

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.010

引用格式:卫纪,高杨森,汪辉,等.465份燕麦种质资源表型遗传多样性分析及优异资源筛选[J].草地学报,2026,34(3):840—852

WEI Ji, GAO Yang-miao, WANG Hui, et al. Phenotype Genetic Diversity Analysis and Screening for Elite Germplasm Resources in 465 Oat Accessions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):840—852

## 465份燕麦种质资源表型遗传多样性分析及优异资源筛选

卫纪<sup>1</sup>,高杨森<sup>1</sup>,汪辉<sup>1,2</sup>,陈有军<sup>1,2</sup>,周青平<sup>1,2</sup>,王沛<sup>1,2\*</sup>,雷映霞<sup>1,2\*</sup>

(1.西南民族大学,草地资源学院,四川成都610041;2.西南民族大学,四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站,四川成都610041)

**摘要:**为分析燕麦(*Avena sativa* L.)表型遗传多样性特征,筛选具有优良性状的种质,本研究对来自26个国家的465份燕麦资源的24个表型性状进行综合分析。结果表明,13个数量性状的变异系数为13.19%~46.70%,11个质量性状的遗传多样性指数为0.12~1.00。相关性分析显示,植株的生长性状(如株高、茎粗)与产量及穗部部分性状之间存在极显著正相关关系( $P<0.01$ ),而抗倒伏性与千粒重呈显著负相关关系( $P<0.05$ )。聚类分析将供试材料分为6个类群:类群I为高生物量皮燕麦,适于饲草育种;类群II兼具高产与抗倒伏性;类群III为裸燕麦,适宜粮用;类群IV~VI具有特殊性状,可作为特色基因库。基于主成分分析(累计贡献率65.05%)和综合得分( $F$ 值),筛选出5份高产抗倒伏的优良种质(174, Y586, Y1062, Y341, 150),这些材料可作为优良亲本或基础研究材料。

**关键词:**燕麦;表型性状;遗传多样性;主成分分析;聚类分析

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0840-13

## Phenotype Genetic Diversity Analysis and Screening for Elite Germplasm Resources in 465 Oat Accessions

WEI Ji<sup>1</sup>, GAO Yang-miao<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>, CHEN You-jun<sup>1,2</sup>, ZHOU Qing-ping<sup>1,2</sup>,  
WANG Pei<sup>1,2\*</sup>, LEI Ying-xia<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan Province 610041, China; 2. Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan Province 610041, China)

**Abstract:** To analyze the genetic diversity characteristics of the phenotypic traits and identify germplasm with superior traits in oats (*Avena sativa* L.), this study conducted a comprehensive evaluation of 24 phenotypic traits in 465 oat accessions collected from 26 countries. The results showed that the coefficient of variation for 13 quantitative traits ranged from 13.19% to 46.70%, while the genetic diversity index for 11 qualitative traits varied between 0.12 and 1.00. Correlation analysis revealed significant positive correlations ( $P<0.01$ ) between plant growth traits (e.g., plant height, stem diameter) and yield-related or panicle traits, whereas a significant negative correlation ( $P<0.05$ ) was observed between lodging resistance and thousand-kernel weight. Cluster analysis classified the accessions into six distinct groups: Group I, high-biomass hulled oats suitable for forage breeding; Group II, accessions combining high yield and lodging resistance; Group III, naked oats ideal for grain use; Groups IV-VI, accessions with distinctive characteristics, which can serve as a specialized gene bank. Based on principal component analysis (cumulative contribution rate of 65.05%) and comprehensive evaluation scores ( $F$  value), five elite accessions (174, Y586, Y1062, Y341, 150) with high

收稿日期:2025-08-18;修回日期:2025-10-11

基金项目:农业科技重大项目(NK20220402);四川省科技计划面上项目(2024NSFSC0310);中央高校项目(ZYN2025029);西藏自治区科技计划项目(XZ202501ZY0086)资助

作者简介:卫纪(1999-),男,汉族,四川泸定人,硕士研究生,主要从事牧草育种研究,E-mail:weiwin996@163.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail:leiyinxia@hotmail.com; wangpei@swun.edu.cn

yield and lodging resistance were identified, demonstrating potential as excellent parental lines or fundamental research materials.

**Key words:** Oat (*Avena sativa* L.); Phenotypic traits; Genetic diversity; Principal component analysis; Cluster analysis

燕麦 (*Avena sativa* L.) 是禾本科 (Poaceae) 燕麦属 (*Avena* L.) 一年生植物<sup>[1]</sup>, 具有抗旱、耐寒、耐盐碱、耐贫瘠的特性及丰富的营养价值, 在全球广泛种植。在农业生产上, 燕麦因其产草量高、适口性好等特性, 常作为重要的饲草作物; 同时, 燕麦籽粒营养价值高, 富含膳食纤维、维生素和矿物质, 也可作为粗粮食用<sup>[2-4]</sup>。我国作为主要的燕麦生产国之一, 燕麦的种植与利用历史悠久。然而, 我国在燕麦种质资源的遗传多样性、遗传潜力及抗逆性等基础研究方面仍较薄弱, 进而制约了资源利用效率的提升与产业的高质量发展<sup>[2]</sup>。

随着农牧业的发展, 我国对燕麦的需求逐年增加。然而, 在高寒干旱种植区, 普遍存在优良燕麦品种不足的问题<sup>[5]</sup>。因此, 选育生产性能好、抗逆性强的燕麦品种变得尤为迫切<sup>[6]</sup>。系统开展燕麦种质资源的筛选与评价研究, 既是保障区域粮食与饲草安全的关键, 也是构建高效育种体系不可或缺的基础。其中, 表型性状鉴定作为最直观、基础的评价手段, 能快速获取资源特征信息, 是解析遗传多样性与筛选优良育种材料的首要环节<sup>[7]</sup>。

大量研究已证实, 系统分析表型性状是揭示作物遗传多样性特征和发掘优异资源的有效途径<sup>[8]</sup>。许娜丽等<sup>[9]</sup>通过对不同品种的小麦 (*Triticum aestivum* L.) 株高、穗粒数、千粒重等关键表型性状的测定, 发现其表型性状的差异显著, 体现了丰富的遗传多样性; 刘伟等<sup>[10]</sup>基于描述性分析、相关分析等方法对影响水稻 (*Oryza sativa* L.) 产量的主要表型性状进行了研究, 发现供试种质资源变异比较丰富, 12个表型性状的变异系数均 $\geq 11\%$ ; 赵芳等<sup>[11]</sup>发现不同品种谷子 (*Setaria italica* L.) 在株型、抗倒伏性及抗旱性等方面的差异, 反映了供试谷子存在丰富的遗传背景。此外, 李淑芳等<sup>[12]</sup>对205份玉米 (*Zea mays* L.) 种质资源的8个描述性状、15个数量性状及3个品质性状进行观察分析, 揭示了其在遗传上的丰富多样性。上述研究共同验证了遗传多样性与表型性状的紧密关联。

对燕麦种质资源遗传多样性的研究也有大量报道。贾志锋等<sup>[13]</sup>基于100份材料, 指出主穗小穗数、芒色及粒形变异突出, 并筛选出抗倒伏早熟种

质; 王建丽等<sup>[14]</sup>研究发现, 燕麦种质资源各性状具有丰富的遗传多样性 (其中主穗长、株高和主穗粒重最为突出) 和显著的变异 (主穗小穗数、主穗粒重和分蘖数变异最大)。梁国玲等<sup>[15]</sup>对590份皮燕麦的分析进一步表明, 质量与数量性状均存在丰富的遗传变异, 但变异系数与多样性指数间无一致性规律, 聚类结果可为类群定向划分提供依据。值得注意的是, 基于表型评价的研究, 其结果受环境差异及样本异质性的制约, 可能导致结论普适性不足, 进而在燕麦种质资源利用和育种等方面存在一定局限性。

因此, 为更精准地评价燕麦种质资源并服务于高寒干旱区育种需求, 本试验选取465份来源广泛的燕麦种质, 在甘肃寒旱区进行表型精准鉴定。通过对关键性状的遗传多样性特征及其关联性分析, 旨在量化燕麦表型性状的遗传多样性水平, 筛选兼具高产与抗逆特性等的优异种质类群, 为后续燕麦新品种的定向选育与推广提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究选用西南民族大学草地资源学院种质资源库保存的465份燕麦种质。这些资源来自26个不同地区 (表1), 涵盖了温带、寒带及高海拔等多种生态类型。

### 1.2 试验设计

试验于2024年在甘肃省山丹县燕麦科技小院实验基地 ( $100^{\circ}41' \sim 100^{\circ}46' \text{ E}$ ,  $37^{\circ}50' \sim 38^{\circ}03' \text{ N}$ ; 海拔2450 m) 进行。该地属典型温带大陆性干旱气候, 气候干冷, 昼夜温差大, 光照充足, 土壤肥沃。

试验地采用格子划分, 每份燕麦种质为一个小区, 在田间按随机区组排列, 共465个处理。每个小区面积为  $4 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ), 播种有效宽度为1.8 m (两侧各留0.1 m边界), 种植7行作物 (行距0.3 m、行长2 m), 小区间设0.5 m宽保护行。供试种子纯净度 $\geq 98\%$ , 发芽率 $\geq 85\%$ 。于2024年4月25日进行人工条播, 播量  $0.012 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 播种深度约3~

表 1 燕麦种质资源的来源及数量

Table 1 Origin and number of oat germplasm accessions

| 原产地 Origin    | 皮/裸 Husk/Naked | 份数 Amount | 原产地 Origin                  | 皮/裸 Husk/Naked | 份数 Amount |
|---------------|----------------|-----------|-----------------------------|----------------|-----------|
| 阿根廷 Argentina | 皮 Husk         | 1         | 蒙古 Mongolia                 | 皮 Husk         | 1         |
| 智利 Chile      | 皮 Husk         | 16        | 巴基斯坦 Pakistan               | 皮 Husk         | 2         |
| 芬兰 Finland    | 皮 Husk         | 1         | 罗马尼亚 Romania                | 皮 Husk         | 5         |
| 以色列 Israel    | 皮 Husk         | 1         | 澳大利亚 Australia              | 皮 Husk         | 5         |
| 法国 France     | 皮 Husk         | 9         | 荷兰 Netherlands              | 皮 Husk         | 1         |
| 土耳其 Turkey    | 皮 Husk         | 4         | 英国 United Kingdom           | 皮 Husk         | 2         |
| 德国 Germany    | 皮 Husk         | 6         | 瑞士 Switzerland              | 皮 Husk         | 1         |
| 丹麦 Denmark    | 皮 Husk         | 150       | 新西兰 New Zealand             | 皮 Husk         | 1         |
| 比利时 Belgium   | 皮 Husk         | 1         | 保加利亚 Bulgaria               | 皮 Husk         | 2         |
| 瑞典 Sweden     | 皮 Husk         | 12        | 捷克斯洛伐克 Czechoslovakia       | 皮 Husk         | 2         |
| 日本 Japan      | 皮 Husk         | 6         | 美国 United States of America | 皮 Husk         | 22        |
| 中国 China      | 皮 Husk         | 55        | 加拿大 Canada                  | 皮 Husk         | 108       |
|               | 裸 Naked        | 7         |                             | 裸 Naked        | 3         |
| 匈牙利 Hungary   | 皮 Husk         | 17        | 苏联 Soviet Union             | 皮 Husk         | 22        |
|               | 裸 Naked        | 1         |                             | 裸 Naked        | 1         |

注:苏联、捷克斯洛伐克属于历史国家

Note: The Soviet Union and Czechoslovakia are historical states

5 cm。在需要时进行病、虫和杂草防除工作,在旱情严重影响试验结果时适量浇水。

### 1.3 表型性状测定

参照《燕麦种质资源描述规范和数据标准》<sup>[16]</sup>,于分蘖期、抽穗期、初花期、灌浆期、乳熟期、完熟期等关键生育期开展性状调查。在每个小区内避开边行,采用五点取样法在小区内均匀分布的五个点上各随机选取2株具有代表性的单株,共选取10株进行测量;其中,11个质量性状(包括:

皮/裸、熟性、抗倒伏性、旗叶角度/硬度及芒性等)采用直接观察法,依据标准的描述进行分级和记录,由于籽粒类型、茎叶形态结构、穗部形态特征等的量纲不同,为了便于数量化和统计分析,对质量性状进行赋值量化,具体赋值标准详见表2;13个数量性状(包括:株高、茎粗、分蘖数、旗叶长/宽、小穗粒数及千粒重等)使用卷尺、游标卡尺、电子天平等工具测量,以各性状在每个小区10株测量值的平均值作为该种质的观测值用于后续统计分析。

表 2 燕麦种质资源性状描述及评价标准

Table 2 Trait characterization and evaluation criteria for oat germplasm resources

| 性状 Traits                   | 赋值标准 Trait level assignment                                                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 皮/裸 Husk/Nake/HN            | 1-带皮;2-裸粒 1-Husk; 2-Naked                                                                            |
| 熟性 Maturity/Mat.            | 1-特早熟;2-早熟;3-中熟;4-晚熟<br>1-Extra-early maturing; 2-Early-maturing; 3-Medium-maturing; 4-Late-maturing |
| 抗倒伏性 Lodging resistance/LR  | 1-抗倒伏;2-中抗倒伏;3-倒伏 1-Resistant; 2-Moderately resistant; 3-Susceptible                                 |
| 茎粗度 Stem thickness/ST       | 1-细;2-中等;3-粗 1-Thin; 2-Medium; 3-Thick                                                               |
| 旗叶角度 Flag leaf angle/FLA    | 1-锐角;2-中等;3-钝角 1-Acute angle; 2-Medium; 3-Obtuse angle                                               |
| 旗叶硬度 Flag leaf hardness/FLH | 1-弯;2-稍弯;3-挺直 1-Bent; 2-Slightly bent; 3-Erect                                                       |
| 穗直立性 Panicle erectness/PE   | 1-直立;2-半直立 1-Erect; 2-Semi-erect                                                                     |
| 小穗直立性 Spikelet erectness/SE | 1-直立;2-半直立;3-下垂 1-Erect; 2-Semi-erect; 3-Drooping                                                    |
| 芒性 Awn character/ACH.       | 0-无芒;1-弱芒;2-强芒 0-Awnless; 1-Weak; 2-Strong                                                           |
| 芒型 Awn type/AT              | 1-挺直;2-弯曲 1-Erect; 2-Curved                                                                          |
| 芒色 Awn color/AC             | 1-白色;2-黑色 1-White; 2-Black                                                                           |

### 1.4 数据处理及统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 统计各个样品数量性状的平均值(Mean)、最大值(Max)、最小值(Min)以及标准差(Standard deviation,SD)和变异系数(Coef-

ficient of variation,CV)计算公式为: $CV = \frac{SD}{Mean} \times$

100%;采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ),计算每个质量性状在各等级出现的频率  $P_i$ ,计算公式为:

$H' = -\sum P_i \ln P_i$ 。数量性状 $H'$ 的计算,依据表型性状观测值的Mean和SD,把每个数量性状的连续数据按0.5 SD为一级离散化为1~10级。具体分级标准如下:1级: $X < (\text{Mean} - 2 \text{SD})$ ;2级: $(\text{Mean} - 2 \text{SD}) \leq X < (\text{Mean} - 1.5 \text{SD})$ ;……;9级: $(\text{Mean} + 1.5 \text{SD}) \leq X < (\text{Mean} + 2 \text{SD})$ ;10级: $X \geq (\text{Mean} + 2 \text{SD})$ ,其中 $X$ 为性状观测值。计算各等级频率 $P_i$ 后,根据公式 $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 计算分级后数据的 $H'$ 。

聚类分析(Cluster analysis, CA)和主成分分析(Principal component analysis, PCA)通过SPSS 27.0完成,其中CA采用Ward离差平方和法,种质间遗传距离通过欧式距离(Euclidean distance)计算。PCA以特征值大于1的原则提取主成分,主成分得分 $F_i$ 通过SPSS计算获得<sup>[17]</sup>。主成分综合得分 $F$ 的计算公式为:

$$F = \frac{\lambda_1}{\sum \lambda} F_1 + \frac{\lambda_2}{\sum \lambda} F_2 + \frac{\lambda_3}{\sum \lambda} F_3 + \frac{\lambda_4}{\sum \lambda} F_4 + \frac{\lambda_5}{\sum \lambda} F_5 + \frac{\lambda_6}{\sum \lambda} F_6 + \frac{\lambda_7}{\sum \lambda} F_7$$

其中 $\lambda_i$ 为第 $i$ 个主成分的特征值, $\sum \lambda$ 为所提取的7个主成分特征值之和, $F_i$ 为第 $i$ 个主成分的得分。相关图形绘制使用GraphPad Prism 8完成,同时采用分布函数 $\chi^2$ 检验各数量性状是否符合正态分布。

## 2 结果与分析

### 2.1 表型性状变异及分布

#### 2.1.1 质量性状变异分布及遗传多样性分析 对

465份燕麦的11个质量性状分析表明,皮燕麦在供试样品中占比最高(97.42%)(图1)。熟性呈偏态分布,以中熟型为主(68.82%),早熟型占30.96%,晚熟型占比极低(0.22%)。抗倒伏方面,不抗倒伏型占54.19%,抗倒伏型占45.81%。茎粗度统计表明,细茎型占比最高(52.47%),粗茎型次之(41.72%)。旗叶角度以锐角型为主(76.99%),钝角型占18.28%;旗叶硬度以挺直型为主(54.41%),中等型占27.31%,弯曲型占18.28%。穗直立性中直立型占比最高(75.48%),半直立型占24.52%,且未观察到下垂型;而小穗直立性以下垂型占比最高(92.47%)。供试材料中,无芒性状占比高达89.89%。而在有芒材料中,又以芒型挺直为绝对主体,占比达93.62%;此外,有芒材料中有72.34%表现为黑色芒。

对11个质量性状的遗传多样性分析发现,Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )介于0~1之间,其值越高表明遗传多样性越丰富(表3)。具体而言,所有性状平均 $H'$ 值为0.53。其中,旗叶硬度、茎粗度、抗倒伏性的 $H'$ 值最高,分别为1.00,0.87,0.79;其次,旗叶角度( $H'=0.66$ )、熟性( $H'=0.63$ )和穗直立性( $H'=0.56$ )的遗传多样性处于中等水平;最后,芒性( $H'=0.38$ )、小穗直立性( $H'=0.30$ )、芒色( $H'=0.29$ )和芒型( $H'=0.26$ )的 $H'$ 值则相对较低且皮裸的 $H'$ 值最低,仅为0.12。

**2.1.2 数量性状变异分布及遗传多样性分析** 基于465份燕麦种质资源的 $\chi^2$ 检验分析表明,13个数量性状均符合正态分布,但其变异程度存在显著差异(表4、图2)。

表3 质量性状遗传多样性分析

Table 3 Analysis of genetic diversity for qualitative traits

| 性状 Traits | 频率分布 Frequency distribution/% |       |       |       |      | 遗传多样性指数 $H'$ |
|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|------|--------------|
|           | 0                             | 1     | 2     | 3     | 4    |              |
| 皮/裸 HN    | —                             | 97.42 | 2.58  | —     | —    | 0.12         |
| 熟性 Mat.   | —                             | —     | 30.97 | 68.82 | 0.22 | 0.63         |
| 抗倒伏性 LR   | —                             | 43.23 | 2.58  | 54.19 | —    | 0.79         |
| 茎粗度 ST    | —                             | 52.47 | 5.81  | 41.72 | —    | 0.87         |
| 旗叶角度 FLA  | —                             | 76.99 | 4.73  | 18.28 | —    | 0.66         |
| 旗叶硬度 FLH  | —                             | 18.28 | 27.31 | 54.41 | —    | 1.00         |
| 穗直立性 PE   | —                             | 75.48 | 24.52 | —     | —    | 0.56         |
| 小穗直立性 SE  | —                             | 1.08  | 6.45  | 92.47 | —    | 0.30         |
| 芒性 ACh.   | 89.89                         | 2.58  | 7.53  | —     | —    | 0.38         |
| 芒型 AT     | —                             | 93.62 | 6.38  | —     | —    | 0.26         |
| 芒色 AC     | —                             | 27.66 | 72.34 | —     | —    | 0.29         |

注:“—”表示空值

Note: “—” indicates a null value

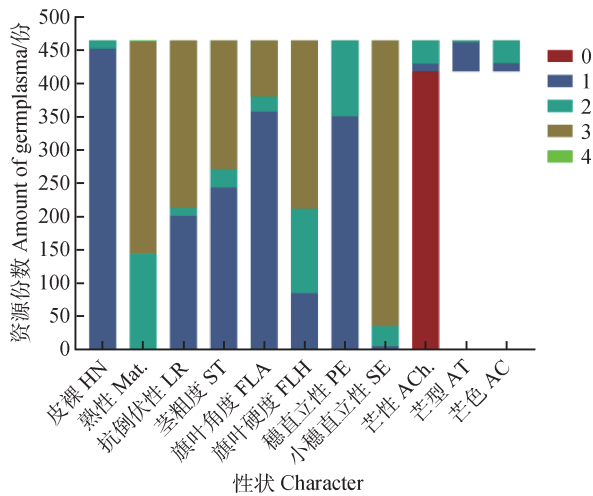


图1 燕麦质量性状变异类型分布频率

Fig. 1 Frequency distribution of qualitative trait variations in oat

注:红色代表数字0;深蓝色代表数字1;青绿色代表数字2;棕色代表数字3;绿色代表数字4;每个数字对应的性状描述同表1

Note: Red represents the number 0; dark blue represents the number 1; turquoise represents the number 2; brown represents the number 3; green represents the number 4. The trait descriptions for each number correspond to those in Table 1

各性状的平均变异系数为26.10%,其中变异系数最大的是生物干重(CV=46.70%),变异幅度为2.44~28.19 g。总分蘖数(CV=39.96%,变异幅度

为1.60~14.00个)、有效分蘖数(CV=38.21%,变异幅度为1.00~8.20个)、生物鲜重(CV=37.05%,变异幅度为8.96~100.92 g)和小穗数(CV=33.62%,变异幅度为10.06~84.00个)也表现出较高变异。旗叶宽(CV=28.57%,变异幅度为0.50~5.44 cm)、旗叶长(CV=20.79%,变异幅度为8.54~31.70 cm)和穗长(CV=18.31%,变异幅度为12.06~65.32 cm)呈中等变异。茎粗(CV=16.50%,变异幅度为1.34~5.81 mm)、千粒重(CV=16.38%,变异幅度为13.90~52.83 g)、轮层数(CV=15.47%,变异幅度为2.80~7.80层)、株高(CV=14.54%,变异幅度为69.26~161.76 cm)和叶量(CV=13.19%,变异幅度为3.20~6.80片)则相对稳定。

遗传多样性分析显示,13个数量性状的平均Shannon-Wiener指数( $H'$ )为4.17。株高遗传多样性最高( $H'=6.03$ ),生物鲜重(干重)、旗叶长、穗长和千粒重的 $H'$ 值较高,分别为5.98(5.86),5.74,5.71和5.64。小穗数( $H'=5.18$ )、茎粗( $H'=5.11$ )和旗叶宽( $H'=4.15$ )遗传多样性表现为中等大小,而总分蘖数( $H'=3.56$ )、有效分蘖数( $H'=3.00$ )、轮层数( $H'=2.78$ )和叶量( $H'=2.48$ )遗传多样性较低。根据排序结果,变异系数高低和遗传多样性指数大小不具有统一性。

表4 燕麦种质资源数量性状的变异分析

Table 4 Analysis of quantitative trait variation in oat germplasms

| 性状 Character | 最大值 Max | 最小值 Min | 平均值 Mean | 标准差 SD | 变异系数 CV/% | 遗传多样性指数 $H'$ |
|--------------|---------|---------|----------|--------|-----------|--------------|
| 株高 PH        | 161.76  | 69.26   | 125.48   | 18.24  | 14.54     | 6.03         |
| 茎粗 SD        | 5.81    | 1.34    | 4.00     | 0.66   | 16.50     | 5.11         |
| 总分蘖数 TT      | 14.00   | 1.60    | 5.33     | 2.13   | 39.96     | 3.56         |
| 有效分蘖数 ET     | 8.20    | 1.00    | 2.80     | 1.07   | 38.21     | 3.00         |
| 叶量 LB        | 6.80    | 3.20    | 4.70     | 0.62   | 13.19     | 2.48         |
| 旗叶长 FLL      | 31.70   | 8.54    | 19.72    | 4.10   | 20.79     | 5.74         |
| 旗叶宽 FLW      | 5.44    | 0.50    | 1.40     | 0.40   | 28.57     | 4.15         |
| 生物鲜重 FW      | 100.92  | 8.96    | 38.49    | 14.26  | 37.05     | 5.98         |
| 生物干重 DB      | 28.19   | 2.44    | 8.78     | 4.10   | 46.70     | 5.86         |
| 穗长 PL        | 65.32   | 12.06   | 22.34    | 4.09   | 18.31     | 5.71         |
| 小穗数 SN       | 84.00   | 10.60   | 39.41    | 13.25  | 33.62     | 5.18         |
| 轮层数 NSL      | 7.80    | 2.80    | 5.43     | 0.84   | 15.47     | 2.78         |
| 千粒重 TKW      | 52.83   | 13.90   | 29.61    | 4.85   | 16.38     | 5.66         |

注:PH,株高/厘米;SD,茎粗/毫米;TT,总分蘖数/个;ET,有效分蘖数/个;LB,叶量/片;FLL,旗叶长/厘米;FLW,旗叶宽/厘米;FW,生物鲜重/克;DB,生物干重/克;PL,穗长/厘米;SN,小穗数/个;NSL,轮层数/层;TKW,千粒重/克。下同

Note: PH, Plant height/cm; SD, Stem diameter/mm; TT, Total tillers; ET, Effective tillers; LB, Leaf biomass; FLL, Flag leaf length/cm; FLW, Flag leaf width/cm; FW, Fresh weight/g; DB, Dry biomass/g; PL, Panicle length/cm; SN, Spikelet number; NSL, Number of spikelet layers; TKW, Thousand kernel weight/g. This is applicable for the following figures and tables as well

## 2.2 表型性状的相关性分析

在本研究中,对燕麦种质资源进行相关性检验,结果表明供试燕麦种质的表型性状间存在复杂

的显著关联(图3)。植物生长性状(株高、茎粗、总分蘖数、有效分蘖数、熟性)内部关联显著,株高与茎粗、总分蘖数与有效分蘖数呈极显著正相关( $P<$

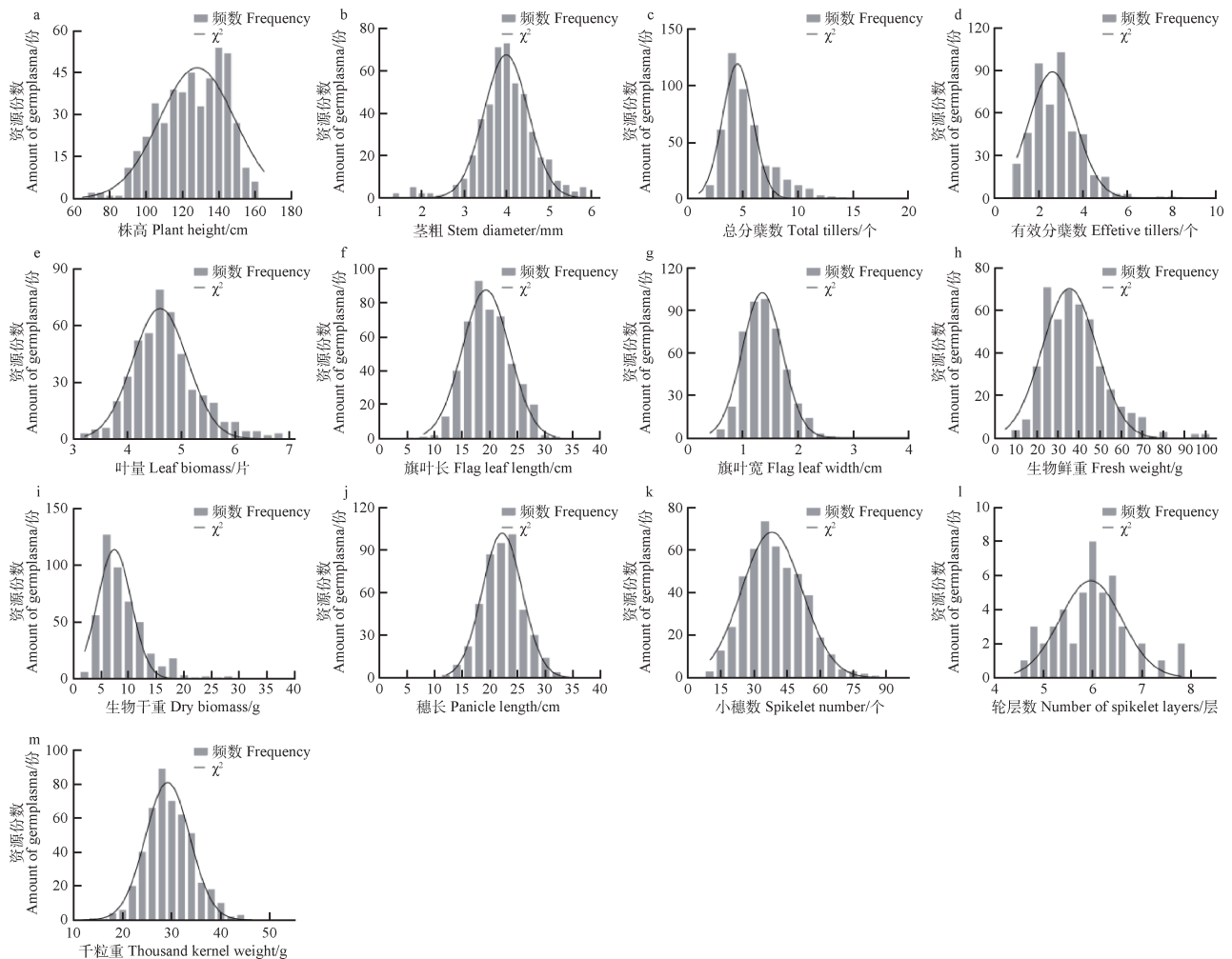


图2 燕麦数量性状频数分布图

Fig. 2 Frequency distribution of quantitative traits in oat

注: a, 株高; b, 茎粗; c, 总分蘖数; d, 有效分蘖数; e, 叶量; f, 旗叶长; g, 旗叶宽; h, 生物鲜重; i, 生物干重; j, 穗长; k, 小穗数; l, 轮层数; m, 千粒重  
 Note: a, Plant height; b, Stem diameter; c, Total tillers; d, Effective tillers; e, Leaf biomass; f, Flag leaf length; g, Flag leaf width; h, Fresh weight; i, Dry biomass; j, Panicle length; k, Spikelet number; l, Number of spikelet layers; m, Thousand kernel weight

0.01)。主要生长性状(株高、茎粗、总分蘖数、有效分蘖数)与生物量(鲜重/干重)呈极显著正相关( $P < 0.01$ );株高和茎粗还与穗部性状(穗长、小穗数、轮层数)呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),此外,有效分蘖数与旗叶长、旗叶宽均呈负相关( $P < 0.05$ )。

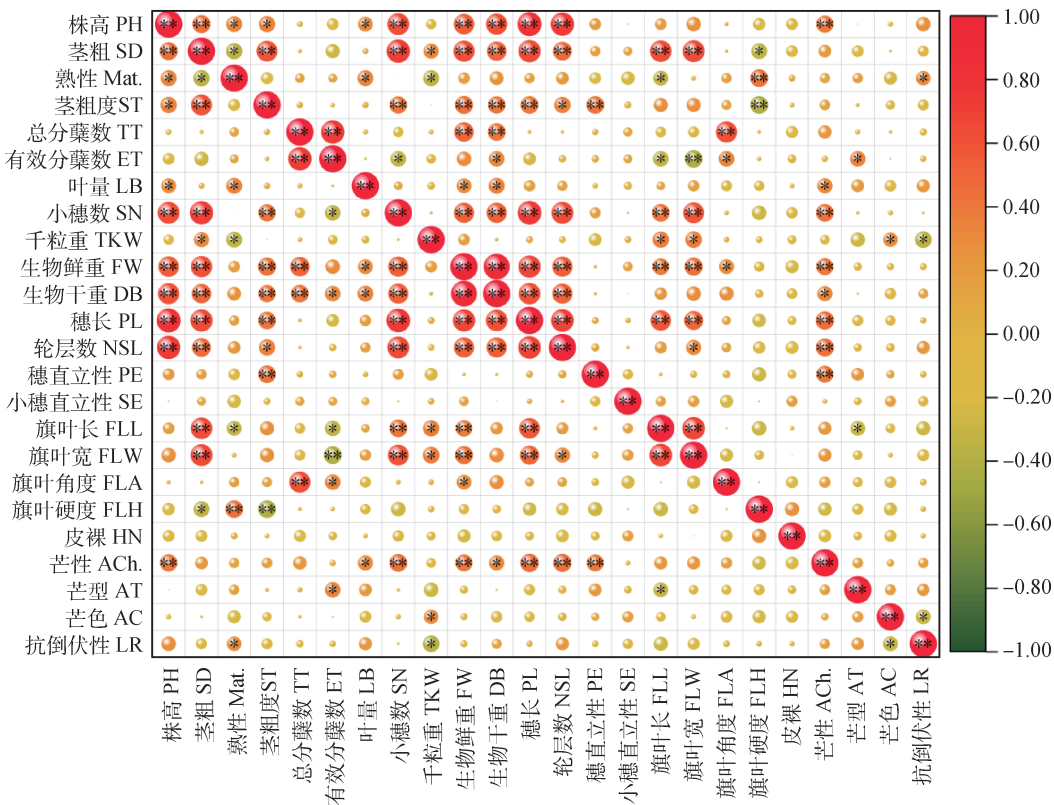
产量相关性状(叶量、小穗数、千粒重、生物鲜重、生物干重)的形成受到多因素驱动。生物量(鲜重/干重)与小穗数呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),小穗数和生物量均与穗部性状(穗长、轮层数)呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。叶部性状(旗叶长和旗叶宽)与生物鲜重呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与千粒重呈显著正相关( $P < 0.05$ );叶量与生物量(鲜重/干重)呈显著正相关( $P < 0.05$ )。其次,穗部性状(穗长、轮层数、穗直立性、小穗直立性)内部高度协同,穗长与小穗数、轮层数呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。

值得注意的是,抗倒伏性与千粒重呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与株高呈正相关趋势( $P > 0.05$ ),同时与旗叶长和旗叶宽这一叶部性状存在负相关趋势( $P > 0.05$ )。

### 2.3 表型性状的主成分分析

对22个主要表型性状进行KMO检验和Bartlett球度检验,结果显示KMO值为0.746( $P > 0.600$ ),Bartlett球形度检验的概率为0.000,表明变量间具有极显著相关性,此数据适合进行主成分分析(表5)。

基于特征值大于1的原则,对13个质量性状和9个数量性状进行主成分分析,发现前7个主成分累计贡献率达65.05%(表6)。各主成分特征如下:PC<sub>1</sub>(贡献率15.32%、特征值3.37)主要由小穗数、



\* $P \leq 0.05$  \*\* $P \leq 0.01$

图 3 燕麦种质资源性状的相关性

Fig. 3 Correlations among traits in oat germplasm

表 5 KMO 和 Bartlett 的检验

Table 5 KMO and Bartlett's tests

| 检验方法 Test method                                  | 检验值 Test value                         |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 取样足够度的 KMO 度量 KMO metric for sampling adequacy    | 0.746                                  |
| Bartlett 的球形度检验<br>Bartlett's test for sphericity | 近卡方值 Near-Cartesian values<br>3896.898 |
|                                                   | 自由度 Degrees of freedom<br>231.000      |
|                                                   | 显著性 Significance<br>0.000              |

旗叶宽、旗叶长、茎粗、穗长、茎粗度等特征向量较大的性状构成；PC<sub>2</sub>(贡献率 13.22%、特征值 2.91)主要由株高、轮层数、熟性、抗倒伏性、旗叶角度构成；PC<sub>3</sub>(贡献率 12.60%、特征值 2.77)主要由有效分蘖数、总分蘖数、生物鲜重、生物干重构成；PC<sub>4</sub>(贡献率 6.33%、特征值 1.39)特征向量较大的性状

包括千粒重、叶量；PC<sub>5</sub>(贡献率 6.03%、特征值 1.33)特征向量较大的性状包括小穗直立性、茎粗度、芒性；PC<sub>6</sub>(贡献率 6.02%、特征值 1.33)特征向量较大的性状包括穗直立性、旗叶硬度；PC<sub>7</sub>(贡献率 5.54%、特征值 1.22)特征向量较大的性状包括皮裸、芒性、旗叶角度(图 4)。

表 6 主成分特征值及方差贡献率

Table 6 Eigenvalues and explained variance of principal components

| 性状<br>Character | 主成分 Principal component |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                 | PC <sub>1</sub>         | PC <sub>2</sub> | PC <sub>3</sub> | PC <sub>4</sub> | PC <sub>5</sub> | PC <sub>6</sub> | PC <sub>7</sub> |
| 特征值 CV          | 3.370                   | 2.907           | 2.771           | 1.392           | 1.327           | 1.325           | 1.219           |
| 贡献率 CR/%        | 15.318                  | 13.215          | 12.598          | 6.326           | 6.032           | 6.021           | 5.541           |
| 累计贡献 ACR/%      | 15.318                  | 28.533          | 41.130          | 47.456          | 53.488          | 59.509          | 65.051          |

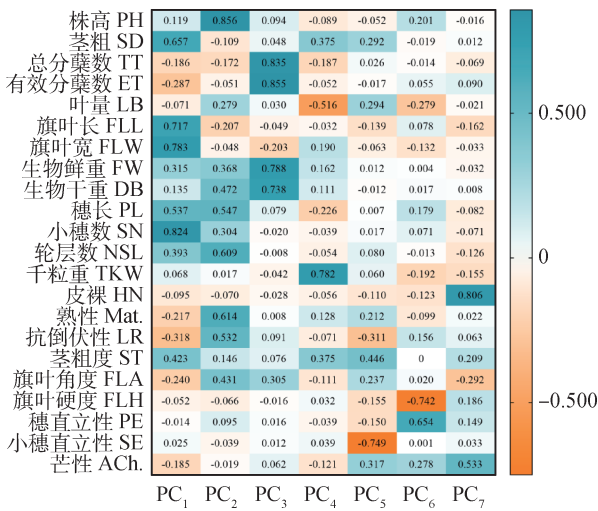


图 4 燕麦种质资源主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis (PCA) of Oat germplasms

### 2.4 综合评价

基于各主成分的特征向量,计算各主成分值  $F_n$

( $1 \leq n \leq 7$ ), 得到其与 22 个表型性状标准化数据 ( $X_i$ ) 的线性表达式为:

$$F_1 = 0.119X_1 + 0.657X_2 - 0.186X_3 + \dots - 0.025X_{21} - 0.185X_{22}$$

$$F_2 = 0.856X_1 - 0.109X_2 - 0.172X_3 + \dots - 0.039X_{21} - 0.019X_{22}$$

以此,计算出每个品种的  $F_1 \sim F_7$  共 7 个主成分值。再根据每个主成分对应特征值占所提取主成分特征值之和的比例作为权重,构建主成分的综合线性模型:

$$F = 0.2355F_1 + 0.2031F_2 + 0.1937F_3 + 0.0972F_4 + 0.0927F_5 + 0.0926F_6 + 0.0852F_7$$

按分值高低进行排序发现,所有供试燕麦种质综合得分大于 0 的占 48.17%,在  $F > 0$  的种质中,皮燕麦和裸燕麦分别占 48.43% 和 41.67%;值得注意的是, $F > 0$  的前 80 位全部为皮燕麦,且前 20 位中丹麦和加拿大来源的种质占比最高均为 40%(表 7)。

表 7 主成分因子得分及部分综合排名

Table 7 Factor scores and comprehensive ranking based on principal components

| 品种编号<br>Code | 排序前 20 主成分因子得分 Sorting the top 20 principal component factor scores |        |        |        |        |        |        | 综合得分<br>Score | 原产地<br>Origin | 皮/裸<br>Husk/Naked | 排序<br>Grade |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------------|-------------------|-------------|
| 174          | 1.717                                                               | 2.262  | 0.772  | -0.371 | 2.559  | -0.099 | 1.630  | 1.344         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 1           |
| Y586         | 1.258                                                               | 1.206  | 3.923  | 0.135  | -0.179 | -0.282 | -0.289 | 1.247         | 匈牙利 Hungary   | 皮 Husk            | 2           |
| Y1062        | 0.498                                                               | 2.052  | 2.506  | -0.353 | 1.841  | -0.189 | -0.064 | 1.133         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 3           |
| Y341         | 2.182                                                               | -0.302 | 1.779  | -0.592 | 4.393  | -1.128 | 0.007  | 1.043         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 4           |
| 150          | 1.439                                                               | 1.544  | 0.374  | -0.832 | 1.182  | 1.352  | 1.608  | 1.016         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 5           |
| 161          | 0.656                                                               | 0.327  | 2.783  | -0.619 | 1.852  | 0.411  | 0.923  | 0.988         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 6           |
| 338          | 1.616                                                               | 1.310  | 0.876  | 1.139  | 0.003  | 1.023  | -0.409 | 0.987         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 7           |
| Y756         | 0.232                                                               | 0.926  | 1.288  | 1.494  | 1.837  | 1.942  | -0.507 | 0.944         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 8           |
| Y390         | 2.156                                                               | 0.817  | 0.669  | 1.684  | 0.231  | -0.515 | 0.024  | 0.943         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 9           |
| 129          | 0.470                                                               | 1.157  | 1.524  | -0.936 | 0.808  | 1.212  | 2.203  | 0.925         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 10          |
| Y1135        | 0.330                                                               | -0.979 | 4.965  | 1.781  | 0.275  | -1.510 | 0.244  | 0.920         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 11          |
| Y91          | 2.457                                                               | -0.447 | 1.550  | -0.505 | 2.562  | -0.165 | -0.850 | 0.889         | 匈牙利 Hungary   | 皮 Husk            | 12          |
| Y366         | 2.224                                                               | -0.119 | -1.280 | 0.957  | 0.711  | 3.216  | 1.309  | 0.820         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 13          |
| Y326         | 2.728                                                               | -0.462 | 1.405  | -0.280 | -0.016 | 0.076  | 0.222  | 0.818         | 中国 China      | 皮 Husk            | 14          |
| Y1023        | 0.415                                                               | 1.427  | 0.986  | 1.326  | -0.808 | 1.306  | 0.613  | 0.806         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 15          |
| Y642         | 0.501                                                               | -0.269 | 0.859  | 0.516  | 0.860  | 3.167  | 1.742  | 0.802         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 16          |
| Y706         | 1.969                                                               | 0.577  | 0.481  | 0.220  | 0.257  | 0.568  | 0.339  | 0.801         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 17          |
| Y966         | 1.447                                                               | -1.459 | 1.474  | -0.457 | 1.289  | 2.757  | 1.607  | 0.797         | 丹麦 Denmark    | 皮 Husk            | 18          |
| Y253         | -0.625                                                              | 1.896  | 1.888  | 4.022  | -0.569 | -1.087 | -0.665 | 0.784         | 中国 China      | 皮 Husk            | 19          |
| 183          | 0.553                                                               | 1.699  | 0.844  | -0.555 | 1.328  | 0.149  | 0.410  | 0.757         | 加拿大 Canada    | 皮 Husk            | 20          |

### 2.5 表型性状的聚类分析

对 465 份燕麦种质的 22 个性状进行聚类分析,在欧氏距离系数为 23 时共分为 6 个类群,各类群燕麦种质的特征如下(表 8、图 5):

类群 I 包含 418 份材料,占比 89.89%:多数数量性状的平均值较高,其中旗叶长 19.93 cm、旗叶宽

1.42 cm、千粒重 29.84 g 为各类群较高,且变异系数在各类群中相对稳定,以生物干重的 CV(46.86%)最高。质量性状以中熟(68.42%)、不抗倒伏(55.74%)、细茎(52.39%)、旗叶锐角(79.90%)、旗叶挺直(55.02%)、穗直立(76.56%)、小穗下垂(94.50%)和无芒(94.50%)为主。

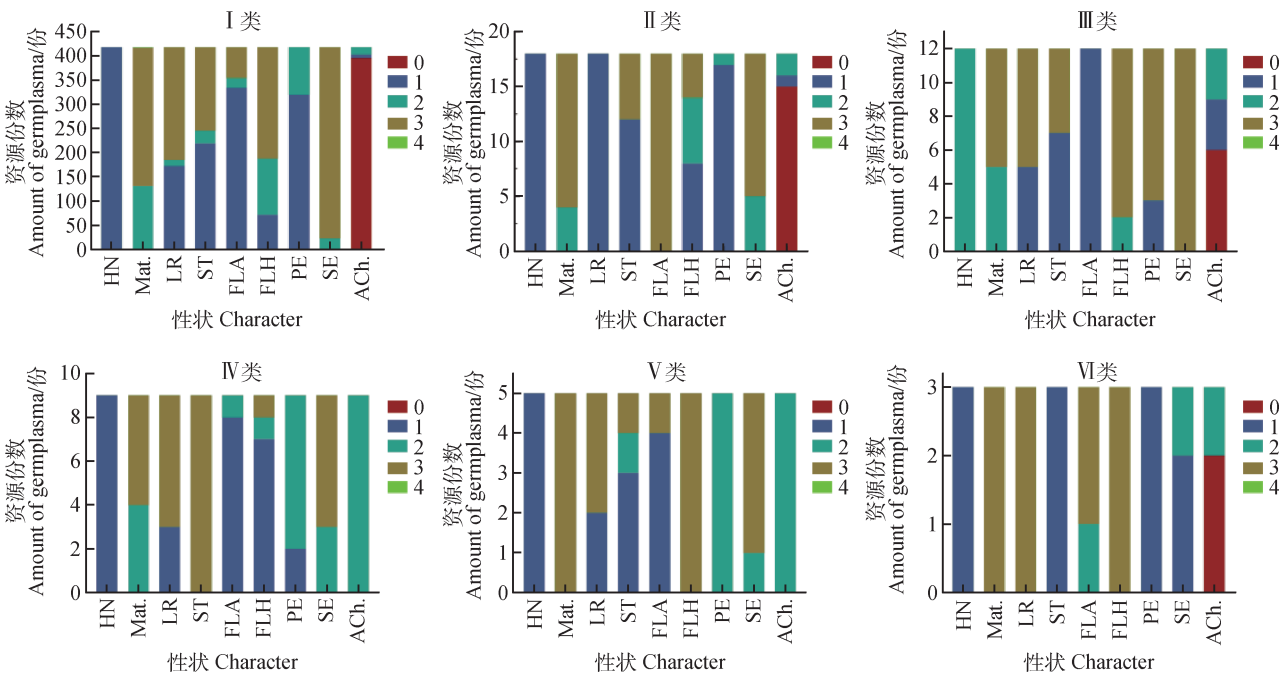


图 5 不同类群的质量表型性状特征  
Fig. 5 Qualitative traits of different groups

表 8 不同类群的数量表型性状特征  
Table 8 Quantitative traits of different groups

| 性状<br>Character |         | 种质群 Germplasm groups |          |           |         |        |         |
|-----------------|---------|----------------------|----------|-----------|---------|--------|---------|
|                 |         | I(418 份)             | II(18 份) | III(12 份) | IV(9 份) | V(5 份) | VI(3 份) |
| 株高              | Mean/cm | 125.51               | 130.93   | 112.26    | 138.21  | 124.86 | 97.59   |
| PH              | CV/%    | 14.59                | 8.38     | 14.58     | 10.33   | 11.60  | 19.95   |
| 茎粗              | Mean/mm | 4.02                 | 4.01     | 3.59      | 4.43    | 3.29   | 3.50    |
| SD              | CV/%    | 16.42                | 16.71    | 13.93     | 19.41   | 13.98  | 4.57    |
| 总分蘖数            | Mean/个  | 5.25                 | 6.67     | 5.17      | 5.07    | 7.04   | 7.20    |
| TT              | CV/%    | 39.62                | 43.48    | 24.56     | 38.46   | 31.39  | 44.44   |
| 有效分蘖数           | Mean/个  | 2.74                 | 3.40     | 3.10      | 3.09    | 4.20   | 2.87    |
| ET              | CV/%    | 37.96                | 41.76    | 26.45     | 33.66   | 28.81  | 44.95   |
| 叶量              | Mean/片  | 4.69                 | 5.06     | 4.57      | 4.89    | 4.56   | 4.60    |
| LB              | CV/%    | 12.79                | 16.80    | 10.50     | 15.34   | 28.73  | 20.00   |
| 旗叶长             | Mean/cm | 19.93                | 19.28    | 16.55     | 19.54   | 14.44  | 15.95   |
| FLL             | CV/%    | 20.07                | 19.14    | 22.42     | 31.83   | 32.20  | 21.94   |
| 旗叶宽             | Mean/cm | 1.42                 | 1.21     | 1.14      | 1.35    | 0.90   | 1.01    |
| FLW             | CV/%    | 28.17                | 26.45    | 19.30     | 29.63   | 38.89  | 28.71   |
| 生物鲜重            | Mean/g  | 38.70                | 41.80    | 27.24     | 43.86   | 32.39  | 22.84   |
| FW              | CV/%    | 36.64                | 37.42    | 25.92     | 35.89   | 39.80  | 54.42   |
| 生物干重            | Mean/g  | 8.77                 | 9.65     | 6.57      | 11.57   | 7.40   | 5.63    |
| DB              | CV/%    | 46.86                | 41.45    | 31.96     | 44.43   | 20.00  | 16.87   |
| 穗长              | Mean/cm | 22.32                | 24.87    | 19.39     | 24.71   | 19.29  | 18.85   |
| PL              | CV/%    | 15.68                | 43.18    | 10.68     | 19.10   | 23.33  | 15.28   |
| 小穗数             | Mean/个  | 39.98                | 36.84    | 25.10     | 48.84   | 27.04  | 19.67   |
| SN              | CV/%    | 32.54                | 34.64    | 25.74     | 30.81   | 36.46  | 35.89   |
| 轮层数             | Mean/层  | 5.45                 | 5.54     | 4.47      | 5.96    | 4.84   | 4.73    |
| NSL             | CV/%    | 15.05                | 13.36    | 11.86     | 21.98   | 20.45  | 10.57   |
| 千粒重             | Mean/g  | 29.84                | 29.08    | 26.44     | 27.14   | 24.93  | 28.11   |
| TKW             | CV/%    | 15.92                | 14.92    | 18.23     | 23.80   | 28.36  | 17.54   |

类群II包含18份材料,占比3.87%:其中叶量(5.06片)、穗长(24.87 cm)的平均值及穗长的CV(43.18%)为各类群最大。质量性状均为中熟、100%抗倒伏,茎粗度以细茎为主(占66.67%),旗叶全部为钝角且硬度分布广泛,穗以直立为主(占94.44%),小穗以下垂为主(占72.22%),无芒占比83.33%。

类群III包含12份材料,占比2.58%:是唯一包含裸燕麦的类群,该类群数量特征的平均值在各类群中相对稳定,其中轮层数(4.47层)的平均值和总分蘖数(24.56%)、有效分蘖数(26.45%)、叶量(10.50%)、旗叶宽(19.30%)、生物鲜重(19.30%)、穗长(10.68%)、小穗数(25.74%)的CV为各类群最小。质量性状以中熟、不抗倒伏(58.33%)、细茎(58.33%)为主,旗叶全部为锐角且挺直(83.33%),穗以下垂为主(75.00%),小穗则全部下垂,同时无芒占比50.00%。

类群IV包含9份材料,占比1.94%:该类群株高(138.21 cm)、茎粗(4.43 mm)、生物鲜重(43.86 g)、生物干重(11.57 g)、小穗数(48.84个)、轮层数(5.96层)的平均值和茎粗(19.41%)、轮层数(21.98%)的CV为各类群最大。并且,该类群全部为粗茎,不抗倒伏占66.67%,旗叶角度以锐角为主(88.89%)且多弯曲(77.78%),穗半直立(77.78%)全部为强芒。

类群V包含5份材料,占比1.08%:该类群有效分蘖数(4.20个)的均值和叶量(28.73%)、旗叶长(32.20%)、旗叶宽(38.89%)、小穗数(36.46%)、千粒重(28.36%)的CV为各类群最大。质量性状以中熟(60.00%)、不抗倒伏(60.00%)、细茎(60.00%)为主,旗叶角度以锐角为主(80.00%)且全部挺直,穗全部半直立,小穗下垂(80.00%),且全为弱芒。

类群VI包含3份材料,占比0.65%:该类群总分蘖数(7.20个)的平均值和株高(19.95%)、总分蘖数(44.44%)、有效分蘖数(44.95%)、生物鲜重(54.42%)的CV为各类群最大。质量性状中全为细茎、中熟、不抗倒伏,旗叶以钝角为主(66.67%)且全挺直,穗全直立,直立小穗和无芒占比均为66.67%。

### 3 讨论

#### 3.1 燕麦表型性状的遗传多样性分析

植物表型性状作为基因型与环境互作的直观

表现,其遗传多样性的分析对种质资源评价、基因挖掘及品种选育具有重要价值<sup>[14]</sup>,当前已广泛应用于小麦<sup>[9]</sup>、水稻<sup>[18]</sup>、玉米<sup>[12]</sup>和燕麦<sup>[19]</sup>等作物的评价和筛选中。本试验对465份燕麦种质资源的表型性状分析表明,质量性状中旗叶硬度、茎粗度、抗倒伏性的遗传多样性指数较高,表明其对环境适应能力较强。此外,本研究中芒相关性状(芒型、芒色)及小穗直立性的遗传多样性较低,与耿小丽等<sup>[7]</sup>研究结果基本一致;其次皮裸性的遗传多样性指数最低,与梁国玲等<sup>[15]</sup>研究燕麦穗部性状遗传多样性结果类似,这与种质组成中皮燕麦占绝对优势的结果一致,反映了定向选择对籽粒性状的连带效应。

数量性状的遗传多样性分析显示,株高、生物鲜重、生物干重和穗长等遗传多样性指数较高,而总分蘖数和有效分蘖数遗传多样性指数较低。本研究结果与先前多项研究的结论既有吻合也有差异。一方面,在性状遗传多样性的高低趋势上,与孙艳楠等<sup>[20]</sup>(株高、穗长较高等,分蘖数最低)及张琦等<sup>[21]</sup>(单株鲜重、干重较高等,分蘖数最低)的报道基本一致。另一方面,与张坤等<sup>[22]</sup>的结论(主穗小穗数、粒重较高等,穗长最低)不一致。这些差异可能与所考察的性状、所用种质资源的种类与数量,以及种植环境的不同有关。有研究表明,变异系数大于10%即可表示样本间差异较大<sup>[22-23]</sup>,本研究中燕麦各品种数量性状的变异系数均高于13%,表明供试的种质间存在显著差异。其中,生物干重、总分蘖数及有效分蘖数变异系数较大,与孙艳楠等<sup>[20]</sup>报道的分蘖数变异最大一致。综上,供试种质在质量性状上遗传背景相对单一,而数量性状则展现出丰富的遗传多样性,可以为燕麦品种改良提供丰富、优良的亲本材料。

#### 3.2 燕麦表型性状之间的相关性

相关性分析表明,不同燕麦资源的表型性状间存在不同程度的相关性。主要生长性状(株高、茎粗、分蘖数)均与生物量(鲜重/干重)呈极显著正相关( $P<0.01$ ),这与谢楠等<sup>[24]</sup>、孙建平<sup>[25]</sup>研究发现类似,即茎部相关性状是影响饲草产量的重要因子。虽然有效分蘖能通过增加茎、叶数量提升生物量,但也存在负面效应。植株内部养分资源总量是有限的,过多的有效分蘖会导致资源供给分散,进而抑制叶片扩展与籽粒充实<sup>[26]</sup>。这可能是本研究中观察到有效分蘖数与旗叶长、宽和小穗数呈显著

负相关( $P<0.05$ )的重要生物学基础。

其次,千粒重与旗叶长宽、茎粗呈显著正相关( $P<0.05$ ),表明较大的光合器官(旗叶)可能提供更多同化物用于籽粒灌浆,这与杨丽丽等<sup>[27]</sup>研究小麦粒重的提高与灌浆速率密切相关的结论一致;而较强的茎秆则有助于支撑和运输,共同促进籽粒充实<sup>[28]</sup>。然而,千粒重与小穗数和轮层数均存在负相关趋势( $P>0.05$ ),同时,小穗数与旗叶长(宽)和轮层数均存在极显著正相关关系( $P<0.01$ )。表明轮层数多的植株通常具有更多的小穗,而小穗数直接决定潜在籽粒数;值得注意的是,虽然宽大旗叶有利于光合生产,但轮层数增多带来的小穗增加意味着潜在籽粒数显著上升<sup>[29]</sup>,进而在有限的光合产物和资源条件下,植株通过增加小穗数和轮层数提升潜在粒数的策略,可能导致单粒物质分配减少,最终降低千粒重,这与哈雪等<sup>[30]</sup>对草地早熟禾的研究结果一致。

倒伏作为制约燕麦产量的重要因素,其抗性机制表现为多性状协同作用<sup>[31]</sup>。在燕麦<sup>[32]</sup>、小麦<sup>[33]</sup>和水稻<sup>[34]</sup>的相关研究中,研究者发现,株高并不是决定抗倒性的唯一因素,作物的抗倒能力还与茎秆强度、叶部特性相关。在本研究中,燕麦株高与抗倒伏性虽呈正相关趋势,这与梁国玲等<sup>[31]</sup>研究高寒区不同燕麦品种茎秆特性与抗倒伏性的结果类似,进一步验证了株高并非抗倒伏的最主要影响因素。其次,抗倒伏性与千粒重呈显著负相关( $P<0.05$ ),同时与旗叶长和旗叶宽也存在负相关趋势,这表明更高的千粒重及更大的叶片会提升植株重心,从而增加倒伏风险。这一结论与薛军等<sup>[35]</sup>的研究相符,即玉米基部节间较长的植株会直接导致穗位和重心高度上移,降低植株的稳定性。而且,过大的叶片虽能通过光合作用产生更多可溶性碳水化合物,但这些资源可能被优先用于节间伸长等营养生长,而非用于强化茎秆机械组织,因此倒伏风险较大。此外,分蘖数的增加虽然能显著提升生物量[总分蘖和有效分蘖与生物干重均呈显著正相关( $P<0.05$ )],但也加剧了倒伏风险。分析表明,有效分蘖数和总分蘖数与抗倒伏性均呈现负相关趋势,尽管该相关性未达显著水平,这一结果进一步证实了,多蘖型植株往往因茎秆相对细弱而更易倒伏<sup>[36]</sup>。因此,要实现抗倒高产的目标,关键在于优化株型结构并平衡籽粒产量与抗倒伏能力的关系。

### 3.3 基于燕麦表型性状的育种潜力分析

本研究通过多元统计分析,系统评估了465份燕麦种质的表型特征及其育种潜力,为饲用燕麦的遗传改良提供了重要的理论依据。主成分分析中各主成分表型性状因子可为育种过程中性状定向选择和潜力挖掘提供方向<sup>[37]</sup>。本研究提取到7个主成分因子,体现了不同的性状特征,其中PC<sub>1</sub>反映植株主要器官的形态;PC<sub>2</sub>体现整体生长势与生殖特性;PC<sub>3</sub>关联生物量积累与分蘖能力;PC<sub>4</sub>~PC<sub>7</sub>则分别对应产量分配、形态结构稳定性、穗部与旗叶形态以及籽粒特性等类型特征。聚类分析可根据资源的特点将其划分为不同的类型,便于科学选配差异较大的材料,从而为杂交育种提供依据<sup>[38]</sup>。本研究基于Ward法将465份燕麦资源分为六个类群,这与赵芳等<sup>[11]</sup>采用Ward离差平方法将224份谷子分为六个类群,梁国玲等<sup>[15]</sup>在欧式遗传距离为20处将590份皮燕麦聚为5个类群的方法一致。本研究结果将供试材料划分为六个类群:类群I为高产稳定型,兼具高生物量潜力和丰富的表型多样性,可作为广适性亲本库;类群II是抗倒伏核心种质;类群III属于粮用育种的优选资源;类群IV表现为高产但易倒伏;类群V和VI则构成高遗传多样性种质库。因此,基于本研究,可以进一步构建燕麦定向育种核心资源库。

## 4 结论

本研究对465份燕麦种质资源进行了系统表型分析。结果表明,供试种质在质量性状上遗传背景相对单一,而在数量性状上表现出丰富的遗传多样性。相关性分析显示,株高、茎粗及分蘖数等性状与产量及抗倒伏性均存在显著关联。基于主成分分析(特征值 $>1$ )的综合评分,筛选出5份在产量和抗倒伏方面表现优异的种质(174, Y586, Y1062, Y341, 150)。聚类分析则进一步将465份种质划分为六个具有不同育种潜力的资源群。综上,本研究通过系统解析465份燕麦的关键表型性状及其关系,明确了各类群的育种价值,为后续科学的亲本选配提供了重要依据。

## 参考文献

- [1] 张波,任长忠. 燕麦基因组学与分子育种研究进展[J]. 植物学报, 2022, 57(6): 785-791  
ZHANG B, REN C Z. Advances in oat genomic research and

- molecular breeding[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6):785-791
- [2] 叶雪玲,甘圳,万燕,等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. 草业学报,2023,32(2):160-177  
YE X L, GAN Z, WAN Y, et al. Advances and perspectives in forage oat breeding[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 160-177
- [3] 闫庆忠. 燕麦草的饲用价值及加工方式[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(12):138-140  
YAN Q Z. Feeding value and processing mode of oat grass[J]. Special Economic Animals and Plants, 2022, 25(12):138-140
- [4] 任长忠,同金婷,董锐,等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12):438-446  
REN C Z, YAN J T, DONG R, et al. Research progress on oat nutrients, functional properties and related products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12):438-446
- [5] 景芳,边芳,任生兰,等. 半干旱地区燕麦种子产量及其相关农艺性状[J]. 草业科学, 2024, 41(2):356-370  
JING F, BIAN F, REN S L, et al. Analysis of oat seed yield and related agronomic characteristics in semi-arid regions[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(2):356-370
- [6] 周青平,胡晓炜,汪辉,等. 燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用[J]. 草业学报, 2024, 33(10):171-182  
ZHOU Q P, HU X W, WANG H, et al. The important role of oat in reinforcing the foundation of food security[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10):171-182
- [7] 耿小丽,张榕,张少平,等. 130份燕麦种质表型性状多样性分析及评价[J]. 草业科学, 2020, 37(10):2022-2034  
GENG X L, ZHANG R, ZHANG S P, et al. Comprehensive evaluation of the phenotypic diversity of 130 oat germplasms[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(10):2022-2034
- [8] 南铭,马宁,刘彦明,等. 燕麦种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1):262-267  
NAN M, MA N, LIU Y M, et al. Genetic diversity analysis on agronomic characteristics of oat germplasms[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1):262-267
- [9] 许娜丽,王新华,马冬花,等. 251份小麦种质资源的主要农艺与品质性状遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9):2404-2416  
XU N L, WANG X H, MA D H, et al. Genetic diversity analysis of main agronomic and quality traits of 251 wheat germplasm resources[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(9): 2404-2416
- [10] 刘伟,张荣昌,付久才,等. 黑龙江省水稻种质资源农艺性状与产量关系的分析[J]. 中国稻米, 2016, 22(3):39-42  
LIU W, ZHANG R C, FU J C, et al. Relationship analysis between agronomic characteristics and yield of rice germplasm resources in Heilongjiang Province[J]. China Rice, 2016, 22(3):39-42
- [11] 赵芳,魏玮,张晓磊,等. 224个谷子品种农艺性状聚类和相关性分析[J]. 种子, 2022, 41(1):74-83  
ZHAO F, WEI W, ZHANG X L, et al. Clustering and correlation analysis of agronomic traits of 224 millet varieties[J]. Seed, 2022, 41(1):74-83
- [12] 李淑芳,李鹤南,刘晓冬,等. 205份玉米种质资源表型性状遗传多样性分析及优异种质筛选[J]. 玉米科学, 2023, 31(5):1-10  
LI S F, LI H N, LIU X D, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits and selection of superior germplasm in 205 maize germplasm resources[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(5):1-10
- [13] 贾志锋,马祥,雷生春,等. 燕麦种质资源在青海生态区的形态多样性评价[J]. 种子, 2019, 38(12):58-63  
JIA Z F, MA X, LEI S C, et al. Evaluation of morphological diversity of oat germplasm resources in Qinghai ecological area[J]. Seed, 2019, 38(12):58-63
- [14] 王建丽,马利超,申忠宝,等. 基于遗传多样性评估燕麦品种的农艺性状[J]. 草业学报, 2019, 28(2):133-141  
WANG J L, MA L C, SHEN Z B, et al. An evaluation of agronomic traits and genetic diversity among 51 oat germplasm accessions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2):133-141
- [15] 梁国玲,刘文辉,马祥. 590份皮燕麦种质资源穗部性状遗传多样性分析[J]. 草地学报, 2021, 29(3):495-503  
LIANG G L, LIU W H, MA X. Phenotypic diversity of the panicle among 590 covered oats germplasm resources in apline of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(3):495-503
- [16] 郑殿升,王晓鸣,张京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社, 2006:1-21  
ZHENG D S, WANG X M, ZHANG J. Descriptive norms and data standards for oat germplasm resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 1-21
- [17] 王淑君,解慧芳,邢璐,等. 基于主成分分析和灰色关联度分析的谷子品种(系)综合评价[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(15):42-49  
WANG S J, XIE H F, XING L, et al. Comprehensive evaluation of foxtail millet varieties (lines) based on principal component analysis and grey relational analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(15):42-49.
- [18] 邓伟,吕莹,董阳均,等. 云南水稻种质资源的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(3):624-635  
DENG W, LÜ Y, DONG Y J, et al. The genetic diversity analysis of rice germplasm resources in Yunnan Province of China[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(3):624-635
- [19] 雷雄,游明鸿,白史旦,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[J]. 草业学报, 2020, 29(7):131-142  
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[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(7):131-142
- [20] 孙艳楠,路耿新,唐超,等. 134份皮燕麦种质资源生物学性状遗传多样性分析[J]. 草地学报, 2023, 31(9):2684-2692  
SUN Y N, LU G X, TANG C, et al. Genetic diversity of bio-

- logical characters in 134 covered oats germplasm resources[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(9):2684-2692
- [21] 张琦,魏臻武,闫天芳,等. 燕麦种质资源农艺性状遗传多样性的鉴定评价[J]. *草地学报*, 2021, 29(2):309-316  
ZHANG Q, WEI Z W, YAN T F, et al. Identification and evaluation of genetic diversity of agronomic traits in oat germplasm resources [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29 (2): 309-316
- [22] 张坤,颜红波,周青平,等. 42份燕麦种质资源农艺性状多样性研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(4):11-16,26  
ZHANG K, YAN H B, ZHOU Q P, et al. Analysis of genetic diversity of biological characters on 42 oat germplasm resources[J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science Edition)*, 2014, 32(4):11-16,26
- [23] 孙铭,符开欣,范彦,等. 15份多花黑麦草优良引进种质的表型变异分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(4):655-662  
SUN M, FU K X, FAN Y, et al. Analysis of phenotypic variations in 15 introduced elite germplasm of *Lolium multiflorum* lam [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17 (4): 655-662
- [24] 谢楠,刘振宇,冯伟,等. 饲用谷子在环渤海盐碱旱地的生产性能及饲用品质评价[J]. *草地学报*, 2021, 29(1):60-71  
XIE N, LIU Z Y, FENG W, et al. The production performance and forage quality of forage millet in saline alkali dryland around Bohai Sea[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(1):60-71
- [25] 孙建平,薛竹慧,杨国义,等. 施氮对晋北燕麦饲草主要农艺性状及干物质产量的影响[J]. *草地学报*, 2018, 26(4):964-970  
SUN J P, XUE Z H, YANG G Y, et al. Effects of nitrogen addition on the yield and quality of oat in northern Shanxi[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(4):964-970
- [26] YUAN S, LI Y, PENG S B. Leaf lateral asymmetry in morphological and physiological traits of rice plant[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6):e0129832
- [27] 杨丽丽,任建宏,刘溢建,等. 小麦花后水分亏缺和复水对同化物转运和籽粒灌浆的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(11):1909-1918  
YANG L L, REN J H, LIU Y J, et al. Effect of water deficit and rehydration on the post-flowering assimilate transport and grain filling in wheat [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(11):1909-1918
- [28] ZHONG Y N, ZHANG T, QIAO W J, et al. Optimizing canopy spacing configuration enhances foxtail millet grain yield and water productivity by improving stalk lodging resistance in the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 158:127230
- [29] CUI Z L, CHEN X P, LI J L, et al. Effect of N fertilization on grain yield of winter wheat and apparent N losses [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(6):806-812
- [30] 哈雪,张金青,宋于笑,等. 5份草地早熟禾种子产量性状相关指标综合评价与分析[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(12):61-71  
HA X, ZHANG J Q, SONG Y X, et al. Comprehensive evaluation of seed yield traits in five varieties of Kentucky bluegrass[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(12):61-71
- [31] 梁国玲,张永超,贾志锋,等. 高寒区不同燕麦品种(系)表型性状和茎秆力学特征与抗倒伏性的关系研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(4):58-69  
LIANG G L, ZHANG Y C, JIA Z F, et al. A study of the relationship between phenotypic traits, stem mechanical traits and lodging resistance of oat varieties for alpine regions [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(4):58-69
- [32] 张向前,刘景辉,齐冰洁,等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(2):168-174  
ZHANG X Q, LIU J H, QI B J, et al. Cluster diversity analysis of the main agronomic traits in oat germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(2):168-174
- [33] 苏亚蕊,孙少光,刘浩婷,等. 不同小麦品种(系)抗倒伏性状多样性分析[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(10):1238-1246  
SU Y R, SUN S G, LIU H T, et al. Diversity of lodging resistance traits of different wheat varieties (lines) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(10):1238-1246
- [34] 顾汉柱,王琛,张瑛,等. 水稻茎秆抗倒伏评价及其生理机制研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(21):1-7  
GU H Z, WANG C, ZHANG Y, et al. Research progress on lodging resistance evaluation of rice stem and its physiological mechanism [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51 (21): 1-7
- [35] 薛军,王克如,谢瑞芝,等. 玉米生长后期倒伏研究进展[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(10):1845-1854  
XUE J, WANG K R, XIE R Z, et al. Research progress of maize lodging during late stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10):1845-1854
- [36] 郭翠花,高志强,苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3):151-155  
GUO C H, GAO Z Q, MIAO G Y. Relationship between lodging and mechanical characteristics of winter wheat stem under different yield levels [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3):151-155
- [37] 罗小婷,刘行发,蔡长福,等. 福建武夷朱砂根种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2025, 26(2):296-308  
LUO X T, LIU X F, CAI C F, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits in *Ardisia crenata* germplasm resources in Wuping, Fujian [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2025, 26(2):296-308
- [38] 郭强,江清梅,何洪良,等. 基于主成分分析和聚类分析评价141份中蔗优良品系资源[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(1):49-59  
GUO Q, JIANG Q M, HE H L, et al. Evaluation of 141 excellent Zhongzhe sugarcane germplasms based on principal component analysis and cluster analysis [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(1):49-59