

DOI:10.11686/cyxb2025326

<http://cyxb.magtech.com.cn>

张博鸿, 马祥, 琚泽亮, 等. 不同生态条件下燕麦种质资源遗传多样性分析与综合评价. 草业学报, 2026, 35(7): 151—164.

ZHANG Bo-hong, MA Xiang, JU Ze-liang, *et al.* Genetic diversity analysis and multi-trait evaluation of oat germplasm under different ecological conditions. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 151—164.

不同生态条件下燕麦种质资源遗传多样性分析与综合评价

张博鸿, 马祥, 琚泽亮, 段连学, 王小军, 贾志锋*

(青海大学畜牧兽医科学院, 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 青藏高原地区气候严酷, 天然牧草初级生产力低, 人工草地建植已成为缓解草畜矛盾的重要途径。然而, 当前人工草地存在品种适应性差、种质单一等问题, 难以满足畜牧业发展需求, 亟需筛选出适宜高寒生态区人工种植的优质高产饲用燕麦品种。本研究在不同的生态条件下, 对 48 份燕麦种质资源的农艺性状、饲草产量、营养品质以及光合生理参数进行测定, 采用 Shannon-Wiener 多样性指数和 TOPSIS-多准则决策模型进行遗传多样性分析和综合评价。结果表明: 供试材料遗传多样性丰富, Shannon-Wiener 多样性指数为 1.77~2.08; 结构方程模型揭示基因型和株高是影响相对饲喂价值的关键因子, 总效应值分别为 0.506 和 -0.617; 区域适应性方面, 青永久 178、257 和 226 在湟中区表现出优良的综合性状; 青永久 486、051 和 465 在贵南县整体表现较佳; 此外, 青永久 160、458 和 085 在两个生态条件下均位居前列, 表现出较强的适应广度。综上所述, 本研究筛选到的燕麦种质可为青藏高原等高寒牧区培育优异燕麦品种提供重要材料。

关键词: 燕麦种质; 生态条件; 遗传多样性; 综合评价; 结构方程模型

Genetic diversity analysis and multi-trait evaluation of oat germplasm under different ecological conditions

ZHANG Bo-hong, MA Xiang, JU Ze-liang, DUAN Lian-xue, WANG Xiao-jun, JIA Zhi-feng*

Qinghai University, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary, Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining 810016, China

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is characterized by harsh climatic conditions and low primary productivity of natural pastures. Establishing artificial grasslands has become a key strategy to alleviate the conflict between forage availability and livestock demand. However, current artificial pastures face challenges such as limited varietal adaptability and narrow genetic diversity, which hinder the sustainable development of animal husbandry. There is an urgent need to identify high-yielding, high-quality oat (*Avena sativa*) germplasm adapted to alpine environments. In this study, 48 oat germplasm lines were evaluated under different ecological conditions for agronomic traits, forage yield, nutritional quality, and photosynthetic physiological parameters. Genetic diversity and multi-trait performance were assessed using the Shannon-Wiener diversity index and the TOPSIS multi-criteria decision-making model. Results showed a high level of genetic diversity among the germplasm lines, with Shannon-Wiener indices ranging from 1.77 to 2.08. Structural equation modeling further revealed that genotype and plant height were the key

收稿日期: 2025-08-14; 改回日期: 2025-09-29

基金项目: 青海省科技特派员专项 (2025-NK-P22) 和现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-07) 资助。

作者简介: 张博鸿 (1999—), 男, 甘肃平凉人, 在读硕士。E-mail: zbhqhd@163.com

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

determinants of relative feed value (RFV), with standardized total effects of 0.506 and -0.617 , respectively. In terms of regional adaptability, the germplasm lines Qingyongjiu 178, 257, and 226 exhibited superior performance in Huangzhong District, while Qingyongjiu 486, 051, and 465 performed better in Guinan County. Notably, Qingyongjiu 160, 458, and 085 ranked highly in both locations, demonstrating broad adaptability. These elite germplasm resources identified in this study can be recommended as providing valuable genetic materials for the development of oat cultivars suitable for the Qinghai-Tibet Plateau and other alpine pastoral regions.

Key words: oat germplasm; ecological condition; genetic diversity; comprehensive evaluation; structural equation model

青藏高原等高寒牧区气候寒冷干燥,冷季漫长、暖季短,天然牧草初级生产力低、生长期短,冬天可供青刈利用的牧草较少,草畜矛盾突出^[1]。近年来,随着全球气候变暖、过度放牧以及草地管理水平有限等多重因素的影响,高寒地区草地退化日益加剧,草地生态系统稳定性下降,牧草产量不足且季节供应不均,严重制约畜牧业的可持续发展^[2]。因此,筛选适宜在高寒生态区人工种植的优质高产饲用作物品种,已成为保障牧草资源供给、促进生态修复与畜牧业可持续发展的重要途径。燕麦(*Avena sativa*)是禾本科燕麦属一年生粮饲兼用型作物,具有耐贫瘠、耐盐碱、抗旱、耐寒和适应性广等优良特性,在我国华北和西北农牧交错带广泛种植^[3];作为冬春季节牧草供应的补充和建植人工草地的重要牧草,发展饲用燕麦对于缓解草畜矛盾、改善草地生态具有重要的应用和生态价值^[4]。

因此,开展燕麦种质资源的遗传变异与综合适应性评价已成为实现高寒牧区饲草供给能力提升的关键环节。燕麦种质资源是开展遗传改良与品种选育的核心基础^[5],系统开展其遗传多样性与综合评价,有助于优异种质的鉴定与遗传育种材料的创制。近年来,燕麦种质资源研究主要聚焦于表型性状^[6]、品质性状^[7]、抗逆性^[8]及分子标记^[9]等方面。表型多样性研究通过多环境评价筛选出5份综合性状优良的种质资源^[10];饲用性状分析则围绕产量与营养品质筛选出适宜区域化推广的高产优质材料^[11]。耐盐碱性评价揭示了燕麦存在显著分化,并鉴定出与耐盐相关的关键基因 *AsWRKY*^[12];此外,简化基因组测序技术与分子标记水平的研究进一步揭示了种质间的遗传差异^[13]。上述成果为燕麦遗传改良和优异基因挖掘奠定了重要基础。然而,现有研究多聚焦于特定性状或单一环境条件,对高寒生态条件下燕麦光合生理参数的遗传多样性研究尚不明确,对光合生理参数与农艺性状、产量、品质性状的综合评价还未见报道。

基于此,本研究在不同的生态条件下,对48份燕麦种质资源的农艺性状、饲草产量、营养品质以及光合生理参数进行测定,采用Shannon-Wiener多样性指数和TOPSIS-多准则决策模型进行遗传多样性分析和综合评价,旨在筛选出适应性强、综合性状优异的种质,为高寒生态区新品种的选育提供理论依据和种质基础。并通过相关性分析揭示草产量、营养品质与农艺性状、光合生理参数之间的协同变化规律;进一步通过构建结构方程模型,探讨基因型、环境及其交互作用对燕麦相对饲喂价值的调控路径,并量化其直接与间接效应,为提升燕麦饲喂价值提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试燕麦材料共计48份,来自16个国家,由青海大学畜牧兽医科学院草原所提供。其中来自欧洲的材料较多,占68.75%,具体名称及来源信息详见表1。

1.2 试验地概况

试验于2024年在青海省湟中区土门关乡(101°41' E, 36°26' N, 海拔2650 m)和青海省贵南县塔秀乡(100°38' E, 35°09' N, 海拔3400 m)进行。两地均属于高原大陆性气候,气温低,昼夜温差大,土壤类型均为栗土。具体的土壤和气候条件如表2所示。

表 1 参试种质资源名称及来源

Table 1 Names and sources of the tested germplasm resources

编号 Code	种质资源 Germplasm resources	来源 Origin	编号 Code	种质资源 Germplasm resources	来源 Origin
1	青永久 471 Qingyongjiu 471	加拿大 Canada	25	青永久 023 Qingyongjiu 023	苏联 Soviet Union
2	青永久 465 Qingyongjiu 465	瑞典 Sweden	26	青永久 027 Qingyongjiu 027	苏联 Soviet Union
3	青永久 458 Qingyongjiu 458	瑞典 Sweden	27	青永久 062 Qingyongjiu 062	罗马尼亚 Romania
4	青永久 488 Qingyongjiu 488	法国 France	28	青永久 064 Qingyongjiu 064	苏联 Soviet Union
5	青永久 085 Qingyongjiu 085	瑞士 Switzerland	29	青永久 097 Qingyongjiu 097	瑞典 Sweden
6	青永久 084 Qingyongjiu 084	德国 Germany	30	青永久 160 Qingyongjiu 160	丹麦 Denmark
7	张燕 1 号 Zhangyan 1	中国 China	31	青永久 479 Qingyongjiu 479	罗马尼亚 Romania
8	西藏白郎 Xizangbailang	中国 China	32	青永久 480 Qingyongjiu 480	维多利亚 Victoria
9	青永久 045 Qingyongjiu 045	加拿大 Canada	33	青永久 486 Qingyongjiu 486	瑞典 Sweden
10	青永久 051 Qingyongjiu 051	德国 Germany	34	青永久 482 Qingyongjiu 482	澳大利亚 Australia
11	青永久 080 Qingyongjiu 080	匈牙利 Hungary	35	青永久 092 Qingyongjiu 092	匈牙利 Hungary
12	青永久 083 Qingyongjiu 083	德国 Germany	36	青永久 090 Qingyongjiu 090	瑞士 Switzerland
13	青永久 257 Qingyongjiu 257	丹麦 Denmark	37	青永久 061 Qingyongjiu 061	罗马尼亚 Romania
14	青永久 326 Qingyongjiu 326	丹麦 Denmark	38	青永久 060 Qingyongjiu 060	保加利亚 Bulgaria
15	青永久 476 Qingyongjiu 476	日本 Japan	39	青燕 5 号 Qingyan 5	中国 China
16	青永久 475 Qingyongjiu 475	荷兰 Netherlands	40	蒙古燕麦 Menggu oat	中国 China
17	青永久 477 Qingyongjiu 477	日本 Japan	41	巴燕 5 号 Bayan 5	中国 China
18	青永久 478 Qingyongjiu 478	日本 Japan	42	高寒 7 号 Gaohan 7	中国 China
19	青永久 226 Qingyongjiu 226	丹麦 Denmark	43	青永久 052 Qingyongjiu 052	匈牙利 Hungary
20	青永久 178 Qingyongjiu 178	丹麦 Denmark	44	青永久 055 Qingyongjiu 055	罗马尼亚 Romania
21	青永久 073 Qingyongjiu 073	匈牙利 Hungary	45	青永久 057 Qingyongjiu 057	蒙古 Mongolia
22	青永久 066 Qingyongjiu 066	匈牙利 Hungary	46	青永久 059 Qingyongjiu 059	保加利亚 Bulgaria
23	青永久 037 Qingyongjiu 037	加拿大 Canada	47	青永久 489 Qingyongjiu 489	法国 France
24	青永久 029 Qingyongjiu 029	加拿大 Canada	48	青永久 089 Qingyongjiu 089	苏联 Soviet Union

表 2 试验地土壤与气候属性

Table 2 Soil and climatic properties of the experimental site

试验地 Experimental site	年平均气温 Mean annual temperature (°C)	年平均降水量 Mean annual precipitation (mm)	年蒸发量 Annual evaporation (mm)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)
湟中 Huangzhong	5.5	483	1180	34.2	2.21	0.87	23.46	119	19	260.00
贵南 Guinan	2.3	404	1379	37.1	2.46	0.60	21.46	137	9	114.67

1.3 试验设计

参照当地燕麦生产常规施肥量,两个试验点均播前一次性施基肥(75 kg·hm⁻²尿素和 150 kg·hm⁻²磷酸二铵),全生育期末追肥。湟中试验地于 2024 年 4 月 25 日播种,贵南试验地于 2024 年 6 月 14 日播种。试验采用随机区组设计,3 次重复,每份种质资源种植 12 行,行长 5 m,行距 25 cm,小区面积 15 m²,播深 3~4 cm,播种方式为条播,播种量为 225 kg·hm⁻²,保护行为‘青燕 3 号’。其他栽培管理参照燕麦高产栽培技术^[14]实行。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 农艺性状测定 每份种质资源在3个重复中各选取5株长势良好且无病虫害的代表性植株,共计15株。株高与茎粗测定严格遵循《燕麦种质资源描述规范和数据标准》^[15]。另取相同植株旗叶,采用LI-3000C型叶面积扫描仪(LI-COR,美国)测定叶面积。

1.4.2 草产量测定 为避免边际效应,剔除边行及地头两侧50 cm后,于乳熟期在各小区内随机选取长势均匀、无病虫害的区域,齐地刈割1 m×1 m样方植株,立即称重记录鲜草产量。样品经105℃烘箱杀青30 min,再于65℃烘干至恒重后,记录干草产量。每份种质资源共测定3个小区。

1.4.3 营养品质测定 将烘干样品粉碎过1 mm筛孔,采用DS2500型近红外光谱仪(FOSS,丹麦)测定:粗灰分(crude ash, Ash)、粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(ether extract, EE)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)及酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量。每份种质资源的最终结果为3个重复小区测定值的平均值。相对饲喂价值(relative feeding value, RFV)^[16]计算公式如下:

$$RFV = \frac{DMI(\%) \times DDM(\%)}{1.29}$$

$$DMI = \frac{120}{NDF(\%)}$$

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

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

1.4.4 光合参数测定 分别于2024年8月上旬(湟中)和2024年9月下旬(贵南)进行光合参数测定。在晴朗天气的上午10:00—11:30,各小区选取3株长势一致、无明显病虫害的植株,测定其充分展开的旗叶。采用LI-6800型便携式光合仪(LI-COR,美国),记录净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)、胞间CO₂浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i)和蒸腾速率(transpiration rate, T_r)等光合气体交换参数。测定时在红蓝光源叶室、光强1800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、开放式气路条件下进行,待读数稳定后记录数据,每株重复测定3次。在此基础上,进一步计算叶片固有水分利用效率(intrinsic water use efficiency, $WUE_{\text{intr}} = A/G_s$)、瞬时水分利用效率(instantaneous water use efficiency, $WUE_{\text{inst}} = A/E$)和瞬时羧化效率(instantaneous carboxylation efficiency, $CE = A/C_i$)^[17]。

1.5 遗传多样性分析

基于群体内各性状数据,以平均值(X)和标准差(δ)划分为10个等级,第1等级 $<X-2\delta$,第10等级 $\geq X+2\delta$,中间各等级相差0.5 δ 。进而计算每一等级的分布频率,记为 $P_i = n_i/n$, n_i 表示第*i*级包含的个体数, n 为供试材料总数。基于群体内各性状数据,采用遗传多样性信息指数(Shannon-Wiener diversity index, H')对各性状的遗传变异水平进行评价。公式为 $H' = -\sum P_i \ln P_i$,其中 P_i 为某性状第*i*种变异出现的频率^[18]。

1.6 数据统计分析

数据整理与初步统计分析在Microsoft Excel 2019中完成,多样性统计分析 with 交互效应分析在SPSS 27.0中进行。基于R 4.4.2,依次进行:Pearson相关性分析与Mantel检验(dplyr, linkET与ggplot2)、K均值聚类分析(factoextra)、TOPSIS多准则决策模型构建(dplyr)、GEE双标图构建(GGEBiplots)、随机森林变量筛选(random forest);进一步通过PiecwiseSEM数据包构建分段结构方程模型。标准化效应值则采用Origin 2024绘制。

2 结果与分析

2.1 各性状的遗传多样性分析

48份燕麦种质在农艺性状、营养品质和光合气体交换参数等方面表现出明显的变异特征及丰富的遗传多样性(表3)。不同种质间的变异系数为7.29%~55.30%,其中蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)以及瞬时水分利用效率(WUE_{inst})3个参数的变异系数较大,均超过50%;而酸性洗涤纤维(ADF)和中性洗涤纤维(NDF)的变异系数相对较小,分别为9.67%和7.29%。对17个关键性状的Shannon-Wiener指数(H')分析发现,茎粗、叶面积、净光合

速率较高,分别为 2.08、2.07、2.07。 H' 整体为 1.77~2.08,反映了参试种质各性状的遗传多样性丰富,为后续亲本筛选和性状改良提供了丰富的遗传基础。

表 3 48 份燕麦种质资源多样性统计分析
Table 3 Genetic diversity statistics of 48 oat germplasm resources

性状 Trait	平均值±标准差 Mean±standard deviation (SD)	变幅 Range	变异系数 Coefficient of variation (CV, %)	多样性指数 Shannon-Wiener index (H')
株高 Plant height (PH, cm)	147.88±24.42	62.00~195.00	16.51	1.91
茎粗 Stem diameter (SD, mm)	4.83±1.02	2.35~7.00	21.06	2.08
叶面积 Leaf area (LA, cm ²)	27.18±8.93	7.00~48.15	32.86	2.07
鲜重 Fresh weight (FW, kg·hm ⁻²)	29185.69±11514.59	9960.00~62400.00	39.45	1.97
干重 Dry weight (DW, kg·hm ⁻²)	10058.53±3224.10	4765.50~19561.60	32.05	1.95
粗灰分 Crude ash (Ash, %DM)	7.06±1.53	4.33~11.50	21.70	2.04
粗蛋白 Crude protein (CP, %DM)	7.78±1.29	5.15~13.90	16.65	1.99
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %DM)	40.92±3.96	28.00~49.50	9.67	2.02
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %DM)	62.07±4.52	48.00~73.00	7.29	2.01
相对饲喂价值 Relative feed value (RFV)	66.89±8.96	50.07~100.79	13.40	1.94
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	14.04±4.07	4.44~28.92	28.98	2.07
蒸腾速率 Transpiration rate (T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.90±3.05	0.81~14.93	51.68	2.04
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration (C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	249.69±49.75	62.70~338.09	19.93	1.97
气孔导度 Stomatal conductance (G_s , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.22±0.12	0.04~0.67	55.30	1.91
叶片固有水分利用效率 Intrinsic water use efficiency (WUE_{int} , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	77.57±33.00	23.43~202.06	42.54	1.94
瞬时水分利用效率 Instantaneous water use efficiency (WUE_{inst} , $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	3.00±1.62	0.97~10.52	54.03	1.77
瞬时羧化效率 Instantaneous carboxylation efficiency (CE, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.06±0.02	0.01~0.20	37.23	1.92

2.2 基因型与环境的互作效应分析

各性状受环境因素(environment, E)、基因型(genotype, G)的影响均达极显著($P<0.001$)水平,且各性状的基因型与环境($G\times E$)间存在极显著的互作效应(表 4)。

2.3 相关性分析

将光合参数、农艺性状、草产量和营养品质等相关指标进行 Pearson 相关性分析和 Mantel 检验(图 1)。Pearson 相关性分析结果发现,株高、茎粗、叶面积三者间均呈显著正相关($r>0.5$, $P<0.05$);净光合速率与气孔导度、蒸腾速率、瞬时羧化效率间呈显著正相关;叶片固有水分利用效率与气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度间呈负相关。Mantel 检验进一步明确了各性状与草产量、营养品质之间的相关性。草产量与形态性状(株高、茎粗、叶面积)及光合生理参数(胞间 CO₂ 浓度、叶片固有水分利用效率、瞬时水分利用效率、瞬时羧化效率)之间均呈显著正相关($P<0.05$),提示这些性状是草产量形成的关键决定因素。营养品质与形态性状(株高、叶面积)及光合生理参数(净光合速率、瞬时羧化效率)间呈显著正相关($P<0.05$),揭示这些性状是优化饲草品质的关键表型性状和生理性状。

2.4 各性状在不同环境中的变异

不同的生态环境条件下,燕麦种质在农艺性状、品质性状以及光合生理特征等方面均表现出较大的差异(表 5)。净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、瞬时水分利用效率、瞬时羧化效率等光合生理参数在海拔

表 4 基因型与环境的互作效应分析

Table 4 Analysis of the interaction effects between genotype and environment

性状 Trait	变异来源 Variance sources	F	P	性状 Trait	变异来源 Variance sources	F	P
株高 Plant height (PH)	基因型 Genotype (G)	290.87	0.00	相对饲喂价值 Relative feed value (RFV)	基因型 Genotype (G)	33.59	0.00
	环境 Environment (E)	1211.13	0.00		环境 Environment (E)	54.73	0.00
	基因型×环境 G×E	81.72	0.00		基因型×环境 G×E	14.93	0.00
茎粗 Stem diameter (SD)	基因型 Genotype (G)	293.61	0.00	净光合速率 Net photosynthetic rate (A)	基因型 Genotype (G)	4.78	0.00
	环境 Environment (E)	18786.96	0.00		环境 Environment (E)	12.56	0.00
	基因型×环境 G×E	132.80	0.00		基因型×环境 G×E	4.57	0.00
叶面积 Leaf area (LA)	基因型 Genotype (G)	25.89	0.00	蒸腾速率 Transpiration rate (E)	基因型 Genotype (G)	5.24	0.00
	环境 Environment (E)	896.05	0.00		环境 Environment (E)	511.26	0.00
	基因型×环境 G×E	18.01	0.00		基因型×环境 G×E	6.48	0.00
鲜重 Fresh weight (FW)	基因型 Genotype (G)	345.16	0.00	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration (C _i)	基因型 Genotype (G)	3.76	0.00
	环境 Environment (E)	4593.52	0.00		环境 Environment (E)	93.20	0.00
	基因型×环境 G×E	333.99	0.00		基因型×环境 G×E	3.55	0.00
干重 Dry weight (DW)	基因型 Genotype (G)	154.38	0.00	气孔导度 Stomatal conductance (G _s)	基因型 Genotype (G)	5.27	0.00
	环境 Environment (E)	5997.95	0.00		环境 Environment (E)	192.88	0.00
	基因型×环境 G×E	192.60	0.00		基因型×环境 G×E	5.23	0.00
粗灰分 Crude ash (Ash)	基因型 Genotype (G)	125.49	0.00	叶片固有水分利用效率 Intrinsic water use efficiency (WUE _{int})	基因型 Genotype (G)	3.51	0.00
	环境 Environment (E)	2685.67	0.00		环境 Environment (E)	181.19	0.00
	基因型×环境 G×E	208.94	0.00		基因型×环境 G×E	3.72	0.00
粗蛋白 Crude protein (CP)	基因型 Genotype (G)	118.25	0.00	瞬时水分利用效率 Instantaneous water use efficiency (WUE _{inst})	基因型 Genotype (G)	4.78	0.00
	环境 Environment (E)	335.79	0.00		环境 Environment (E)	378.52	0.00
	基因型×环境 G×E	145.51	0.00		基因型×环境 G×E	4.95	0.00
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF)	基因型 Genotype (G)	26.96	0.00	瞬时羧化效率 Instantaneous carboxylation efficiency (CE)	基因型 Genotype (G)	3.09	0.00
	环境 Environment (E)	61.85	0.00		环境 Environment (E)	13.11	0.00
	基因型×环境 G×E	14.37	0.00		基因型×环境 G×E	2.56	0.00
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF)	基因型 Genotype (G)	29.92	0.00				
	环境 Environment (E)	25.61	0.00				
	基因型×环境 G×E	13.35	0.00				

更高、光照更强的贵南县环境中表现出较高的变异系数。株高、茎粗、叶面积、鲜重、干重等在湟中区表现出较高的变异系数。不同环境中变异系数差异较大的性状有叶面积、蒸腾速率、瞬时羧化效率,说明这3个性状受环境因素的影响较大。

2.5 不同环境中的聚类分析

基于17个关键性状的K均值聚类分析,将48份燕麦种质划分为3个类群。在湟中区(图2a),类群I(13份,占27.08%),其农艺性状与产量表现优良,营养品质较差,光合参数表现中等,为高产型资源;类群II(12份,占25.00%),其光合参数表现较优,农艺性状、产量及营养品质表现中等,呈现出较强的光合生理潜质;类群III(23份,占47.92%),其营养品质较优,但农艺性状、产量及光合参数表现较差。在贵南县(图2b),类群I(18份,占37.50%),其草产量较优,其余性状(农艺性状、营养品质、光合参数)表现中等,为高产型资源;类群II(11份,占22.92%),其营养品质较优,但农艺性状、产量及光合参数表现较差;类群III(19份,占39.58%),其农艺性状表现优良,产量中等,营养品质较差,光合参数表现较优,呈现出较强的表型和光合生理潜质。

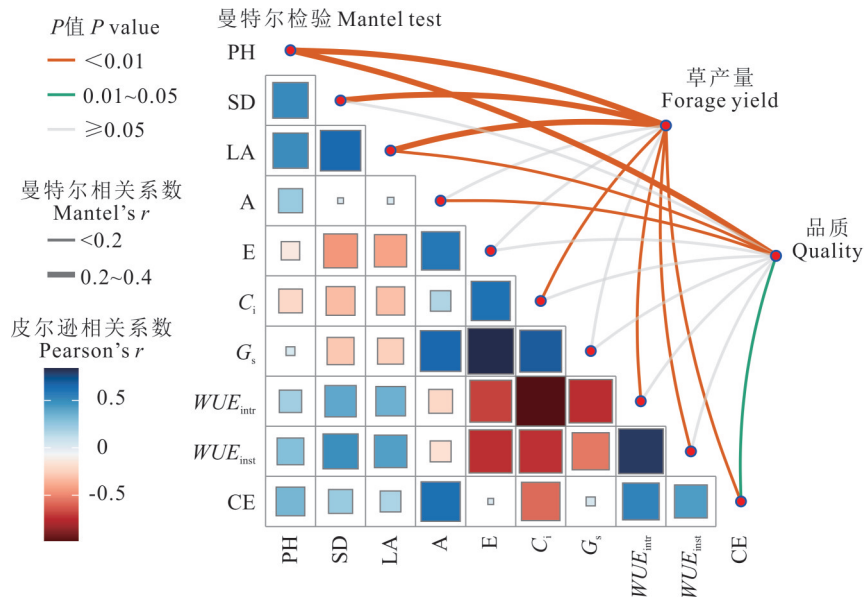


图 1 草产量、营养品质与农艺性状、光合参数间的相关性

Fig. 1 Correlation among forage yield, nutritional quality, agronomic traits, and photosynthetic parameters

PH: 株高 Plant height; SD: 茎粗 Stem diameter; LA: 叶面积 Leaf area; A: 净光合速率 Net photosynthetic rate; E: 蒸腾速率 Transpiration rate; C_i : 胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration; G_s : 气孔导度 Stomatal conductance; WUE_{intr} : 叶片固有水分利用效率 Intrinsic water use efficiency; WUE_{inst} : 瞬时水分利用效率 Instantaneous water use efficiency; CE: 瞬时羧化效率 Instantaneous carboxylation efficiency. 下同 The same below.

表 5 各性状在不同环境中的变异

Table 5 Trait variation across different environments

性状 Trait	贵南 Guinan		湟中 Huangzhong	
	平均值±标准差 Mean±standard deviation (SD)	变异系数 Coefficient of variation (CV, %)	平均值±标准差 Mean±standard deviation (SD)	变异系数 Coefficient of variation (CV, %)
PH (cm)	154.05±19.19	12.46	141.71±27.42	19.35
SD (mm)	5.53±0.77	13.87	4.12±0.70	16.92
LA (cm ²)	31.94±7.06	22.11	22.43±8.05	35.88
FW (kg·hm ⁻²)	33252.00±11314.29	34.03	25119.38±10236.44	40.75
DW (kg·hm ⁻²)	11720.34±3100.47	26.45	8396.72±2384.87	28.40
Ash (%DM)	6.48±1.10	16.97	7.64±1.68	21.98
CP (%DM)	7.99±1.36	17.01	7.57±1.20	15.81
ADF (%DM)	40.26±4.12	10.23	41.59±3.68	8.86
NDF (%DM)	61.59±5.15	8.36	62.55±3.75	5.99
RFV	68.20±10.17	14.92	65.57±7.36	11.23
P_n (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	13.47±4.29	31.81	14.61±3.77	25.80
T_r (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	3.96±1.93	48.78	7.85±2.71	34.51
C_i (μmol·mol ⁻¹)	230.56±53.11	23.03	268.81±37.56	13.97
G_s (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	0.16±0.08	50.56	0.28±0.13	46.23
WUE_{intr} (μmol·mol ⁻¹)	94.18±33.40	35.46	60.96±22.68	37.21
WUE_{inst} (μmol·mmol ⁻¹)	3.98±1.69	42.47	2.02±0.69	33.99
CE (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	0.06±0.03	42.58	0.06±0.02	27.36

湟中区表现最优的是类群 I ,产量和农艺性状优势突出;而贵南县综合表现最优的是类群 III ,在农艺性状和光合参数上具备明显的优势。两地优势类群的差异揭示了环境因素对燕麦种质的适应性具有重要影响。

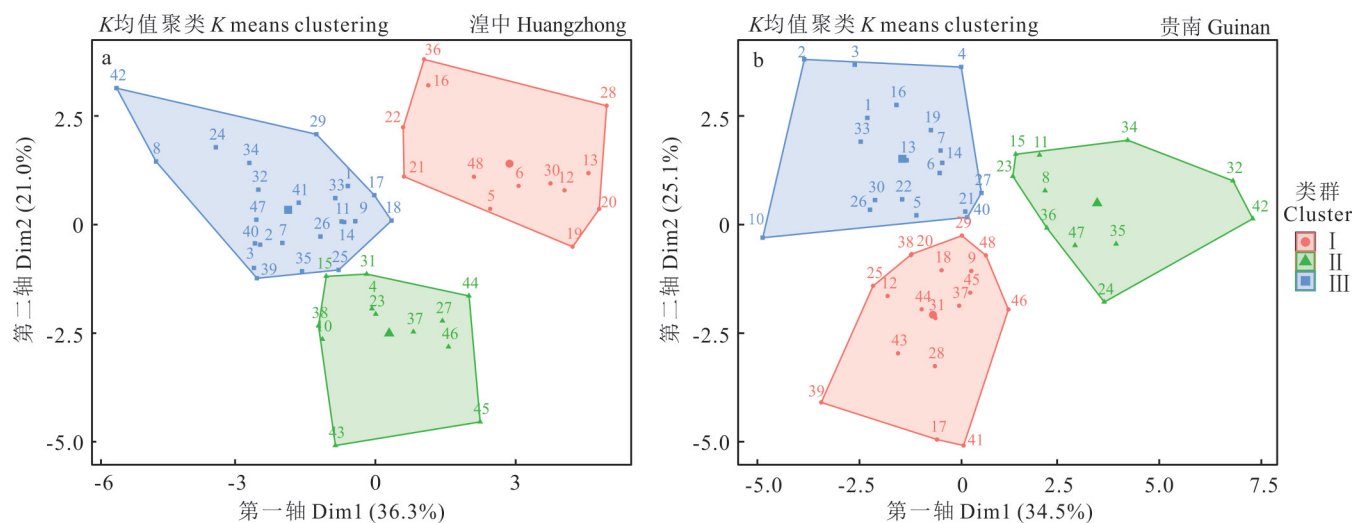


图2 48份燕麦种质聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of 48 oat germplasm

编号1~48分别代表48份燕麦种质,具体同表1。图a和b分别对应湟中区 and 贵南县,不同颜色区域表示不同的类群。Code 1-48 respectively represent 48 oat germplasms, as detailed in Table 1. Figures a and b represent Huangzhong and Guinan, respectively, with different colors denoting distinct clusters. 下同 The same below.

2.6 燕麦种质资源的综合评价

为进一步筛选出优良的燕麦种质资源,采用TOPSIS模型对48份燕麦种质的农艺性状、光合参数、饲用品质及草产量进行综合评价(图3)。在湟中区(图3a),青永久178、青永久257、青永久226、青永久064、青永久083和青永久160等材料的相对贴合度(closeness coefficient, CI)值较高,表现出较强的综合适应性;而在贵南县(图3b),青永久486、青永久051、青永久465、青永久027、青永久458和青永久160等材料的表现较为优异;这表明燕麦种质对海拔、气候条件等生态因子存在响应差异。然而,部分种质展现出跨地域的优良特性,青永久160、青永久458、青永久052、青永久475、青永久055、青永久085等材料在两地均进入前15,表现出较强的适应广度,为选育高产优质且适应性强的燕麦新品种奠定了重要基础。

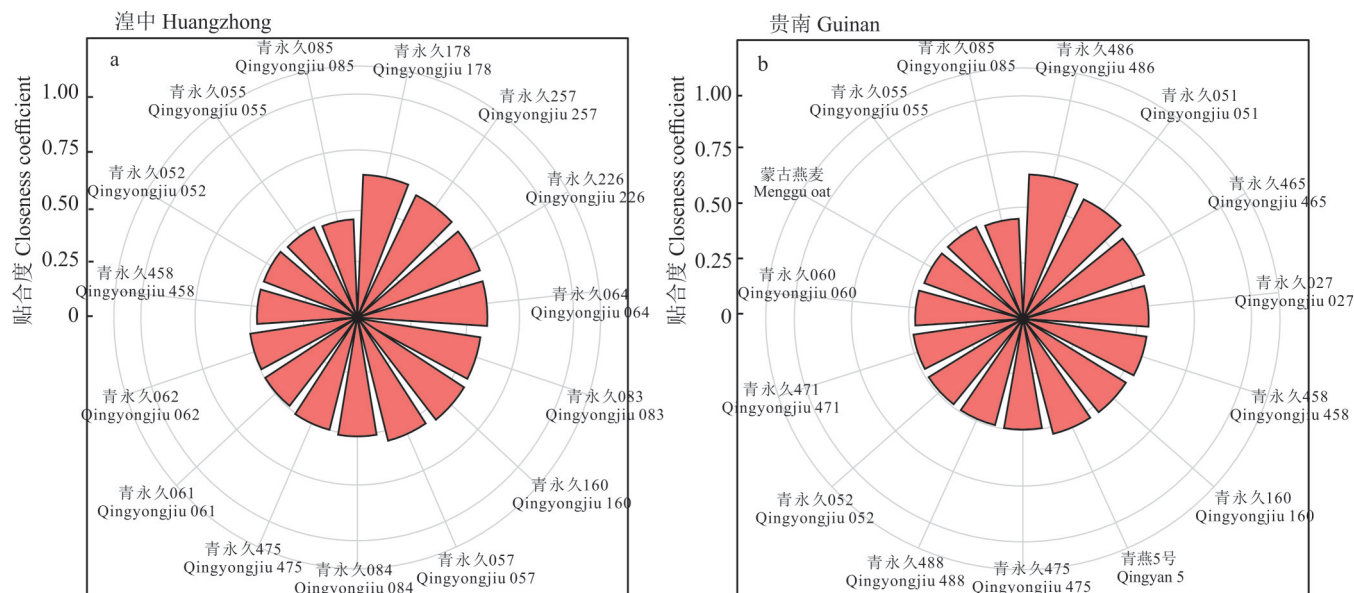


图3 两地前15燕麦种质TOPSIS综合表现

Fig. 3 TOPSIS-based comprehensive evaluation of top 15 oat germplasms in two locations

2.7 燕麦种质资源干草产量的适应性评价

双标图可以有效识别在不同环境条件下具有良好适应性的种质材料(图4)。双标图被划分为若干个多边形区域,当某一试验点落入特定区域时,该区域顶角所对应的种质材料即为干草产量表现最优的材料^[19]。湟中区(Huangzhong, HZ)所在区域的顶角材料为编号12和13;贵南县(Guinan, GN)所在区域的顶角材料为编号26、43和38,说明这些种质在当地具有较高的干草产量。然而,其他多边形区域内未出现试验点分布,综合模型推断,顶角编号42、34和47在两地的适应性可能相对较差。

2.8 燕麦饲喂价值影响因素及作用路径解析

为明确燕麦种质农艺性状和光合参数对相对饲喂价值(RFV)的影响,采用随机森林模型对多个关键性状进行重要性排序。结果表明(图5),株高、鲜重、茎粗、干重、瞬时羧化效率和蒸腾速率对RFV有极显著影响($P<0.01$),叶面积、瞬时水分利用效率与净光合速率对RFV的影响也达到显著水平($P<0.05$),表明这些因子在决定燕麦饲用品质方面具有重要作用。基于随机森林模型结果,选取具有极显著影响的因子,进一步构建结构方程模型以深入解析其影响路径(图6)。该模型拟合效果良好($P=0.5$, Fisher's $C=5.349$),其结果显示,基因型(G)及其与环境互作($G\times E$)对RFV均具有显著的直接影响,其中 $G\times E$ 的路径系数最大,为 -0.417 。同时,基因型、环境及其互作还通过影响中间变量(株高、鲜重、茎粗、干重、瞬时羧化效率、蒸腾速率)间接影响RFV。株高、茎粗、草产量对RFV有直接影响,其路径系数分别为 -0.513 、 0.257 、 -0.367 ,株高和草产量对RFV呈负向作用,说明在一定范围内,植株生长过高或干物质积累过多可能导致饲用品质下降。综合直接效应与间接效应,基因型和株高对RFV的总效应较大,分别为 0.506 和 -0.617 ,显示了其在影响燕麦RFV中的关键调控地位。

3 讨论

3.1 燕麦种质各性状的遗传多样性评价

种质资源作为作物遗传改良与新品种选育的核心基础^[5],其蕴含的遗传多样性为优异基因挖掘、关键性状解析提供了重要支撑。种质资源的多样性受基因型、环境及其互作的共同影响,系统开展关键性状多样性评价,不仅有助于识别育种潜力材料,也可为

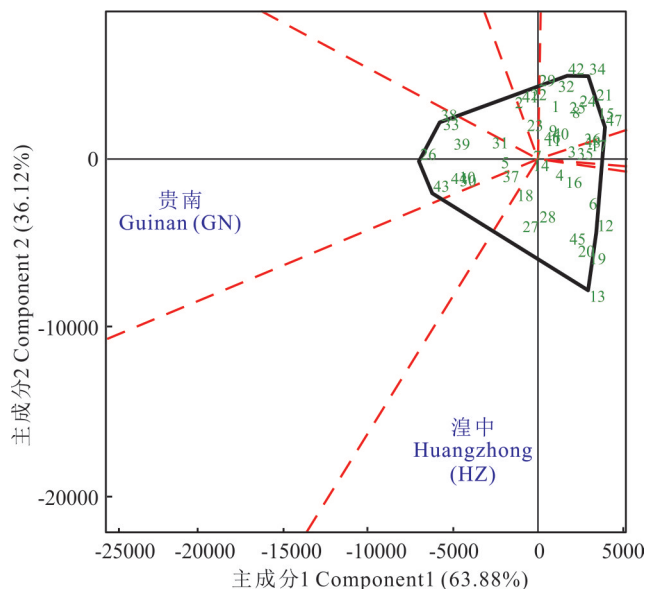


图4 燕麦种质资源干草产量的适应性分析

Fig. 4 Adaptability analysis of hay yield in oat germplasm resources

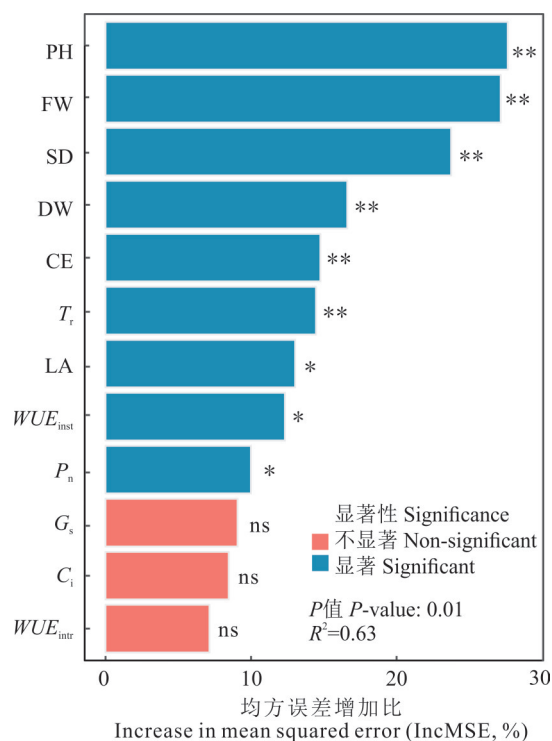


图5 相对饲喂价值与农艺性状、光合参数的随机森林模型

Fig. 5 Random forest model linking relative feed value (RFV) to agronomic traits and photosynthetic parameters

均方误差的百分比增加代表了主要预测因子的重要性。*表示在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异显著,ns代表无显著性差异,下同。The percentage increase in mean squared error (MSE) represents the importance of predictive variables. *: $P<0.05$, **: $P<0.01$, ns indicates no significant difference. The same below.

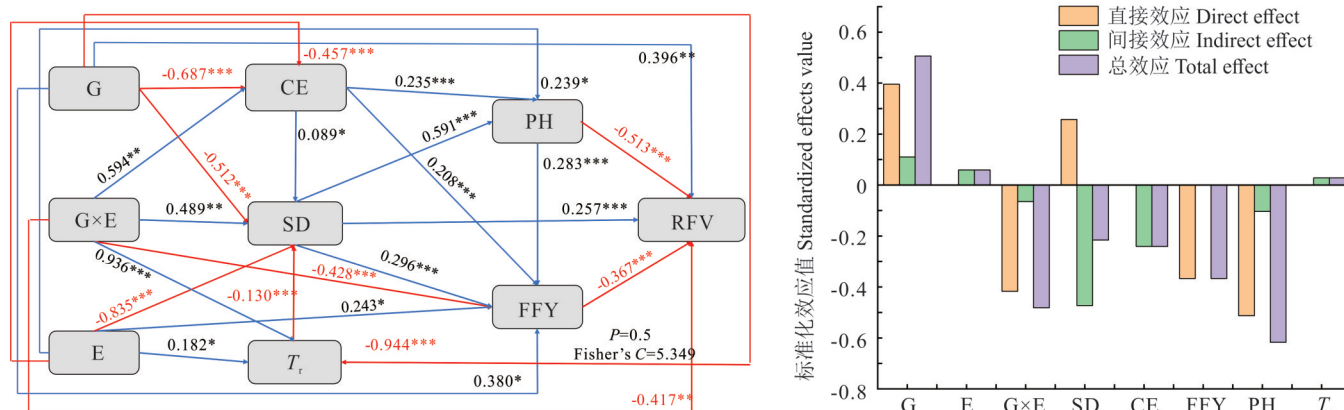


图6 结构方程模型分析基因型与环境对燕麦相对饲喂价值的影响路径及各变量标准化效应值

Fig. 6 Structural equation modeling of the pathways and standardized effects of genotype and environment on relative feed value (RFV) in oat

G: 基因型 Genotype; E: 环境 Environment; G×E: 基因型×环境 Genotype×environment; CE: 瞬时羧化效率 Instantaneous carboxylation efficiency; SD: 茎粗 Stem diameter; T_r : 蒸腾速率 Transpiration rate; FFY: 鲜草产量 Fresh forage yield; RFV: 相对饲喂价值 Relative feed value. 图中蓝色箭头和红色箭头分别表示变量之间显著的正向和负向路径, 数值为标准化路径系数。***表示在 0.001 水平上差异显著。Blue arrows denote significant positive paths, red arrows denote significant negative paths. Values indicate standardized path coefficients value. ***: $P < 0.001$.

种质资源的科学利用与生态适应性改良奠定理论基础^[20-21]。本研究基于遗传多样性信息指数 (Shannon-Wiener diversity index, H') 对 48 份燕麦种质的 17 个关键性状进行分析, H' 为 1.77~2.08, 显示供试材料遗传多样性丰富, 具有良好的选育潜力。类似地, 在春小麦 (*Triticum aestivum*) 光合生理参数的遗传多样性研究中, H' 为 1.81~2.03, 本研究结果与其较为一致^[22]。变异系数 (coefficient of variation, CV) 用于衡量种质间性状的变异幅度, 其值越大, 说明该性状在育种中具有更大的选择潜力^[23]。本研究中供试材料各性状的变异系数为 7.29%~55.30%, 其中蒸腾速率 (E)、气孔导度 (G_s) 以及瞬时水分利用效率 (WUE_{inst}) 3 个光合生理参数的变异系数均超过 50%, 反映出较大的遗传改良空间。相比之下, 关于马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 叶片光合性状的研究报道中其变异系数为 8.42%~25.21%^[24], 低于本研究观测值。对谷子 (*Setaria italica*) 光合及叶片形态性状的研究中, 其变异系数为 3.41%~33.94%, 并通过聚类分析筛选出 8 份高光效种质, 为高光效育种提供了材料基础^[25]。本研究变异系数较高, 可能与材料来源广泛、性状的环境敏感性较强以及光合生理参数本身变异度较大有关。此外, 对野生型和栽培型燕麦灌浆期光合特性的比较研究中发现, 野生型材料的变异系数高于栽培型, 为 12.8%~79.2%; 说明光合性状的遗传变异不仅受作物遗传背景影响, 也受到生态环境和群体结构等多重因素的共同作用^[26]。

进一步对 17 个关键性状在湟中区和贵南县两地间的变异特征进行分析, 燕麦种质在农艺性状、品质性状以及光合生理特征等方面均表现出较大的差异; 尤其是叶面积、蒸腾速率和瞬时羧化效率在不同生态条件表现出较强的环境敏感性。这一现象反映出光合相关性状对外界因子高度敏感, 不同基因型种质对光热资源的利用效率存在差异。综合各项指标, 贵南县在农艺性状、草产量及光合参数等方面整体优于湟中区, 推测这可能是高海拔条件下光照充足、辐射强、昼夜温差大的生态环境, 有利于提高光合作用效率与干物质积累能力, 从而提升了燕麦的产量。该推测印证了燕麦适宜在高海拔冷凉地区进行饲草生产的结论^[27], 与梁国玲等^[28]在海晏、湟中、民和三地开展的区域比较研究结果相似。

3.2 燕麦种质综合评价

在作物种质资源研究中, 综合性状评价是种质资源鉴定与优异材料筛选的重要途径, 近年来已广泛应用于小麦^[29]、青稞 (*Hordeum vulgare* var. *coeleste*)^[30]、水稻 (*Oryza sativa*)^[31] 等作物的种质筛选和遗传改良中。其中, TOPSIS-多准则决策模型能够有效整合多种指标, 通过构建最优与最劣方案的距离函数, 以相对贴近度为依据进行排序, 对种质资源综合表现进行全面评估^[32]。在燕麦品种综合评价中, 该模型已展现出较强的适用性。以环青

海湖地区的连续两年试验为例,基于农艺和品质性状的综合分析,青燕4号和青燕3号表现突出,具有在该生态区推广的潜力^[33]。本研究利用TOPSIS模型对48份燕麦种质在湟中区和贵南县的综合表现进行了系统评价,湟中区优势材料主要是青永久178、257和226,其特征为株型优良、茎秆粗壮、光合效率较高且相对饲喂价值适中,相比之下,贵南县优势材料则为青永久486、051和465,草产量和光合效率更突出,虽然营养品质相对一般,但整体生物量积累能力较强,在高寒生态条件下展现出更佳的生产潜力。两地种质表现差异可能与气候和生态条件密切相关:贵南县海拔较高,气候寒冷干燥,生育期短,燕麦难以完成完整的生育周期;而湟中区气候相对温和,更有利于多性状的协调表达与稳定遗传。这一结果与高海拔地区(如海拔4200 m的三江源地区)燕麦适应性评价的研究结论一致,即在该类生态条件下参试品种普遍无法实现籽粒成熟^[34]。值得注意的是,青永久160、458、052、475、055和085在两地表现均位居前列,说明其遗传稳定性高,对环境适应力强。这些种质不仅能耐受高原特有的强辐射、低氧与大昼夜温差,还保持了优良的产量与品质性状,可作为选育广适性品种的优异亲本。干草产量是评估燕麦种质环境适应性和生产性能的重要指标^[35]。为量化不同种质在该性状上的适应性差异^[36],本研究采用GGE双标图对多环境试验数据进行解析,发现青永久083、257在湟中区表现出较高的干草产量;青永久027、052和060在贵南县表现较优,反映出种质在不同生态条件下的适应性差异。该方法在马铃薯干旱半干旱区引种试验中亦得到有效验证^[37],显示其在多环境适应性评价和优良基因型筛选中的广泛适用性。

此外,相对饲喂价值(RFV)作为衡量牧草饲用潜力的关键指标,从纤维含量、干物质消化率与营养供给水平等方面综合反映牧草的营养价值,广泛应用于牧草品质分级体系中^[38]。本研究中,RFV为50.07~100.79,略低于已有对190份燕麦种质RFV(85.91~121.49)的报道^[39],这一差异可能由样品取样时期、种质来源及生态环境差异等多因素所致。结构方程模型揭示,基因型(G)及其与环境互作($G \times E$)对燕麦相对饲喂价值(RFV)均具有显著的直接效应,其中 $G \times E$ 互作效应更为突出。此外,基因型、环境及其互作还主要通过株高、草产量和瞬时羧化效率等关键指标影响燕麦的RFV;可见,RFV的形成受多路径、多因子的协同调控,农艺性状与光合效率参数在其中发挥重要的作用。因此,在选育适应性强、品质优良的燕麦品种过程中,应侧重于其在不同生态条件下关键性状的稳定性表现,提升其在实际生产中的应用价值。

4 结论

基于Shannon-Wiener多样性指数、聚类分析、TOPSIS模型、GGE双标图及结构方程模型等统计方法,系统评估了48份燕麦种质在不同生态条件下的遗传多样性与综合表现。主要结论如下:

1)供试材料遗传多样性丰富, H' 为1.77~2.08,具备良好的遗传潜力。

2)结构方程模型揭示基因型和株高是影响相对饲喂价值(RFV)的关键因子,总效应值分别为0.506和-0.617。

3)通过TOPSIS模型共筛选出9份核心种质;青永久178、257和226在湟中区表现优良;青永久486、051和465在贵南县综合性状突出;而青永久160、458和085则表现出较强的适应广度。这些材料可为青藏高原等高寒牧区培育优异燕麦品种提供重要种质。

参考文献 References:

- [1] Li X M, Peng Y L, Yue J. Ecological management of degraded alpine pasture areas under the development of the tourism industry. *Pratacultural Science*, 2019, 36(5): 1435—1444.
李祥妹, 彭元柳, 岳洁. 旅游产业发展背景下高寒牧区退化草地生态治理途径. *草业科学*, 2019, 36(5): 1435—1444.
- [2] Wang Y X, Zheng Q Y, Yan Z L, *et al.* Institutional transition of grassland property rights and its impact on animal husbandry under the background of climate changes—A case study from eastern Qinghai—Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10): 1687—1694.
王彦星, 郑群英, 晏兆莉, 等. 气候变化背景下草原产权制度变迁对畜牧业的影响—以青藏高原东缘牧区为例. *草业科学*, 2015, 32(10): 1687—1694.
- [3] Zhang B, Ren C Z. Advances in oat genomic research and molecular breeding. *Chinese Bulletin of Botany*, 2022, 57(6):

785—791.

张波, 任长忠. 燕麦基因组学与分子育种研究进展. 植物学报, 2022, 57(6): 785—791.

- [4] 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.
- [5] Leiová-Svobodová L, Michel S, Tamm I, *et al.* Diversity and pre-breeding prospects for local adaptation in oat genetic resources. *Sustainability*, 2019, 11(24): 6950.
- [6] Boczkowska M, Zebrowski J, Nowosielski J, *et al.* Environmentally-related genotypic, phenotypic and metabolic diversity of oat (*Avena sativa*) landraces based on 67 Polish accessions. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2017, 64(8): 1829—1840.
- [7] Jiang H X, Bai S S, Wu B, *et al.* A multivariate evaluation of agronomic traits and forage quality of 22 oat varieties in the Huang-Huai-Hai area of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 140—149.
- 姜慧新, 柏杉杉, 吴波, 等. 22个燕麦品种在黄淮海地区的农艺性状与饲草品质综合评价. 草业学报, 2021, 30(1): 140—149.
- [8] Francisco J C C, Rispail N, Omar G T, *et al.* Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 182(5): 104333.
- [9] Han L, Tang S S, Li J, *et al.* Construction of SNP high-density genetic map and localization of QTL for β -glucan content in oats. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(7): 1710—1718.
- 韩丽, 汤胜胜, 李佳, 等. 燕麦SNP高密度遗传图谱构建及 β -葡聚糖含量QTL定位. 作物学报, 2024, 50(7): 1710—1718.
- [10] Tang Y L, Wang L, Wang H D, *et al.* Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of oat germplasms. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(6): 1236—1244.
- 唐有林, 王蕾, 王寒冬, 等. 燕麦种质资源表型多样性及综合评价. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6): 1236—1244.
- [11] 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): 1063—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): 1063—1071.
- [12] Zhang J. Identification and evaluation of saline-alkali tolerance of oat (*Avena sativa*) germplasm resources and functional research of related gene. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.
- 张静. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及相关基因功能研究. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- [13] Yang F. Phenotypic traits and SSR & SNP molecular markers identification of oat germplasm. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.
- 杨帆. 燕麦种质资源表型性状和SSR及SNP分子标记鉴定. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [14] Liu Y M. Oat cultivation techniques. *Yunnan Agriculture*, 2020(1): 86.
- 刘云梅. 燕麦栽培技术. 云南农业, 2020(1): 86.
- [15] Zheng D S, Wang X M, Zhang J. Description specification and data standard of oat germplasm resources. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- 郑殿升, 王晓鸣, 张京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [16] Linn J G, Martin N P. Forage quality analyses and interpretation. *Veterinary Clinics of North America Food Animal Practice*, 1991, 7(2): 509.
- [17] Li C J, Qin W, Xu C H, *et al.* Genetic variations and cluster analysis of photosynthetic gas exchange parameters in exotic sugarcane cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(12): 2288—2299.
- 李纯佳, 覃伟, 徐超华, 等. 国外引进甘蔗栽培品种的光合气体交换参数遗传差异与聚类分析. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2288—2299.
- [18] Nie B T, Liu D Q, Chen J, *et al.* Analysis and comprehensive evaluation of agronomic and quality traits of spring soybean varieties in northern China. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(9): 2248—2266.
- 聂波涛, 刘德泉, 陈健, 等. 北方春大豆品种农艺和品质性状分析与综合评价. 作物学报, 2024, 50(9): 2248—2266.
- [19] Wang H Y, Luo J J, Lian J L, *et al.* Comprehensive evaluation on yield and stability of winter wheat varieties in Xinjiang areas based on GGE double-plotted map. *Seed*, 2024, 43(6): 105—112.
- 王贺亚, 罗静静, 连金龙, 等. 基于GGE双标图对新疆地区冬小麦品种丰产性和稳定性综合评价. 种子, 2024, 43(6): 105—112.
- [20] Wei S W, Yang H, Zhang Q R, *et al.* The diversity of lettuce resource based on the analysis of phenotypic traits. *Journal of*

- Plant Genetic Resources, 2016, 17(5): 871–876.
- 魏仕伟, 杨华, 张前荣, 等. 基于表型性状的叶用莴苣资源多样性分析. 植物遗传资源学报, 2016, 17(5): 871–876.
- [21] Liu Y, Chen T, Zhang J, *et al.* Genetic diversity analysis of Chinese cherry landraces (*Prunus pseudocerasus*) based on phenotypic traits. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(11): 2119–2132.
- 刘胤, 陈涛, 张静, 等. 中国樱桃地方种质资源表型性状遗传多样性分析. 园艺学报, 2016, 43(11): 2119–2132.
- [22] Zhang J C, Xu Q J, Zhang Y Q, *et al.* Analysis of photosynthetic physiology and genetic diversity in spring wheat varieties from Xinjiang over the past 40 years. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2): 13–21.
- 张景灿, 徐其江, 张永强, 等. 新疆近 40 年春小麦品种光合生理遗传多样性分析. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2): 13–21.
- [23] Bai X H, Chen W Y, Li Q, *et al.* Seed germination and seedling growth characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* from different provenances. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 196–209.
- 白小红, 陈文燕, 李琴, 等. 不同种源乌拉尔甘草种子萌发及幼苗生长比较研究. 草业学报, 2025, 34(7): 196–209.
- [24] Xu G C, Luo W B, Li H W, *et al.* Screening for genetic variation in photosynthesis and high photosynthetic efficiency germplasm in potato. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(11): 2239–2250.
- 许国春, 罗文彬, 李华伟, 等. 马铃薯叶片光合效率遗传变异分析及高光效种质筛选. 园艺学报, 2021, 48(11): 2239–2250.
- [25] Yan F, Dong Y, Zhao F Y, *et al.* Comprehensive evaluation of photosynthetic performance of foxtail millet varieties and screening of high photosynthetic efficiency varieties. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(5): 40–48.
- 闫锋, 董扬, 赵富阳, 等. 谷子品种光合性能综合评价及高光效品种筛选. 河南农业科学, 2024, 53(5): 40–48.
- [26] Zhu L Y, Yang Q H, Liu Y X, *et al.* Correlation analysis between photosynthetic characteristics and agronomic traits of wild and cultivated oats during filling process. Crops: 1–9. [2025-08-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250409.1124.012>.
- 朱铃羽, 杨乔惠, 刘亦迅, 等. 野生和栽培燕麦在灌浆过程的光合特性与农艺性状的相关性分析. 作物杂志: 1–9. [2025-08-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250409.1124.012>.
- [27] Cheng H Q, Hou Q Q, Zhu M, *et al.* Effects of climate change and crop rotation system on forage oats yield in northern Shanxi Province. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(10): 2599–2613.
- 成华强, 侯青青, 朱敏, 等. 气候变化与轮作制度对晋北饲用燕麦产草量的影响. 作物学报, 2024, 50(10): 2599–2613.
- [28] Liang G L, Liu W H, Zhou Q P. Study on photosynthetic characteristics and production performance of I-D oat strain and their parents in the Alpine regions. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(4): 15–21, 80.
- 梁国玲, 刘文辉, 周青平. 高寒区燕麦 I-D 新品系与亲本光合特性和生产性能研究. 中国草地学报, 2017, 39(4): 15–21, 80.
- [29] Zhou Q, Lu Q M, Zhao Z C, *et al.* Identification of drought resistance of 244 spring wheat varieties at seedling stage. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(9): 1646–1663.
- 周全, 路秋梅, 赵张晨, 等. 244 份春小麦苗期抗旱性的鉴定. 中国农业科学, 2024, 57(9): 1646–1663.
- [30] Bai Y X, Zheng X Q, Yao Y H, *et al.* Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits in hulless barley germplasm resources. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(23): 4201–4214.
- 白羿雄, 郑雪晴, 姚有华, 等. 青稞种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4201–4214.
- [31] Zhao J, Wang X F, Zhang Y L, *et al.* Identification of salt tolerance at germination and seedling stage of different rice cultivars. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(23): 55–59.
- 赵杰, 王晓风, 张余良, 等. 不同水稻品种萌发期与幼苗期耐盐性鉴定. 江苏农业科学, 2024, 52(23): 55–59.
- [32] Liu W J, Jiang F Z, Qi K B, *et al.* Effects of different fertilization and sowing amounts on vegetation restoration and soil quality in alpine mining areas and comprehensive evaluation. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 27–39.
- 刘文谨, 蒋福祯, 祁凯斌, 等. 不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价. 草业学报, 2025, 34(5): 27–39.
- [33] 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.

- [34] 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 Prataculturae 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.
- [35] Hui J F, Wei K Q, Sun Y L, *et al.* Response of alfalfa hay yield and nutritional quality to altitude in the Yili River basin. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(10): 41–50.
回金峰, 魏孔钦, 孙延亮, 等. 伊犁河流域紫花苜蓿干草产量和营养品质对海拔高度的响应. *草业学报*, 2025, 34(10): 41–50.
- [36] Gowda K H, Chauhan V B S, Nedunchezhiyan M, *et al.* Genotype×environment interaction analysis and simultaneous selection using AMMI, BLUP, GGE biplot and MTSI under drought condition in sweet potato. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, 25(2): 3797–3814.
- [37] Yu B, Yang H Y, Wang L, *et al.* Genetic diversity analysis and comprehensive assessment of phenotypic traits in introduced potato germplasm resources in arid and semi-arid area. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(1): 63–74.
余斌, 杨宏羽, 王丽, 等. 引进马铃薯种质资源在干旱半干旱区的表型性状遗传多样性分析及综合评价. *作物学报*, 2018, 44(1): 63–74.
- [38] Zhao M Y, Feng Y P, Shi Y, *et al.* Yield and quality properties of silage maize and their influencing factors in China. *Science China-Life Sciences*, 2022, 65(8): 1655–1666.
- [39] Chen M M. Analysis of genetic diversity and nutritional value of oat germplasm resources. Changchun: Northeast Normal University, 2024.
陈明明. 燕麦种质资源遗传多样性与营养价值分析. 长春: 东北师范大学, 2024.