

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.022

引用格式:侯美如,张军,董司琪,等.基于CRITIC-GRA-TOPSIS的荒漠草原常见牧草营养价值综合评价[J].草地学报,2026,34(7):2592-2602

HOU Mei-ru, ZHANG Jun, DONG Si-qi, et al. Comprehensive Evaluation of Nutritional Value of Common Forages in Desert Steppe Based on CRITIC-GRA-TOPSIS[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2592-2602

基于CRITIC-GRA-TOPSIS的荒漠草原常见 牧草营养价值综合评价

侯美如¹, 张 军^{1*}, 董司琪¹, 刘菊红¹, 吕世杰²

(1. 内蒙古农业大学理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要:通过采集内蒙古乌兰察布市四子王旗荒漠草原11种牧草,分别测定和计算它们的粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可吸收营养物质总量、干物质采食量、干物质消化率、相对饲喂价值、相对牧草品质10项营养指标数据,并进行不同牧草营养价值综合评价。研究采用CRITIC客观赋权与GRA-TOPSIS综合评价模型相结合的方法,结果显示:禾本科中的三种牧草营养价值由高到低依次为羊草(*Leymus chinensis*)>短花针茅(*Stipa breviflora*)>无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*);灌木、半灌木中的五种牧草营养价值由高到低依次为木地肤(*Bassia prostrata*)>驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)>小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)>冷蒿(*Artemisia frigida*)>狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*);杂类草中的三种牧草营养价值由高到低依次为糙苏(*Phlomis umbrosa*)>银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)>黄芪(*Astragalus membranaceus*)。

关键词:荒漠草原;牧草营养;CRITIC赋权;GRA-TOPSIS;对应分析

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2592-11

Comprehensive Evaluation of Nutritional Value of Common Forages in Desert Steppe Based on CRITIC-GRA-TOPSIS

HOU Mei-ru¹, ZHANG Jun^{1*}, DONG Si-qi¹, LIU Ju-hong¹, LÜ Shi-jie²

(1. College of Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: By collecting 11 forage species from the desert steppe of Siziwang Banner, Ulanqab City, Inner Mongolia, we separately determined and calculated their crude protein, ether extract, crude ash, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, total digestible nutrients, dry matter intake, dry matter digestibility, relative feeding value, and relative forage quality. A comprehensive evaluation of the nutritional value of different forages was conducted. The study employed a combined approach utilizing the CRITIC objective weighting method and the GRA-TOPSIS comprehensive evaluation model. The results of the study showed that the three forage grasses in the grass group, in descending order of nutritional value, were *Leymus chinensis* > *Stipa breviflora* > *Cleistogenes songorica*; the five forage grasses in the shrub and semi-shrub group, in descending order of nutritional value, were *Bassia prostrata* > *Krascheninnikovia ceratoides* > *Caragana microphylla* > *Artemisia frigida* > *Caragana stenophylla*; and the three forage grasses in the weedy group, in descending order of nutritional value, were *Phlomis umbrosa* > *Convolvulus ammannii* > *Astragalus membranaceus*.

Key words: Desert Steppe; Forage nutrition; CRITIC assignment; GRA-TOPSIS; Correspondence analysis

收稿日期:2025-09-03;修回日期:2025-10-24

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2025LHMS03053);国家自然科学基金项目(32160332;32160258;32460423);内蒙古农业大学学科交叉基金项目(BR231502)资助

作者简介:侯美如(2000-),女,汉族,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事草地生态学研究,E-mail:hmrjyl@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:zj325328333@163.com

牧草作为畜牧业生产的重要物质基础,其营养价值直接影响牲畜的生长性能、健康水平和养殖效益。科学评价牧草的营养成分,筛选优质牧草品种,对于优化饲料配方、提高资源利用效率、促进畜牧业可持续发展具有重要意义。而牧草营养价值的高低受到牧草种类的影响^[1-2],不同种类牧草因生长环境、生理特性等因素,其营养成分存在显著差异。因此亟需建立客观、全面的牧草营养价值评价体系,用于指导牧草资源的合理利用和畜牧业的高效可持续发展。

目前,对于牧草营养价值的综合评价,已经有很多学者进行了分析研究。常用的方法有:主成分分析^[3-7]、聚类分析^[8-11]、方差分析^[12-13]、灰色关联分析^[14-17]、权重决策法^[18]等。其中主成分分析与灰色关联分析在相关研究中应用尤为广泛。尽管这些方法各具优势,但仅靠单一的方法往往难以全面反映牧草的营养特性。例如,主成分分析能够降维但可能会忽略指标间的冲突性,而灰色关联分析侧重于动态关联而缺乏静态排序能力。

鉴于此,本文利用CRITIC法进行客观赋权,避免了主观偏差,确保了权重反映数据的真实信息。将GRA-TOPSIS综合评价模型运用到牧草营养综合评价分析研究中,可以做到静态与动态相结合,TOPSIS通过欧氏距离量化绝对差异,GRA通过灰色关联度分析变化趋势。本研究以11种牧草作为研究对象,测定其主要营养成分,计算出干物质消化率、相对牧草品质等指标,应用CRITIC法对10种营养成分指标进行客观赋权,并建立GRA-TOPSIS综合评价模型,对牧草营养成分进行综合评价。此外,对营养成分指标和牧草种类作对应分析,通过双标图直观地进行对比分析,以此为牧草资源的优化利用和牲畜的科学饲养提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 研究地概况 试验牧草取自内蒙古乌兰察布市四子王旗,内蒙古农牧科学院野外观测站^[19],地理位置41°10′~43°22′N、110°20′~113°00′E,平均海拔1000~1500 m。该旗位于内蒙古自治区中部,乌兰察布市西北部,地处阴山山脉北麓的蒙古高原上,地形以高原为主,南部为阴山山地,北部为荒漠草原,地势南高北低,全旗大部分属温带大陆

性气候,干旱少雨,日照充足,昼夜温差大,冬季寒冷漫长,夏季短暂凉爽,春温骤升多风沙,秋温剧降,无霜期短。年平均气温为1~6℃,年平均降水量为240~386 mm,降水多集中于6~8月。试验地的牧草主要有短花针茅(*Stipa breviflora*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、羊草(*Leymus chinensis*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、驼绒藜(*Krascheninikovia ceratoides*)、木地肤(*Bassia prostrata*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、黄芪(*Astragalus membranaceus*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等。

1.1.2 取样与指标测定 本研究于2023年8月中旬的牧草盛花期,在放牧围封试验区,选取12个0.5 m×0.5 m的样方,将每个样方中的植物分种齐地刈割,放入65℃的恒温烘箱中48 h,取出后将同一种牧草的样品进行混合。将烘干后的每种牧草样品一部分通过40目粉碎机(德国Retsch公司)用于测定牧草酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量,一部分通过100目粉碎机(德国Retsch公司)用于测定牧草粗灰分和粗脂肪含量,另一部分用球磨仪(MM400)研磨的样品用于测定牧草粗蛋白含量^[20]。

测定的牧草营养成分指标有粗蛋白(Crude protein, CP)、粗脂肪(Ether extract, EE)、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)。这些指标的单位均为%。其中,CP是利用全自动杜马斯定氮仪测定^[21];ADF、NDF是通过ANKOM纤维分析系统测定^[22];CA采用550℃燃烧法测定^[23];EE使用VELP SER148/6脂肪测试仪测定^[24]。而可吸收营养物质总量(Total digestible nutrients, TDN)、干物质采食量(Dry matter intake, DMI)、干物质消化率(Digestibility dry matter, DDM)、相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)、相对牧草品质(Relative forage quality, RFQ)是通过下面的公式计算得到:

$$\text{TDN}^{[25]}: C_{\text{TDN}} = 82.38 - 0.7515 W_{\text{ADF}}$$

式中, C_{TDN} 为可吸收营养物质的质量分数(以干物质为基础),%; W_{ADF} 为酸性洗涤纤维的质量分数(以干物质为基础),%。

$$\text{RFQ}^{[25]}: R_{\text{RFQ}} = \frac{W_{\text{TDN}} \times I_{\text{DMI}}}{1.23}$$

式中, R_{RFQ} 为相对牧草品质,为无量纲的比值; W_{TDN} 为可吸收营养物质的质量分数,%; I_{DMI} 为干物

质采食量, %。

$$\text{DMI}^{[26]}: I_{\text{DMI}} = \frac{120}{W_{\text{NDF}}}$$

式中, I_{DMI} 为干物质采食量, %; W_{NDF} 为中性洗涤纤维的质量分数(以干物质为基础), %。

$$\text{DDM}^{[26]}: D_{\text{DDM}} = 88.9 - 0.779W_{\text{ADF}}$$

式中, D_{DDM} 为干物质消化率, %; W_{ADF} 为酸性洗涤纤维的质量分数(以干物质为基础), %。

$$\text{RFV}^{[26]}: R_{\text{RFV}} = I_{\text{DMI}} \times \frac{D_{\text{DDM}}}{1.29}$$

式中, R_{RFV} 为相对饲喂价值, 为无量纲的比值; I_{DMI} 为干物质采食量, %; D_{DDM} 为干物质消化率, %。

1.2 试验方法

1.2.1 方差分析 方差分析是一种用于比较三个或更多组别均值是否存在显著性差异的统计方法。其核心思想是将数据的总变异分解为不同来源的变异, 判断组间差异是否显著大于组内随机误差。

1.2.2 CRITIC 赋权方法 CRITIC 法^[27]是一种由 Diakoulaki 等学者于 1995 年提出的客观权重分配方法, 其核心思想是通过分析指标之间的冲突性(相关系数)和对比强度(标准差), 综合计算各指标的权重, 避免主观赋权的偏差。指标内部数据的标准差越大, 说明样本在该指标上的差异越明显, 信息量越大, 权重应更高; 若指标与其他指标高度相关(如相关系数接近 1), 即冲突性越小, 说明它提供的信息与其他指标重复, 应降低其权重。因此, CRITIC 法不仅能识别出波动性大、信息丰富的指标, 还能有效甄别并削弱多重共线性指标带来的信息冗余, 其赋值结果兼具信息量与独立性的双重保障, 比仅考虑单一因素(如熵权法只考虑信息量)的客观赋权法更为全面和可靠, 尤其适用于指标间存在复杂相关关系的多属性综合评价体系。然而其对异常值较为敏感, 在应用该方法前需要进行数据预处理。

假设共有 m 个方案, n 个指标, 则评价矩阵形式为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

CRITIC 客观赋权法的计算步骤如下:

(1) 指标方向一致化处理。

对于效益型指标, 数值越大效果越好; 而对于成本型指标, 数值越小效果越好。当两种类型的指

标同时存在时, 为方便后续分析, 需要对数据进行同向化处理。而本文牧草营养成分指标中, 粗灰分是高温燃烧后的无机残余物(矿物质), 含量过高会降低有效营养密度, 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维包含纤维素、木质素等, 而这些物质几乎不能被动物消化酶分解, 因此将这三个指标看作为成本型指标, 其余为效益型指标。

对于效益型指标需要作正向化处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

对于成本型指标需要作逆向化处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

其中, x_{ij} 为评价矩阵 X 中的第 i 行、第 j 列元素。 $x_{j\min}$ 为第 j 个指标的最小值; $x_{j\max}$ 为第 j 个指标的最大值。运用上述公式处理后, 得到正向化后的矩阵 X' 。

(2) 指标数据无量纲化处理。

由于矩阵 X' 中各指标的含义和单位各不相同, 因此需要对各指标数据应用规范化方法, 进行无量纲化处理, 得到标准化矩阵 X'' :

$$x''_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x'^2_{ij}}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, x''_{ij} 为标准化矩阵 X'' 中第 i 行、第 j 列的元素, $\sqrt{\sum_{j=1}^n x'^2_{ij}}$ 为第 i 个样本在所有指标上的正向化数据向量的欧几里得范数(向量的模长)。

(3) 计算指标的客观权重。

先计算对比强度, 即标准差:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x''_{ij} - \bar{x}_j)^2}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

再计算冲突性, 即相关系数:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(x''_i, x''_j)}{s_i s_j} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, x''_{ij} 为标准化矩阵 X'' 中第 i 行、第 j 列的元素, $\bar{x}_j$ 为第 j 个指标的均值; $\text{cov}(x''_i, x''_j)$ 为标准化矩阵 X'' 的第 i 列与第 j 列的协方差; $s_i s_j$ 为第 i 个指标和第 j 个指标的标准差乘积。

设 M_j 表示第 j 个评价指标所包含的信息量, 则 M_j 可表示为:

$$M_j = s_j \sum_{i=1}^m (1 - \rho_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

M_j 越大, 说明第 j 个指标所含信息量就越多, 该

指标越重要,则需赋予更大的权重。所以第 j 个指标的权重计算公式为:

$$w_j = \frac{M_j}{\sum_{j=1}^n M_j} \quad (7)$$

1.2.3 GRA-TOPSIS 综合评价模型 TOPSIS法^[28]是一种多属性决策分析方法,用于对有限方案进行排序和优选。其核心思想是通过计算各方案与理想解(最优解)和负理想解(最劣解)的接近程度,综合评价方案的优劣。灰色关联分析(GRA)^[29]是灰色系统理论中的一种分析方法,用于量化不确定系统中各因素之间的关联程度。它通过比较数据序列的几何形状相似性,判断哪些因素对系统行为的影响更为显著。GRA分析因素间的动态关联趋势,TOPSIS提供静态的优劣排序。本文将两者结合起来,构造GRA-TOPSIS综合评价模型,形成了一种更全面、更灵活的综合评价模型,弥补了单一方法的不足。具体计算步骤如下:

(1)构造加权评价矩阵。令上述CRITIC法得到的标准化矩阵 X'' 作为初始评价矩阵,得到加权评价矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, w_j 为指标的权重, x''_{ij} 为标准化的评价矩阵元素, u_{ij} 为加权矩阵各元素, U 为加权矩阵。

(2)确定正负理想解 U_j^+ 和 U_j^- 。

$$U_j^+ = (u_1^+, u_2^+, \cdots, u_n^+) = \{\max u_{ij} | i = 1, 2, \cdots, m\} \quad (9)$$

$$U_j^- = (u_1^-, u_2^-, \cdots, u_n^-) = \{\min u_{ij} | i = 1, 2, \cdots, m\} \quad (10)$$

其中, $\max u_{ij}$ 为对所有样本(i 从1到 m)的第 j 个加权指标值 u_{ij} 取最大值; $\min u_{ij}$ 为对所有样本(i 从1到 m)的第 j 个加权指标值 u_{ij} 取最小值。

(3)计算正负理想解的欧氏距离 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^+ - u_{ij})^2} \quad (11)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^- - u_{ij})^2} \quad (12)$$

(4)计算正负理想解的灰色关联系数 r_{ij}^+ 和 r_{ij}^- 。

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |x''_{ij} - U_j^+| + \rho \max_i \max_j |x''_{ij} - U_j^+|}{|x''_{ij} - U_j^+| + \rho \max_i \max_j |x''_{ij} - U_j^+|} \quad (13)$$

$$r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |x''_{ij} - U_j^-| + \rho \max_i \max_j |x''_{ij} - U_j^-|}{|x''_{ij} - U_j^-| + \rho \max_i \max_j |x''_{ij} - U_j^-|} \quad (14)$$

其中, $\min_i \min_j$ 为两级最小差, $\max_i \max_j$ 为两级最大差; ρ 为分辨系数,一般取 $\rho = 0.5$ 。

(5)计算灰色关联度 R_i^+ 和 R_i^- 。

$$\begin{cases} R_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^+ \\ R_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^- \end{cases} \quad (15)$$

(6)将欧氏距离与灰色关联度结合起来,构建新型的加权距离。

$$\begin{cases} C_i^+ = \mu D_i^- + (1 - \mu) R_i^+ \\ C_i^- = \mu D_i^+ + (1 - \mu) R_i^- \end{cases} \quad (16)$$

其中 μ 由决策者主观决定。一般地,取 $\mu = 0.5$,表示对两种方法的偏好程度相同。

(7)计算新型的相对贴近度(综合关联度) γ_i 。

$$\gamma_i = \frac{C_i^+}{C_i^+ + C_i^-} \quad (17)$$

1.2.4 营养成分指标与牧草种类的对应分析 对应分析^[30]是由法国学者 Benzenc 于1970年提出的,其基本思想是将一个列联表的行和列中各元素的比例结构以点的形式在较低维的空间中表现出来。它的最大特点是能把众多的样品和变量同时画到同一张图上,即为双标图。双标图能够直观体现变量与样本之间的对应关系,双标图的充分性主要取决于两个因素:信息比和拟合度。若信息比大于1,拟合度大于70%,则表明双标图能够充分体现变量与样品的对应关系。

1.2.5 数据分析 将原始数据使用Excel进行整理,利用SPSS和R 4.4.3软件进行方差分析、CRITIC赋权、GRA-TOPSIS综合评价和对应分析。

2 结果与分析

2.1 方差分析结果

本文首先对半灌木、杂类草、灌木类及禾本科四类牧草的营养成分进行方差分析,再对各类牧草(短花针茅、无芒隐子草、羊草、狭叶锦鸡儿、小叶锦鸡儿、驼绒藜、木地肤、冷蒿、糙苏、黄芪和银灰旋花)的营养成分分别进行方差分析,结果如表1和表2所示。

表 1 四类牧草营养成分方差分析结果

Table 1 Analysis of variance results of nutritional components of four types of forages

	半灌木 ($n=9$) Subshrub	杂类草 ($n=9$) Forbs	灌木类 ($n=6$) Shrub	禾本科 ($n=9$) Gramineae	F	P
粗蛋白 CP/%	20.884±3.831	19.585±8.371	18.236±0.258	13.653±0.893	4.870	0.007**
粗脂肪 EE/%	5.182±0.687	5.247±0.538	7.307±1.203	6.607±0.610	4.183	0.014*
粗灰分 CA/%	9.854±2.604	9.062±0.681	10.701±0.806	9.425±3.726	0.457	0.715
中性洗涤纤维 NDF/%	41.284±2.924	37.855±11.825	41.975±3.122	62.093±0.770	20.593	<0.001**
酸性洗涤纤维 ADF/%	26.918±6.527	27.058±5.101	41.217±8.652	34.884±4.95	6.510	0.002**
可吸收营养物质总量 TDN/%	62.151±4.905	62.046±3.834	51.406±6.502	56.16±3.618	6.510	0.002**
干物质采食量 DMI/%	2.932±0.200	3.442±1.094	2.933±0.133	1.940±0.023	8.506	<0.001**
干物质消化率 DDM/%	67.931±5.085	67.822±3.974	56.792±6.740	61.725±2.818	6.510	0.002**
相对饲喂价值 RFV/%	155.003±21.714	183.267±67.577	131.246±18.649	93.034±5.367	7.679	0.001**
相对牧草品质 RFQ/%	148.764±21.423	175.958±65.362	124.726±18.502	88.794±5.368	7.649	0.001**

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。下同Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$. The same as below

从表1可以看出,对于不同种类的牧草而言,CP, NDF, ADF, TDN, DMI, DDM, RFV 及 RFQ 均在 $\alpha=0.01$ 水平下呈现出显著差异,而 EE 则在 $\alpha=0.05$ 水

平下呈现出显著差异。CA 的 $P=0.715>0.05$, 意味着不同牧草之间的 CA 全部表现出一致性,无显著差异。

表 2 十一种牧草营养成分方差分析结果

Table 2 Analysis of variance results of the nutritional components of eleven kinds of forages

	冷蒿 ($n=3$) <i>Artemisia frigid</i>	小叶锦鸡儿 ($n=3$) <i>Caragana microphylla</i>	无芒隐子草 ($n=3$) <i>Cleistogenes songorica</i>	木地肤 ($n=3$) <i>Bassia prostrata</i>	狭叶锦鸡儿 ($n=3$) <i>Caragana stenophylla</i>	短花针茅 ($n=3$) <i>Stipa breviflora</i>	糙苏 ($n=3$) <i>Phlomis umbrosa</i>	羊草 ($n=3$) <i>Leymus chinensis</i>	银灰旋花 ($n=3$) <i>Convolvulus ammannii</i>	驼绒藜 ($n=3$) <i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	黄芪 ($n=3$) <i>Astragalus membranaceus</i>	F	P
粗蛋白 CP/%	17.496±0.123	18.419±0.158	13.252±0.354	20.115±0.094	18.054±2.854	13.031±0.160	28.858±0.097	14.677±0.244	17.313±0.598	25.042±0.139	12.585±0.289	96.800	<0.001**
粗脂肪 EE/%	4.391±1.090	8.157±0.873	6.635±0.373	5.632±1.819	6.456±1.036	7.203±0.913	4.990±2.422	5.984±2.827	5.865±0.496	5.523±1.139	4.884±0.478	1.718	0.139
粗灰分 CA/%	7.868±0.157	10.130±0.718	6.725±2.543	8.893±1.536	11.271±4.096	13.676±2.463	8.746±1.132	7.876±2.241	9.844±0.645	12.802±2.572	8.596±1.284	3.246	0.010*
中性洗涤纤维 NDF/%	44.633±4.610	39.768±2.806	62.464±5.628	39.981±1.197	44.182±10.957	62.607±4.257	27.296±5.978	61.208±4.052	35.637±3.440	39.238±4.644	50.632±3.052	15.451	<0.001**
酸性洗涤纤维 ADF/%	33.898±2.511	35.098±0.679	35.540±6.759	25.889±2.814	47.335±14.155	38.129±1.887	22.252±0.987	30.983±3.110	26.512±3.222	20.966±1.358	32.411±11.105	4.687	0.001**
可吸收营养物质总量 TDN/%	56.905±1.887	56.004±0.510	55.672±5.080	62.924±2.115	46.808±10.638	53.726±1.418	65.657±0.742	59.096±2.337	62.457±2.421	66.624±1.021	58.023±8.345	4.687	0.001**
干物质采食量 DMI/%	2.707±0.267	3.027±0.208	1.931±0.166	3.003±0.089	2.839±0.748	1.922±0.136	4.563±1.141	1.966±0.125	3.388±0.315	3.087±0.364	2.376±0.148	8.665	<0.001**
干物质消化率 DDM/%	62.493±1.956	61.558±0.529	61.214±5.266	68.732±2.192	52.026±11.027	59.198±1.470	71.565±0.769	64.764±2.423	68.248±2.510	72.567±1.058	63.652±8.651	4.687	0.001**
相对饲喂价值 RFV/%	131.197±14.590	144.433±9.395	92.009±14.762	160.092±9.193	118.059±55.896	88.253±6.830	252.739±60.610	98.839±9.534	179.303±19.460	173.721±21.664	117.760±22.578	8.724	<0.001**
相对牧草品质 RFQ/%	125.298±14.060	137.808±8.939	87.782±14.503	153.717±9.072	111.643±54.570	84.004±6.555	243.165±58.185	94.596±9.310	172.097±18.878	167.276±20.926	112.612±22.475	8.712	<0.001**

由表2可知 EE 的 $P=0.139>0.05$, 意味着不同牧草对于 EE 全部表现出一致性,并没有显著性差异。而 CP, NDF, ADF, TDN, DMI, DDM, RFV 以及 RFQ 在各类牧草中呈现出显著差异。

上述方差分析的结果显示,不同种类的牧草在大部分营养指标上存在显著差异,这表明牧草营养特征的差异与其功能属性密切相关。为进一步开展牧草营养价值综合评价,本研究依据植物的生态

生活型,将本研究中的 11 种牧草划分为三大类:禾本科、灌木与半灌木类、杂类草。其中,禾本科包括短花针茅、无芒隐子草和羊草,具有发达的须根或根茎,能够适应干旱半干旱环境,生态功能上表现出较强的耐牧性和再生能力,在草原生态系统中起土壤固持和防风固沙的作用,是草食动物的主要饲料来源。灌木与半灌木类包括狭叶锦鸡儿、小叶锦鸡儿、驼绒藜、木地肤和冷蒿,它们属于木本植物,

具有很强的抗旱、耐寒、耐盐碱能力,适应恶劣生境,生态功能上起防风固沙和改良土壤的作用,是冬季或干旱季节的重要补充饲料。杂类草包括糙苏、银灰旋花和黄芪,它们多为一年生或多年生草本,形态多样,在草原中多为伴生种或偶见种,起到增加植物多样性和生态补充的作用。这种基于生态生活型功能群的分类方式,清晰地揭示了不同牧草在形态结构与生态适应性上的本质差异,为分组进行牧草营养价值综合评价提供了分类依据。

2.2 基于CRITIC的赋权结果

本文对内蒙古乌兰察布市四子王旗3类牧草的10项营养成分指标数据分别进行预处理。其中CA,NDF,ADF为成本型指标,因此根据公式(2)进行逆向化处理;而其余指标为效益型指标,则根据公式(1)作正向化处理。再经过标准化后得到的CRITIC赋权结果如表3~表5所示。

表3 禾本科CRITIC赋权结果

Table 3 Gramineae CRITIC empowerment results

指标 Norm	变异性 Variability	冲突性 Conflictual	信息量 Volume of information	权重 Weight
CP	0.538	2.607	1.403	0.071
EE	0.441	17.530	7.738	0.393
CA	0.412	4.975	2.047	0.104
NDF	0.547	2.664	1.458	0.074
ADF	0.476	2.406	1.145	0.058
TDN	0.476	2.406	1.145	0.058
DMI	0.522	2.523	1.317	0.067
DDM	0.476	2.406	1.145	0.058
RFV	0.478	2.406	1.150	0.058
RFQ	0.477	2.406	1.148	0.058

对于禾本科牧草(表3),NDF(0.547)和CP(0.538)的变异性位居前两位,说明不同禾草的NDF和CP含量差异较大;CA(0.412)和EE(0.441)的变异性较低,表明不同禾草的粗灰分和粗脂肪含量相对稳定。EE(17.530)的冲突性极高,说明粗脂肪与其他指标的相关性很低,具有较高的独立信息价值;CP(2.607),NDF(2.664)等指标的冲突性较低,说明它们与其他指标存在一定的相关性,信息重叠较多。EE(7.738)的信息量最高,远高于其他指标,CA(2.047),CP(1.403),NDF(1.458)的信息量次之。EE(0.393)的权重最高,占比近40%,说明粗脂肪是禾本科牧草营养评价的最关键指标。CA(0.104),CP(0.071),NDF(0.074)的权重次之,ADF,TDN,DDM,RFV,RFQ的权重较低

(均约0.058),说明其在评价中的贡献较小。

表4 灌木、半灌木类CRITIC赋权结果

Table 4 Shrub、Subshrub CRITIC empowerment results

指标 Norm	变异性 Variability	冲突性 Conflictual	信息量 Volume of information	权重 Weight
CP	0.382	4.434	1.692	0.116
EE	0.303	9.716	2.944	0.202
CA	0.277	12.031	3.332	0.229
NDF	0.178	3.460	1.049	0.072
ADF	0.303	3.446	0.900	0.062
TDN	0.261	3.446	0.900	0.062
DMI	0.263	4.062	1.069	0.073
DDM	0.261	3.446	0.900	0.062
RFV	0.293	3.031	0.888	0.061
RFQ	0.292	3.038	0.887	0.061

对于灌木、半灌木(表4),CP(0.382)和EE(0.303)的变异性较高,说明不同灌木类牧草的粗蛋白和粗脂肪含量差异较大;NDF(0.178)的变异性最低,表明中性洗涤纤维在不同灌木类牧草中的含量相对稳定。CA(12.031)的冲突性最高,说明粗灰分与其他指标的相关性很低,具有较高的独立信息价值;EE(9.716)和CP(4.434)的冲突性次之,表明粗脂肪和粗蛋白也有较强的独立性;RFV(3.031)和RFQ(3.038)的冲突性最低,说明它们与其他指标的信息重叠较多。CA(3.332)的信息量最高;EE(2.944)和CP(1.692)的信息量次之,表明粗脂肪和粗蛋白也有重要影响;NDF(1.049)和DMI(1.069)的信息量较低,贡献相对有限。CA(0.229)的权重最高,占比约23%,说明粗灰分是灌木类牧草营养评价的最关键指标;EE(0.202)和CP(0.116)的权重次之,分别占比约20%和12%,表明粗脂肪和粗蛋白也有较大影响;NDF(0.072)和DMI(0.073)的权重较低,贡献较小;其余指标(如ADF,TDN,DDM等)的权重均低于0.062,影响甚微。

对于杂类草(表5),EE(0.546)和RFV(0.456),RFQ(0.456)的变异性较高,说明不同杂类草的粗脂肪和相对饲喂价值/品质差异较大;CA(0.410)和CP(0.494)的变异性中等,表明粗灰分和粗蛋白含量在不同杂类草中存在一定差异;NDF(0.426)和ADF(0.434)的变异性较低,说明纤维类指标相对稳定。CA(10.935)的冲突性最高,说明粗灰分与其他指标的相关性极低,具有最强的独立信息价值;EE(9.159)的冲突性次高,表明粗脂肪的独立性也较强;CP(2.307)和纤维类指标(NDF与

表5 杂类草CRITIC赋权结果

Table 5 Forbs CRITIC empowerment results

指标 Norm	变异性 Variability	冲突性 Conflictual	信息量 Volume of information	权重 Weight
CP	0.494	2.307	1.139	0.067
EE	0.546	9.159	4.998	0.292
CA	0.410	10.935	4.483	0.262
NDF	0.426	2.165	0.923	0.054
ADF	0.434	2.098	0.911	0.053
TDN	0.434	2.098	0.911	0.053
DMI	0.454	2.080	0.945	0.055
DDM	0.434	2.098	0.911	0.053
RFV	0.456	2.083	0.949	0.055
RFQ	0.456	2.083	0.949	0.055

ADF)及消化类指标(DDM与DMI等 ≈ 2.1)指标的冲突性最低,说明它们与其他指标的信息重叠较多。EE(4.998)和CA(4.483)的信息量远超其他指标,分别位列第一和第二;CP(1.139)的信息量中等,表明粗蛋白有一定影响但不如EE和CA显著;

其余指标(如NDF,ADF,TDN等)的信息量均低于1.0,贡献相对有限。EE(0.292)和CA(0.262)的权重最高,合计占比超55%,是杂类草牧草营养评价的最关键指标;CP(0.067)的权重中等,占比约6.7%,是次要指标;纤维类(NDF与ADF ≈ 0.053)和消化类(TDN与DDM ≈ 0.053)指标的权重最低,均约5.3%,影响较小;RFV(0.055)和RFQ(0.055)的权重略高于纤维类指标,但仍属低权重范畴。

2.3 基于CRITIC-GRA-TOPSIS的综合评价结果

在获得各类牧草营养指标的客观权重后,为进一步比较同一类别内不同牧草品种的营养价值,本研究采用CRITIC-GRA-TOPSIS综合评价方法对各类牧草进行综合排序,三类牧草综合评价结果如表6、表7、表8所示。

表6 基于CRITIC-GRA-TOPSIS的禾本科牧草营养价值综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation results of nutritional value of Gramineous forages based on CRITIC-GRA-TOPSIS

名称 Name	D_i^+	D_i^-	R_i^+	R_i^-	C_i^+	C_i^-	γ_i	排名 Ranking
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	0.190	0.347	0.762	0.933	0.554	0.562	0.497	2
无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	0.208	0.207	0.790	0.850	0.499	0.529	0.485	3
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	0.347	0.185	0.926	0.766	0.556	0.556	0.500	1

对于禾本科(表6),CRITIC-GRA-TOPSIS综合关联度从大到小为羊草(0.500),短花针茅

(0.497),无芒隐子草(0.485)。因此得到牧草营养价值综合排名依次为:羊草>短花针茅>无芒隐子草。

表7 基于CRITIC-GRA-TOPSIS的灌木、半灌木类牧草营养价值综合评价结果

Table 7 Comprehensive evaluation results of nutritonal value of shrub and semi-shrub forages based on CRITIC-GRA-TOPSIS

名称 Name	D_i^+	D_i^-	R_i^+	R_i^-	C_i^+	C_i^-	γ_i	排名 Ranking
狭叶锦鸡儿 <i>Caragana stenophylla</i>	0.200	0.105	0.608	0.880	0.357	0.540	0.398	5
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	0.132	0.201	0.777	0.704	0.489	0.418	0.539	3
驼绒藜 <i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	0.198	0.167	0.877	0.662	0.521	0.430	0.548	2
木地肤 <i>Bassia prostrata</i>	0.138	0.171	0.800	0.659	0.486	0.399	0.549	1
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	0.217	0.166	0.686	0.838	0.426	0.527	0.447	4

对于灌木、半灌木(表7),GRA-TOPSIS综合关联度从大到小为木地肤(0.549),驼绒藜(0.548),小叶锦鸡儿(0.539),冷蒿(0.447),狭叶锦鸡儿(0.398)。因此得到牧草营养价值综合排名依次为:木地肤>驼绒藜>小叶锦鸡儿>冷蒿>狭

叶锦鸡儿。

对于杂类草(表8),CRITIC-GRA-TOPSIS综合关联度从大到小为糙苏(0.538),银灰旋花(0.522),黄芪(0.423)。因此得到牧草营养价值综合排名依次为:糙苏>银灰旋花>黄芪。

表8 基于CRITIC-GRA-TOPSIS的杂类草牧草营养价值综合评价结果

Table 8 Comprehensive evaluation results of nutritional value of forbs based on CRITIC-GRA-TOPSIS

名称 Name	D_i^+	D_i^-	R_i^+	R_i^-	C_i^+	C_i^-	γ_i	排名 Ranking
糙苏 <i>Phlomis umbrosa</i>	0.260	0.226	0.922	0.724	0.574	0.492	0.538	1
黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i>	0.323	0.197	0.730	0.943	0.463	0.633	0.423	3
银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	0.211	0.299	0.826	0.818	0.562	0.514	0.522	2

2.4 牧草种类与营养指标的对应分析

对应分析用于研究分类变量之间的关系,尤其适用于二维列联表数据的可视化分析。对应分析双标图是一种将行变量和列变量同时映射到同一个二维坐标空间的图形化方法,其可以直

观展示牧草间相似性(距离越近,营养特征越相似)、营养指标间的相关性(夹角越小,指标关联性越强)和牧草与营养指标的关联性(牧草点与指标向量的接近程度反映其在该指标上的表现)。

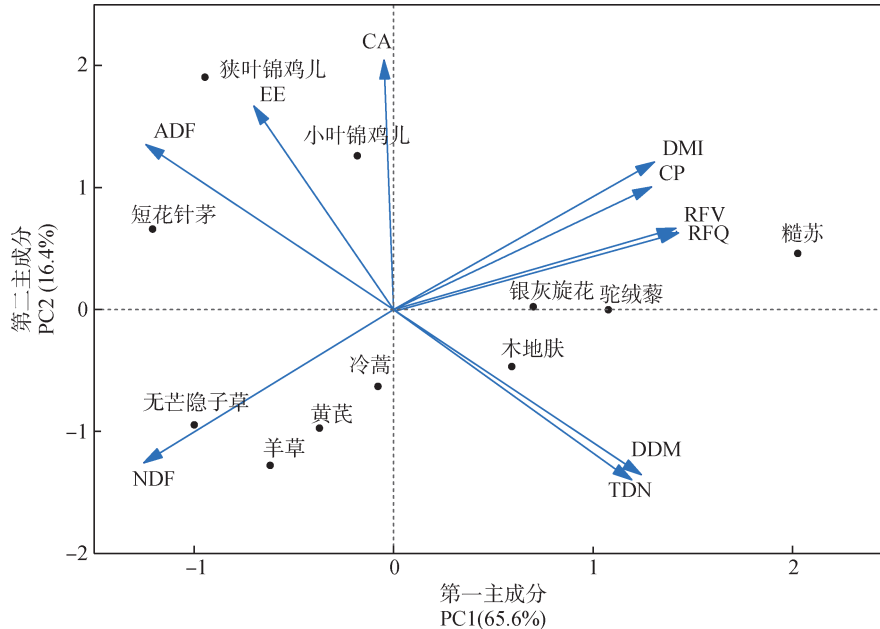


图1 牧草种类与评价指标的对应关系双标图

Fig. 1 Dual-label plot of correspondence between forage species and evaluation indicators

由图1可知,前两个主成分累计方差贡献率达到82.0%,两者能够代表原始数据中绝大部分的信息,且对应分析通过了信息比和拟合度检验,体现了牧草种类与评价指标之间的相互关系。从图1中可以看出,CP,DMI,RFV及RFQ呈正相关关系,而与ADF和NDF呈负相关关系。糙苏的CP,DMI,RFV,RFQ含量相对较高,说明牧草品质较好。RFV与RFQ呈正相关关系。干物质消化率和可吸收营养物质总量呈正相关关系。

3 讨论

3.1 不同牧草评价结果差异比较

牧草的营养成分是综合评价其品质优良与否的核心指标之一,不仅直接关联牧草的经济价值与生态效益,也是开展牧草资源筛选、品种选育及可持续利用的重要科学依据。

不同类别牧草在营养成分组成上存在显著差异,这一现象已被多项研究证实。基于方差分析的不同牧草营养成分指标之间的结果(表1、表2)表明,禾本科、灌木、半灌木和杂类草之间营养成分指标中

的CA含量不显著,其他指标都呈现出显著差异;冷蒿、小叶锦鸡儿、无芒隐子草、木地肤、狭叶锦鸡儿、短花针茅、糙苏、羊草、银灰旋花、驼绒藜、黄芪之间的EE不显著,其他指标都显著。这充分表明,不同类别的牧草由于生长环境和生理特性的不同,在主要营养物质的积累与纤维素含量方面存在明显区别。邹曼等^[31]在分析不同品种多花黑麦草的营养成分中,也得出上述结论。陈玲玲等^[32]在杂类草营养价值分析中,得到5类杂草的大部分营养成分含量均值达极显著水平,也表明不同牧草营养成分含量不同的特点。

从营养成分权重来看,在禾本科,杂类草,灌木、半灌木中,CP权重相对较高,而ADF及NDF权重相对较低。有研究表明,粗蛋白含量和纤维素含量是进行牧草营养价值综合评价的重要指标^[33],两者呈现出负相关关系^[34],表明营养价值高的牧草,其CP含量较高而NDF及ADF含量相对较低。禾本科、杂类草及灌木、半灌木类植物多为一年生或多年生草本植物,以及灌木的嫩枝叶部分,这些植物的生长速度快,叶片比例高,细胞壁薄,木质化程度低,因此纤维素(ADF、NDF)含量相对较低;同时,这些植物为了维持快速生长和光合作用,叶片

中蛋白质含量高,从而导致粗蛋白含量相对较高。三类牧草中,EE所赋权重也较高,分别达到0.393, 0.202和0.292。EE是牧草中重要的能量来源之一^[35],其含量高说明牧草的能量价值高。因此,其含量在本研究也可以成为区分牧草营养价值的关键因素。CA在三者中的权重相对接近,说明该指标一般不能作为区分不同牧草营养成分的关键指标。八月份牧草正处于“青草期”,牧草生长旺盛,光合作用强,干物质中有机质(蛋白质、脂肪、纤维素等)快速积累,但矿物质吸收速度相对滞后。该地处于乌兰察布高原,土壤以栗钙土、棕钙土为主,有机质含量较低,矿质元素相对较少。TDN, DMI, DDM, RFV, RFQ在不同牧草中的权重普遍较低且差异较小,但对于牧草营养成分的综合研究,其重要性仍然不可忽略^[36]。在禾本科牧草中,羊草综合排名第一(0.500),这得益于其较高的粗蛋白含量($14.677\% \pm 0.244\%$)和干物质消化率($64.764\% \pm 2.423\%$),说明其蛋白质供应和消化利用效率优势显著,这与张军等^[5]关于禾本科牧草营养价值综合评价结果一致。短花针茅和无芒隐子草分列二、三位。羊草作为优质牧草^[37],有“禾草之王”的称号,其具有发达的根茎,耐寒、耐旱、耐盐碱,而且具有防风固沙的作用。在灌木、半灌木牧草中,木地肤综合得分最高(0.549),其粗蛋白含量($20.115\% \pm 0.094\%$)和干物质消化率($68.732\% \pm 2.192\%$)表现突出,说明其营养品质优良。木地肤是一种耐寒抗旱、品质优良的半灌木饲用植物,可消化蛋白质含量与豆科和禾本科含量相接近,适口性较好^[38]。驼绒藜次之,其粗蛋白含量较高,无氮浸出物含量也相对较高,适口性较好^[39]。小叶锦鸡儿、冷蒿、狭叶锦鸡儿综合得分位于后三位,可能与其较高的酸性洗涤纤维含量和较低的可吸收营养物质总量有关。在杂类草牧草中,糙苏(0.538)排名第一,其粗蛋白含量($28.858\% \pm 0.097\%$)和相对饲喂价值($252.739\% \pm 60.610\%$)均为最高,表明其具有较高的饲用价值,其株型庞大,具有丰富的叶片,含有丰富的营养成分如粗蛋白质,适口性较好,被视为杂类草牧草中的优质牧草。银灰旋花和黄芪分列二、三位,黄芪因纤维含量较高($50.632\% \pm 3.052\%$)和消化率较低($63.652\% \pm 8.651\%$)导致排名靠后,营养价值较低。营养成分间相关性分析表明,CP与DMI、RFV与RFQ、DDM与TDN呈现正相关关系,ADF与CP呈负相关关系。羊草消化率和粗蛋白含量较高,

表明其在这两项指标上表现优异;而短花针茅酸性洗涤纤维含量较高,即其纤维含量高,营养品质较差。

3.2 牧草营养价值综合评价方法比较

于健龙等^[40]、凌超等^[41]运用灰色关联分析方法对牧草营养成分进行了综合评价,虽能反映指标间动态关联,但仅给出关联序,缺乏对“绝对优劣”距离的量化,结果易受异常值干扰;张玉^[3]、张凡凡等^[4]利用主成分分析降维,以少数综合得分排序,却忽略指标之间的冲突性,当主成解释率低于70%时信息损失明显。付志慧等^[42]、王德凤等^[11]使用聚类分析,将牧草硬性分群,但无法给出连续性优劣梯度,难以直观比较临界样本。传统熵权-TOPSIS^[43]虽可计算与理想解的距离,但熵权仅度量指标变异度,未考虑指标间相关性,易导致高相关指标重复加权、权重失真。本文将CRITIC客观赋权与GRA-TOPSIS耦合,既突出信息量大的指标,又自动削弱冗余指标,避免人为干预;如在禾草类中EE权重高达0.393,而ADF、NDF等纤维指标被压缩至0.058左右,体现了对脂肪这一关键差异指标的精确捕捉。而GRA-TOPSIS将欧氏距离(静态位置)与灰色关联度(动态趋势)等权融合,使排序兼顾“绝对差距”与“曲线形状”,克服了GRA无量纲缺陷与TOPSIS忽视序列走势的不足。

4 结论

本研究综合运用方差分析、CRITIC赋权及GRA-TOPSIS综合评价模型,对内蒙古乌兰察布市四子王旗11种牧草进行系统评价。方差分析揭示,不同种类的牧草因生长环境、生理特性差异,在营养物质积累和纤维含量上差异显著。基于数据变异性与冲突性,CRITIC赋权呈现出不同类别牧草关键评价指标的特异性,为针对性筛选优质牧草提供权重依据。GRA-TOPSIS综合评价模型融合动态关联与静态排序,有效区分了各类牧草营养价值的优劣。三者协同,全面解析牧草营养特征,为牧草资源合理利用和饲料配方优化提供坚实科学支撑,助力提升牧草利用效率。

参考文献

- [1] ZHANG J, IWAASA A D, HAN G D, et al. Utilizing a multi-index decision analysis method to overall assess forage yield and

- quality of C3 grasses in the western Canadian prairies[J]. Field Crops Research, 2018, 222: 12-25
- [2] 李艳琴,徐敏云,王振海,等. 牧草品质评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4485-4486, 4546
LI Y Q, XU M Y, WANG Z H, et al. Research advances in evaluation of forage quality[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(11): 4485-4486, 4546
- [3] 张玉. SPSS软件和主成分分析法在牧草营养价值评价中的应用[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7186-7188
ZHANG Y. Application of SPSS software and principle component analysis method in evaluation of forage nutrition value[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 7186-7188
- [4] 张凡凡,和海秀,于磊,等. 天山西部高山区夏季放牧草地4种重要牧草营养成分评价[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 207-215
ZHANG F F, HE H X, YU L, et al. Nutritional quality of four important herbage species in summer grazing grassland in the alpine zone, west Tianshan Mountain[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(8): 207-215
- [5] 张军,李治国,李江文,等. 鄂温克草原常见禾本科牧草营养价值的综合评价与对应分析[J]. 中国草地学报, 2019, 41(5): 33-39
ZHANG J, LI Z G, LI J W, et al. Comprehensive evaluation and correspondence analysis of nutritional value of common grass species in ewenki grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(5): 33-39
- [6] 李宇宇,格根图,降晓伟,等. 基于主成分分析巴林左旗天然打草场主要牧草营养成分评价[J]. 草学, 2021(1): 18-23
LI Y Y, GE G T, JIANG X W, et al. Quality evaluation of main forages in the natural grassland of Bahrain Zuoqi based on principal component analysis[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2021(1): 18-23
- [7] 田斌,马超,耿怡雯,等. 基于主成分分析法评价不同牧草营养成分饲用价值[J]. 饲料工业, 2024, 45(7): 15-19
TIAN B, MA C, GENG Y W, et al. Evaluation of the feeding value of different forage nutrients based on the principal component analysis method[J]. Feed Industry, 2024, 45(7): 15-19
- [8] 夏明,桂荣,那日苏. 牧草营养成分聚类分析与评价[J]. 中国草地, 2000, 22(4): 33-37
XIA M, GUI R, NA R S. Analysis and evaluation on artificial cultivating grass with hierarchical cluster[J]. Grassland of China, 2000, 22(4): 33-37
- [9] 乌云高娃,吴艳玲,余红梅,等. 内蒙古呼伦贝尔地区6种禾本科牧草营养成分分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2017, 38(2): 50-52
WU Y, WU Y L, YU H M, et al. Analysis of nutritional components of six Gramineae forages in Hulunbeier, Inner Mongolia[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2017, 38(2): 50-52
- [10] 马霞,肖爱萍,王斌,等. 宁夏雨养区10个小黑麦品种(系)生产性能及其营养价值研究[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3687-3696
MA X, XIAO A P, WANG B, et al. Study on production performance and nutritional value of 10 *Triticale varieties* (lines) in rainfed area of Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12): 3687-3696
- [11] 王德凤,韩勇,袁超,等. 西南喀斯特山区120种野生牧草的常规营养成分含量及其聚类分析[J]. 动物营养学报, 2022, 34(8): 5255-5269
WANG D F, HAN Y, YUAN C, et al. Conventional nutrient contents of 120 wild forages from southwest karst mountainous areas and their clustering analysis[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(8): 5255-5269
- [12] 白玉龙,姜永,赵剑平,等. 禾本科牧草与豆科牧草营养成分比较[J]. 当代畜牧, 2007(12): 34-35
BAI Y L, JIANG Y, ZHAO J P, et al. Comparison of nutritional components between Gramineae forage and Leguminosae forage[J]. Contemporary Animal Husbandry, 2007(12): 34-35
- [13] 张凡凡,于磊,张前兵,等. 沙尔套山天然割草场主要豆科牧草营养价值综合评价研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(10): 1907-1915
ZHANG F F, YU L, ZHANG Q B, et al. Comprehensive assessment of the main legume forages' nutritional value of natural mowing steppe in shaertao mountain, Zhaosu, Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(10): 1907-1915
- [14] 田兵,冉雪琴,薛红,等. 贵州42种野生牧草营养价值灰色关联度分析[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 92-103
TIAN B, RAN X Q, XUE H, et al. Evaluation of the nutritive value of 42 kinds of forage in Guizhou Province by grey relational grade analysis[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 92-103
- [15] 牛文远,王召明,闫晓红,等. 呼伦贝尔市不同地区天然打草场牧草营养成分分析[J]. 草原与草业, 2015, 27(3): 49-55
NIU W Y, WANG Z M, YAN X H, et al. Analysis of nutritional components of natural grassland forage in different areas of Hulunbeier City[J]. Grassland and Prataculture, 2015, 27(3): 49-55
- [16] 徐远东,范彦. 重庆野生牧草资源营养价值综合评价[J]. 中国饲料, 2020(3): 70-75
XU Y D, FAN Y. The comprehensive evaluation of nutritional value of wild forage resources in Chongqing[J]. China Feed, 2020(3): 70-75
- [17] 侯伟峰,其格其,何刘柱,等. 兴安盟8种乡土豆科牧草营养成分比较研究[J]. 饲料研究, 2023, 46(12): 135-138
HOU W F, QI G Q, HE L Z, et al. Comparative study on nutritional composition of eight native leguminous forage in Xing'an league[J]. Feed Research, 2023, 46(12): 135-138
- [18] 杨振海. 基于灰色关联度法和权重决策法评价牧草营养成分[J]. 陕西农业科学, 2011, 57(5): 58-60
YANG Z H. Evaluation of forage nutrient composition based on grey relational grade method and weight decision method[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2011, 57(5): 58-60
- [19] 谢宇,姜冬梅,孙海莲,等. 四子王旗牧草产业发展战略研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2019(20): 3-6
XIE Y, JIANG D M, SUN H L, et al. Research on the development strategy of forage industry in Siziwang banner[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2019(20): 3-6
- [20] 李江文,李治国,王瑞珍,等. 草甸草原常见天然牧草营养元素差异性分析[J]. 中国草地学报, 2016, 38(6): 66-70
LI J W, LI Z G, WANG R Z, et al. Difference analysis of nutritive element content of common natural grass in ewenki meadow steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(6): 66-70
- [21] VERSHININA, Y S, MITIN, I V, GARMAY, A V, et al. Simple and robust approach for determination of total protein content in plant samples. Foods, 2025, 14(3): 358
- [22] SKLÁDANKA J, DOHNAL V, JEŽKOVÁ A. Fibre and ergosterol contents in forage of *Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata* and *Festulolium* at the end of the growing season[J]. Czech Journal of Animal Science, 2008, 53(8): 320-328
- [23] QUIRINO D F, PALMA M N, FRANCO M O, et al. Varia-

- tions in methods for quantification of crude ash in animal feeds. Journal of AOAC International, 2023, 106(1): 6-13
- [24] 赵牧其尔, 包健, 王志军, 等. 不同乳酸菌添加剂对天然草地牧草青贮饲料青贮品质的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(5): 3352-3362
ZHAO M, BAO J, WANG Z J, et al. Effect of different lactic acid bacteria additives on silage quality of natural pasture grass silage[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(5): 3352-3362
- [25] 刘爱鑫, 张楠楠, 刘毅, 等. 青海省高寒地区5种禾本科牧草产草量和营养价值综合评价[J]. 动物营养学报, 2025, 37(2): 1388-1400
LIU A X, ZHANG N N, LIU Y, et al. Comprehensive evaluation of grass yield and nutritional value of five gramineous forages in alpine region of Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(2): 1388-1400
- [26] ROHWEDER D A, BARNES R F, JORGENSEN N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality[J]. Journal of Animal Science, 1978, 47(3): 747-759
- [27] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems; the critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770
- [28] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981: 1-17
- [29] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2010: 62-73
LIU S F, DANG Y G, FANG Z G, et al. Grey system theory and its applications (5th ed.) [M]. Beijing: Science Press, 2010: 62-73
- [30] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 173-196
HE X Q. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2004: 173-196
- [31] 邹曼, 徐佳祥, 唐连英, 等. 马关县不同品种多花黑麦草产量及营养成分分析[J]. 中国奶牛, 2024(10): 63-67
ZOU M, XU J X, TANG L Y, et al. Analysis of yield and nutrient content of different varieties of Italian ryegrass in Maguan County[J]. China Dairy Cattle, 2024(10): 63-67
- [32] 陈玲玲, 乌艳红, 乌仁图雅, 等. 杂类草营养价值评析[J]. 饲料研究, 2012, 35(6): 80-81
CHEN L L, WU Y H, WU R, et al. Evaluation on nutritional value of miscellaneous grasses[J]. Feed Research, 2012, 35(6): 80-81
- [33] 郑凯, 顾洪如, 沈益新, 等. 牧草品质评价体系及品质育种的研究进展[J]. 草业科学, 2006, 23(5): 57-61
ZHENG K, GU H R, SHEN Y X, et al. Evaluation system of forage quality and research advances in forage quality breeding[J]. Pratacultural Science, 2006, 23(5): 57-61
- [34] 刘娜, 毕研亮, 刁其玉, 等. 全株玉米青贮饲料在奶牛瘤胃中的干物质、淀粉及中性洗涤纤维降解特性研究与预测模型建立[J]. 动物营养学报, 2019, 31(12): 5846-5856
LIU N, BI Y L, DIAO Q Y, et al. Degradation characteristics and prediction model of dry matter, starch and neutral detergent fiber of whole-plant corn silage in cow rumen[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(12): 5846-5856
- [35] 孟林. 驼绒藜在新疆草地的分布及其生态经济价值[J]. 草原与草坪, 2002, 22(3): 24-27
MENG L. The distribution, ecological and economic values of *Ceratoides latens* in grassland of Xinjiang Region [J]. Grassland and Turf, 2002, 22(3): 24-27
- [36] 史激光. 锡林郭勒天然草地营养成分评价[J]. 草业科学, 2012, 29(12): 1941-1944
SHI J G. Comprehensive nutrients evaluation of Xilin Gol natural grassland[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(12): 1941-1944
- [37] 陈山. 锡林郭勒草原饲用禾草资源概述[J]. 中国草原, 1979, 1(1): 13-20
CHEN S. Brief introduction of forage grass resources in Xilin Gol League grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 1979, 1(1): 13-20
- [38] 雍世鹏. 木地肤的生态生物学特性和栽培技术[J]. 中国草原, 1980, 2(2): 39-43
YONG S P. Eco-biological characteristics and cultivation techniques of *Kochia scoparia* [J]. Chinese Journal of Grassland, 1980, 2(2): 39-43
- [39] 易津, 王学敏, 乌仁其木格, 等. 驼绒藜属植物生物学特性研究进展[J]. 草地学报, 2003, 11(2): 87-94
YI J, WANG X M, WU R, et al. Advances in the study of biological characteristics of genus *Ceratoides* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2003, 11(2): 87-94
- [40] 于健龙, 石红霄. 高寒草甸主要乡土牧草营养成分的灰色关联综合评价及利用潜力[J]. 家畜生态学报, 2011, 32(4): 58-64
YU J L, SHI H X. Grey relevance analysis and utilization potential on natural pastures nutrient constituent of alpine meadow [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2011, 32(4): 58-64
- [41] 凌超, 卜令贝, 李姣, 等. 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, et al. 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
- [42] 付志慧, 格根图, 贾玉山, 等. 9个多花黑麦草品种在土默川地区的生产性能和营养价值分析[J]. 中国草地学报, 2023, 45(8): 41-49
FU Z H, GE G T, JIA Y S, et al. Analysis on the production performance and nutritive value of nine annual ryegrass varieties in tumochuan area[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(8): 41-49
- [43] 段科龙, 牛最荣, 张真荣, 等. 水氮调控对多年生黑麦草生长特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 34-42
DUAN K L, NIU Z R, ZHANG Z R, et al. Optimal irrigation and nitrogen fertilization for growth and yield of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 34-42

(责任编辑 付 宸)