

云南亚热带地区常见蛋白饲用植物营养价值综合评价

胡廷花¹, 钟绍丽¹, 雷风雨², 韩学琴³, 赵琼玲³, 刘 昀¹, 刘彦培¹, 何志邦^{1,4},
薛世明^{1,4}, 张美艳^{1,4*}

1. 云南省草地动物科学研究院, 云南昆明 650212; 2. 盈江县农业农村局畜牧站, 云南德宏 679300; 3. 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南元谋 651300; 4. 云南农业大学动物科学技术学院, 云南昆明 650201

摘 要: 云南良好的气候资源孕育了丰富多样的植物资源, 为当地草食畜牧业发展提供了多种多样的饲草来源, 但绝大多数植物资源未得到很好的挖掘利用, 这不仅严重制约了草食畜牧业的发展, 还造成饲料粮的高消耗。因此, 挖掘饲用价值高的蛋白饲用植物, 对云南省草食畜牧业的绿色健康发展具有重要意义。本研究对云南亚热带地区采集的 25 种常见蛋白饲用植物的粗蛋白、粗纤维、中性洗涤纤维、钙、磷等 16 个营养指标进行测定, 并采用灰色关联度分析法对其营养价值进行综合评价。结果表明: (1) 供试植物粗蛋白含量为 11.03%~21.73%, 其中, 海法白三叶、扁豆、紫花苜蓿、白刺花、紫穗槐、刺槐 6 种植物粗蛋白含量在 20% 以上, 具较好的蛋白饲料潜力; 其余 19 种植物如杂交构树、银合欢等粗蛋白含量为 11.03%~18.69%, 具备蛋白饲料的基本条件。(2) 通过综合评价, 营养价值为优良的植物有 15 种, 前 4 名为扁豆、海法白三叶、杂交构树和圭亚那柱花草, 这些植物具较大开发利用价值; 评价为中等的 10 种植物中, 白刺花、刺槐的粗蛋白含量大于 20%, 蔓草虫豆、木豆、刺槐、白刺花、须弥葛、截叶铁扫帚的 Fe、Cu、Zn、Se 等微量元素含量明显优于玉米。在今后的开发应用中, 应充分发挥蛋白饲草自身的营养特性, 与其他饲料配合使用, 以满足家畜的均衡营养需求, 实现豆粕减量替代和草食畜健康养殖的节本增效。

关键词: 亚热带地区; 蛋白饲用植物; 粗蛋白; 营养价值评价; 灰色关联度分析

中图分类号: S816 文献标志码: A

Comprehensive Evaluation of the Nutritional Value of Common Protein Feeding Plants in Subtropical Area of Yunnan Province

HU Tinghua¹, ZHONG Shaoli¹, LEI Fengyu², HAN Xueqin³, ZHAO Qionglings³, LIU Yun¹, LIU Yanpei¹,
HE Zhibang^{1,4}, XUE Shimings^{1,4}, ZHANG Meiyans^{1,4*}

1. Yunnan Academy of Grassland and Animal Science, Kunming, Yunnan 650212, China; 2. Animal Husbandry Stationin of Yingjiang County, Dehong, Yunnan 679300, China; 3. Institute of Tropical Eco-agricultural, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan 651300, China; 4. Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: The favorable climatic resources in Yunnan Province have nurtured the rich and diverse plant resources, providing various sources of forage for the development of local herbivorous animal husbandry. Yet, the vast majority of the plant resources has not been well excavated and utilized, which not only severely restricts the development of herbivorous animal husbandry, but also leads to high consumption of feed grains. Consequently, exploring protein-rich plants with high feeding value is of great significance for the green and healthy development of herbivorous animal husbandry in Yunnan Province. This study measured 16 nutritional indicators, including crude protein, crude fiber, neutral detergent fiber, calcium and phosphorus of 25 common protein forages collected from the subtropical areas of Yun-

收稿日期 2025-04-01; 接受日期 2025-05-07

基金项目 国家牧草产业技术体系德宏综合试验站建设专项(No. CARS-34-52); 云南省科技厅农业联合专项——面上项目(No. 202301BD070001-096); 云南省芒市畜牧站薛世明专家基层科研工作站项目。

作者简介 胡廷花(1997—), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 草地生态学、牧草栽培与管理利用。*通信作者(Corresponding author): 张美艳(ZHANG Meiyans), E-mail: zhangmeiyans1220@163.com。

nan Province. The nutritional values of the plants were comprehensively evaluated using grey correlation analysis. The crude protein content of the tested plants varied from 11.03% to 21.73%, among which the crude protein content of 6 plants, including *Trifolium repens* L. cv. Haifa, *Lablab purpureus*, *Medicago sativa*, *Sophora davidii*, *Amorpha fruticosa* and *Robinia pseudoacacia* was above 20%, suggesting good protein for rotein feed. The crude protein content of the remaining 19 plants, such as *Broussonetia papyrifera* and *Leucaena leucocephala*, ranged from 11.03% to 18.69%, meeting the basic requirements for the protein feed. According to the comprehensive evaluation, there were 15 plants with excellent nutritional value, among which the top 4 were *L. purpureus*, *T. repens* L. cv. Haifa, *B. papyrifera* and *Stylosanthes guianensis*, which have significant development and utilization value. Among the 10 plants evaluated as moderate, the crude protein content of *S. davidii* and *R. pseudoacacia* exceeded 20%, while the trace element content of Fe, Cu, Zn, and Se in *Cajanus scarabaeoides*, *C. cajan*, *R. pseudoacacia*, *S. davidii*, *Haymondia wallichii* and *Lespedeza cuneata* demonstrated significantly higher levels than that of corn. In the future development and application, the nutritional characteristics of protein-rich forages should be fully utilized, and it should be used in combination with the other feeds to meet the balanced nutritional needs of livestock, achieve cost saving and efficiency improvement by reducing soybean meal reduction and promoting healthy breeding of herbivorous livestock.

Keywords: subtropical area; protein feed plants; crude protein; evaluation of nutritional value; grey correlation analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.021

牧草产业作为国家现代农业的重要组成部分,在保障草食畜产品有效供给,维护国家粮食安全上发挥了重要作用。近年来,我国对动物性食物的消费大量增加,人均谷物消费相对减少,食物结构发生了革命性改变^[1],极大地推动了我国草食畜牧业快速发展。然而,我国饲草料资源严重短缺,蛋白质饲草料自给率不足 50%,能量饲料供应极其脆弱,饲草料资源短缺不仅威胁着饲料安全,还严重威胁着粮食安全^[2-3]。为保障粮食和重要农产品稳定安全供给,2023 年农业农村部发布的《饲用豆粕减量替代三年行动方案》要求减少豆粕用量,促进饲料粮节约降耗,并对蛋白饲料资源开发利用及优质饲草供给提出了新目标。

云南省是草食畜牧业大省,是我国南方亚热带地区重要的肉牛生产基地和高端牛肉供应基地,有饲用植物 3200 多种^[4],2024 年全省畜牧业产值 1869.18 亿元。但省内饲草产业起步较晚,蛋白饲草料自给能力不足已成为制约当地草食畜牧业发展的瓶颈之一。蛋白饲用植物作为优质蛋白饲料来源,在调节饲草平衡供应、促进肉牛产业发展中发挥着重要作用^[5],其开发利用可有效缓解当地饲草料供给不足及饲料粮消耗过高的问题,这在一定程度上成为草食畜牧业发展的关键。因此,引种、驯化、栽培和利用营养价值优越的蛋白饲用植物对云南省草食畜牧业的高速发展至关重要。

众多学者对各类蛋白饲草植物、常见饲用灌木等植物中的营养成分进行了分析^[6-8],指标较为

全面,具有一定参考性。但依旧存在研究区非亚热带地区、指标差异较大、测定的饲草所处生长期不同等问题,其他区域的饲用植物评价结果无法直接作为云南省亚热带地区蛋白饲用植物引种、驯化、栽培、利用的依据。因此,本研究在云南省亚热带地区采集了 3 科 20 属 25 种常见蛋白饲用植物,对其进行营养成分测定,并采用灰色关联度分析法对其饲用品质进行综合评价,以筛选出适合引种栽培的优良蛋白饲用植物品种,以为亚热带地区优良蛋白饲用植物引种、驯化、栽培、质量评价和开发利用等提供更为精确的数据支撑和理论基础。

1 材料与方法

1.1 自然概况

云南省气候基本属于亚热带高原季风型,立体气候特点显著,一个省区内同时具有寒、温、热(包括亚热带)三带气候。年温差小,一般只有 10~12℃,全省最热(7 月)月平均气温在 20~23℃之间,最冷(1 月)月平均气温在 7~11℃之间;日温差大,可达 12~20℃。干湿季节分明,湿季(雨季)为 5—10 月,集中了 85%的降水量;干季(旱季)为当年 11 月至次年 4 月,降水量只占全年的 15%。气温随地势高低垂直变化异常明显,一般海拔高度每上升 100 m,气温平均递降 0.6~0.7℃。全省降水地域分布差异大,最多的地方年降水量超过 2300 mm,最少的仅有 547 mm,大部分地区年降水量在 900 mm 以上。全省无霜

期长，南部边境全年无霜，偏南地区无霜期超过 300 d，中部地区无霜期约为 250 d，比较寒冷的滇西北和滇东北高海拔地区少于 200 d。

1.2 供试材料采集情况

于 2021 年 3—9 月在云南亚热带地区采集蛋白饲用植物 25 种，每种采集鲜物质 1000 g，带回实验室烘干后测定营养指标。采集地概况见表 1，物种名称及采集部位见表 2。

1.3 营养指标测定和计算方法

干物质（dry matter, DM）含量采用烘干法测定；粗蛋白质（crude protein, CP）含量由公式 $CP=6.25 \times N(\%)$ 计算，式中，N 含量采用凯氏定氮法测定；粗脂肪（crude fat ether extract, EE）含量采用 ANKOMXT10i 型自动脂肪分析仪滤袋

提取法测定；中性洗涤纤维（neutral detergent fibre, NDF）和酸性洗涤纤维（acid detergent fiber, ADF）含量采用范氏（van soest）洗涤纤维分析法；粗灰分（crude ash, Ash）含量采用 600 ℃高温灼烧法测定；钙（Ca）、钠（Na）、钾（K）、铁（Fe）、铜（Cu）、锌（Zn）、镁（Mg）、硒（Se）含量采用原子吸收光谱法测定；磷（P）含量采用钼锑抗比色法测定。具体分析方法及饲料质量检测技术》^[9]。

相对饲喂价值（RFV）计算公式为： $RFV=(DMI \times DDM)/1.29$ 。式中，DMI 为粗饲料干物质的随意采食量，DDM 为可消化的干物质百分比。DMI 和 DDM 预测模型为： $DMI=120/NDF$ ； $DDM=88.9-0.779ADF$ 。

表 1 采集地概况
Tab. 1 Overview of sampling site

采样地 Sampling site	地理坐标 Geographical coordinates	海拔 Altitude/m	降水量 Amount of precipitation/mm	气候带 Climatic zone
曲靖市马鸣	25°18'46"N, 103°21'13"E	1984.30	927.1	北亚热带地区北缘
昆明市小哨	25°10'27"N, 102°58'53"E	1991.00	1000.0	北亚热带地区
楚雄州元谋县	25°51'2.8"N, 101°49'24"E	1115.86	637.5	南亚热带地区
德宏州盈江县	24°44'32"N, 97°56'51"E	825.10	1552.0	南亚热带地区

1.4 灰色关联度分析与营养价值综合评价

1.4.1 建立参考品种 X_0 采用灰色关联度分析法^[10]，将所有参试品种作为一个灰色系统，每个品种则为系统中的一个因素。建立 X_0 为参考品种的理想数列，参试品种的各项性状指标构成比较数列，记为 X_i （ $i=1, 2, 3 \cdots 25$ ），各项性状指标用 k 表示（ $k=1, 2, 3 \cdots 16$ ）。“参考品种”中各正向指标均高于参试品种各项生产性能指标最高的 5%；逆向指标（NDF、ADF）均低于参试品种各项生产性能指标最低的 5%。

1.4.2 数据无量纲化处理 各项指标量纲不同，需要对每项指标进行无量纲化处理，将其转化为评价数据，介于 0~1 之间。正向指标为 $x_i=X_i(k)/X_0(k)$ ，逆向指标（NDF、ADF）为 $x_i=X_0(k)/X_i(k)$ ，参考品种为 $x_0=X_0(k)/X_0(k)$ （即均为 1）。

1.4.3 计算关联系数 根据公式 $\Delta_i(k)=|x_0(k)-x_i(k)|$ 算出参考品种数列与比较数列的绝对差值。根据关联系数计算公式：

$$\varepsilon_i(k)=\frac{\min \min |\Delta_i(k)|+\rho \max \max |\Delta_i(k)|}{|\Delta_i(k)|+\rho \max \max |\Delta_i(k)|} \quad (1)$$

其中， $\min |\Delta_i(k)|$ 是一级最小差，即在 $|\Delta_i(k)|$ 中按 k 值选择的最小值， $\min \min |\Delta_i(k)|$ 即 i 在 k 点上的二级最小差； $\max |\Delta_i(k)|$ 是一级最大差，即在 $|\Delta_i(k)|$ 中按 k 值选择的最大值， $\max \max |\Delta_i(k)|$ 即 i 在 k 点上的二级最大差； ρ 为分辨系数，取值范围 0~1，这里取 $\rho=0.5$ 。

1.4.4 计算关联度 用各性状指标关联度系数的平均值作为参试品种与参考品种关联程度的量度。即

$$\gamma_i=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (2)$$

根据 γ_i 的大小来判断参试品种的优劣， γ_i 越大，则说明与“参考品种”相似度越高， γ_i 越小，则说明相似度越低。

1.4.5 营养价值综合评价 参考侯留飞等^[10]对关联度的等级划分，本研究根据关联度将 25 个参试品种的营养价值划分为 4 个等级： $\gamma_i \geq 0.80$ ，营养价值为优； $0.60 \leq \gamma_i < 0.80$ ，营养价值为良； $0.40 \leq \gamma_i < 0.60$ ，营养价值为中； $\gamma_i < 0.40$ 营养价值为差。

表 2 供试饲用植物名称及采集部位
Tab. 2 Name and sampling part of test feed plants

科 Family	属 Genus	种 Species	编号 No.	茎形态学特征 Morphological characteristics of stems	生育期 Growth period	取样部位 Sampling part	采样来源 Sampling source	采集时间 Sampling time
豆科 Legumi- nosae	苦参属 <i>Sophora</i>	白刺花 <i>S. davidii</i>	X ₁	灌木	营养期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-23
	黄芪属 <i>Astragalus</i>	地八角 <i>A. bhotanensis</i>	X ₂	草本	开花期	全株	昆明小哨基地	2021-08-12
	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	截叶铁扫帚 <i>L. cuneata</i>	X ₃	灌木	盛花期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-24
	紫穗槐属 <i>Amorpha</i>	紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	X ₄	灌木	开花期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-23
	刺槐属 <i>Robinia</i>	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	X ₅	乔木	营养期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-23
	须弥葛属 <i>Haymondia</i>	须弥葛 <i>H. wallichii</i>	X ₆	藤本	营养期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-23
	木蓝属 <i>Indigofera</i>	多花木蓝 <i>I. amblyantha</i>	X ₇	灌木	开花期	嫩枝叶	昆明小哨基地	2021-08-12
	山蚂蝗属 <i>Desmodium</i>	波叶山蚂蝗 <i>D. Sequax</i>	X ₈	灌木	结荚初期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-23
		绿叶山蚂蝗 <i>D. intortum</i>	X ₉	草本	营养期	叶片	昆明小哨基地	2021-08-10
	苜蓿属 <i>Medicago</i>	紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>	X ₁₀	草本	营养期	全株	曲靖马鸣基地	2021-08-25
	车轴草属 <i>Trifolium</i>	白三叶 <i>T. repens</i>	X ₁₁	草本	开花期	全株	曲靖马鸣基地	2021-08-25
		红三叶 <i>T. pratense</i>	X ₁₂	草本	开花期	全株	曲靖马鸣基地	2021-08-25
		海法白三叶 <i>T. repens</i> L.cv.Haifa	X ₁₃	草本	盛花期	全株	曲靖马鸣基地	2021-09-02
	柱花草属 <i>Stylosanthes</i>	柱花草 <i>S. gracilis</i>	X ₁₄	草本/半灌木	开花期	全株	楚雄市元谋县	2021-08-26
		圭亚那柱花草 <i>S. guianensis</i>	X ₁₅	草本	开花期	全株	德宏州盈江县	2021-09-02
	大豆属 <i>Glycine</i>	爪哇大豆 <i>G. wightii</i>	X ₁₆	草本	初花期	嫩枝叶	楚雄市元谋县	2021-08-26
	银合欢属 <i>Leucaena</i>	银合欢 <i>L. leucocephala</i>	X ₁₇	灌木	营养期	全株	楚雄市元谋县	2021-03-12
	木豆属 <i>Cajanus</i>	蔓草虫豆 <i>C. scarabaeoides</i>	X ₁₈	藤本	结荚期	嫩枝叶	楚雄市元谋县	2021-08-26
		木豆 <i>C. cajan</i>	X ₁₉	灌木	营养期	全株	楚雄市元谋县	2021-03-12
		大翼豆 <i>M. lathyroides</i>	X ₂₀	草本	初花期	嫩枝叶	楚雄市元谋县	2021-08-26
	落花生属 <i>Arachis</i>	落花生 <i>A. hypogaea</i>	X ₂₁	草本	营养期	全株	德宏州盈江县	2021-08-31
	扁豆属 <i>Lablab</i>	扁豆 <i>L. purpureus</i>	X ₂₂	藤本	营养期	全株	德宏州盈江县	2021-09-02
桑科 Moraceae	桑属 <i>Morus</i>	桑树 <i>M. alba</i>	X ₂₃	乔木/灌木	营养期	叶片	楚雄市元谋县	2021-08-26
	构属 <i>Broussonetia</i>	杂交构树 <i>B. papyrifera</i>	X ₂₄	乔木	营养期	嫩枝叶	曲靖马鸣基地	2021-08-23
辣木科 Morin- gaceae	辣木属 <i>Moringa</i>	辣木 <i>M. oleifera</i>	X ₂₅	乔木	营养期	全株	楚雄市元谋县	2021-07-12

2 结果与分析

2.1 营养成分含量及相对饲喂价值

25 种蛋白饲用植物营养成分及 RFV 中, DM 含量为 64.34%~97.63%, 除落花生 (86.88%) 和大翼豆 (64.34%) 外, 其余 23 种蛋白饲用植物的 DM 含量均在 91% 以上, 最高的是多花木蓝 (表

3)。CP 含量为 11.03% (柱花草) ~21.73% (海法白三叶), 含量为 20% 以上的物种有 6 种, 分别是海法白三叶、扁豆、紫花苜蓿、紫穗槐、白刺花和刺槐。Ash 含量为 4.36% (白刺花) ~13.71% (落花生), 含量在 10% 以上的物种有 6 种。EE 含量最高的是大翼豆 (7.48%), 最低的是圭亚那柱花

草（0.74%）。NDF 含量最高的是绿叶山蚂蝗（70.11%），最低的是扁豆（45.98%）。ADF 含量最高的是柱花草（58.4%），最低的是扁豆（36.86%）。RFV 中，仅扁豆、海法白三叶、地八角、银合欢和桑树的值在 100%以上，最高的是扁豆(121.76%)，最低的是绿叶山蚂蝗(59.63%)。

表 3 25 种蛋白饲用植物的营养成分及相对饲喂价值
Tab. 3 Nutritional components and relative feeding value of 25 protein feed plants

编号 No.	种 Species	DM/%	CP/%	Ash/%	EE/%	NDF/%	ADF/%	RFV
X ₁	白刺花	97.27	20.56	4.36	3.25	61.38	51.31	74.16
X ₂	地八角	95.63	15.32	7.05	2.47	48.40	37.35	114.94
X ₃	截叶铁扫帚	97.60	11.39	4.89	3.22	54.58	52.20	82.22
X ₄	紫穗槐	97.50	20.69	6.45	3.60	60.92	47.89	78.79
X ₅	刺槐	97.34	20.48	5.88	3.41	56.71	50.19	81.69
X ₆	须弥葛	93.50	17.68	6.92	2.78	60.52	55.80	69.84
X ₇	多花木蓝	97.63	13.14	6.53	4.15	61.00	57.50	67.27
X ₈	波叶山蚂蝗	97.50	18.04	6.76	3.51	63.65	50.42	72.52
X ₉	绿叶山蚂蝗	96.50	17.01	6.74	3.16	70.11	56.43	59.63
X ₁₀	紫花苜蓿	97.00	21.02	8.60	2.84	58.60	55.05	73.06
X ₁₁	白三叶	96.50	17.89	10.43	4.43	60.34	55.06	70.92
X ₁₂	红三叶	96.50	14.33	8.18	5.83	59.45	51.97	75.76
X ₁₃	海法白三叶	95.00	21.73	8.33	4.99	47.92	37.68	115.59
X ₁₄	柱花草	96.40	11.03	7.47	3.07	66.23	58.40	60.97
X ₁₅	圭亚那柱花草	91.62	13.91	8.30	0.74	69.65	53.88	62.68
X ₁₆	爪哇大豆	97.50	16.54	10.30	3.89	51.85	50.88	88.38
X ₁₇	银合欢	92.94	18.69	9.50	5.18	46.84	43.02	110.01
X ₁₈	蔓草虫豆	95.40	12.36	6.78	2.89	56.15	46.34	87.47
X ₁₉	木豆	95.69	16.75	6.73	2.97	58.31	57.90	69.87
X ₂₀	大翼豆	64.34	14.38	11.24	7.48	55.28	51.75	81.77
X ₂₁	落花生	86.88	12.11	13.71	2.33	63.53	52.34	70.47
X ₂₂	扁豆	93.31	21.31	10.29	3.04	45.98	36.86	121.76
X ₂₃	桑树	95.00	18.34	12.84	6.76	48.59	42.97	106.11
X ₂₄	杂交构树	97.60	16.03	8.64	4.78	53.84	44.04	94.33
X ₂₅	辣木	93.98	13.34	8.86	4.52	53.32	48.80	88.77

2.2 矿物质含量

25 种蛋白饲用植物矿物质含量中,Na 含量在 0.1%及以上的有 3 种，最高为柱花草（0.26%），最低为地八角、刺槐、须弥葛、绿叶山蚂蝗、白三叶、爪哇大豆，其含量均为 0.02%（表 4）。Mg 含量最高为杂交构树（0.5%），含量在 0.1%及以下的物种仅白三叶（0.01%）。P 含量在 0.1%及以上的有 5 种，最高为扁豆（0.18%），其次是海法白三叶、波叶山蚂蝗、截叶铁扫帚和柱花草。K 含量在 1.00%以下的仅白三叶（0.11%），其余 24 种植物中，含量最高的为扁豆（4.6%）。Ca 含量

在 1%以上的有 10 种，最高为扁豆（2.36%），最低为蔓草虫豆（0.11%）。Fe 含量最高的为圭亚那柱花草和波叶山蚂蝗，其含量均为 0.06%，其次是紫穗槐、多花木蓝、红三叶、海法白三叶和落花生，含量均为 0.05%。Cu 含量在 10 mg/kg 以上的有 4 种，含量最高的为多花木蓝（12.06 mg/kg），含量在 1 mg/kg 以下的仅白三叶，含量为 0.32 mg/kg；Zn 含量最高为蔓草虫豆(39.87 mg/kg)，最低为白三叶 6.46 mg/kg；Se 含量在 1 mg/kg 以上的仅圭亚那柱花草（1.39 mg/kg），含量最低的为蔓草虫豆 0.02 mg/kg。

表 4 25 种蛋白饲用植物的矿物质含量
Tab. 4 Mineral content of 25 protein feed plants

编号 No.	种 Species	Na/%	Mg/%	P/%	K/%	Ca/%	Fe/%	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Se/(mg·kg ⁻¹)
X ₁	白刺花	0.04	0.18	0.02	1.32	0.19	0.04	6.19	26.05	0.06
X ₂	地八角	0.02	0.22	0.01	1.70	0.17	0.03	4.20	11.18	0.10
X ₃	截叶铁扫帚	0.06	0.39	0.10	1.97	0.45	0.04	6.57	21.87	0.06
X ₄	紫穗槐	0.05	0.19	0.02	1.92	0.20	0.05	7.10	30.85	0.04
X ₅	刺槐	0.02	0.15	0.02	1.45	0.72	0.02	6.29	30.41	0.13
X ₆	须弥葛	0.02	0.12	0.03	1.94	0.87	0.04	8.48	23.11	0.17
X ₇	多花木蓝	0.06	0.31	0.09	2.03	0.60	0.05	12.06	35.27	0.08
X ₈	波叶山蚂蝗	0.04	0.23	0.11	1.50	1.27	0.06	8.37	27.17	0.07
X ₉	绿叶山蚂蝗	0.02	0.16	0.02	1.29	1.38	0.04	7.71	16.62	0.13
X ₁₀	紫花苜蓿	0.07	0.25	0.03	2.81	1.18	0.02	8.38	23.80	0.10
X ₁₁	白三叶	0.02	0.01	0.01	0.11	0.13	0.01	0.32	6.46	0.03
X ₁₂	红三叶	0.03	0.30	0.02	2.31	1.38	0.05	11.08	24.48	0.15
X ₁₃	海法白三叶	0.05	0.33	0.11	2.24	0.40	0.05	5.76	34.59	0.03
X ₁₄	柱花草	0.26	0.16	0.10	1.39	0.15	0.01	3.43	8.69	0.03
X ₁₅	圭亚那柱花草	0.08	0.47	0.06	2.92	2.23	0.06	5.68	15.49	1.39
X ₁₆	爪哇大豆	0.02	0.29	0.09	2.93	0.32	0.02	8.88	28.96	0.04
X ₁₇	银合欢	0.03	0.40	0.07	2.15	0.13	0.02	5.71	19.29	0.04
X ₁₈	蔓草虫豆	0.04	0.23	0.05	1.43	0.11	0.04	5.07	39.87	0.02
X ₁₉	木豆	0.03	0.31	0.07	1.60	0.36	0.04	8.98	29.84	0.03
X ₂₀	大翼豆	0.06	0.48	0.06	1.87	1.47	0.04	8.90	26.08	0.12
X ₂₁	落花生	0.05	0.29	0.02	2.52	1.90	0.05	7.03	20.94	0.58
X ₂₂	扁豆	0.10	0.27	0.18	4.60	2.36	0.04	11.05	37.86	0.08
X ₂₃	桑树	0.03	0.11	0.01	1.40	0.18	0.01	1.54	8.02	0.04
X ₂₄	杂交构树	0.07	0.50	0.08	1.85	1.17	0.04	10.28	38.24	0.08
X ₂₅	辣木	0.25	0.36	0.03	2.86	1.07	0.03	7.83	21.13	0.10

2.3 灰色关联度分析

2.3.1 构建参考数列 根据参试品种的测定数据构建参考数列： $\{X_0(k)\} = (102.51, 22.82, 14.40, 7.85, 43.68, 35.02, 0.27, 0.53, 0.19, 4.83, 2.48, 0.06, 12.66, 41.86, 1.46, 127.85)$ 。

2.3.2 灰色关联度和营养价值综合评价 根据公式(1)和(2)，计算 25 种蛋白饲用植物的关联度(γ_i) (表 5)。关联度能直观反映各个参试品种与参考理想品种之间的差异，其排名越高，越接近理想品种，反之差异越大。25 种蛋白饲用植物的关联度从高到低依次为：扁豆>海法白三叶>杂交构树>圭亚那柱花草>大翼豆>辣木=银合欢>多花木蓝=红三叶=波叶山蚂蝗>落花生=爪哇大豆>桑树=紫穗槐>紫花苜蓿>蔓草虫豆=地八角=截叶铁扫帚=木豆>刺槐=白刺花>须弥葛>绿叶山

蚂蝗=柱花草>白三叶。对 25 种蛋白饲用植物关联度进行划分，其营养价值评价为优的有 1 种(扁豆)；营养价值评价为良的有 14 种(海法白三叶、杂交构树、圭亚那柱花草、大翼豆、辣木、银合欢等)；营养价值评价为中的有 10 种(蔓草虫豆、地八角、截叶铁扫帚、木豆、白刺花等)。

3 讨论

牧草营养价值是衡量牧草质量、反映牧草品质的重要指标^[11]，它包括 CP、EE、Ash 等营养成分，Na、P 等矿质成分，以及 RFV 等牧草饲用价值指标。CP 能为家畜及体内的微生物提供能量和必需氨基酸，对家畜生长具有重要作用^[12]。云南 25 种蛋白饲用植物中，海法白三叶、扁豆、紫花苜蓿、紫穗槐、白刺花、刺槐的 CP 含量均大

表 5 25 种蛋白饲用植物营养价值的灰色关联度和综合评价
Tab. 5 Grey correlation and comprehensive evaluation of nutritional value of 25 protein feed plants

排序 Ranking	种 Species	等权关联度 Equal weight correlation degree	生育期 Growth period	取样部位 Sampling part	营养价值评价 Nutritional value evaluation	云南省分布区域 Distribution area in Yunnan province
1	扁豆	0.81	营养期	全株	优	云南热带及亚热带地区
2	海法白三叶	0.69	盛花期	全株	良	云南温带至中亚热带。海拔 1400~3000 m, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年积温 3500~5500 $^{\circ}\text{C}$, 年降水量 650~1500 mm 的广大地区
3	杂交构树	0.68	营养期	嫩枝叶	良	云南除滇东北少数地区外均有分布
4	圭亚那柱花草	0.66	开花期	全株	良	云南海拔 1700 m 以下的热带和亚热带地区
5	大翼豆	0.64	初花期	嫩枝叶	良	云南南部及干热河谷区
6	辣木	0.63	营养期	全株	良	云南温暖、湿润, 年降水量 1000~2000 mm 的地区
7	银合欢	0.63	营养期	全株	良	云南热带地区
8	多花木蓝	0.63	开花期	嫩枝叶	良	云南普洱、开远、邓川、洱源、保山、祥云、景东、景洪等地区
9	红三叶	0.62	开花期	全株	良	云南温带、亚热带地区
10	波叶山蚂蝗	0.62	结荚初期	嫩枝叶	良	喜暖热气候, 耐旱, 云南省分布较广
11	落花生	0.61	营养期	全株	良	云南海拔 1800 m 以下, 年降水量大于 1500 mm 的热带、亚热带地区
12	爪哇大豆	0.61	初花期	嫩枝叶	良	云南年降水量 750~1500 mm 的地区
13	桑树	0.60	营养期	叶片	良	云南广大地区
14	紫穗槐	0.60	开花期	嫩枝叶	良	云南滇中地区
15	紫花苜蓿	0.60	营养期	全株	良	云南滇中、滇西北、滇东北地区
16	蔓草虫豆	0.59	结荚期	嫩枝叶	中	云南海拔 150~1500 m 的旷野、路旁或山坡草丛中
17	地八角	0.58	开花期	全株	中	云南的温凉湿润地区
18	截叶铁扫帚	0.58	盛花期	嫩枝叶	中	云南除滇东北外的大部分地区
19	木豆	0.58	营养期	全株	中	云南滇中及滇中以南海拔 1600 m 以下的地区
20	刺槐	0.57	营养期	嫩枝叶	中	云南年平均气温 8~14 $^{\circ}\text{C}$ 、年降水量 500~900 mm 的温带地区
21	白刺花	0.57	营养期	嫩枝叶	中	云南各地河谷沙丘和山坡路边的灌木丛中
22	须弥葛	0.56	营养期	嫩枝叶	中	滇西地区
23	绿叶山蚂蝗	0.55	营养期	叶片	中	云南年降水量超过 875 mm 的热带和亚热带地区
24	柱花草	0.55	开花期	全株	中	云南热带和亚热带地区
25	白三叶	0.52	开花期	全株	中	除云南南部边缘热区、少数干热河谷、海拔 3500 m 以上高寒山区外的地区

于 20%, 达到了优级苜蓿干草捆的标准, 是优良的植物蛋白饲料; 其余植物的 CP 含量在 11%~18.7%之间, 基本达到了一级至四级苜蓿干草捆标准, 具有较高的蛋白利用价值, 这些植物全株或嫩枝叶利用可基本满足家畜生长发育的蛋白质需求, 具备蛋白饲料的基本条件^[13-14]。NDF 和 ADF 含量说明牧草纤维化程度。其含量过高会影响牧草适口性; 而含量过低可能会造成家畜瘤胃酸中

毒^[15]。因此, 一定比例的 NDF 和 ADF 对维持家畜瘤胃的健康至关重要, 同时, 其产生的挥发性脂肪酸也是反刍动物的重要能量来源^[16]。以苜蓿干草捆质量标准^[14]为参照, 25 种蛋白饲草中, 扁豆的 NDF 含量 (45.98%) 达到二级标准, 海法白三叶、地八角、银合欢、桑树和爪哇大豆达到三级或四级标准; 扁豆、海法白三叶、地八角的 ADF 含量为三级标准。以燕麦 (*Avena sativa*) 干草质量

标准^[17]而言,除柱花草、圭亚那柱花草、绿叶山蚂蝗外,其余物种(如扁豆、银合欢等)的 NDF 含量均达到三级及以上标准;ADF 含量仅扁豆、地八角、海法白三叶达到二级标准。在实际应用中,本研究物种需与其他饲草合理搭配,以实现家畜所需营养物质的均衡需求,提高适口性和家畜消化率。RFV 是表征牧草饲用价值的指标,其值越高,说明牧草质量越好^[18],本研究中,扁豆、海法白三叶、地八角、银合欢和桑树的 RFV 值在 100%以上,达到二级至四级苜蓿干草的标准,具有较高的饲用植物开发价值。

矿物质的摄入影响动物的免疫功能,若摄入比例不当,会引起动物生理功能紊乱,免疫力下降,最终影响动物生产^[19]。牧草中 Ca、P 含量严重影响着家畜的生长发育,适量的 P 对家畜繁殖力的保持有着重要作用^[20-21]。25 种蛋白饲用植物中,仅银合欢的钙磷比在饲粮理想钙磷比范围内(1:1~2:1)^[22],其余物种钙磷比均高于此范围;25 种蛋白饲用植物的 P 含量远低于云贵地区常见饲用灌木的 P 含量^[13],处于较低水平,这些蛋白饲用植物单独使用不能满足家畜的 P 需求;25 种蛋白饲用植物的 Ca 含量与云贵地区常见饲用灌木的 Ca 含量相近^[13],其中扁豆、圭亚那柱花草和落花生的 Ca 含量高于紫花苜蓿(1.5%~1.9%)^[23]。Fe、Cu、Zn、Se 是动物机体内必不可少的微量元素,与机体生长发育、蛋白合成、免疫力、新陈代谢、繁殖、酶的合成等密切相关^[24-29]。若摄入不足会导致机体产生一系列疾病,影响家畜健康^[30];摄入过量会造成家畜中毒^[31],如机体吸收利用不足则会排出体外,污染环境^[32]。25 种蛋白饲用植物中,除少数几个物种外,其他物种的 Fe、Cu、Zn、Se 四种微量元素基本达到或远高于玉米的含量^[24, 33-35],这些植物基本是理想的动物矿质元素来源,但若想为家畜提供均衡的矿质营养,还需与其他饲料搭配使用。

对牧草营养成分含量的测定一般只测定常规的营养指标,而牧草微量元素含量对牧草营养品质以及家畜采食量等也有很大影响。对饲草饲用价值的评价很难用单一指标进行,用更丰富的营养指标进行综合分析,才能更客观、全面地进行牧草营养价值综合评价^[36-37]。经过灰色关联度分析,亚热带地区 25 种蛋白饲用植物中,扁豆关联度最高(0.81),其综合营养价值最优,海法白三叶、杂交构树、大翼豆、辣木、银合欢等 14 种蛋

白饲用植物的综合营养价值为良,这与他们的 CP、EE、NDF、ADF 等营养成分含量、RFV 及部分矿物质含量的表现一致,这 15 种蛋白饲用植物可以作为亚热带地区优质蛋白饲草资源开发利用的品种选择。其余 10 种植物的综合营养价值评价为中,但部分植物的某种营养物质含量较为突出,如白刺花、刺槐的 CP 含量大于 20%,蔓草虫豆、截叶铁扫帚、木豆、刺槐、白刺花、须弥葛的 Fe、Cu、Zn、Se 等元素含量明显优于玉米^[24, 33-35],在今后的开发应用中宜与其他饲料混合利用,以实现家畜的均衡营养需求和豆粕减量替代的目标。另外,评价结果可能与取样部位和取样时间有关,今后我们将在同一年度内对植物不同部位、不同生育期分别进行采集取样,明确某一物种的饲用部位和利用时期,以期获得更为全面的评价,为草食畜禽养殖中豆粕减量替代行动提供更为全面的蛋白饲草选择。

4 结论

本研究 25 种蛋白饲用植物的粗蛋白含量为 11.03%~21.73%,均达到了蛋白饲料的基本条件,其中海法白三叶、扁豆、紫花苜蓿、紫穗槐、白刺花和刺槐 6 种植物的粗蛋白含量在 20%以上,具有较好的蛋白饲料潜力。用灰色关联度分析法对云南亚热带地区 25 种蛋白饲用植物的 CP、EE、NDF、ADF、P、Ca 等 16 个指标进行饲用潜力综合分析。结果表明,扁豆的营养价值综合评价为优,海法白三叶、杂交构树、红三叶、银合欢、辣木等 14 种植物营养价值综合评价为良,这 15 种植物具有较高的开发利用价值;蔓草虫豆、地八角、截叶铁扫帚等其他 10 种植物的营养价值虽综合评价为中,但部分物种的一些营养成分含量较为突出,宜与其他饲料配合使用,可为云南亚热带地区草食畜牧业健康高效发展、豆粕减量替代、家畜养殖节本增效提供更多种类的饲草料选择。

参考文献

- [1] 任继周,南志标,林慧龙.以食物系统保证食物(含粮食)安全:实行草地农业,全面发展食物系统生产潜力[J].草业学报,2005(3): 1-10.
REN J Z, NAN Z B, LIN H L. Taking the grassland agro-system to insure food security[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005(3): 1-10. (in Chinese)
- [2] 任继周.我国传统农业结构不改变不行了:粮食九连增后

- 的隐忧[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 1-5.
- REN J Z. China's traditional agricultural structure must change: the hidden worry after the nine consecutive increase in grain[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(3): 1-5. (in Chinese)
- [3] 张英俊, 任继周, 王明利, 杨高文. 论牧草产业在我国农业产业结构中的地位和布局[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(4): 61-71.
- ZHANG Y J, REN J Z, WANG M L, YANG G W. Discussion on the position and development distribution of forage industry in China's agricultural industry structure[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(4): 61-71. (in Chinese)
- [4] 赵志军, 李天平, 王世雄, 尹尚芬, 杨国荣. 云南省草原生态保护建设现状与成效[J]. 养殖与饲料, 2018(5): 104-105.
- ZHAO Z J, LI T P, WANG S X, YIN S F, YANG G R. Current status and effectiveness of grassland ecological protection and construction in Yunnan province[J]. Animals Breeding and Feed, 2018(5): 104-105. (in Chinese)
- [5] 匡崇义, 徐驰, 袁福锦, 杨国荣, 杨雪梅, 黄琦, 罗在仁, 黄必志. 优质蛋白饲草产品的开发与利用[J]. 养殖与饲料, 2010(12): 67-68.
- KUANG C Y, XU C, YUAN F J, YANG G R, YANG X M, HUANG Q, LUO Z R, HUANG B Z. Development and utilization of high-quality protein forage grass products[J]. Animals Breeding and Feed, 2010(12): 67-68. (in Chinese)
- [6] 唐一国, 龙瑞军, 李季蓉. 云南省草地饲用灌木资源及其开发利用[J]. 四川草原, 2003(3): 39-42.
- TANG Y G, LONG R J, LI J R. The assessment and development fodder shrub resources in Yunnan[J]. Sichuan Caoyuan, 2003(3): 39-42. (in Chinese)
- [7] 刘果, 尚秀华, 张沛健, 高丽琼, 彭彦. 卡亚和杂交构树的饲用营养价值及其比较分析[J]. 热带作物学报, 2023, 44(2): 419-428.
- LIU G, SHANG X H, ZHANG P J, GAO L Q, PENG Y. Comparative analysis on feed nutritive value of *Cnidioscolus aconitifolius* and hybrid *Broussonetia papyrifera*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(2): 419-428. (in Chinese)
- [8] 罗天琼, 莫本田, 龙忠富, 吴佳海, 刘华荣, 吴永仙. 几种热带豆科饲用灌木在贵州南部地区的生态适应性研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(7): 1372-1380.
- LUO T Q, MO B T, LONG Z F, WU J H, LIU H R, WU Y X. Ecological adaptability of several tropical legumes forage shrubs in south Guizhou province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(7): 1372-1380. (in Chinese)
- [9] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1999.
- YANG S. Feed analysis and feed quality testing technology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 侯留飞, 乔安海, 袁青杉, 李娟. 应用灰色关联度法评定牧草营养价值的研究[J]. 中国草食动物科学, 2017, 37(2): 32-24.
- HOU L F, QIAO A H, YUAN Q S, LI J. Application of grey relational analysis in the evaluation of pasture nutrient contents[J]. China Herbivore Science, 2017, 37(2): 32-24. (in Chinese)
- [11] CASTRO-MONTOYA J M, DICKHOEFER U. The nutritional value of tropical legume forages fed to ruminants as affected by their growth habit and fed form: a systematic review[J]. Animal Feed Science and Technology, 2020(269): 114641. (in Chinese)
- [12] 李三省. 饲料中主要养分及其功能的介绍[J]. 计量与测试技术, 2007, 34(4): 52-53.
- LI S S. An introduction of the primary nutrients and their functions in forage[J]. Metrology & Measurement Technique, 2007, 34(4): 52-53. (in Chinese)
- [13] 胡廷花, 于应文, 徐震, 毛文娅, 穆靖轩. 云贵地区饲用灌木营养价值及生物活性物质[J]. 草业科学, 2019, 36(9): 2351-2364.
- HU T H, YU Y W, XU Z, MAO W Y, MU J X. Advances in nutritional value and bioactive substances in forage shrubs in the Yungui area[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(9): 2351-2364. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国农业农村部. 苜蓿干草捆, NY/T 1170—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China. Alfalfa hay bales, NY/T 1170—2020[S]. Beijing: China Standards Press, 2020. (in Chinese)
- [15] 王海珍, 王加启, 龚月生, 黄庆生. 瘤胃内粗纤维的降解机制及其调控[J]. 中国畜牧兽医, 2002(4): 3-7.
- WANG H Z, WANG J Q, GONG Y S, HUANG Q S. The degradation mechanism of the roughage fiber in the rumen and the manipulation methods[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2002(4): 3-7. (in Chinese)
- [16] 张吉鹏, 卢德勋. 试述反刍动物日粮中的纤维问题[J]. 中国乳业, 2003(7): 21-24.
- ZHANG J K, LU D X. Consider the fiber problems in ruminant diets[J]. China Dairy, 2003(7): 21-24. (in Chinese)
- [17] 中国畜牧业协会. 燕麦干草质量分级, T/CAAA 002-2018[S]. 北京: 中国畜牧业协会, 2019.
- China Animal Agriculture Association. Oats hay quality grade, T/CAAA 002-2018[S]. Beijing: China Animal Agriculture Association, 2019. (in Chinese)

- [18] 王彦华, 王成章, 李德锋, 郑爱荣, 齐胜利, 李冠真. 播种量和品种对紫花苜蓿植株动态变化、产量及品质的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 123-135.
WANG Y H, WANG C Z, LI D F, ZHENG A R, QI S L, LI G Z. Effects of seeding rate on plant number, production performance, and quality of alfalfa[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(2): 123-135. (in Chinese)
- [19] 杨凤. 动物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
YANG F. *Animal nutrition*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993. (in Chinese)
- [20] 陈盼, 徐婷婷, 何彦锋, 刘凯莉, 解静菲, 岳珂, 张朝栋, 林露茜, 曹芹芹, 黄淑成. 钙磷代谢对动物骨骼健康影响的研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2022, 43(1): 39-45.
CHEN P, XU T T, HE Y F, LIU K L, XIE J F, YUE K, ZHANG C D, LIN L X, CAO Q Q, HUANG S C. Research progress on effects of calcium and phosphorus metabolism on animal bone health[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2022, 43(1): 39-45. (in Chinese)
- [21] 王岗. 绵羊矿物质营养研究的最新进展及其对中国养羊生产可能产生的影响[J]. 动物营养学报, 1998(1): 1-11.
WANG G. Recent advances in mineral nutrition: some consequences for sheep production in China[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 1998(1): 1-11. (in Chinese)
- [22] 付斌龙, 赵小琪, 倪晓君, 旦增白吉, 薛白, 李卫娟, 权国波. 饲料粗蛋白质水平对妊娠期云南半细毛羊养分表观消化率的影响[J]. 中国饲料, 2024(19): 81-89.
FU B L, ZHAO X Q, NI X J, DANZENG B J, XUE B, LI W J, QUAN G B. Effect of dietary crude protein level on apparent nutrient digestibility of Yunnan semi-fine wool ewes during pregnancy[J]. *China Feed*, 2024(19): 81-89. (in Chinese)
- [23] 王志军. 饲草组合优化及其发酵品质评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
WANG Z J. The quality evaluation of fermentation and the combinatorial optimization of forage[D]. Hohhot: Agricultural University of the Inner Mongol, 2016. (in Chinese)
- [24] 马雪莲, 张丽阳, 王良治, 刘东元, 吕林, 廖秀冬, 罗绪刚. 我国畜禽饲料资源中微量元素铁含量分布的调查研究[J]. 动物营养学报, 2019, 31(8): 3821-3829.
MA X L, ZHANG L Y, WANG L Z, LIU D Y, LYU L, LIAO X D, LUO X G. A survey on distribution of iron content in feedstuff resources for livestock and poultry in China[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(8): 3821-3829. (in Chinese)
- [25] LABUNSKYY V M, HATFIELD D L, GLADYSHEV V N. Selenoproteins: molecular pathways and physiological roles[J]. *Physiological Reviews*, 2014, 94(3): 739-777.
- [26] 张彩英, 胡国良, 曹华斌, 郭小权. 饲料铜添加水平对育成蛋鸡免疫功能和抗氧化酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2011, 23(1): 154-161.
ZHANG C Y, HU G L, CAO H B, GUO X Q. Effects of dietary copper levels on immunity and activity of anti-oxidation enzyme of growing-laying hens[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(1): 154-161. (in Chinese)
- [27] HAMDI M, SOLA D, FRANCO R, DUROSOY S, ROMEO A, PEREZ J F. Including copper sulphate or dicopper oxide in the diet of broiler chickens affects performance and copper content in the liver[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2018, 237: 89-97.
- [28] 李万栋, 张晓卫, 冯宇哲, 崔占鸿. 微量元素硒在反刍动物中的应用研究进展[J]. 动物营养学报, 2020, 32(4): 1499-1507.
LI W D, ZHANG X W, FENG Y Z, CUI Z H. Research advances on application of trace element selenium in ruminants[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(4): 1499-1507. (in Chinese)
- [29] VALLEE B L, FALCHUK K H. The biochemical basis of zinc physiology[J]. *Physiological Reviews*, 1993, 73(1): 79-118.
- [30] ZHAO X, YAO H D, FAN R F, ZHANG Z W, XU S W. Selenium deficiency influences nitric oxide and selenoproteins in pancreas of chickens[J]. *Biological Trace Element Research*, 2014, 161: 341-349.
- [31] 蒋菱玉, 丁昌鹏, 张大柱, 蒋洁, 庄绪钦, 王振南. 硒在羊生产中的应用研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(22): 113-116.
JIANG L Y, DING C P, ZHANG D Z, JIANG J, ZHUANG X Q, WANG Z N. Research progress on application of selenium in sheep breeding[J]. *Feed Research*, 2021, 44(22): 113-116. (in Chinese)
- [32] LIU G Q, LI S F, SU X, HE Y, ZHANG L Y, LU L, LIAO X D, LUO X G. Estimation of standardized mineral availabilities in feedstuffs for broilers[J]. *Journal of Animal Science*, 2019, 97(2): 794-802.
- [33] 王丽赛, 张丽阳, 邵玉新, 马雪莲, 王良治, 邢冠中, 杨柳, 李素芬, 吕林, 廖秀冬, 罗绪刚. 我国畜禽饲料资源中微量元素铜含量分布的调查[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1982-1992.
WANG L S, ZHANG L Y, SHAO Y X, MA X L, WANG L Z, XING G Z, YANG L, LI S F, LYU L, LIAO X D, LUO X G. A survey on distribution of copper contents in feedstuffs for livestock and poultry in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1982-1992. (in Chinese)
- [34] 邵玉新, 张丽阳, 马雪莲, 王良治, 刘东元, 吕林, 廖秀冬, 罗绪刚. 我国畜禽饲料资源中微量元素锌量分布的调查[J].

- 中国农业科学, 2019, 52(11): 2002-2010.
- SHAO Y X, ZHANG L Y, MA X L, WANG L Z, LIU D Y, LYU L, LIAO X D, LUO X G. A survey on distribution of zinc contents in feedstuffs for livestock and poultry in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 2002-2010. (in Chinese)
- [35] 王丽赛, 张丽阳, 马雪莲, 王良治, 邢冠中, 杨柳, 于涛, 吕林, 廖秀冬, 李素芬, 罗绪刚. 我国畜禽饲料资源中微量元素硒含量分布的调查[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(11): 2011-2020.
- WANG L S, ZHANG L Y, MA X L, WANG L Z, XING G Z, YANG L, YU T, LYU L, LIAO X D, LI S F, LUO X G. A survey on distribution of selenium contents in feedstuffs for livestock and poultry in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 2011-2020. (in Chinese)
- [36] 肖海龙. 三江源地区不同退化程度高寒草原土壤和牧草微量元素含量研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- XIAO H L. Study on the content of trace elements in soil and forage of alpine steppe under different degradation degrees in Sanjiangyuan Region[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [37] 凌超, 卜令贝, 李姣, 朝木力嘎, 陶雪, 于辉, 孙强, 张延辉. 基于灰色关联分析对新疆冰草生产性能和营养品质的综合评价[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(10): 58-67.
- LING C, BU L B, LI J, CHAOMULIGA, TAO X, YU H, SUN Q, ZHANG Y H. A comprehensive evaluation of the production performance and nutritional quality of *agropyron cristatum* in Xinjiang based on grey correlation analysis[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(10): 58-67. (in Chinese)