X X, JIA G D, SUN L B, LIU Z Q, YANG Z G, YAN T F. Influence factors of tree mortality in different size classes based on random forest. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 8003-8009.
- [19] 陈本学, 李雁冰, 范少辉, 刘广路, 申景昕. 海南甘什岭白藤土壤种子库特征及幼苗更新能力. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1091-1100.  
CHEN B X, LI Y B, FAN S H, LIU G L, SHEN J X. Seed bank and seedling regeneration of *Calamus tetradactylus* in Ganzhaling, Hainan Province. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1091-1100.
- [20] HUSSE S, HUGUENIN-ELIE O, BUCHMANN N, LÜSCHER A. Larger yields of mixtures than monocultures of cultivated grassland species match with asynchrony in shoot growth among species but not with increased light interception. *Field Crops Research*, 2016, 194: 1-11.
- [21] FINN J A, KIRWAN L, CONNOLLY J, SEBASTIÀ M T, HELGADOTTIR A, BAADSHAUG O H, BÉLANGER G, BLACK A, BROPHY C, COLLINS R P, ČOP J, DALMANNSDÓTTIR S, DELGADO I, ELGERSMA A, FOTHERGILL M, FRANKOW-LINDBERG B E, GHESQUIERE A, GOLINSKA B, GOLINSKI P, GRIEU P, GUSTAVSSON A M, HÖGLIND M, GUGUENIN-ELIE O, JØRGENSEN M, KADZIULIENE Z, KURKI P, LLURBA R, LUNNAN T, PORQUEDDU C, SUTER M, THUM U, LÜSCHER A. Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: A 3-year continental-scale field experiment. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(2): 365-375.
- [22] DEV I, RAM A, RADOTRA S, MISRI B K, SAREEN S, KUMAR P, SINGH D, KUMAR S, KUMAR N, SINGH R. Cereal clover bi-cropping for sustainable forage production in the Himalayan region. *European Journal of Agronomy*, 2021, 130: 126354.
- [23] NÖLKE I, KOMAINDA M, TONN B, FEUERSTEIN U, ISSELSTEIN J. Including chicory and selecting white clover varieties as strategies to improve temporal stability of forage yield and quality in white-clover-based temporary grassland. *European Journal of Agronomy*, 2021, 130: 126362.
- [24] 马妍琪. 高寒地区一年生禾本科-豆科人工草地混播模式及产量形成机制研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2019: 22-23.  
MA Y Q. Study on mixed sowing mode of annual grass-legume artificial grassland and yield formation mechanism in alpine region. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 22-23.
- [25] 袁英良, 唐丹, 鲁英, 冉桂霞, 郭艳芹. 吉林地区麦后复种饲用油菜与燕麦混播效应研究. *草业学报*, 2021, 30(7): 167-178.  
YUAN Y L, TANG D, LU Y, RAN G X, GUO Y Q. An investigation of multiple crop planting options when following wheat with mixed-cropped forage rape and oats in the Jilin area of northeast China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(7): 167-178.
- [26] MALÉZIEUX E, CROZAT Y, DUPRAZ C, LAURANS M, MAKOWSKI D, OZIER-LAFONTAINE H, RAPIDEL B, TOURDONNET S D, VALANTIN-MORISON M. Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and model. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 43-62.
- [27] NYFELER D, HUGUENIN-ELIE O, SUTER M, FROSSARD E, LÜSCHER A. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1): 155-163.
- [28] DELÉGLISE C, MEISSER M, MOSIMANN E, SPIEGELBERGER T, SIGNARBIEUX C, JEANGROS B, BUTTLER A.

- Drought-induced shifts in plants traits, yields and nutritive value under realistic grazing and mowing managements in a mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 213: 94-104.
- [29] 魏正业, 张海星, 石薇, 常生华, 张程, 贾倩民, 侯扶江. 种植方式与施氮对西北旱区饲草作物产量、品质和水分利用的影响. *作物学报*, 2022(10): 2638-2653.
- WEI Z Y, ZHANG H X, SHI W, CHANG S H, ZHANG C, JIA Q M, HOU F J. Effects of planting methods and nitrogen application on forage crop yield, quality and water use in arid area of Northwest China. *Acta Agronomica Sinica*, 2022(10): 2638-2653.
- [30] HAMACHER M, MALISCH C S, REINSCH T, TAUBE F, LOGES R. Evaluation of yield formation and nutritive value of forage legumes and herbs with potential for diverse grasslands due to their concentration in plant specialized metabolites. *European Journal of Agronomy*, 2021, 128: 126307.
- [31] 杨得玉, 郝力壮, 刘书杰, 牛建章. 青海省反刍动物常用粗饲料营养价值研究进展. *饲料工业*, 2018, 39(1): 20-23.
- YANG D Y, HAO L Z, LIU S J, NIU J Z. The research progress of nutritive value of ruminant animal's common forage in Qinghai Province. *Feed Industry*, 2018, 39(1): 20-23.
- [32] 杨祁峰, 滕怀渊, 牛菊兰, 梁智, 吕经邦, 毛应诚. 饲用双低油菜华协1号营养成分含量动态及营养价值研究. *草业学报*, 2003(2): 87-92.
- YANG Q F, TENG H Y, NIU J L, LIANG Z, LYU J B, MAO Y C. Studies on nutrient content dynamics and nutritive value of Huaxie 1 forage rape. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003(2): 87-92.
- [33] 黄洁, 王超, 闫景彩, 祝贺, 邢艳霞, 祝远魁, 陈思宇, 陈东. 蚕豆的饲用现状和饲用改良技术发展趋势. *饲料工业*, 2017, 38(10): 60-64.
- HUANG J, WANG C, YAN J C, ZHU H, XING Y X, ZHU Y K, CHEN S Y, CHEN D. Status and trend of broad bean for feed stuff. *Feed Industry*, 2017, 38(10): 60-64.
- [34] LITHOURGIDIS A S, VASILAKOGLU I B, DHIMA K V, DORDAS C A, YIAKOULAKI M D. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 2006, 99(2): 106-113.
- [35] BARRY T N. The feeding value of forage brassica plants for grazing ruminant livestock. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 181(1): 15-25.
- [36] 周娟娟, 白玛嘎翁, 魏巍, 德科加. 西藏高寒区禾—豆混播对牧草营养品质及土壤养分的影响. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2): 143-149.
- ZHOU J J, Baimagaweng, WEI W, Dekeja. The effects of grass-legume mixing farming on forage nutritional quality and soil nutrient in alpine zone of Tibet. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 143-149.
- [37] 王旺年, 王宗凯, 汪波, 郭安国, 杨华, 刘芳, 蒯婕, 傅廷栋, 周广生. 饲料油菜与牧草混合冬播效应研究. *中国油料作物学报*, 2019, 41(3): 317-323.
- WANG W N, WANG Z K, WANG B, GUO A G, YANG H, LIU F, KUAI J, FU T D, ZHOU G S. Benefits of mixed cropping of forage rapeseed with other forage crops. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(3): 317-323.
- [38] 汪精海, 李广, 银敏华, 齐广平, 康燕霞, 马彦麟. 调亏灌溉对高寒荒漠区人工混播草地土壤环境与牧草生长的影响. *草业学报*, 2022, 31(1): 95-106.
- WANG J H, LI G, YIN M H, QI G P, KANG Y X, MA Y L. Effects of regulated deficit irrigation on the soil environment and forage growth of mixed-species forage plantings in China's high-cold desert area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 95-106.
- [39] 李学博. 饲用油菜高粱混播结合施肥对饲草产质量及土壤特性的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2020: 22-28.
- LI X B. Effects of mixed sowing and fertilization of forage rapeseed and sorghum on forage yield, quality and soil properties. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020: 22-28.
- [40] 陈杨. 种间相互作用对大豆、蚕豆和小麦根系形态的影响. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2005: 8.
- CHEN Y. Effect on interspecific interaction on root morphology of soybean, faba bean and wheat. Master Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2005: 8.
- [41] DOWLING A, O SADRAS V, ROBERTS P, DOOLETTE A, ZHOU Y, DENTON M D. Legume-oilseed intercropping in mechanised broadacre agriculture: A review. *Field Crops Research*, 2021, 260: 107980.



- [42] 牛书丽, 蒋高明. 豆科植物在中国草原生态系统中的地位及其生理生态研究. 植物学通报, 2004(1): 9-18.  
NIU S L, JIANG G M. The importance of legume in China grassland ecosystem and the advances in physiology and ecology studies. Chinese Bulletin of Botany, 2004(1): 9-18.
- [43] 赵雯, 黄来明. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素. 生态学报, 2022, 42(11): 4415-4427.  
ZHAO W, HUANG L M. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4415-4427.
- [44] 郭肖. 不同油菜品种氮素利用效率差异生理机制. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2021: 48-54.  
GUO X. Mechanical understanding of nitrogen utilization efficiency in different genotypes of oilseed rape (*Brassica napus* L.). PhD Thesis. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2021: 48-54.
- [45] QIANG L, YU P J, LI G D, ZHOU D W. Grass—legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157: 23-31.
- [46] HURISSE T T, NORTON J B, NORTON U. Soil profile carbon and nitrogen in prairie, perennial grass Grass—legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 181: 179-187.
- [47] 谢开云, 赵云, 李向林, 何峰, 万里强, 王丹, 韩冬梅. 豆—禾混播草地种间关系研究进展. 草业学报, 2013, 22(3): 284-296.  
XIE K Y, ZHAO Y, LI X L, HE F, WAN L Q, WANG D, HAN D M. Grass—legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(3): 284-296.
- [48] HARDARSON G, ATKINS C A. Optimising biological N<sub>2</sub> fixation by legumes in farming systems. *Plant and Soil*, 2003, 252(1): 41-54.
- [49] TANG C, DREVON J J, JAILLARD B, SOUCHE G, HINSINGER P. Proton release of two genotypes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by N nutrition and P deficiency. *Plant and Soil*, 2004, 260(1): 59-68.
- [50] 马乃娇. 盐碱地油菜燕麦混播结合施肥对饲草产量和土壤性状的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2019: 14-17.  
MA N J. Effect of mixed sowing and application of rapeseed and oat on forage yield and soil characters in saline-alkali soil. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019: 14-17.
- [51] VOGELER I, HANSEN E M, THOMSEN I K, ØSTERGAARD H S. Legumes in catch crop mixtures: effects on nitrogen retention and availability, and leaching losses. *Journal of Environmental Management*, 2019, 239: 324-332.
- [52] 张子龙, 孙萌, 李凯明, 侯俊玲, 王文全. 基于TOPSIS-RSR法的三七连作障碍消减效应综合评价. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 713-724.  
ZHANG Z L, SUN M, LI K M, HOU J L, WANG W Q. Comprehensive evaluation of reduced obstacles of continuous cropping of *Panax notoginseng* using TOPSIS-RSR analysis. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 713-724.
- [53] 孙鑫, 张富仓, 杨玲, 张少辉, 王海东, 强生才, 郭金金. 基于熵权法和TOPSIS法优化马铃薯钾肥种类和滴灌量组合. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 279-290.  
SUN X, ZHANG F C, YANG L, ZHANG S H, WANG H D, QIANG S C, GUO J J. Optimal combination of potassium fertilizer and drip irrigation for potato production based on entropy weight method and TOPSIS analysis. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(2): 279-290.
- [54] 肖燕子, 辛晓平, 徐丽君, 孙林, 王伟, 周天荣, 乌仁其其格. 呼伦贝尔地区不同添加剂对燕麦青贮品质的影响. 草业科学, 2022, 39(7): 1487-1493.  
XIAO Y Z, XIN X P, XU L J, SUN L, WANG W, ZHOU T R, Wurenqiqige. Effect of different additives on the quality of oat silage in Hulunbuir area. Pratacultural Science, 2022, 39(7): 1487-1493.
- [55] MOFIDI CHELAN M, ALIJANPOUR A, BARANI H, MOTAMEDDI J, AZADI H, VAN PASSEL S. Economic sustainability assessment in semi-steppe rangelands. *Science of The Total Environment*, 2018, 637-638: 112-119.

(责任编辑 王芳)