

DOI: 10.11686/cyxb2025360

http://cyxb.magtech.com.cn

黄德锋, 李珂珂, 赖可, 等. 18个燕麦品种在日喀则的生产性能和青贮品质评价. 草业学报, 2026, 35(8): 84—96.

HUANG De-feng, LI Ke-ke, LAI Ke, *et al.* Evaluation of yield, nutritional quality and silage quality of 18 oat varieties in Shigatse. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 84—96.

18个燕麦品种在日喀则的生产性能和青贮品质评价

黄德锋¹, 李珂珂¹, 赖可², 班洁², 王硕¹, 齐博康¹, 张晓雯¹, 钟志强¹, 邓孝琛¹, 原现军^{1*}

(1. 南京农业大学草业学院, 江苏 南京 210095; 2. 日喀则市草原工作站, 西藏 日喀则 857000)

摘要:为筛选出适合日喀则高寒气候的优质燕麦品种,在日喀则市对18个饲用燕麦品种进行引种栽培,测定了其农艺性状、生产性能、营养品质和青贮特性。结果表明:干草产量以甜燕75为最高,达 $13.40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为泰克,干草产量达 $11.39\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。粗蛋白含量以泰克最高,为12.17%。定燕2号中性洗涤纤维含量最低,为46.34%。高燕17、定燕2号、优牧1号、前锋和泰克的酸性洗涤纤维含量低于其余参试品种,分别为24.07%、24.75%、25.10%、26.15%和26.36%。自然青贮80 d后,除英迪米特、陇燕3号、歌莉娅、高燕16和定燕2号青贮饲料的pH高于4.2外,其余品种均发酵良好,泰克和甜燕2+的乳酸含量较高,各品种的氨态氮含量均低于10%,英迪米特和优牧1号丁酸含量较高,其余品种均低于1%。前锋、优牧1号和泰克青贮饲料相对饲喂价值(RFV)和饲草分级指数(FGI)排名位列前三,饲用价值较高。综合考虑产量、营养品质和青贮特性,根据主成分、灰色关联度和熵权TOPSIS法分析结果,推荐将前锋、泰克和优牧1号作为日喀则高寒地区饲用燕麦的核心推广品种。

关键词:高寒地区;燕麦;青贮品质;综合评价;品种筛选

Evaluation of yield, nutritional quality and silage quality of 18 oat varieties in Shigatse

HUANG De-feng¹, LI Ke-ke¹, LAI Ke², BAN Jie², WANG Shuo¹, QI Bo-kang¹, ZHANG Xiao-wen¹, ZHONG Zhi-qiang¹, DENG Xiao-chen¹, YUAN Xian-jun^{1*}

1. College of Grassland Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Shigatse Grassland Workstation, Shigatse 857000, China

Abstract: This research aimed to identify high-quality oat (*Avena sativa*) varieties suitable for the alpine climate in Shigatse. Eighteen forage oat varieties were selected and cultivated in Shigatse City, and their agronomic traits, yield, nutritional quality, and silage characteristics were determined. The results indicated that the oat variety Tianyan 75 had the highest hay yield (up to $13.40\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), followed by Taiké ($11.39\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Taiké had the highest crude protein content, at 12.17%. Dingyan No. 2 had the lowest neutral detergent fiber (NDF) content, at 46.34%. Gaoyan 17, Dingyan No. 2, Youmu No. 1, Qianfeng, and Taiké had lower acid detergent fiber (ADF) contents than the other tested varieties, with the ADF contents being 24.07%, 24.75%, 25.10%, 26.15%, and 26.36% respectively. After 80 days of natural ensiling, all varieties showed good fermentation except for Indimite, Longyan No. 3, Gloria, Gaoyan 16, and Dingyan No. 2, whose silage pH values were higher than 4.2. Taiké and Tianyan 2+ had comparatively high lactic acid contents. The ammonia nitrogen content of all varieties was lower

收稿日期:2025-09-03;改回日期:2025-10-16

基金项目:日喀则市区域科技协同创新专项(QYXTZX-RKZ2025-03-2)资助。

作者简介:黄德锋(2001—),男,贵州六盘水人,在读硕士。E-mail: huangdf3015@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: hnyxj0702@163.com

than 10%; Indimite and Youmu No. 1 had the highest butyric acid contents at $>1\%$, while the other varieties were all lower than 1%. Qianfeng, Youmu No. 1, and Taike ranked the top three in terms of relative feeding value and forage grading index of their silages, exhibiting high forage value. Based on a multivariate consideration of yield, nutritional quality, and silage characteristics, and according to the results of principal component analysis, grey relational analysis, and entropy-weighted TOPSIS analyses, Qianfeng, Youmu No. 1, and Taike are recommended as high performing varieties of forage oats in the alpine regions of Shigatse.

Key words: alpine region; oat; silage quality; comprehensive evaluation; variety screening

日喀则是西藏自治区重要的畜牧业生产基地。由于地处高海拔区域,植物生长较为缓慢,草原载畜能力和恢复力均相对较弱。目前,该区草原退化较为普遍,草畜矛盾突出^[1-2]。近年来,西藏自治区把扩大饲草种植面积作为解决牧草短缺的重要举措。燕麦(*Avena sativa*)作为高寒牧区主要的禾本科栽培牧草,兼具抗旱、抗寒、耐瘠薄和营养价值高、适口性好、消化率高等特点,一直以来是该区主要的栽培饲草种类之一,在保障青藏高原高寒气候区饲草安全和缓解草畜矛盾方面发挥着不可替代的作用^[3-4]。因此,不断地筛选适应于该地区自然条件的优质燕麦品种对于维护该地区草畜平衡和生态生产可持续发展均具有重要的科学意义。

针对青藏高原等高寒气候区的燕麦引种研究已有相关报道。崔雄雄等^[5]评估了燕麦品种“林纳”在海拔 3480 m 的碌曲县的生产性能,发现其生产力和营养品质均优于当地品种,具有良好的应用前景。张光雨等^[6]在日喀则地区对 8 个燕麦品种进行生产性能和营养品质分析,并应用灰色关联度理论进行综合分析发现,青引 1 号、青引 3 号和青引 2 号适宜在西藏日喀则地区种植推广。马桂琳等^[7]在甘南高寒地区对 7 个饲用燕麦品种比较发现,爱沃、青引 1 号、甜燕麦性状尤为突出,更适宜在该地区推广种植。然而当前日喀则地区饲用燕麦栽培仍存品种混杂、种质退化严重、产量低且年际波动大等突出问题,亟须开展优异饲用燕麦引种研究^[8]。另外,高效加工贮藏技术是确保饲草周年均衡供应的保障,青贮作为饲草加工的重要方式,其发酵品质直接影响饲草的营养价值与利用效率。尽管青藏高原已开展了多项燕麦品种适应性研究,但现有成果多聚焦于农艺性状比较与产量性状评价,尚未建立结合青贮特性的多维度品种综合评价体系。

农业生产中,常用于农作物品种综合评价的模型主要有灰色关联度分析法(grey relational analysis, GRA)^[6]、基于熵权的逼近理想解排序法(entropy weight-technique for order preference by similarity to an ideal solution)^[9]和主成分分析法(principal component analysis, PCA)^[10]等,3 种评价模型各有优势,但单一评价方法难以完全规避评价的主观性和局限性。因此,本研究拟以 18 个饲用燕麦品种为材料进行引种试验,主要通过农艺性状、营养品质和青贮特性等指标构建综合评价体系,评估各燕麦品种的具体表现。旨在明确参试燕麦品种在日喀则地区的综合表现,优选兼具高产潜力与优异品质的燕麦品种,为当地燕麦种质资源创新、饲草生产及产业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于西藏日喀则市南木林县艾玛乡恰热村(29.251° N, 83.252° E),海拔 3836 m,属典型的高原温带半干旱气候型,无霜期 120 d 左右,月平均气温为 $-1\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 350 mm。试验地土壤属砂质土,pH 6.83,有机质 $13.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $69.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $6.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $49.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,试验地前茬作物为燕麦。

1.2 试验材料

参试燕麦品种信息详见表 1。

1.3 试验设计

采用随机区组设计,小区面积 $3\text{ m}\times 5\text{ m}$,间距 1 m。2024 年 4 月 26 日条播,播种密度为 $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,行距 30

表 1 参试燕麦品种及其来源

Table 1 Oat varieties and their sources for the trial

品种 Varieties	来源 Source
优牧 1 号 Youmu No. 1	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Industry Co., Ltd.
英迪米特 Indimite	四川志和城锐农牧科技有限公司 Sichuan Zhihe Chengrui Agriculture and Animal Husbandry Technology Co., Ltd.
泰克 Taikē	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Industry Co., Ltd.
陇燕 5 号 Longyan No. 5	甘肃农业大学/百思特草业有限公司 Gansu Agricultural University/Best Grass Industry Co., Ltd.
悍马 Hanma	圣牧高科生态草业有限公司 Shengmu Hi-tech Ecological Grass Co., Ltd.
前锋 Qianfeng	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Industry Co., Ltd.
甜燕 2+ Tianyan 2+	北京佰青源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Baiqingyuan Animal Husbandry Technology Development Co., Ltd.
高燕 17 Gaoyan 17	青海湟中天兴草业有限公司 Qinghai Tianxing Grass Industry Co., Ltd.
陇燕 4 号 Longyan No. 4	甘肃农业大学/百思特草业有限公司 Gansu Agricultural University/Best Grass Industry Co., Ltd.
白燕 7 号 Baiyan No. 7	甘肃百斯特草种有限公司 Gansu Best Seed Industry Co., Ltd.
陇燕 3 号 Longyan No. 3	甘肃农业大学/百思特草业有限公司 Gansu Agricultural University/Best Grass Industry Co., Ltd.
歌莉娅 Gloria	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Industry Co., Ltd.
青海甜燕麦 Qinghai sweet oat	青海湟中天兴草业有限公司 Qinghai Tianxing Grass Industry Co., Ltd.
高燕 16 Gaoyan 16	青海湟中天兴草业有限公司 Qinghai Tianxing Grass Industry Co., Ltd.
青引 1 号 Qingyin No. 1	青海湟中天兴草业有限公司 Qinghai Tianxing Grass Industry Co., Ltd.
甜燕 75 Tianyan 75	北京佰青源畜牧业科技发展有限公司 Beijing Baiqingyuan Animal Husbandry Technology Development Co., Ltd.
挑战者 Challenger	四川志和城锐农牧科技有限公司 Sichuan Zhihe Chengrui Agriculture and Animal Husbandry Technology Co., Ltd.
定燕 2 号 Dingyan No. 2	甘肃百斯特草种有限公司 Gansu Best Seed Industry Co., Ltd.

cm,播深 3~5 cm,设置 3 个重复。底肥为有机肥(有机质 $\geq 45\%$, $N+P_2O_5+K_2O\geq 5\%$) $700\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,人工撒施均匀后机械翻耕整地;种肥(磷酸二铵 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)随播种条施。全生育期灌溉 6 次,并于 6 月 6 日、7 月 6 日结合灌水追施尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;6 月 10 日中耕,7 月 8 日人工除草。

1.4 指标测定及方法

1.4.1 农艺性状与产量测定 于 2024 年 7 月 22 日至 8 月 5 日对处于乳熟期的各品种进行收获。为消除边际效应,小区内去除边行及两端各 0.5 m。在各处理小区内随机选取长势一致的燕麦植株 10 株,测定主茎旗叶长度、旗叶宽度、株高及茎粗。此外,在各小区选取代表性样方($50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$),留茬高度 3~5 cm,刈割后称取鲜重,换算为鲜草产量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$),将刈割材料运回实验室后,茎叶分离,分别测定叶和茎重。各新鲜样品在烘箱(DHG-9005,上海一恒科学仪器有限公司) $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,之后转至 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,称重并计算干草产量(hay yield, HY)和叶茎比(leaf-stem ratio, L/S)。

1.4.2 青贮饲料制作和发酵特性分析 将每个燕麦品种的 3 个小区分别刈割制作青贮饲料,自然萎蔫(含水量约 70%)后,切短至 2~3 cm,充分混匀,称取 500 g 装入 $30\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 聚乙烯真空袋($30\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 双面网格纹路 32 丝,得力集团有限公司)中,采用抽真空机(LM890S,得力集团有限公司)密封后置于避光环境下贮藏 80 d 后取样。

青贮开袋后,将袋中样品全部倒出并充分混匀,取 20 g 于锥形瓶中,加入 80 mL 蒸馏水浸没样品,保鲜膜封口,置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱浸提 24 h 后取出,滤纸过滤后得到浸提液,用于分析 pH、氨态氮(ammonia nitrogen, AN)和有机酸。采用 pH 计(pH 211,意大利哈纳公司)测定样品浸提液 pH;采用苯酚一次氯酸钠比色法^[11]测定氨态氮含量;采用高效液相色谱[Agilent HPLC 1260,色谱柱:Carbomix® HNP5:8%($5\text{ }\mu\text{m}$, $7.8\text{ mm}\times 300\text{ mm}$),流动相: $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ H}_2\text{SO}_4$,柱温: $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,流速: $0.5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量: $10\text{ }\mu\text{L}$,示差检测器]测定样品中乳酸(lactic acid, LA)、乙酸(acetic acid, AA)和丁酸(butyric acid, BA)的含量^[12]。

1.4.3 营养品质测定 采用凯氏定氮法^[13]测定粗蛋白(crude protein, CP)含量(Kjeltec 8400, 丹麦 FOSS 有限公司);采用纤维分析仪(Ankom220, 美国 ANKOM Technology 公司)测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量^[14];采用蒽酮-硫酸比色法^[15]测定水溶性碳水化合物(water-soluble carbohydrates, WSC)含量。

相对饲喂价值(relative feed value, RFV)计算公式为^[10]:

$$RFV = DMI \times DDM / 1.29$$

$$DMI = 120 / NDF$$

$$DDM = 88.9 - 0.779ADF$$

式中:DMI 为干物质采食量(dry matter intake, %BW, body weight);NDF 为饲草中性洗涤纤维含量(%DM, dry matter);DDM 为可消化干物质(digestible dry matter, %DM);ADF 为饲草酸性洗涤纤维含量(%DM)。

饲草分级指数(forage grading index, FGI)计算公式为^[10]:

$$FGI = NE_L \times VDMI \times CP / NDF$$

$$VDMI = 1.2 / NDF \times BW$$

$$NE_L = [1.085 - (0.0124 \times ADF)] \times 9.29$$

式中:NE_L 为饲草产乳净能(forage net energy for lactation, MJ·kg⁻¹);VDMI 为干物质随意采食量(voluntary dry matter intake, kg·d⁻¹);CP 为饲草中粗蛋白含量(%DM);BW 为奶牛体重(body weight, 以 600 kg·头⁻¹计)。

1.5 综合评价方法

选取 18 个燕麦品种的 HY、L/S、DM、NDF、ADF、WSC、CP、RFV、GI、pH、LA、BA、AN 作为关键性指标,采用主成分分析法、灰色关联度法和基于熵权的 TOPSIS 法进行综合评分,对 18 个品种进行排名。

1.5.1 主成分分析法 计算主成分得分时,各指标的特征向量值为相应因子载荷除以其主成分特征值的平方根。主成分得分公式^[15]: $F = 0.043X_1 + 0.030X_2 + 0.325X_3 + 0.407X_4 + 0.413X_5 + 0.327X_6 + 0.230X_7 + 0.412X_8 + 0.393X_9 + 0.175X_{10} + 0.047X_{11} + 0.046X_{12} + 0.190X_{13}$, 式中: $X_1 \sim X_{13}$ 依次表示 HY、L/S、DM、NDF、ADF、WSC、CP、RFV、GI、pH、LA、BA、AN 标准化值。

根据主成分贡献率计算权重,综合得分为方差解释率与主成分得分乘积后累加计算得出。

1.5.2 基于熵权的逼近理想解排序法 采用熵权法^[16]计算指标权重,将其与各指标标准化值相乘,构建规范化矩阵。该矩阵中取最大值记作正理想解,最小值记作负理想解。利用下列公式计算正、负理想距离及相对贴近度,相对贴近度值越高代表参试品种越好。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

式中: D_i^+ 为各品种正理想距离; D_i^- 为品种负理想距离; v_{ij} 为决策矩阵中第 i 个品种的第 j 个指标的值; v_j^+ 为正理想解; v_j^- 为负理想解; C_i 为各品种的相对贴近度。

1.5.3 灰色关联度法 依据灰色关联度法^[17]构建“参考品种”以量化不同品种的相对优劣性。各指标的最优特征值构建为参考品种(X_0)。对各指标进行无量纲化处理以消除其量纲差异。计算各品种与参考品种的灰色关联系数 $\xi_i(k)$,表达式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

式中: $|X_0(k) - X_i(k)|$ 表示 $X_0(k)$ 数列与 $X_i(k)$ 数列在 k 点的绝对值差; $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 表示第二级最小差值, $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 表示第二级最大差值; ρ 为判别系数,一般取 0.5。每个品种的相关系数取平均

值,表示为系列 X_i 与系列 X_0 之间的等权关联系数 r_i ,计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \xi_i(k)$$

1.6 数据分析

采用 Excel(2019)对数据进行预处理。采用 SPSS 软件(27.0.1)对燕麦农艺性状、营养组分、发酵品质等指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA),若存在显著差异($P < 0.05$),则进一步采用 Duncan 法进行多重比较。试验数据以“平均值±标准差(mean±standard deviation, $n=3$)”展示。采用 Origin 2024 绘制相对饲喂价值和饲草分级指数柱状图。

2 结果与分析

2.1 农艺性状与产量

参试品种的旗叶长度、旗叶宽度、株高、茎粗存在显著差异($P < 0.05$,表2)。其中,高燕16的旗叶长度最长,为33.30 cm,悍马次之,为30.85 cm。高燕16的旗叶(2.92 cm)宽于定燕2号(2.65 cm)、挑战者(2.64 cm)和悍马(2.62 cm),显著宽于其余品种($P < 0.05$)。英迪米特最高,为135.16 cm,青海甜燕麦最低,仅为83.73 cm。高燕16的茎最粗,为5.35 mm,其次为高燕17和挑战者。

参试燕麦鲜草与干草产量差异显著($P < 0.05$),其中甜燕75鲜草产量表现最优,达39.79 t·hm⁻²,高于定燕2号(33.78 t·hm⁻²)和陇燕5号(33.21 t·hm⁻²)。甜燕75干草产量(13.40 t·hm⁻²)最高,其次为泰克(11.39 t·hm⁻²)。青海甜燕麦的鲜草产量与干草产量均最低,分别为16.91和8.25 t·hm⁻²。参试燕麦叶茎比为0.62~1.32,优牧1号和陇燕4号叶茎比较高,显著高于其余参试品种($P < 0.05$)。泰克叶茎比为0.86,高于平均水平0.81(表2)。

2.2 新鲜燕麦营养品质

不同品种燕麦青贮前营养组分差异显著($P < 0.05$,表3),参试燕麦的DM含量为29.45%~39.67%,前锋DM含量最高,为39.67%。各品种WSC的平均含量为17.87%,其中甜燕2+的WSC含量最高,达23.08%,前锋的WSC含量最低,为12.77%。泰克CP含量最高,为12.17%,前锋(9.21%)和优牧1号(8.93%)CP含量均高于平均值(8.84%)。定燕2号NDF含量最低(46.34%),优牧1号(48.45%)、歌莉娅(48.95%)和泰克(49.20%)次之。英迪米特(35.03%)的ADF含量最高,高燕17、定燕2号、优牧1号、前锋和泰克的ADF含量较低,分别为24.07%、24.75%、25.10%、26.15%和26.36%。

2.3 青贮燕麦营养组分和发酵品质

不同品种青贮80 d后DM含量为28.12%~38.96%(表4)。WSC含量大幅下降,前锋WSC含量显著高于优牧1号($P < 0.05$),两者显著高于其余参试品种($P < 0.05$)。NDF和ADF含量均不同程度升高,前锋NDF含量最低(49.79%),显著低于其他品种,其次是优牧1号和泰克。前锋的ADF含量最低,为29.11%,其次是优牧1号、青海甜燕麦、定燕2号和泰克。

不同燕麦品种青贮饲料的pH、LA、AA、乳乙比、BA、AN均存在显著差异($P < 0.05$,表5)。英迪米特、歌莉娅、高燕16、定燕2号和陇燕3号的pH较高,分别为4.59、4.29、4.27、4.25和4.23,其余品种均低于4.2。泰克和甜燕2+的LA含量较高,略高于挑战者和定燕2号。青海甜燕麦和甜燕75的AA含量分别最高(2.13%)和最低(0.59%)。参试品种青贮饲料乳乙比为2.87~14.30,青海甜燕麦乳乙比最低,为2.87。英迪米特(1.56%)和优牧1号(1.07%)的BA含量较高,其余各品种均低于1%。高燕17的AN含量最高(7.46%),悍马的AN含量最低,为4.17%,但与前锋和陇燕3号无显著差异($P > 0.05$)。

2.4 相对饲喂价值和饲草分级指数

18个燕麦品种青贮饲料中,前锋、优牧1号和泰克相对饲喂价值排名前三(图1)。青贮饲料饲草分级指数中,参试品种排名前三的为前锋、泰克和优牧1号,陇燕4号的两种饲料品质评定指数均最低。

表 2 参试燕麦品种农艺性状及产量比较

Table 2 Comparison of agronomic traits and yield of tested oat varieties

品种 Variety	旗叶长度 (cm) Flag leaf length (cm)	旗叶宽度 Flag leaf width (cm)	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	鲜草产量 Fresh grass yield (t·hm ⁻²)	干草产量 Hay yield (t·hm ⁻²)	叶茎比 Leaf-stem ratio
优牧 1 号 Youmu No. 1	23.19±1.83c	1.52±0.05cde	104.12±13.07cde	4.12±0.28ef	22.34±6.47cde	8.73±2.03bc	1.32±0.03a
英迪米特 Indimite	15.37±0.48gh	1.41±0.09ef	135.16±10.78a	4.41±0.06de	27.64±9.27bcd	10.94±2.39abc	0.65±0.06f
泰克 Taike	21.96±1.67cde	1.49±0.11de	114.84±2.20bcd	4.59±0.20bcde	27.43±3.33bcd	11.39±1.27ab	0.86±0.03cd
陇燕 5 号 Longyan No. 5	18.16±0.62fg	1.78±0.08cd	107.14±4.74cde	4.45±0.10cde	33.21±3.19ab	9.09±1.10bc	0.68±0.03ef
悍马 Hanma	30.85±2.32ab	2.62±0.16a	127.08±6.87ab	4.84±0.44abcd	30.80±0.94abc	10.66±0.41bc	0.77±0.02def
前锋 Qianfeng	22.74±1.06cd	1.83±0.33c	94.18±4.43ef	4.82±0.21abcd	25.55±1.45bcde	10.19±1.73bc	0.68±0.04ef
甜燕 2+Tianyan 2+	13.97±2.22h	1.40±0.04ef	98.60±20.17def	4.76±0.49bcd	25.72±11.63bcde	8.65±3.03bc	0.69±0.02ef
高燕 17 Gaoyan 17	21.26±0.42cdef	2.33±0.14b	112.65±6.02bcd	5.10±0.16ab	28.91±3.01bc	9.32±0.58bc	0.62±0.02f
陇燕 4 号 Longyan No. 4	18.85±0.77ef	1.58±0.12cde	106.34±4.49cde	3.66±0.19fg	19.08±0.77de	9.98±0.72bc	1.30±0.16a
白燕 7 号 Baiyan No. 7	22.62±1.20cd	1.52±0.19cde	115.44±6.88bcd	4.28±0.52de	31.59±8.85abc	10.37±0.72bc	0.76±0.12def
陇燕 3 号 Longyan No. 3	22.64±1.31cd	2.22±0.12b	115.42±7.07bcd	4.56±0.19bcde	24.32±2.48bcde	9.58±0.44bc	0.65±0.01f
歌莉娅 Gloria	18.98±0.96ef	1.51±0.09de	121.03±5.19abc	4.07±0.26efg	26.71±1.67bcd	11.16±0.68ab	1.14±0.06b
青海甜燕麦 Qinghai sweet oat	19.34±2.16def	1.13±0.16f	83.73±3.67f	3.58±0.25g	16.91±3.04e	8.25±2.39c	0.93±0.24c
高燕 16 Gaoyan 16	33.30±5.07a	2.92±0.31a	114.64±7.98bcd	5.35±0.18a	30.13±3.63bc	10.07±1.18bc	0.67±0.01f
青引 1 号 Qingyin No. 1	19.63±1.03cdef	1.43±0.09ef	115.02±7.32bcd	4.18±0.20ef	29.43±2.72bc	11.05±0.80ab	0.82±0.06cde
甜燕 75 Tianyan 75	22.54±1.03cd	2.16±0.10b	110.22±5.29bcde	4.79±0.05bcd	39.79±3.05a	13.40±0.36a	0.71±0.02def
挑战者 Challenger	28.70±2.12b	2.64±0.35a	117.84±19.70bc	5.02±0.60abc	30.55±4.73abc	10.20±0.21bc	0.74±0.01def
定燕 2 号 Dingyan No. 2	29.79±1.73b	2.65±0.15a	116.24±4.44bcd	4.59±0.09bcde	33.78±1.99ab	11.05±0.32ab	0.62±0.03f

注：同列不同小写字母表示参试燕麦品种间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: In the same column, different lowercase letters mean significant differences among the tested oat varieties ($P<0.05$). The same below.

表3 不同燕麦品种青贮前营养组分比较

Table 3 Comparison of nutritional values of different oat varieties before ensiling

品种 Varieties	干物质 DM (%FW)	水溶性碳水化合物 WSC (%DM)	粗蛋白 CP (%DM)	中性洗涤纤维 NDF (%DM)	酸性洗涤纤维 ADF (%DM)
优牧1号 Youmu No. 1	34.73±2.14def	14.97±0.62ghi	8.93±0.15bcdef	48.45±2.70de	25.10±2.99gh
英迪米特 Indimite	29.45±0.70h	14.14±0.72hi	8.74±0.68cdef	58.94±1.60a	35.03±1.41a
泰克 Taikē	34.99±0.49cdef	17.61±1.99defg	12.17±0.40a	49.20±1.89cde	26.36±1.37fgh
陇燕5号 Longyan No. 5	35.83±1.99bcde	20.29±3.18bcd	6.85±1.30hi	55.50±1.70abc	33.15±0.26abc
悍马 Hanma	37.50±0.60ab	16.83±2.43efgh	9.83±0.78bc	55.19±0.09abcd	29.60±0.37cdef
前锋 Qianfeng	39.67±0.47a	12.77±0.27i	9.21±0.13bcdef	50.63±3.26cde	26.15±0.78fgh
甜燕2+ Tianyan 2+	32.05±0.54g	23.08±1.97a	7.40±0.19gh	54.28±2.24abcd	31.70±2.00abc
高燕17 Gaoyan 17	33.15±1.04fg	21.58±1.41ab	8.39±0.25efg	49.27±7.38cde	24.07±2.09h
陇燕4号 Longyan No. 4	31.81±1.01g	19.12±1.31bcdef	6.15±0.70i	54.87±4.22abcd	33.06±3.39abc
白燕7号 Baiyan No. 7	35.58±0.34bcde	18.77±1.70cdef	8.54±0.23defg	50.09±5.40cde	27.68±2.86defgh
陇燕3号 Longyan No. 3	36.23±0.34bcd	14.08±1.29hi	8.52±0.75defg	58.15±0.33ab	34.40±0.29ab
歌莉娅 Gloria	37.78±1.14ab	16.45±0.03fgh	8.30±1.52fg	48.95±1.58cde	28.01±0.65defg
青海甜燕麦 Qinghai sweet oat	37.06±1.52bc	21.37±2.20abc	8.78±0.53bcdef	51.38±2.87cde	27.36±2.16efgh
高燕16 Gaoyan 16	34.63±1.46def	15.11±0.72ghi	9.31±0.36bcdef	52.22±4.57bcde	30.36±3.00cde
青引1号 Qingyin No. 1	35.73±1.43bcde	19.61±0.20bcde	8.57±0.39cdefg	50.13±4.09cde	27.94±1.91defg
甜燕75 Tianyan 75	33.85±0.22efg	20.36±0.54abcd	10.03±0.44ab	54.70±3.41abcd	31.20±2.33bcd
挑战者 Challenger	37.56±2.40ab	17.88±0.06def	9.76±0.72bcd	51.12±3.56cde	27.79±1.19defg
定燕2号 Dingyan No. 2	37.64±0.39ab	17.60±0.74defg	9.60±0.48bcde	46.34±2.30e	24.75±1.45gh

DM: 干物质 Dry matter; FW: 鲜重 Fresh weight; WSC: 水溶性碳水化合物 Water-soluble carbohydrates; CP: 粗蛋白 Crude protein; NDF: 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; 下同 The same below.

表4 不同燕麦品种青贮饲料营养组分比较

Table 4 Comparison of nutritional components in silage of different oat varieties

品种 Variety	干物质 DM (%FW)	水溶性碳水化合物 WSC (%DM)	中性洗涤纤维 NDF (%DM)	酸性洗涤纤维 ADF (%DM)
优牧1号 Youmu No. 1	32.42±0.63defg	3.23±0.32b	53.87±2.19e	30.99±1.51hi
英迪米特 Indimite	28.12±0.73i	1.10±0.11gh	66.37±2.41a	39.51±1.24ab
泰克 Taikē	30.57±1.19gh	1.82±0.28e	56.11±3.77de	33.19±2.20efgh
陇燕5号 Longyan No. 5	32.93±1.20cdef	1.57±0.23ef	63.12±3.21ab	37.50±1.50bcd
悍马 Hanma	31.45±1.42fg	2.20±0.30d	62.09±1.59abc	35.83±1.42cdef
前锋 Qianfeng	38.96±1.01a	3.66±0.43a	49.79±1.37f	29.11±0.91i
甜燕2+ Tianyan 2+	28.54±1.07hi	1.42±0.16fg	64.13±0.87ab	37.78±1.09abcd
高燕17 Gaoyan 17	32.00±1.34defg	1.54±0.26ef	63.92±2.76ab	37.43±2.32bcd
陇燕4号 Longyan No. 4	29.08±0.69hi	1.05±0.10gh	66.04±2.39a	40.97±2.22a
白燕7号 Baiyan No. 7	33.05±0.88cdef	0.84±0.06h	59.76±1.33bcd	35.53±0.71cdef
陇燕3号 Longyan No. 3	34.13±1.52bcd	1.32±0.21fg	62.92±3.06ab	37.55±2.55bcd
歌莉娅 Gloria	33.07±1.73cdef	2.81±0.33c	59.82±2.25bcd	36.08±1.88cde
青海甜燕麦 Qinghai sweet oat	33.99±0.83bcde	1.27±0.18fg	58.11±2.40cd	32.46±1.48gh
高燕16 Gaoyan 16	32.30±1.02defg	1.37±0.04fg	65.70±3.27a	38.25±1.53abc
青引1号 Qingyin No. 1	35.51±4.05ab	1.60±0.21ef	58.30±4.58cd	33.33±3.76efgh
甜燕75 Tianyan 75	31.74±0.91efg	1.85±0.23e	63.02±3.93ab	35.00±1.98defg
挑战者 Challenger	33.42±0.90bcdef	2.30±0.31d	60.18±2.96bcd	34.00±1.51efgh
定燕2号 Dingyan No. 2	35.03±0.51bc	2.37±0.23d	57.69±1.82cde	32.83±1.67fgh

表 5 不同燕麦品种青贮饲料发酵特性比较

Table 5 The fermentation profiles of oat silages among varieties

品种 Variety	pH	乳酸 LA (%DM)	乙酸 AA (%DM)	乳乙比 LA/AA	丁酸 BA (%DM)	氨态氮 AN (%TN)
优牧 1 号 Youmu No. 1	4.02±0.08c	6.77±0.36abc	0.62±0.07d	11.06±1.13ab	1.07±0.21ab	5.65±0.49bcde
英迪米特 Indimite	4.59±0.39a	4.84±1.88cdef	0.80±0.55cd	7.04±2.21bcd	1.56±1.14a	6.59±1.03ab
泰克 Taike	4.18±0.10bc	7.89±0.98a	1.45±0.30abcd	5.53±0.66bcd	0.03±0.01c	6.52±0.79ab
陇燕 5 号 Longyan No. 5	4.14±0.02bc	5.23±0.32bcdef	0.63±0.09d	8.39±0.98bcd	0.05±0.05c	5.69±0.95bcd
悍马 Hanma	4.18±0.13bc	4.11±2.83ef	1.94±1.27ab	4.08±4.04cd	0.06±0.05c	4.17±0.26g
前锋 Qianfeng	4.09±0.08bc	5.28±0.44bcdef	0.68±0.25cd	9.23±5.32abc	0.61±0.46bc	4.20±0.11g
甜燕 2+ Tianyan 2+	4.01±0.04c	7.82±0.97a	1.71±0.78abc	5.24±2.14bcd	0.24±0.39c	6.07±0.86bc
高燕 17 Gaoyan 17	4.08±0.10bc	5.68±1.90bcde	1.61±0.91abcd	5.26±4.14bcd	0.12±0.13c	7.46±1.16a
陇燕 4 号 Longyan No. 4	4.18±0.11bc	6.00±1.10abcde	0.92±0.18bcd	6.61±1.29bcd	0.55±0.57bc	6.29±0.30bc
白燕 7 号 Baiyan No. 7	4.14±0.05bc	4.87±0.49cdef	1.10±0.22bcd	4.57±1.10cd	0.10±0.11c	4.25±0.54fg
陇燕 3 号 Longyan No. 3	4.23±0.09bc	6.04±1.04abcde	0.75±0.24cd	8.59±3.02bcd	0.06±0.07c	4.20±0.72g
歌莉娅 Gloria	4.29±0.07b	5.30±0.69bcdef	1.00±0.19bcd	5.50±1.50bcd	0.54±0.60bc	6.04±0.89bc
青海甜燕麦 Qinghai sweet oat	4.14±0.21bc	3.35±1.47f	2.13±1.33a	2.87±3.29d	0.30±0.55c	5.23±0.78cdefg
高燕 16 Gaoyan 16	4.27±0.08b	4.55±1.56def	1.47±0.91abcd	4.45±3.70cd	0.18±0.17c	5.31±0.53cdef
青引 1 号 Qingyin No. 1	4.14±0.07bc	5.38±0.55bcdef	0.74±0.28cd	7.77±1.88bcd	0.15±0.24c	4.61±0.33defg
甜燕 75 Tianyan 75	4.18±0.06bc	7.18±1.56ab	0.59±0.27d	14.30±6.55a	0.28±0.28c	4.58±0.63efg
挑战者 Challenger	4.17±0.04bc	6.61±0.55abcd	1.13±0.44abcd	6.36±1.92bcd	0.04±0.00c	4.77±0.29defg
定燕 2 号 Dingyan No. 2	4.25±0.03b	6.44±0.66abcd	0.88±0.65cd	11.10±8.21ab	0.16±0.30c	5.51±0.24bcde

DM: 干物质 Dry matter; LA: 乳酸 Lactic acid; AA: 乙酸 Acetic acid; LA/AA: 乳酸/乙酸 Lactic acid/acetic acid; BA: 丁酸 Butyric acid; AN: 氨态氮 Ammoniacal nitrogen; TN: 总氮 Total nitrogen.

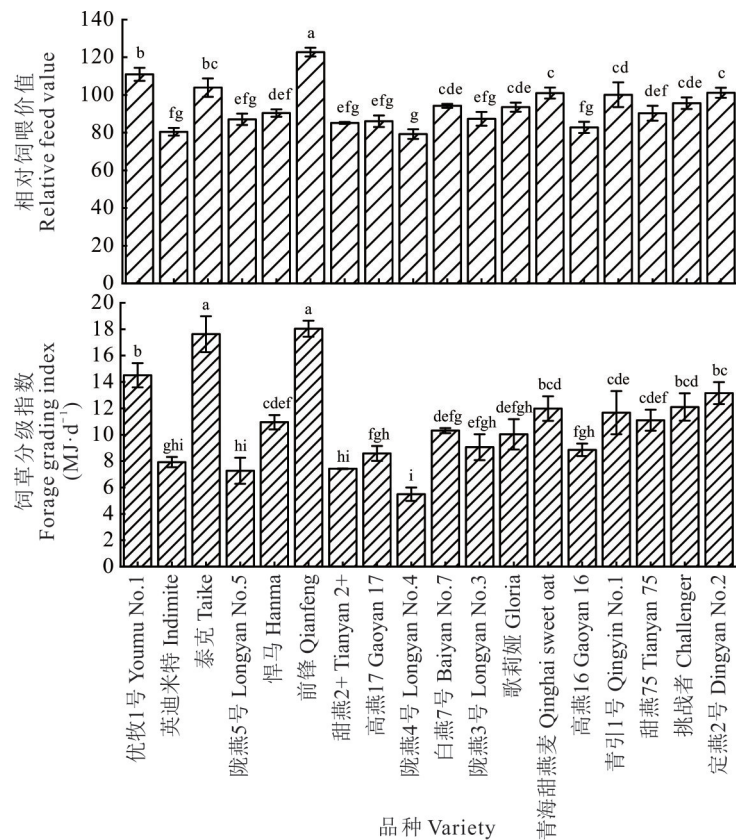


图 1 不同燕麦品种青贮后相对饲喂价值和饲草分级指数比较

Fig. 1 Comparison of relative feed value and forage grading index of different oat varieties after ensiling

2.5 燕麦品种综合评价

2.5.1 基于主成分分析的综合评价 依据特征值 >1 准则,共提取4个主成分,累计方差贡献率达82.792%,可涵盖原始数据的绝大部分信息(表6)。第一主成分的方差贡献率为42.755%,主要由干物质、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、水溶性碳水化合物、相对饲喂价值、饲草分级指数决定,该主成分主要反映燕麦的营养品质与饲用价值;第二主成分方差贡献率为14.815%,主要包含干草产量、叶茎比和粗蛋白,体现产量性状与蛋白质水平;第三主成分方差贡献率为13.963%,核心指标为丁酸和氨态氮,主要反映青贮过程中的不良发酵;第四主成分方差贡献率为11.259%,以pH和乳酸为主要载荷因子,可解释青贮发酵特性(表7)。

主成分综合分析中,前锋的评分位居第一,其次是泰克、优牧1号和定燕2号(表8)。其余品种评分均低于0.8,陇燕4号的综合评分最低,为-2.15407。

2.5.2 基于熵权TOPSIS法的综合评价 熵权TOPSIS评分结果显示,优牧1号的相对贴度最高,为0.72322,其次依次为歌莉娅(0.56195)、前锋(0.54498)和泰克(0.50101)。英迪米特相对贴度最低,仅为0.15262(表8)。

2.5.3 基于灰色关联度法的综合评价 根据等权关联度对参试品种进行排名,结果显示,泰克的关联度最高,达0.99227;挑战者次之,关联度为0.99077;悍马紧随其后,为0.98712。参试品种中英迪米特关联度最低,为0.93270(表8)。

综上,基于主成分分析、灰色关联度及熵权TOPSIS法3种评估方法对18个燕麦品种进行综合评价,结果表明前锋、泰克、优牧1号位居前三,综合表现较好。

3 讨论

3.1 参试燕麦品种的生产性能和营养品质

产量是评价饲草品种适应性和生产性能的重要指标^[18],是饲草经济价值的直接体现。研究显示,燕麦旗叶长度和宽度、株高、茎粗、叶茎比等农艺性状与干物质积累及产草量存在正相关关系^[18-19]。本研究中青海甜燕麦的鲜草产量与干草产量均最低,表现为株高较低、茎秆较细、叶片较小,产草能力较弱。甜燕75和泰克具有较高的干草产量,其中泰克干草产量高于包文龙等^[20]在乌兰察布的研究(低于 $4.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。这可能是由于日喀则属于高原温带半干旱气候,年平均日照时间长达3300 h,昼夜温差大,白天光合作用强,夜间呼吸作用弱,有利于植物生物量的积累,进而提高了干草产量。叶茎比是衡量燕麦草品质的重要指标,可表征牧草品质和适口性,叶片比例越高品质和适口性越好^[21]。参试燕麦叶茎比为0.62~1.32,与周启龙^[22]在西藏自治区当雄县的燕麦引种研究

表6 燕麦指标的主成分特征根及方差贡献率

Table 6 Principal component eigenvalues and variance contribution rates (VCR) of oat indicators

主成分 Principal component	特征根 Eigenvalues	方差贡献率 VCR (%)	累计方差贡献率 Cumulative VCR (%)
1	5.558	42.755	42.755
2	1.926	14.815	57.570
3	1.815	13.963	71.533
4	1.464	11.259	82.792

表7 基于主成分分析的燕麦各指标因子载荷

Table 7 Factor loadings of various indicators of oats based on principal component analysis

评价指标 Evaluation indicator	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
干草产量 Hay yield	0.102	0.764	0.357	0.026
叶茎比 Leaf-stem ratio	0.071	-0.649	0.425	-0.023
干物质 Dry matter	0.767	0.033	-0.436	-0.285
中性洗涤纤维 NDF	0.960	-0.175	0.083	-0.051
酸性洗涤纤维 ADF	0.974	-0.039	0.014	-0.027
水溶性碳水化合物 WSC	0.771	-0.181	0.277	-0.073
粗蛋白 Crude protein	0.541	0.635	0.278	0.175
相对饲喂价值 RFV	0.971	-0.145	0.079	-0.068
饲草分级指数 FGI	0.927	0.141	0.189	0.060
酸碱度 pH	0.412	-0.505	-0.418	0.569
乳酸 Lactic acid	0.112	0.052	0.397	0.813
丁酸 Butyric acid	0.109	0.269	-0.712	0.529
氨态氮 AN	0.448	0.286	-0.524	-0.263

NDF: Neutral detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber; WSC: Water-soluble carbohydrates; RFV: Relative feed value; FGI: Forage grading index; AN: Ammoniacal nitrogen.

表 8 基于 3 种评价方法的综合排名
Table 8 Comprehensive ranking based on three evaluation methods

品种 Varieties	主成分分析 PCA		灰色关联度 GRA		TOPSIS		平均 Average	
	CS	R	GRG	R	RFD	R	得分 Score	R
前锋 Qianfeng	2.50269	1	0.96211	14	0.54498	3	1.33659	1
泰克 Taike	2.02336	2	0.99227	1	0.50101	4	1.17221	2
优牧 1 号 Youmu No. 1	1.38214	3	0.94956	17	0.72322	1	1.01831	3
定燕 2 号 Dingyan No. 2	1.12181	4	0.97959	8	0.38780	8	0.82973	4
甜燕 75 Tianyan 75	0.77354	5	0.97221	11	0.36398	10	0.70325	5
挑战者 Challenger	0.72856	6	0.99077	2	0.38676	9	0.70203	7
青引 1 号 Qingyin No. 1	0.68614	7	0.98086	7	0.43971	6	0.70224	6
歌莉娅 Gloria	0.02381	8	0.95923	15	0.56195	2	0.51500	8
悍马 Hanma	-0.07294	9	0.98712	3	0.34453	11	0.41957	9
青海甜燕麦 Qinghai sweet oat	-0.14810	10	0.96868	13	0.43092	7	0.41717	10
白燕 7 号 Baiyan No. 7	-0.39070	11	0.98195	6	0.31968	12	0.30365	11
陇燕 3 号 Longyan No. 3	-0.54000	12	0.98532	4	0.26849	13	0.23794	12
高燕 17 Gaoyan 17	-0.93558	13	0.97741	9	0.20602	17	0.08261	13
高燕 16 Gaoyan 16	-0.98018	14	0.97431	10	0.21447	16	0.06953	14
陇燕 5 号 Longyan No. 5	-1.19144	15	0.98429	5	0.22832	14	0.00706	15
甜燕 2+ Tianyan 2+	-1.20344	16	0.96989	12	0.22494	15	-0.00287	16
英迪米特 Indimite	-1.62560	17	0.93270	18	0.15262	18	-0.18009	17
陇燕 4 号 Longyan No. 4	-2.15407	18	0.95447	16	0.46878	5	-0.24361	18

PCA: Principal component analysis; GRA: Grey relational analysis; TOPSIS: 基于熵权的逼近理想解排序法 Entropy weight-technique for order preference by similarity to ideal solution; CS: 综合得分 Comprehensive score; R: 排名 Rank; GRG: 关联度 Grey relational grade; RFD: 相对贴适度 Relative fit degree.

相似(0.24~1.49)。优牧 1 号和陇燕 4 号的叶茎比较高,显著高于其余的燕麦品种($P<0.05$)。本研究中,甜燕 75 与泰克的干草产量表现较优,且其旗叶长、旗叶宽、株高及茎粗均表现突出。这与李鸿飞等^[23]在内蒙古呼伦贝尔市开展的燕麦引种适应性评价结果一致,该研究表明旗叶面积与干草产量呈强正相关关系;此外,耿小丽等^[24]在甘肃天祝地区对 30 个燕麦品种的适应性评价发现,节间数、叶宽及株高是影响燕麦草产量的关键性状。

CP、WSC、NDF 和 ADF 含量是评价牧草营养价值的重要指标。WSC 是饲草青贮发酵过程中乳酸菌代谢的主要底物,其含量达 2.50%~3.50%,即可为乳酸发酵提供充足的底物^[19]。本试验中各品种的 WSC 最低为 12.77%,均可确保燕麦良好发酵。参试燕麦 CP 含量为 6.15%~12.17%,高于周启龙^[22]在拉萨地区种植的燕麦品种(CP 含量 6.55%~9.19%),低于史京京等^[25]在黑龙江西部农牧交错区种植的燕麦品种(15.49%~22.85%),这可能与日喀则的光照、土壤性质和降水等条件有关。NDF 和 ADF 是反映饲草消化特性的主要指标,ADF 与动物消化率呈负相关关系,其含量越低,饲草消化率和饲用价值越高^[26]。本研究中,泰克 CP 含量最高,而 NDF 和 ANF 含量较低,饲用价值较高。

3.2 青贮饲料的营养品质和发酵特性

青贮饲料 pH 是反映其发酵品质优劣的重要指标之一,发酵品质良好的禾本科青贮饲料 pH 应保持在 4.20 以下^[27]。本研究中除英迪米特、陇燕 3 号、歌莉娅、高燕 16、定燕 2 号外,其余品种青贮饲料 pH 均低于 4.20,均显示良好的青贮发酵品质。乳乙比通常用于判断青贮发酵的类型,AA 是异型发酵途径产物之一,预示着发酵损失增加,通常认为发酵良好的青贮饲料乳乙比约为 3:1^[28],本研究中青贮饲料乳乙比为 2.87~14.30,表明均以同型乳

酸发酵为主导。丁酸和氨态氮积累是梭菌发酵和蛋白降解的结果,意味着青贮饲料营养价值下降和适口性降低^[29]。Kaiser等^[30]指出发酵品质良好的青贮饲料氨态氮/总氮应低于10.00%,本研究各品种青贮饲料AN均未超过10.00%,表明各燕麦品种青贮过程中蛋白保存较好。各品种青贮饲料均有较低的丁酸含量,除英迪米特、优牧1号外,其余各品种丁酸含量均低于1%,均未达到腐烂变质上限^[31]。优牧1号、前锋和甜燕2+的pH、BA和AN较低,乳酸含量较高,表现出良好的发酵品质。

青贮80 d后,各燕麦品种WSC下降,而NDF、ADF略有升高。青贮发酵过程中,乳酸菌等以WSC为底物迅速增殖,而NDF和ADF等不易被微生物降解,保持相对稳定,从而表现出相对升高趋势,这与Sofia等^[32]的研究结论一致。RFV是基于NDF和ADF评估饲草的综合性指标,而FGI引入了粗蛋白含量,RFV和FGI数值越高代表饲草的饲用价值越高^[10],两者结合能精确地评定饲草品质。前锋、优牧1号、泰克的RFV和GI均位居前三,饲用价值优于其余参试品种。

主成分分析法、灰色关联度法、TOPSIS法、隶属函数法及熵权法等综合评价方法广泛应用于农作物育种、农业生产决策、农产品品质评价等众多农业领域^[33]。本研究首先分析了18个燕麦品种的农艺性状、生产性能、营养品质和发酵特性,进一步选取13个关键指标,通过主成分分析法、灰色关联度法与TOPSIS法3种评价方法对不同燕麦品种进行综合评价。本研究中主成分分析法与TOPSIS法所得品种排序具有较高的一致性,而灰色关联度法因采用等权指标体系,其排序结果与前两者存在一定差异。综合农艺性状和发酵品质,前锋、泰克、优牧1号品质较好,其平均得分高于其余参试品种。其中泰克在灰色关联度法中排名第1,在主成分分析法和TOPSIS法中排名第4。综合而言,前锋、泰克、优牧1号具有较强的生产性能、优良的营养品质和优异的青贮发酵特性,这3个品种适宜在日喀则地区推广栽培。

4 结论

基于农艺性状、产量、营养品质、青贮特性及多方法综合评价,前锋、泰克、优牧1号在生产性能(高产、优质农艺性状)、营养价值(高CP、低NDF/ADF)、青贮发酵(低pH、优发酵参数)及综合指标(RFV和FGI高、多方法排名靠前)方面表现最优,适宜在日喀则高寒区推广。

参考文献 References:

- [1] Wang Y, Yuan X J, Guo G, *et al.* Study on fermentation quality and aerobic stability of total mixed rations with different forages in Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 95—102.
王勇, 原现军, 郭刚, 等. 西藏不同饲草全混合日粮发酵品质和有氧稳定性的研究. *草业学报*, 2014, 23(6): 95—102.
- [2] Shi R Z, Renzengwangdui, Pian duo, *et al.* Adaptability evaluation of four oat cultivars in Shenzha County, Naqu, Tibet. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(2): 49—54.
史睿智, 仁增旺堆, 片多, 等. 4个燕麦品种在西藏那曲申扎县的适应性评价. *中国草地学报*, 2022, 44(2): 49—54.
- [3] Li R, Zhang Z X, Tang W, *et al.* Common vetch cultivars improve yield of oat row intercropping on the Qinghai—Tibetan Plateau by optimizing photosynthetic performance. *European Journal of Agronomy*, 2020, 117: 126088.
- [4] Luo F, Liu W H, Mi W B, *et al.* Legume-grass mixtures increase forage yield by improving soil quality in different ecological regions of the Qinghai—Tibet Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1280771.
- [5] Cui X X, Hou F J, Chang S H, *et al.* Comparison of yield and quality of two oat cultivars in alpine pastoral areas. *Pratacultural Science*, 2018, 35(6): 1489—1495.
崔雄雄, 侯扶江, 常生华, 等. 高寒牧区两个燕麦品种的产量与品质比较. *草业科学*, 2018, 35(6): 1489—1495.
- [6] Zhang G Y, Wang J W, Zhang H R, *et al.* Comparative study on production performance and nutritional quality of eight imported oat varieties in the Shigatse region of Tibet, China. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 1117—1125, 1920.
张光雨, 王江伟, 张豪睿, 等. 西藏日喀则地区8个引进燕麦品种的生产性能和营养品质比较. *草业科学*, 2019, 36(4): 1117—1125, 1920.
- [7] Ma G L, Shi H M, Ma J Q, *et al.* Experiments on the cultivation of oat varieties in the alpine area of Gannan. *Chinese Cattle Science*, 2024, 50(4): 35—38.
马桂琳, 石红梅, 马俊清, 等. 不同燕麦品种在甘南高寒地区种植试验. *中国牛业科学*, 2024, 50(4): 35—38.

- [8] Wu H Y, Qu N, Qu Z, *et al.* Comparison of crop yield and forage quality of six oat varieties in Angren County, Shigatse. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(4): 72–80.
吴海艳, 曲尼, 曲珍, 等. 6 个燕麦品种在昂仁县的生产性能及饲草品质比较. *草业学报*, 2022, 31(4): 72–80.
- [9] Wei K T, Zhang C P, Yu Y, *et al.* Yield performance, nutritional quality, and soil physicochemical responses of oat (*Avena sativa*) cultivars in the Qinghai Lake-Gonghe Basin region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(1): 107–118.
魏孔涛, 张春平, 俞咏, 等. 环青海湖共和盆地不同燕麦品种的产量、营养价值及对土壤理化性质的影响. *草业学报*, 2026, 35(1): 107–118.
- [10] Guan H, Xu D, Li H P, *et al.* A study of nutritional quality and rumen degradation characteristics of 17 oat varieties in high cold regions. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(9): 185–198.
关皓, 许多, 李海萍, 等. 高寒地区 17 个燕麦品种营养品质及瘤胃降解特性研究. *草业学报*, 2024, 33(9): 185–198.
- [11] Ma B L, Zheng Z, Pageau D, *et al.* Nitrogen and phosphorus uptake, yield and agronomic traits of oat cultivars as affected by fertilizer N rates under diverse environments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 108(3): 245–265.
- [12] Madrid J, Martínez-Teruel A, Hernández F, *et al.* A comparative study on the determination of lactic acid in silage juice by colorimetric, high-performance liquid chromatography and enzymatic methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(12): 1722–1726.
- [13] Zhang H F, Zhang S P. Comparative study on determination of protein content in feed by biuret method and Kjeldahl determination. *China Feed*, 2008(7): 34–35, 38.
张厚锋, 张淑萍. 双缩脲法和凯氏定氮法测定饲料中蛋白质含量的比较研究. *中国饲料*, 2008(7): 34–35, 38.
- [14] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583–3597.
- [15] Murphy R. A method for the extraction of plant samples and the determination of total soluble carbohydrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1958, 9(11): 714–717.
- [16] Chen W, Xia J H. An optimal weights combination method considering both subjective and objective weight information. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007, 37(1): 17–22.
陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法. *数学的实践与认识*, 2007, 37(1): 17–22.
- [17] Wei M Y, Wang M S, Jiang W G, *et al.* Comprehensive evaluation of twelve kiwifruit (*Actinidia*) varieties on the winemaking adaptability based on multi-criteria decision-making method. *Food Chemistry*, 2025, 477: 143512.
- [18] Bilal M, Ayub M, Tariq M, *et al.* Dry matter yield and forage quality traits of oat (*Avena sativa* L.) under integrative use of microbial and synthetic source of nitrogen. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017, 16(3): 236–241.
- [19] Ju Z L, Zhao G Q, Chai J K, *et al.* Comprehensive evaluation of nutritional value and silage fermentation quality of different oat varieties in central Gansu Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 77–86.
琚泽亮, 赵桂琴, 柴继宽, 等. 不同燕麦品种在甘肃中部的营养价值及青贮发酵品质综合评价. *草业学报*, 2019, 28(9): 77–86.
- [20] Bao W L, Ren J H, Zhang T W, *et al.* Comprehensive evaluation of productivity of 12 forage oat varieties in Ulanqab. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1169–1176.
包文龙, 任家辉, 张腾薇, 等. 12 个饲用燕麦品种在乌兰察布生产力的综合评价. *草地学报*, 2024, 32(4): 1169–1176.
- [21] Yang H L, Xu C L, Yu X J, *et al.* Comparative study on the performance of 14 oat (*Avena sativa*) germplasm in Huangcheng Town of Sunan County, Gansu Province. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 129–135.
杨海磊, 徐长林, 鱼小军, 等. 14 份燕麦种质在肃南皇城镇的生产性能比较. *草业科学*, 2016, 33(1): 129–135.
- [22] Zhou Q L. Test of 16 oat introduced varieties in alpine pastoral region of Tibet. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(1): 33–34.
周启龙. 16 个燕麦品种在西藏高寒牧区的引种试验. *现代农业科技*, 2020(1): 33–34.
- [23] Li H F, Zhou B W, Zhang M, *et al.* Adaptability evaluation of different oat varieties introduced in the Hulunbuir region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 60–72.
李鸿飞, 周帮伟, 张森, 等. 不同燕麦品种在呼伦贝尔地区的引种适应性评价. *草业学报*, 2024, 33(4): 60–72.
- [24] Geng X L, Han T H, Zhang S P, *et al.* Adaptability evaluation of 30 oat germplasm in Tianzhu. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(6): 1743–1750.
耿小丽, 韩天虎, 张少平, 等. 30 个燕麦品种(品系)在甘肃天祝地区的适应性评价. *草地学报*, 2019, 27(6): 1743–1750.
- [25] Shi J J, Xue Y W, Guo W, *et al.* Evaluation of forage yield and nutritional value of introduced oat germplasm resources. *Journal*

- of Triticeae Crops, 2019, 39(9): 1009—1071.
- 史京京, 薛盈文, 郭伟, 等. 引进燕麦种质资源饲草产量与饲用营养价值评价. 麦类作物学报, 2019, 39(9): 1009—1071.
- [26] Li X L, Zhang X Y, Tang Y G, *et al.* Effect of concentrate to forage ratio in diet on weight gain of housed goats. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(2): 85—91.
- 李向林, 张新跃, 唐一国, 等. 日粮中精料和牧草比例对舍饲山羊增重的影响. 草业学报, 2008, 17(2): 85—91.
- [27] Huang Y, Liang L F, Dai S, *et al.* Effect of different regions and ensiling periods on fermentation quality and the bacterial community of whole-plant maize silage. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 743695.
- [28] Cherney D J R, Cherney J H, Cox W J. Fermentation characteristics of corn forage ensiled in mini-silos. Journal of Dairy Science, 2004, 87(12): 4238—4246.
- [29] Jia C W, Yuan X J, Li J F, *et al.* Effect of adding wet hulless barley distillers' grains on fermentation quality of mixed ensilage of alfalfa and perennial ryegrass. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(2): 275—280.
- 贾春旺, 原现军, 李君凤, 等. 青稞酒糟对紫花苜蓿和多年生黑麦草混合青贮发酵品质的影响. 南京农业大学学报, 2016, 39(2): 275—280.
- [30] Kaiser E, Weib K, Krause R. Criterions to judge fermentation quality of grass silages. Proceedings of the Society for Nutritional Physiology, 2000(9): 94—101.
- [31] Zhang Y G, Zi X J, Li M, *et al.* Effect of organic acids on silage quality and nutritional components of *Stylosanthes guianensis*. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(5): 1609—1614.
- 张亚格, 字学娟, 李茂, 等. 有机酸对柱花草青贮品质和营养成分的影响. 动物营养学报, 2016, 28(5): 1609—1614.
- [32] Sofia S, Enrique D J, Luis R J, *et al.* Growth stage and ensiling: Impact on chemical composition, conservation quality, and *in situ* ruminal degradability of whole-crop oat. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 102(7): 2783—2791.
- [33] Li X M. Review of multi-index comprehensive evaluation methods. Statistics and Management, 2022, 37(2): 45—48.
- 李笑梅. 多指标综合评价方法综述. 统计与管理, 2022, 37(2): 45—48.