

DOI:10.11686/cyxb2025076

http://cyxb.magtech.com.cn

魏孔涛, 张春平, 俞旻, 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.

WEI Kong-tao, ZHANG Chun-ping, YU Yang, 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.

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

魏孔涛^{1,2,3}, 张春平^{1,2,3}, 俞旻^{1,2,3}, 张正社⁴, 周泽^{1,2,3}, 张雪^{1,2,3}, 王鑫鑫^{1,2,3}, 岳思玉^{1,2,3}, 曹铨^{1,2,3*}, 董全民^{1,2,3*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海大学三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:针对高寒生态区饲草生产需求,本研究系统评估了10个燕麦品种在产量、营养品质及土壤改良方面的综合表现。通过方差分析、结构方程模型和TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)模型综合评价方法揭示品种适应性以及与土壤的互作机制,为环青海湖共和盆地草牧业发展提供科学依据。结果表明:美达、福瑞至和黑玫克表现出显著产量优势,鲜草产量 $50.20\sim 54.78\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,干草产量 $18.68\sim 21.48\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;其中艾斯克鲜干比最低(1.67),而爱沃茎叶比最低(2.19)。营养价值呈现品种特异性,楷模和爱沃粗蛋白含量 $8.23\%\sim 8.45\%$,美达和艾斯克粗脂肪含量突出(4.94%和4.85%);贝勒2纤维组分表现突出,其粗纤维、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均表现较低,且相对饲喂价值和总可消化养分显著领先,饲用价值较优。贝勒2和福星种植区土壤磷含量表现出较高水平;楷模种植区土壤全氮和全碳含量表现出较高水平。相关性分析提示了高产燕麦品种通常伴随优质营养价值和良好的土壤生态反馈。结构方程模型显示,品种通过直接效应(路径系数 $0.4088\sim 0.4368$)和土壤介导的间接效应($0.0725\sim 0.6885$)共同调控产量与营养品质。TOPSIS综合评价表明,楷模综合得分最高(0.580),兼具高产特性、优质营养及良好的土壤反馈能力,可作为环青海湖共和盆地退化草地修复与草牧业发展的优选品种。

关键词:环青海湖地区;燕麦;产量;营养价值;土壤理化性质

Yield performance, nutritional quality, and soil physicochemical responses of oat (*Avena sativa*) cultivars in the Qinghai Lake-Gonghe Basin region

WEI Kong-tao^{1,2,3}, ZHANG Chun-ping^{1,2,3}, YU Yang^{1,2,3}, ZHANG Zheng-she⁴, ZHOU Ze^{1,2,3}, ZHANG Xue^{1,2,3}, WANG Xin-xin^{1,2,3}, YUE Si-yu^{1,2,3}, CAO Quan^{1,2,3*}, DONG Quan-min^{1,2,3*}

1. Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Xining 810016, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining 810016, China; 3. Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River Source (Qinghai University), Ministry of Education, Xining 810016, China; 4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

Abstract: It is difficult to meet forage demands in alpine ecological zones. To address this issue, we evaluated the

收稿日期:2025-03-11;改回日期:2025-04-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1302104)和青海大学青年科研基金项目(2022-QNY-12)资助。

作者简介:魏孔涛(1995-),男,甘肃兰州人,在读博士。E-mail: weikt123@163.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: caoq1989@126.com; qmdong@qhu.edu.cn

comprehensive performance of 10 oat (*Avena sativa*) varieties in terms of yield, nutritional quality, and soil improvement potential. Using variance analysis, structural equation modeling (SEM), and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) analysis, we assessed the adaptability of the ten oat varieties and their soil interaction mechanisms. The ultimate goal of this research was to provide scientific evidence to underpin the development of the grassland-livestock industry in the Qinghai Lake-Gonghe Basin region. It was found that the oat varieties 'Monida', 'Forage', and 'Haymaker' exhibited significant yield advantages, with the fresh grass yield ranging from 50.20 to 54.78 t·ha⁻¹ and the hay yield ranging from 18.68 to 21.48 t·ha⁻¹. Among the tested varieties, 'Esker' had the lower fresh-dry ratio (1.67), and 'Everleaf' had the lower stem-leaf ratio (2.19). We detected differences in nutritional value among the varieties; 'Model' and 'Everleaf' had the higher crude protein contents (8.23%–8.45%), whereas 'Monida' and 'Esker' were notable for their high ether extract levels (4.94% and 4.85%, respectively). 'Baler 2' exhibited outstanding fiber characteristics, with the lower levels of crude fiber, neutral detergent fiber, and acid detergent fiber, and the higher relative feed value and total digestible nutrient value, indicative of excellent forage quality. In terms of soil impact, plots planted with 'Baler 2' and 'Fuxing' showed higher soil phosphorus levels, while those planted with 'Model' had elevated total nitrogen and carbon contents. Correlation analysis suggested that high-yielding oat varieties were generally associated with superior nutritional profiles and favorable soil ecological feedback. The SEM results revealed that oat variety influenced yield and nutritional traits through both direct effects (path coefficients: 0.4088–0.4368) and indirect, soil-mediated effects (0.0725–0.6885). The TOPSIS comprehensive evaluation identified 'Model' as the top-performing variety (score: 0.580), exhibiting high yield, superior nutrition, and strong soil feedback potential. Therefore, 'Model' is recommended as a priority oat variety for the restoration of degraded grassland and for forage-livestock development in the Qinghai Lake-Gonghe Basin region.

Key words: Qinghai Lake area; oat; yield; nutritional value; soil physicochemical properties

环青海湖地区位于青藏高原东北部,平均海拔3200 m,属典型的高寒大陆性气候,是我国重要的生态屏障和畜牧业基地^[1]。该地区气候寒冷,年均气温较低,降水分布不均,土壤肥力相对较低,但草地资源丰富^[2]。畜牧业是环青海湖地区的主导产业之一,作为青海省畜牧业核心区域,该地区以牦牛、藏羊养殖为主,畜牧业产值在农业总产值中占据主导地位^[3-4]。近年来,随着生态畜牧业的发展,对优质饲草的需求不断增加,再加上天然草地长期超载过牧导致的草地退化现象日益加剧,致使优质饲草缺口逐年扩大。因此,亟需人工种植优质耐寒饲草缓解草畜矛盾、保障畜牧业可持续发展,而燕麦(*Avena sativa*)因其生态适应性与营养特性成为首选作物^[5]。

燕麦作为一种优良的一年生粮饲兼用作物,具有耐寒、耐旱、抗病虫能力强、生长周期短、适应性强及营养价值高等特性^[6]。其籽粒和秸秆均具有较高的营养价值,是畜牧业中重要的饲料来源^[6-7]。营养学研究表明,燕麦的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量通常低于55%和30%(干物质基础),且具有较高的粗蛋白含量,可有效提升反刍动物瘤胃发酵效率^[8-9]。近年来,国内外对燕麦品种的研究不断深入,研究内容涵盖了燕麦的农艺性状、产量性状、营养品质以及对环境的适应性等方面^[10-12]。研究表明,燕麦的籽粒产量与有效分蘖数、穗粒数等农艺性状密切相关^[13]。在巴基斯坦开展的燕麦品种评比试验表明,燕麦产量与株高、叶面积及分蘖数密切相关,且产量最高可达80 t·hm⁻²^[14]。此外,不同燕麦品种在不同生态环境下的表现也存在显著差异,这为燕麦品种的选育和推广提供了重要的理论依据。然而,高寒环境下品种间营养积累差异及其与土壤互作的调控因素仍不明确。

我国是燕麦的主要种植国之一,饲用燕麦在畜牧业中具有重要的地位^[6]。然而,国内燕麦种植仍面临品种单一、产量不稳定、土壤肥力下降等问题。土壤中较高的pH和不足的有效磷也严重制约着燕麦草的养分吸收^[15]。在环青海湖共和盆地,研究不同燕麦品种的产量性状、营养价值以及对土壤理化性质的影响具有重要的现实意义。一方面,筛选出适应高寒环境的高产、优质燕麦品种,可以有效提高饲草产量,满足畜牧业的需求;另一方面,研究燕麦种植对土壤理化性质的影响,有助于优化种植模式,改善土壤肥力,实现生态与经济的双赢。目前,在此

区域虽有引种栽培的燕麦品种,但尚未形成统一的大面积主栽燕麦品种,现有燕麦种植多为分散、小规模,品种来源较为复杂,且部分种植户种植的燕麦品种未经过严格的适应性筛选,存在产量不稳、品质差异大等问题。因此,本研究在前期调研基础上,选取了来自加拿大、美国及中国的 10 个具有代表性的高产优质燕麦品种进行系统的引种适应性评估,目的是为环湖地区的黄河沿岸共和盆地筛选出适合当地生态条件、产量与品质兼优的优良品种,服务于后续推广与生产应用。故本研究以环青海湖共和盆地 10 份引种栽培的燕麦品种为对象,系统评估 10 份燕麦品种的产量性能、营养价值特征及其对土壤环境的反馈效应,不仅能筛选出适宜高寒生态的优质品种,还可为退化草地修复和草牧业可持续发展提供理论依据与实践路径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于环青海湖共和盆地的青海省海南藏族自治州共和县青海大学高原特色农牧业综合试验示范基地(101°55' E, 36°17' N; 平均海拔为 3300 m),属高原大陆性气候,夏季凉爽短暂,冬季寒冷漫长。气候干燥寒冷、多风,全年温差大、干旱少雨,太阳辐射强。年平均气温 2~5 °C,冬季最低气温可降至 -20 °C 以下,夏季最高气温一般不超过 20 °C。年平均降水量在 250~450 mm(降水季节分布不均匀,主要集中于夏季,尤其是 6—8 月,冬季降水较少,多以雪的形式出现),年蒸发量 2000~2400 mm。试验地土壤类型为高山草甸土,2024 年播种前表层土壤 pH 为 8.58,全氮含量 0.93 g·kg⁻¹,全磷含量 1.18 g·kg⁻¹。

1.2 供试材料

供试燕麦品种均购自北京正道种业有限公司(表 1)。

1.3 试验设计

2024 年 5 月 10 日,在研究区选取地势平坦的地块进行燕麦引种评比试验。采用随机区组试验设计,小区面积为 16 m²(4 m×4 m),小区间隔 60 cm,各品种 3 次重复,共 30 个小区。利用开沟器挑沟,人工条播种植,行距 30 cm,每个小区种植 13 行,播深 3~4 cm,根据各品种的发芽率、千粒重和纯净度,燕麦播种量为每行 36.9 g,播后轻轻覆土镇压。播前撒施 75 kg·hm⁻² 尿素+225 kg·hm⁻² 磷酸二铵作为基肥,播种前一次性施入。播后无灌溉、无施肥,在分蘖期进行人工除杂草,其他田间管理同大田一样。播种后用记号牌标记每个小区。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 产量特性 于 2024 年 9 月 20—25 日(燕麦成熟期)进行野外观测及草样采集。每个小区去除边际效应后选取具有代表性的 1 m 样段,齐地面刈割后称重,测定鲜草产量,将鲜样置于烘箱 105 °C 杀青 0.5 h,后调至 75 °C 烘干至恒重,测定其干草产量。此外,在每个小区随机拔取 10 株燕麦,将茎、叶分离,称取茎鲜重和叶鲜重,烘干称其茎干重和叶干重,并计算茎叶比。

1.4.2 营养品质 草样烘干称重后用小型粉碎机粉碎并过 1 mm 筛,用以测定牧草营养品质。粗蛋白(crude protein, CP)含量为采用元素分析仪(FLASH SMART CHNS/0,意大利)测定植物全氮含量后,乘以 6.25 进行换算;粗脂肪(ether extract, EE)含量采用索氏抽提法测定;粗灰分(crude ash, Ash)含量采用马弗炉灼烧法测定;粗纤维(crude fiber, CF)含量采用酸碱消煮法测定;中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量采用 Van Soest 等^[16]的纤维分析法测定;酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)含量采用酸性洗涤木质素法测定;半纤维素含量为中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量之差。以上测定方

表 1 供试燕麦品种基本特征

Table 1 The basic characteristics of tested oat varieties

编号 Number	品种名称 Varieties name	类型 Type	产地 Producing area
Y ₁	楷模 Model	早熟 Early maturity	加拿大 Canada
Y ₂	贝勒 Baler	中熟 Mid maturity	加拿大 Canada
Y ₃	艾斯克 Esker	中熟 Mid maturity	美国 America
Y ₄	贝勒 2 Baler 2	晚熟 Late maturity	加拿大 Canada
Y ₅	爱沃 Everleaf	超晚熟 Ultra-late maturity	美国 America
Y ₆	黑攻克 Haymaker	晚熟 Late maturity	中国 China
Y ₇	福瑞至 Forage	中晚熟 Mid-late maturity	美国 America
Y ₈	美达 Monida	中早熟 Mid-early maturity	美国 America
Y ₉	速锐 Souris	早熟 Early maturity	加拿大 Canada
Y ₁₀	福星 Fuxing	中晚熟 Mid-late maturity	美国 America

法均参考《饲料分析及饲料质量检测技术》^[17]。

相对饲喂价值(relative feed value, RFV)和相对饲草品质(relative feed quality, RFQ)计算公式如下:

$$\begin{aligned} TDN(\%) &= 82.38 - 0.7515 \times ADF(\%) \\ DDM(\%DM) &= 88.9 - 0.779 \times ADF(\%) \\ DMI(\%BW) &= 120/NDF(\%) \\ RFV &= DMI(\%BW) \times DDM(\%DM)/1.29 \\ RFQ &= TDN(\%) \times DMI(\%BW)/1.23 \end{aligned}$$

式中:TDN为总可消化养分(total digestible nutrients);DDM为可消化干物质(digestible dry matter),用所占干物质(dry matter, DM)的百分比表示;DMI为干物质采食量(dry matter intake),用所占体重(body weight, BW)的百分比表示。以上公式参考 Rohweder 等^[18]和 Moore 等^[19]。

1.4.3 土壤理化性质 于2024年9月24日用直径3.5 cm土钻随机在每个小区内采集土壤样品,利用“5点取样法”取0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm共3层土样,将同一层的土样混匀后分两份,挑出杂草、石头等杂物,一份土壤自然风干、研磨后过1 mm筛测定土壤速效养分;另一份过0.25 mm筛测定全量养分。

土壤含水量(soil water content, SWC)采用铝盒烘干法测定;土壤pH采用多参数综合测量仪[Seven Excellence, 梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司]测定;铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量采用全自动间断化学分析仪(Clever Chem 380, 德国)测定;全氮(total nitrogen, TN)和全碳(total carbon, TC)含量采用元素分析仪(FLASH SMART CHNS/O, 意大利)测定;全磷(total phosphorus, TP)含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定;速效磷(available phosphorus, AP)含量采用碳酸氢钠浸提比色法测定。测定方法参照《土壤农化分析》^[20]。

1.5 数据分析与作图

采用Microsoft Excel 2021软件整理并处理数据。采用SPSS Statistics 26.0软件进行方差分析和多重比较,显著水平为0.05。采用Origin 2024软件作图。采用R 4.3.1进行Pearson相关性分析探讨不同燕麦品种的产量与营养价值、土壤理化性质之间的相关性,并用Piecewise SEM包构建分段结构方程模型(structural equation model, SEM),分析品种对燕麦产量、营养品质以及土壤理化性质的影响过程及路径系数。对不同燕麦品种的产量特性、营养价值和土壤理化性质进行TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)模型综合评价^[21],筛选出适宜环青海湖共和盆地种植的燕麦品种。

2 结果与分析

2.1 不同燕麦品种的产量

不同燕麦品种之间的鲜草产量存在差异,其中品种Y₅(50980.87 kg·hm⁻²)、Y₇(54782.53 kg·hm⁻²)和Y₈(54665.00 kg·hm⁻²)的鲜草产量较高,与品种Y₃(19076.61 kg·hm⁻²)差异显著(P<0.05,图1A)。干草产量的趋势与鲜草产量相似,品种Y₆(18682.80 kg·hm⁻²)、Y₇(19108.57 kg·hm⁻²)和Y₈(21478.59 kg·hm⁻²)的干草产量较高,与品种Y₃(11377.09 kg·hm⁻²)差异显著(P<0.05,图1B)。不同燕麦品种的鲜干比表现出较大的波动,其中品种Y₃(1.67)和Y₉(2.24)的鲜干比较低,与品种Y₅差异显著(P<0.05,图1C)。茎叶比的差异较为明显,品种Y₃(9.31)的茎叶比最高,显著高于其他燕麦品种(P<0.05),而品种Y₅(2.19)和Y₆(2.24)的茎叶比较低,说明不同燕麦品种的营养分配模式不同(图1D)。

2.2 不同燕麦品种的营养价值

不同燕麦品种的营养品质存在差异(图2)。燕麦品种Y₁(8.45%)和Y₅(8.23%)的粗蛋白含量显著高于其他品种(P<0.05),品种Y₃和Y₁₀的粗蛋白含量较低,分别为6.41%和6.24%(图2A)。燕麦品种Y₃和Y₈的粗脂肪含量较高,分别为4.85%和4.94%,显著高于品种Y₄、Y₆和Y₁₀(P<0.05,图2B)。品种Y₇的粗纤维含量最高,为32.67%,显著高于其他燕麦品种(除Y₁₀外,P<0.05),而品种Y₄的粗纤维含量最低,为23.25%(图2C)。燕麦品种Y₅和Y₇的粗灰分含量较高,分别为6.88%和6.81%,显著高于其他燕麦品种(P<0.05,图2D)。燕麦品种Y₇的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、半纤维素和酸性洗涤木质素均表现出较高水平,分别为51.93%、28.44%、

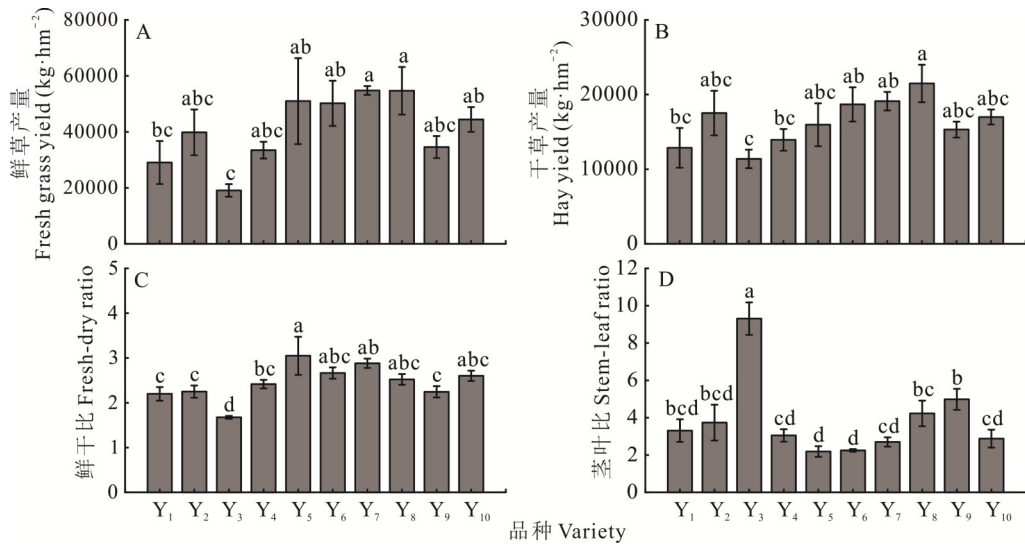


图 1 不同燕麦品种产量

Fig. 1 Yield of different oat varieties

Y₁~Y₁₀ 分别代表楷模、贝勒、艾斯克、贝勒 2、爱沃、黑玫克、福瑞至、美达、速锐、福星。不同小写字母代表不同燕麦品种间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Y₁~Y₁₀ represent Model, Baler, Esker, Baler 2, Everleaf, Haymaker, Forage, Monida, Souris, Fuxing, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different varieties ($P < 0.05$), the same below.

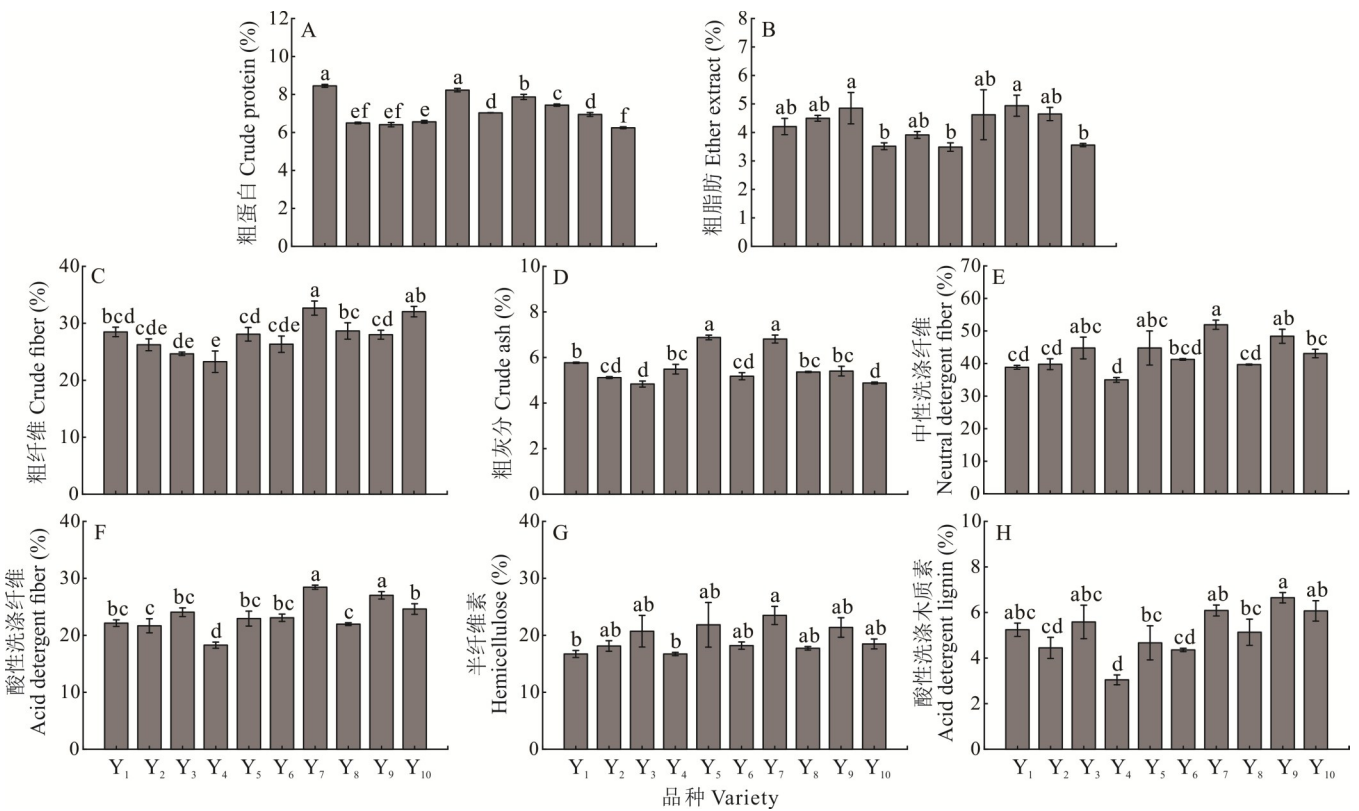


图 2 不同燕麦品种的营养品质

Fig. 2 Nutritional quality of different oat varieties

23.49% 和 6.09%, 而品种 Y₄ 的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、半纤维素以及酸性洗涤木质素均最低, 且与其他多个燕麦品种具有显著差异 ($P < 0.05$, 图 2E~H)。

不同燕麦品种的总可消化养分(TDN)、可消化干物质(DDM)、干物质采食量(DMI)、相对饲喂价值(RFV)以及相对饲草品质(RFQ)均表现出差异, 表明燕麦品种的饲用价值存在一定的变异性(表 2)。燕麦品种 Y₄ 在总

可消化养分(68.65%)和可消化干物质(74.67%DM)方面表现最好,与其他燕麦品种有显著差异($P<0.05$),且干物质采食量为3.43%BW,表现出较高的饲料利用效率。此外,品种Y₄的相对饲喂价值和相对饲草品质均处于较高水平,与其他燕麦品种有显著差异($P<0.05$),表明其饲用价值较高。而品种Y₇的总可消化养分、可消化干物质、干物质采食量、相对饲喂价值以及相对饲草品质均表现出较低水平,饲草饲用价值较低(表2)。

表2 不同燕麦品种饲用价值

Table 2 Forage value of different oat varieties

品种 Variety	总可消化养分 Total digestible nutrients (%)	可消化干物质 Digestible dry matter (%DM)	干物质采食量 Dry matter intake (%BW)	相对饲喂价值 Relative feed value	相对饲草品质 Relative forage quality
Y ₁	65.75±0.44bc	71.66±0.46bc	3.09±0.05ab	171.68±3.35b	165.20±3.27b
Y ₂	66.09±0.92b	72.02±0.96b	3.03±0.12ab	169.09±8.88b	162.76±8.65b
Y ₃	64.30±0.57bc	70.16±0.59bc	2.71±0.19bcd	147.42±11.16bc	141.71±10.78bc
Y ₄	68.65±0.41a	74.67±0.43a	3.43±0.07a	198.73±5.22a	191.63±5.09a
Y ₅	65.15±0.99bc	71.03±1.02bc	2.75±0.29bc	151.78±18.14bc	146.01±17.55bc
Y ₆	65.04±0.49bc	70.92±0.50bc	2.91±0.02bc	159.88±1.62b	153.76±1.60b
Y ₇	61.01±0.27d	66.74±0.28d	2.31±0.06d	119.73±3.11d	114.77±2.98d
Y ₈	65.88±0.19b	71.79±0.19b	3.02±0.01ab	168.30±0.87b	161.97±0.85b
Y ₉	62.08±0.49d	67.85±0.51d	2.49±0.11cd	131.01±6.51cd	125.71±6.29cd
Y ₁₀	63.89±0.70c	69.73±0.73c	2.79±0.09bc	150.91±5.90bc	145.01±5.74bc

同列不同小写字母表示不同品种间差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different varieties.

2.3 不同燕麦品种的土壤理化性质

不同燕麦品种对于土壤理化性质的影响具有明显差异(图3)。土壤含水量的变化趋势为深层高于表层,不同燕麦品种下不同土层的土壤含水量差异不显著,均在18.05%~22.45%(图3A)。土壤pH相对恒定,为8.40~8.79,土壤总体呈弱碱性(图3B)。土壤铵态氮和土壤硝态氮含量基本呈现出表层高于深层的现象,品种Y₉3个土层的土壤铵态氮含量均表现出较高水平,与品种Y₁、Y₂及Y₅均表现出显著差异($P<0.05$);品种Y₇的土壤硝态氮含量在3个土层均表现出较高水平,与其他燕麦品种具有显著差异($P<0.05$,图3C,D)。品种Y₄在3个土层的土壤速效磷均表现出较高水平,与品种Y₅、Y₈和Y₉相比差异显著($P<0.05$,图3E)。土壤全磷含量的变化相对较小,品种Y₁₀在0~10 cm和10~20 cm的全磷含量较其他品种高,且与大部分品种差异显著($P<0.05$,图3F)。土壤全氮和全碳的含量变化较一致,品种Y₁在土壤表层的全氮、全碳含量均表现出较高水平,分别为1.45 g·kg⁻¹和40.15 g·kg⁻¹,与其他品种相比具有显著差异($P<0.05$,图3G,H)。

2.4 不同燕麦品种的产量与营养价值、土壤理化性质相关性分析

不同变量与干草产量和茎叶比之间相关性分析表明,粗蛋白和粗灰分含量显著正相关($P<0.01$),但与土壤速效磷含量显著负相关($P<0.05$);中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维、酸性洗涤木质素含量显著正相关($P<0.001$, $P<0.01$),但与相对饲喂价值显著负相关($P<0.001$);土壤全氮和全碳含量显著正相关($P<0.001$);茎叶比与粗脂肪显著相关,干草产量与土壤pH密切相关(图4)。

2.5 不同品种对燕麦产量、营养价值和土壤理化性质的影响过程

采用分段式结构方程模型探讨品种如何影响土壤理化性质进而影响燕麦产量、营养品质和饲用价值(图5)。通过调整和完善模型,拟合效果良好(Fisher's $C=11.659$, $P=0.473$),品种对燕麦的产量、营养品质和饲用价值有直接效应;品种对土壤速效磷、铵态氮和硝态氮有显著直接效应($P<0.05$, $P<0.001$, $P<0.05$),其中土壤铵态氮的路径系数最大,为0.8961,达极显著水平;品种还通过影响土壤速效磷、铵态氮和硝态氮进而间接影响燕麦产量和营养品质,且土壤铵态氮的解释度最高,为0.80。

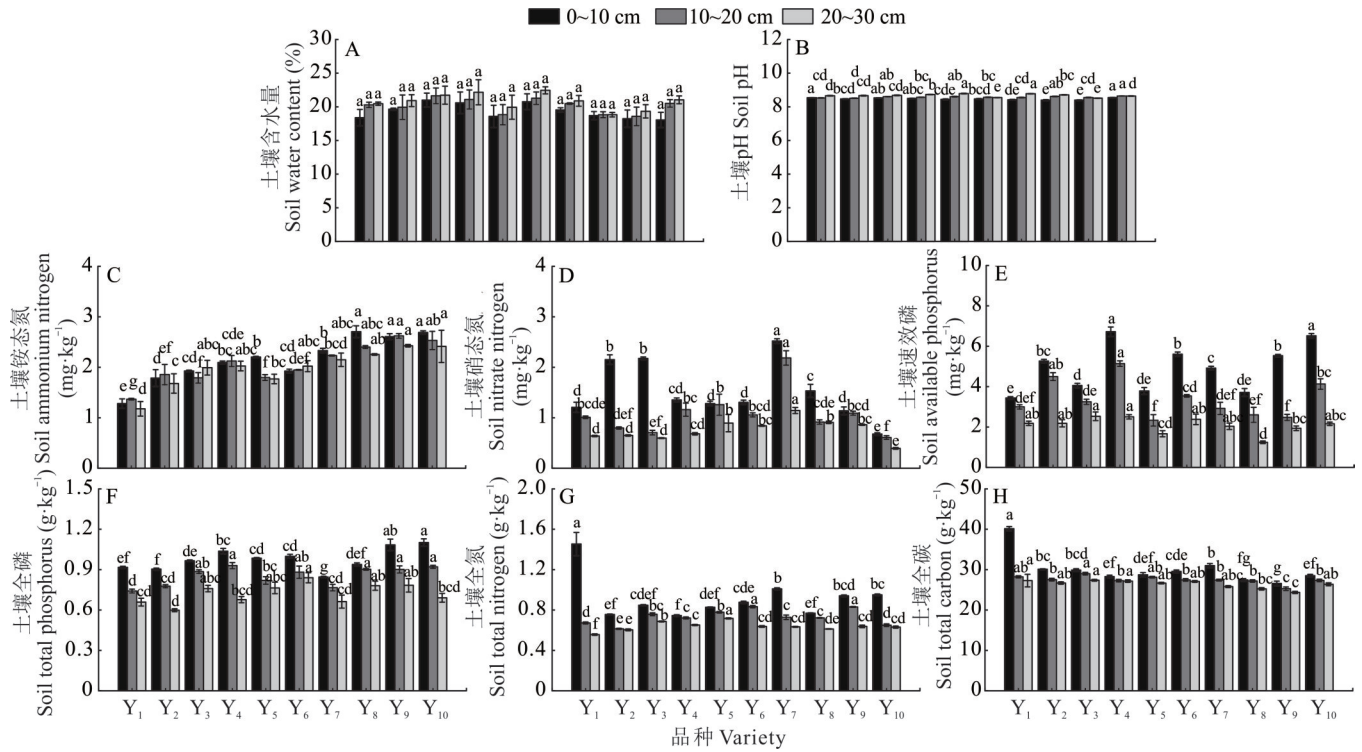


图 3 不同燕麦品种的土壤理化性质

Fig. 3 Soil physicochemical properties of different oat varieties

不同小写字母代表同一土层下不同燕麦品种的土壤理化性质指标间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences in soil physicochemical properties among oat varieties within the same soil layer ($P < 0.05$)。)

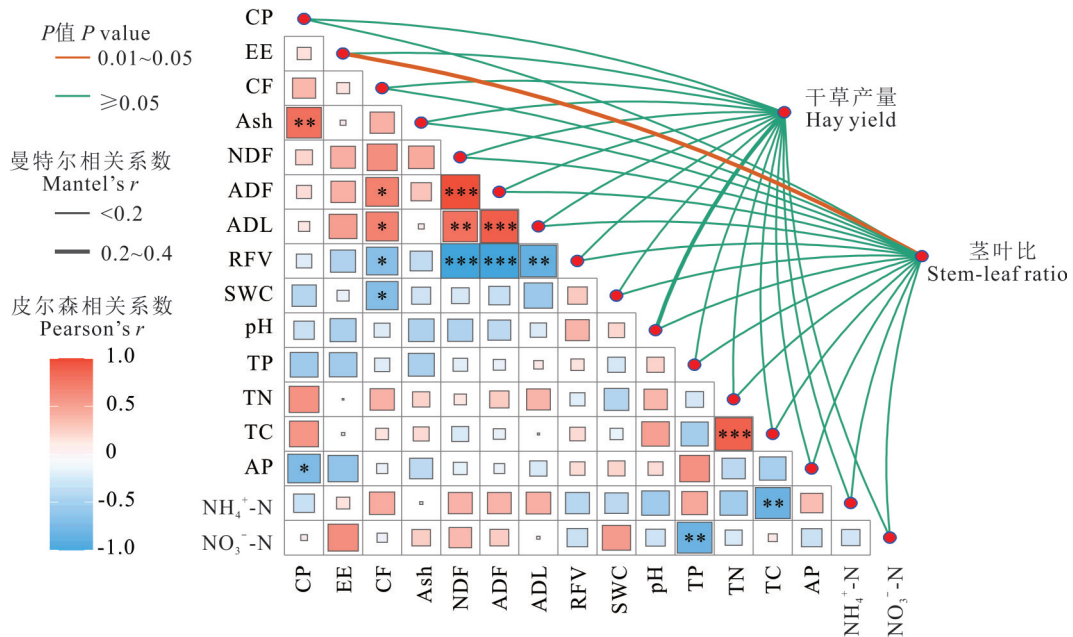


图 4 不同燕麦品种的产量与营养价值、土壤理化性质的相关性

Fig. 4 Correlation between yield, nutritional value, and soil physicochemical properties of different oat varieties

CP: 粗蛋白 Crude protein; EE: 粗脂肪 Ether extract; CF: 粗纤维 Crude fiber; Ash: 粗灰分 Crude ash; NDF: 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; ADL: 酸性洗涤木质素 Acid detergent lignin; RFV: 相对饲喂价值 Relative feed value; SWC: 土壤含水量 Soil water content; TP: 全磷 Total phosphorus; TN: 全氮 Total nitrogen; TC: 全碳 Total carbon; AP: 速效磷 Available phosphorus; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 硝态氮 Nitrate nitrogen.

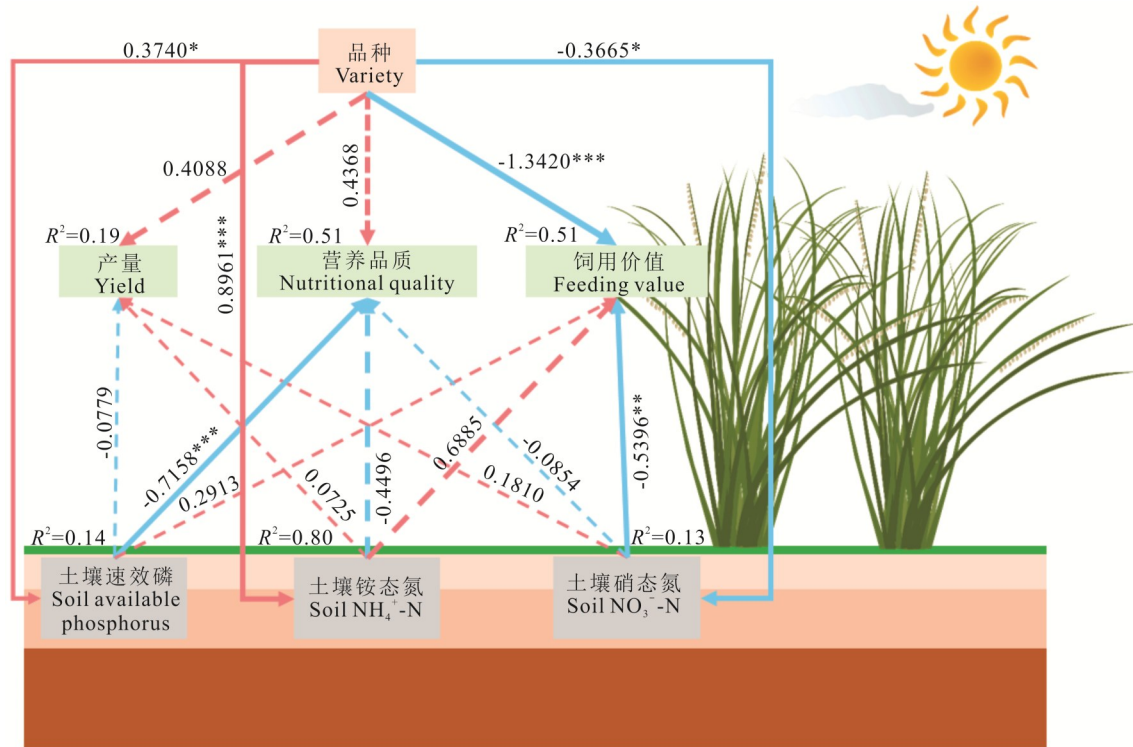


图5 品种对燕麦产量、营养价值和土壤理化性质的影响路径

Fig. 5 Pathways of cultivar effects on oat yield, nutritional quality, and soil physicochemical properties

实线和虚线箭头分别表示显著和不显著的路径关系;红线和蓝线分别表示正和负的路径关系。线上的数值为标准化路径系数。Solid and dashed arrows represent significant ($P < 0.05$) and insignificant paths, respectively. Red and blue line represent positive and negative coefficients, respectively. The values on the lines are standardized path coefficients. *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$.

2.6 不同燕麦品种综合评价

为了从多个层面评价 10 个燕麦品种的综合表现,筛选出适宜该地区种植的燕麦品种,采用 TOPSIS 模型对不同燕麦品种的产量特性、营养品质及土壤理化性质进行综合评价(表 3)。评价结果表明,品种 Y_1 (楷模)的相对贴合度最高,为 0.580;其次为品种 Y_7 (福瑞至),为 0.530;品种 Y_2 (贝勒)最低,为 0.374。综合来看, Y_1 (楷模)是环青海湖共和盆地适宜种植的燕麦品种。

3 讨论

3.1 不同燕麦品种的产量特性和营养价值

不同燕麦品种在特定生长环境中的适应性表现,能够作为判断某一品种生产性能和利用价值的前提^[22]。而燕麦的自身遗传特性和外界环境以及栽培

措施是影响燕麦适应性的主要因素^[23]。产量作为决定燕麦生产性能的重要指标,是不同燕麦品种在特定地区适应性的直观表现^[24]。本研究中的 10 份燕麦品种之间产量差异明显,产量排名前三的燕麦品种分别为美达、福瑞至和黑攻克,其中福瑞至的鲜草产量最高,而美达的干草产量表现出较高水平。鲜草产量较高的品种其干草产量未必持续偏高,因为干草产量与茎叶比、鲜干比的大小等因素紧密相关^[25]。鲜干比能够反映牧草的干物质积累程

表3 不同燕麦品种产量、营养价值及土壤理化性质综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of yield, nutritional quality, and soil physicochemical properties across oat varieties

品种 Variety	最优距离 Optimal distance	最劣距离 Worst distance	相对贴合度 Relative fit	排序 Ranking
Y_1	0.137	0.189	0.580	1
Y_2	0.181	0.108	0.374	10
Y_3	0.174	0.142	0.450	3
Y_4	0.201	0.123	0.380	8
Y_5	0.183	0.110	0.376	9
Y_6	0.173	0.117	0.404	6
Y_7	0.140	0.157	0.530	2
Y_8	0.193	0.120	0.383	7
Y_9	0.182	0.125	0.406	5
Y_{10}	0.188	0.136	0.420	4

度和饲用价值,也为牧草制备青干草和青贮饲料提供了科学依据^[26]。本研究中 10 份燕麦品种的鲜干比较小的 3 个品种分别为艾斯克、楷模和速锐;茎叶比较大的 3 个品种分别为艾斯克、速锐和美达,鲜干比小的品种一般茎叶比大,由于叶片的含水量要高于茎秆,所以鲜干比与茎叶比呈显著负相关,干草产量与鲜干比呈负相关,而与茎叶比呈正相关,同样这也是不同燕麦品种鲜草产量和干草产量的排名发生变化的主要原因,这与雷雄等^[27]的研究结论一致。

牧草的营养品质影响着草料的饲用价值和经济价值^[28]。而牧草的粗蛋白含量和相对饲喂价值是评价牧草营养价值的重要指标,粗蛋白含量越高,饲喂价值越高^[26,29]。粗蛋白含量高的饲草不仅可以有效提高畜产品的质量,还能促进家畜的生长发育,燕麦粗蛋白含量与豆制品相近,一定程度上可以作为动物所需的替代蛋白^[30-31]。本研究中,不同燕麦品种之间的营养品质差异明显,粗蛋白含量最高的是品种楷模,其次为品种爱沃,这与董志晓等^[26]在凉山地区的研究结论相似;粗脂肪含量最高的是品种美达,其次为艾斯克。王小军等^[12]在环青海湖地区的燕麦品种试验中证实,不同燕麦品种的粗蛋白含量在该区域处于 6.5%~8.0%、粗脂肪含量处于 3.3%~4.0%,本研究结果与此相似。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量作为描述饲草料营养品质的关键指标,与饲草料的质量密切相关,能够反映出植物中的纤维质量优劣状况,而酸性洗涤纤维与动物消化率呈负相关,在一定的范围内,饲草消化率越高,酸性洗涤纤维含量越低^[32]。本研究中,品种贝勒 2 的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均显著低于其他燕麦品种,福瑞至的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量最高。相对饲喂价值被广泛应用于粗饲料的质量评定中,一般情况下,牧草的相对饲喂价值越高,饲用价值就越高^[33]。本研究中,品种贝勒 2 的相对饲喂价值最高,其次为品种楷模,这也证实了牧草的相对饲喂价值越高,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维越低,本研究中的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维与相对饲喂价值呈显著负相关也证实了这一点,这与闫亚飞^[34]的研究结论相一致。相对饲草品质作为一种评价饲草质量和价值较为简便的指标,其值越高,饲草营养品质越好^[22]。本研究中,品种贝勒 2 的相对饲草品质最高,其次为楷模和贝勒,这几个品种的可消化干物质、干物质采食量、总可消化养分均表现出较高水平,说明这几个燕麦品种的饲用价值较高。此外,本研究还发现品种对牧草的饲用价值具有显著影响,因本试验的外界环境条件一致,所以燕麦牧草的营养价值主要受品种影响,由于燕麦本身的遗传特性不一样、生长发育以及对特定区域的适应性不同,其营养价值也存在差异^[35]。

3.2 不同燕麦品种对土壤理化性质的影响及综合评价

土壤理化性质是评定土壤质量好坏的重要性质之一,而土壤质量通常在维持生物生产力、维护环境质量以及促进植物健康生长等方面发挥着非常重要的作用^[36]。土壤的利用和管理会对许多土壤特性产生深远影响,从而间接影响土壤质量,进而导致农业用地长期可持续性的改善或者限制^[36]。不同燕麦品种通过根际有机酸和根际微生物对土壤微量元素产生不同的响应机制^[37]。鲍鑫茹^[38]的研究也表明,不同燕麦品种因其根系特征差异,会影响土壤速效养分、微生物群落多样性及酶活性。本研究中,不同燕麦品种的土壤物理性质和养分含量具有明显变化,不同燕麦品种对土壤含水量和 pH 的影响不大。相关研究也证实燕麦的根系状况会影响植物获取土壤中潜在的可用水分和养分^[39],同样燕麦的根系分泌物也会影响土壤养分含量。土壤碳、氮、磷是植物生长发育最为关键的营养元素,也是评定土壤肥力高低最主要的养分指标。本研究中,品种速锐在 3 个土层的土壤铵态氮含量表现出较高水平,显著高于其他燕麦品种;品种福瑞至的土壤硝态氮含量显著高于其他燕麦品种;品种贝勒 2 的土壤速效磷含量明显高于其他燕麦品种;而品种楷模的土壤全氮和全碳含量表现出较高水平,这与王玮^[40]的燕麦品种不同会导致土壤养分发生变化的结论相似。此外,本研究通过相关性分析发现,干草产量与土壤 pH 密切相关,提示高产燕麦品种通常伴随优质营养价值和良好的土壤生态反馈,这一结果为构建基于土壤调控的品种筛选模型提供了依据,也强化了生态适应性与农业生产价值的协同关系。同时,结构方程模型显示,品种对土壤养分有显著的直接效应,通过直接影响土壤养分含量进而间接影响燕麦的产量和营养价值。品种作为土壤性质发生变化最主要的影响因子,这是因为牧草生长发育主要依靠土壤中所提供的水分和养分等物质,不同燕麦品种处在同一生长环境下,品种作为主要影响条件因其根系形态和特性的不同对土壤环境的反馈作用存在差异,这导致不同燕麦的产量和营养品质出现高低优劣。

一个饲草品种整体适应性表现的优劣,不仅靠单一的农艺性状、产量或者营养品质评价,还需要结合产量特性、营养品质、饲用价值以及对土壤环境的影响等多个层面进行综合评价来具体衡量^[13,41]。本研究通过对不同燕麦品种的产量特性、营养价值及土壤理化性质进行TOPSIS综合评价,表明品种楷模综合表现较好,是适宜在环青海湖共和盆地种植的燕麦品种。主要是因为楷模为早熟品种,可以规避霜冻风险,能够提前成熟,避免产量和品质损失。因此,在特定地区引种栽培时,应注重不同燕麦品种本身的遗传特性和生长特性,并结合当地的环境条件、土壤条件以及气候特征,选择适宜种植、推广、利用的优良品种,以充分发挥品种的生产 and 生态潜力以及经济效益。

4 结论

通过对不同燕麦品种的综合研究发现,美达、福瑞至、黑玫克的产量表现优异,艾斯克的鲜干比最低,爱沃的茎叶比最低;在营养品质方面,楷模和爱沃的粗蛋白含量较高,美达和艾斯克的粗脂肪含量较高,贝勒2的纤维组分处于低位,饲用价值指标较优;从土壤影响来看,贝勒2和福星种植下的土壤磷含量较高,美达的铵态氮含量、福瑞至的硝态氮含量较高,楷模促进土壤全氮、全碳累积。相关性分析和结构方程模型共同揭示了土壤理化性质对燕麦产量和品质的调控路径。结构方程模型显示,燕麦品种通过直接效应和土壤介导的间接效应共同调控燕麦的产量与营养品质。TOPSIS评价显示,楷模品种综合表现最优,兼具高产优质特性与正向土壤反馈,建议将其作为环青海湖共和盆地主推种植的燕麦品种。

参考文献 References:

- [1] Yang Y H, Sun J N. Current status and development prospects of livestock and feed industries in the Qinghai Lake region. *Feed Industry*, 2006, 27(23): 61–63.
杨予海, 孙佳妮. 环青海湖地区畜牧业和饲料业现状及发展的思考. *饲料工业*, 2006, 27(23): 61–63.
- [2] Li F X, Fu Y, Yang Q, *et al.* Climate change and its environmental effects in the surrounding area of Qinghai Lake. *Resources Science*, 2008, 30(3): 348–353.
李凤霞, 伏洋, 杨琼, 等. 环青海湖地区气候变化及其环境效应. *资源科学*, 2008, 30(3): 348–353.
- [3] Ding S X. Study on the sustainable development of animal husbandry in minority areas around Qinghai Lake. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(22): 11832–11834, 11837.
丁生喜. 环青海湖少数民族地区畜牧业可持续发展研究. *安徽农业科学*, 2010, 38(22): 11832–11834, 11837.
- [4] Li H M, Zhou B R. Dividing of phenological season around Qinghai Lake and application in animal husbandry. *Pratacultural Science*, 2006, 23(9): 103–105.
李红梅, 周秉荣. 环青海湖地区物候季节划分及在畜牧业生产中的应用. *草业科学*, 2006, 23(9): 103–105.
- [5] Ren Y X, Liu H C, Tian X H, *et al.* Selection of succeeding crops for a double-cropping system in alpine pastoral areas of the Qinghai–Tibetan Plateau. *Grass and Forage Science*, 2024, 79(1): 47–55.
- [6] Hou L Y, Zhu Z Y, Yang J, *et al.* Current status, problems and potentials of forage oat in China. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2019, 45(3): 248–253.
侯龙鱼, 朱泽义, 杨杰, 等. 我国饲草用燕麦现状、问题和潜力. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(3): 248–253.
- [7] Ye X L, Gan Z, Wan Y, *et al.* Advances and perspectives in forage oat breeding. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2): 160–177.
叶雪玲, 甘圳, 万燕, 等. 饲用燕麦育种研究进展与展望. *草业学报*, 2023, 32(2): 160–177.
- [8] 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.
- [9] Ibrahim M S, Ahmad A, Sohail A, *et al.* Nutritional and functional characterization of different oat (*Avena sativa* L.) cultivars. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 1373–1385.
- [10] Van den Broeck H C, Londono D M, Timmer R, *et al.* Profiling of nutritional and health-related compounds in oat varieties. *Foods*, 2015, 5(1): 2.
- [11] Mut Z, Akay H, Erbaş Köse Ö D. Grain yield, quality traits and grain yield stability of local oat cultivars. *Journal of Soil*

- Science and Plant Nutrition, 2018, 18(1): 269–281.
- [12] Wang X J, Wang J L, Ju Z L, *et al.* Comprehensive evaluation on production performance and nutritional quality of different varieties of forage oat in the Qinghai Lake area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(19): 3730–3742.
王小军, 王金兰, 琚泽亮, 等. 环青海湖地区不同饲用燕麦品种生产性能和营养品质综合评价. *中国农业科学*, 2024, 57(19): 3730–3742.
- [13] Cao Y, Malipati·Nuertai, Alehesi·Jiaerdemutila, *et al.* Comprehensive evaluation of the production performance of 18 oat germplasm resources based on the affiliation function method. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(16): 26–28, 32.
曹禹, 玛力帕提·努尔太, 阿勒合斯·加尔得木拉提, 等. 基于隶属函数法的 18 份燕麦种质资源生产性能的综合评价. *安徽农业科学*, 2023, 51(16): 26–28, 32.
- [14] Shah S A S, Akhtar L H, Minhas R, *et al.* Evaluation of different oat (*Avena sativa* L.) varieties for forage yield and related characteristics. *Science Letters*, 2015, 3(1): 13–16.
- [15] Sun H R, Zeng H, Liu J Y, *et al.* Preliminary study on abundance-deficiency index of soil available P and appropriate phosphorus application rate for oats in the farming-grazing transitional zone of China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(10): 101–105.
孙洪仁, 曾红, 刘江扬, 等. 中国农牧交错带燕麦土壤有效磷丰缺指标与适宜施磷量初步研究. *中国农学通报*, 2018, 34(10): 101–105.
- [16] 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.
- [17] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality testing technology (4th edition). Beijing: China Agricultural University Press, 2016.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术(第 4 版). 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
- [18] Rohweder D A, Barnes R F, Jorgensen N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. *Journal of Animal Science*, 1978, 47(3): 747–759.
- [19] Moore J E, Undersander D J. Relative forage quality: an alternative to relative feed value and quality index//Proceedings of 13th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium. Gainesville: University of Florida, 2002: 16–29.
- [20] Bao S D. Agrochemical analysis of soil. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [21] Wei K T, Xiang H, Liu Y F, *et al.* Mixed cropping of *Medicago ruthenica*—*Bromus inermis* exhibits higher yield and quality advantages in the Longxi Loess Plateau region of northwest China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2024, 8: 1411687.
- [22] Zhou Q L, Duoqidunzhu, Yixiyangzong. Evaluation of gray relational grade analysis to 16 oats varieties introduced in Lasa region. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 389–396.
周启龙, 多吉顿珠, 益西央宗. 拉萨地区 16 个燕麦引进品种的灰色关联度评价. *草地学报*, 2020, 28(2): 389–396.
- [23] Li J, Nan M, Liu Y M, *et al.* Comprehensive evaluation of the yield, quality and feeding performance on different oat varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(4): 1089–1098.
李晶, 南铭, 刘彦明, 等. 不同燕麦品种产量和品质及饲喂性能综合评价. *草地学报*, 2023, 31(4): 1089–1098.
- [24] Gao X F, Nie Y Y, Xu L J, *et al.* Adaptability evaluation of oat introduction in winter fallow field of Wumeng Mountain area under drought condition. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(11): 215–227.
高兴发, 聂莹莹, 徐丽君, 等. 干旱条件下乌蒙山区冬闲田燕麦引种适应性评价. *草业学报*, 2024, 33(11): 215–227.
- [25] Sun J P, Dong K H, Kuai X Y, *et al.* Comparison of productivity and feeding value of introduced oat varieties in the agro-pasture ecotone of northern Shanxi. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(11): 222–230.
孙建平, 董宽虎, 蒯晓妍, 等. 晋北农牧交错区引进燕麦品种生产性能及饲用价值比较. *草业学报*, 2017, 26(11): 222–230.
- [26] Dong Z X, Gou W L, Liu Y J, *et al.* Evaluation of production performance and nutritional value of 15 feed barley varieties in the Liangshan region. *Pratacultural Science*, 2024, 41(11): 2651–2663.
董志晓, 苟文龙, 刘英杰, 等. 15 份饲用燕麦品种在凉山地区的生产性能和营养价值评价. *草业科学*, 2024, 41(11): 2651–2663.
- [27] Lei X, You M H, Bai S Q, *et al.* Genetic diversity analysis and multivariate evaluation of agronomic traits of 50 oat germplasm lines in northwest Sichuan. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(7): 131–142.
雷雄, 游明鸿, 白史且, 等. 川西北高原 50 份燕麦种质农艺性状遗传多样性分析及综合评价. *草业学报*, 2020, 29(7):

131–142.

- [28] Rearte D H. New insights into the nutritional value of grass//Utilisation of grazed grass in temperate animal systems. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005: 49–59.
- [29] Razafindrazaka A, Stuerz S, Cotter M, *et al.* Genotypic yield responses of lowland rice in high-altitude cropping systems. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2020, 206(4): 444–455.
- [30] Wang F, Ma X D, Li G, *et al.* Adaptability evaluation of forage oat varieties in Ar Horqin Sandland. *Pratacultural Science*, 2024, 41(4): 931–941.
王飞, 马晓东, 李刚, 等. 阿鲁科尔沁沙地饲用燕麦品种适应性评价. *草业科学*, 2024, 41(4): 931–941.
- [31] Basinskiene L, Cizeikiene D. Cereal-based nonalcoholic beverages//Galanakis C M. Trends in non-alcoholic beverages. London: Academic Press, 2020: 63–99.
- [32] Liu G, Zhao G Q, Wei L M. Primary application of the entropy weight-based gray systematic theory to integrated evaluation of oat. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(3): 84–89.
刘刚, 赵桂琴, 魏黎明. 基于熵权赋权法的灰色系统理论在燕麦品种综合评价中的应用. *中国草地学报*, 2007, 29(3): 84–89.
- [33] Yang F, Zheng M N, Kang J H, *et al.* Comprehensive evaluation of production performance and feeding value of 9 oat varieties in Northern Shanxi. *Crops*, 2019(2): 94–98.
杨富, 郑敏娜, 康佳惠, 等. 9个燕麦品种在晋北地区的生产性能及饲用价值综合评价. *作物杂志*, 2019(2): 94–98.
- [34] Yan Y F. Study on productivity performance and nutritional quality of different forage in Hetao irrigation district. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
闫亚飞. 河套灌区不同饲草生产性能与品质研究. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [35] Wang X, Li D, Pan X L, *et al.* Adaptability evaluation of 10 forage oat varieties in Chifeng semiarid area. *Pratacultural Science*, 2023, 40(2): 521–529.
王筱, 李夺, 潘翔磊, 等. 赤峰半干旱区10个饲用燕麦品种适应性评价. *草业科学*, 2023, 40(2): 521–529.
- [36] Delgado A, Gómez J A. The soil physical, chemical and biological properties//Villalobos F J, Fereres E. Principles of agronomy for sustainable agriculture. Cham: Springer International Publishing, 2017: 15–26.
- [37] Chen R X. The rhizosphere micro-ecology of different oat varieties and their mechanism of cadmium absorption and transport. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
陈若潇. 不同燕麦品种根际微生态及镉吸收转运机制. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [38] Bao X R. Response of soil microbial communities in the rhizosphere of oats to saline-alkali stress. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
鲍鑫茹. 燕麦根际土壤微生物群落对盐碱胁迫的响应. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [39] Hoad S P, Russell G, Lucas M E, *et al.* The management of wheat, barley, and oat root systems. *Advances in Agronomy*, 2001, 74: 193–246.
- [40] Wang W. The phenotype of *Avena sativa* traits, nutrients and microbe community structure of soil under mixed sowing of *Avena sativa* and *Vicia sativa*. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
王玮. 燕麦与箭筈豌豆混播下燕麦性状表型和土壤养分及微生物群落结构的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [41] Wang J L, Wang X J, Liu Q L, *et al.* A multi-trait evaluation of production performance and nutritional quality of different oat varieties in the Sanjiangyuan area. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2024, 33(10): 83–95.
王金兰, 王小军, 刘启林, 等. 不同燕麦品种在三江源区的生产性能和营养品质综合评价. *草业学报*, 2024, 33(10): 83–95.