

DOI:10.11686/cyxb2024313

http://cyxb.magtech.com.cn

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.

BAI Xiao-hong, CHEN Wen-yan, LI Qin, et al. Seed germination and seedling growth characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* from different provenances. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 196—209.

不同种源乌拉尔甘草种子萌发及幼苗生长比较研究

白小红^{1,2,3,4}, 陈文燕^{1,2,3,4}, 李琴^{1,2,3,4}, 王奕璇^{1,2,3,4}, 张雪^{1,2,3,4*}, 王磊^{1,2,3,4}, 曲文杰^{1,2,3,4}, 朱林^{1,2,3,4}

(1. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 3. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏黄河湿地生态系统国家定位观测研究站, 宁夏 银川 750021)

摘要:通过对8个不同种源乌拉尔甘草种子萌发及幼苗生长特性的比较研究, 结果发现: 不同种源乌拉尔甘草种子萌发特性和幼苗形态特征均存在显著差异($P < 0.05$), 遗传多样性指数为1.21~1.91, 变异系数为11.05%~83.55%。伊犁种子在各温度下具有较高的发芽率, 说明其对萌发温度具有较高的耐受性。种子长度、宽度与种子发芽率、发芽指数均呈极显著负相关($P \leq 0.01$), 种子千粒重与种子发芽势呈极显著负相关($P \leq 0.01$), 株高与种子发芽率呈极显著正相关($r = 0.59$, $P \leq 0.01$)。隶属函数法综合评价表明, 赤峰种源品质最好, 综合评价D值为0.89, 其后依次为会宁和杭锦旗, D值分别为0.83和0.75, 可作为人工育种的优质资源。

关键词: 乌拉尔甘草; 表型性状; 种子萌发特性; 综合评价

Seed germination and seedling growth characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* from different provenances

BAI Xiao-hong^{1,2,3,4}, CHEN Wen-yan^{1,2,3,4}, LI Qin^{1,2,3,4}, WANG Yi-xuan^{1,2,3,4}, ZHANG Xue^{1,2,3,4*}, WANG Lei^{1,2,3,4}, QU Wen-jie^{1,2,3,4}, ZHU Lin^{1,2,3,4}

1. College of Ecological Environment of Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Yellow River Wetland Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Yinchuan 750021, China

Abstract: In this research a comparative study of seed germination and seedling growth characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* germplasm lines of eight different provenances was conducted. It was found that there were significant differences in seed germination characteristics and seedling morphological characteristics among different accessions of *G. uralensis* ($P < 0.05$). The genetic diversity index ranged from 1.21 to 1.91, and the coefficient of variation ranged from 11.05% to 83.55%. Seeds from Yili were found to have higher germination rate at a range of different temperatures, indicating that they tolerate a wide range of germination temperatures. Seed length and width were significantly negatively correlated with seed germination rate and seed germination index ($P \leq 0.01$). 1000-seed weight was significantly negatively correlated with seed germination vigor ($P \leq 0.01$). Plant height was significantly positively correlated with seed germination rate ($r = 0.59$, $P \leq 0.01$). A multi-trait evaluation using a membership

收稿日期: 2024-08-08; 改回日期: 2024-10-08

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BEG2012)和宁夏科技创新领军人才项目(2021GKLRX13)资助。

作者简介: 白小红(2001—), 女, 回族, 宁夏吴忠人, 在读硕士。E-mail: 3295918908@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhxue@nxu.edu.cn

function method showed that the quality of seed lines from Chifeng provenance was the best, with a comprehensive evaluation D value of 0.89, followed by Huining and Hangjinqi, with comprehensive evaluation D values of 0.83 and 0.75, respectively. These three germplasm lines could therefore be used as high-quality resources for artificial breeding.

Key words: *Glycyrrhiza uralensis*; phenotypic characteristics; germination characteristics; comprehensive evaluation

乌拉尔甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)为豆科甘草属(*Glycyrrhiza*)多年生草本植物,其根因甘草甜素而具有甜味,故别名甜根子、甜草、甜草苗等^[1-2]。甘草属植物分布广泛,世界共有分布种为29种,其中中国分布有14种,主要分布在宁夏、陕西、新疆、甘肃及内蒙古和辽宁、吉林等地区^[3]。乌拉尔甘草作为西北干旱荒漠区的特有分布种,不仅具有良好的防风、固土和固沙等生态功能^[4],还具有抗炎^[5-6]、抗氧化^[7]、免疫活性剂^[8]、保肝^[9]和抗哮喘^[10]等药用价值,可用于治疗呼吸系统、胃病和肝脏疾病等^[11]。近年来,随着种植规模的不断扩大和种植技术的不断进步,乌拉尔甘草种植已经成为西北地区重要的农业经济产业项目^[12]。乌拉尔甘草的人工种植不仅在西北地区的农业经济发展中具有重要地位,而且对生物多样性维护和生态修复也具有重要意义。因此,开展针对乌拉尔甘草种质资源的优选对其人工种植与育苗工作的推进具有重要价值。

目前,关于乌拉尔甘草的研究主要集中在有效成分的药用活性^[13-14]、药材质量分析^[15-16]、抗逆性^[17]等方面。少量研究表明乌拉尔甘草幼苗的形态特征以及种子萌发特性存在差异。孙群等^[18]通过对34个种源的乌拉尔甘草叶长、叶宽、甘草酸等7个性状进行差异分析,发现其具有较高的遗传多样性。李文斌等^[19]依据不同种源乌拉尔甘草形态学性状和化学成分,对其遗传多样性进行综合分析,发现甘草种质主要形态性状和化学成分的遗传多样性较为丰富,并筛选出6个品质优异的甘草种质。魏胜利等^[20-21]发现不同种群乌拉尔甘草形态性状、种子形态特征和萌发特性存在显著的地理变异,且水分与温度是导致其地理变异产生的主要气候因子。刘长乐等^[22]和魏胜利等^[23]发现水分胁迫对不同种源乌拉尔甘草种子萌发和幼苗生长特性具有显著差异性影响,随着地理经度的增加,不同种源乌拉尔甘草种子发芽率对干旱胁迫的敏感性逐渐增加,但不同种源乌拉尔甘草种子萌发特性对温度变化的响应特征尚不清楚。

综上,本研究以不同种源地的乌拉尔甘草种质资源为材料,对其种子形态特征、萌发特性以及幼苗表型性状进行比较分析,以期揭示不同种源野生乌拉尔甘草种子形态特性、萌发特性和幼苗生长特性之间的差异性和相关性,进行乌拉尔甘草种质资源优选,为后续人工育种所用遗传资源的选择提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2023年在宁夏灵武市白芨滩种质资源圃内开展。该地区平均海拔为1250 m,属于大陆性季风气候,年平均降水量为192.9 mm,年平均气温为10.4℃,积温为3551.3℃,年平均日照时数为2717 h,土壤类型以灰钙土和风沙土为主^[24-25]。选择种质资源圃内8个不同种源的二年生乌拉尔甘草幼苗作为试验对象,种源依次为:内蒙古杭锦旗(Hangjinqi, HJQ)、新疆阿勒泰(Aletai, ALT)、新疆库尔勒(Kuerle, KEL)、新疆伊犁(Yili, YL)、新疆石河子(Shihezi, SHZ)、内蒙古赤峰(Chifeng, CF)、甘肃会宁(Huining, HN)、宁夏盐池(Yanchi, YC)。

1.2 测定方法

1.2.1 种子形态性状测定 在不同种源中选取形状完整、无虫害、无霉变的成熟乌拉尔甘草种子,每个种源进行5个重复,每个重复100粒种子,用种子分析仪(Opto agri, 上海)测量种子长度、宽度、千粒重、圆度、长宽比、周长、直径。

1.2.2 种子萌发性状测定 选取形状完整、无虫害、无霉变的成熟乌拉尔甘草种子,用5%次氯酸钠进行消毒,用蒸馏水反复清洗后将种子均匀铺在设有双层滤纸的一次性长方形餐盒内,并用5 mL蒸馏水浸湿滤纸。每

个处理5个重复,每个重复100粒种子。通过设置光照培养箱(YTGP-300B,北京)(夜间/白天)温度,共5℃/10℃、10℃/15℃、15℃/20℃、20℃/25℃、25℃/30℃和30℃/35℃这6个温度梯度来测定种子萌发特性。每个温度下设置光照处理条件为光暗交替(10 h黑暗/14 h光照),75%相对湿度(relative humidity, RH)、光照强度15000 lx,置于光照培养箱内作发芽培养。以胚根突破种皮为准^[26],每隔24 h观察并记录种子萌发数量,直到连续7 d没有新的种子萌发为止。各参数计算公式如下:

$$\text{发芽率}(\%) = (n/N) \times 100$$

式中: n 为规定时间萌发种子数, N 为供试种子总数^[27]。

$$\text{发芽势}(\%) = (\text{种子发芽达到高峰时的发芽数} / \text{供试种子总数}) \times 100$$

$$\text{发芽指数} = \sum(G_t/D_t)$$

式中: G_t 为 t 天的发芽数, D_t 为相应的发芽天数^[28]。

1.2.3 幼苗表型性状测定 于2023年10月开展8个种源的乌拉尔甘草野外采样工作。每个种源随机选取10株长势一致的健康植株,测量其株高(plant height, PH)、冠幅(crown width, CW)、基茎(basal stem, BS),并依次采集各植株根、茎、叶装入自封袋进行编号,将编号样品带回实验室储存备用。用电子分析天平(ME204E,上海)称量叶片鲜重(leaf fresh weight, LFW);用数字化扫描仪(Epson scanner,上海)选取没有病虫害的叶片进行扫描,并运用Win-FOLIA Pro 2016b图像分析软件对叶长(leaf length, LL)、叶宽(leaf width, LW)和叶面积(leaf area, LA)进行分析测量;选取6个叶片测量叶片厚度(leaf thickness, LT)^[29]。表型指标测量后将叶片装入信封袋放入烘箱(105℃ 2 h, 65℃ 48 h),待样品烘至恒重,取出称量并记录叶片干重(leaf dry weight, LDW)。计算比叶面积(specific leaf area, SLA)、叶组织密度(leaf tissue density, LTD)、叶片干物质含量(leaf dry matter content, LDMC)^[29]、叶形指数(leaf index, LI)^[30]、叶片总含水量(total water content, TWC)^[31]。计算公式如下:

$$\text{比叶面积}(\text{SLA}, \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) = \text{叶片面积}(\text{LA}, \text{cm}^2) / \text{叶片干重}(\text{LDW}, \text{g})$$

$$\text{叶组织密度}(\text{LTD}, \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = \text{叶片干重}(\text{g}) / \text{叶体积}(\text{cm}^3)$$

$$\text{叶体积}(\text{cm}^3) = \text{叶面积}(\text{cm}^2) \times \text{叶厚度}(\text{cm})$$

$$\text{叶形指数}(\text{LI}) = \text{叶长}(\text{LL}, \text{mm}) / \text{叶宽}(\text{LW}, \text{mm})$$

$$\text{叶片总含水量}(\text{TWC}, \%) = (\text{叶片鲜重} - \text{叶片干重}) / \text{叶片干重} \times 100$$

$$\text{叶片干物质含量}(\text{LDMC}) = \text{叶片干重}(\text{LDW}) / \text{叶片鲜重}(\text{LFW})$$

1.3 数据分析

利用Excel 2021进行数据整理,并计算多样性指数^[32]和变异系数^[33];利用SPSS软件对不同种源和不同温度间萌发指标进行单因素方差分析;利用Origin 2022进行Pearson相关性分析和主成分分析;利用隶属函数法进行综合评价;利用Origin 2022进行数据可视化绘图。其中,其他分析中所涉及的种子萌发指标均以各种源种子最佳萌发温度的指标为准。相关指标计算公式如下:

遗传多样性指数(Shannon Wiener, H'):根据各指标算出的平均值 \bar{X} 、标准差 δ ,将各指标分为10级,从第1级($\leq \bar{X} - 2.0\delta$)到第10级($> \bar{X} + 2.0\delta$),中间每级相差 0.5δ ,每一级相对频率用于计算多样性指数。计算公式为 $H' = -\sum_{i=0}^9 P_i \ln P_i$,其中 P_i 为某性状第 i 个级别出现的频率。

$$\text{变异系数}(\text{variable coefficient}, \text{CV}) = \frac{\delta}{\bar{X}} \times 100\%$$

各指标隶属函数计算公式为:

$$U(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: $U(X_i)$ 为测定各指标的隶属函数值, X_i 为指标测定值; X_{\min} 为某一测定指标的最小值; X_{\max} 为某一测定指标的最大值。

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=0}^9 P_i}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=0}^n [U(X_i) \times W_i], i = 1, 2, 3 \dots n \quad (3)$$

式中: W_i 为第 i 个综合指标在所有指标中的重要程度, 即权重; P_i 为经主成分分析所得不同种源第 i 个综合指标的贡献率; D 为各种源乌拉尔甘草综合指标评价值。

2 结果与分析

2.1 种子表型性状

如表 1 所示, 通过对不同种源乌拉尔甘草种子表型性状进行分析发现, 乌拉尔甘草种子表型性状在不同种源之间差异性显著 ($P < 0.05$)。8 个种源的乌拉尔甘草种子表型性状遗传多样性指数 (H') 为 1.26~1.73, 平均为 1.41。其中乌拉尔甘草种子圆度遗传多样性指数最大, 为 1.73; 种子宽度遗传多样性指数最小, 为 1.26, 其余性状的遗传多样性指数大小依次为: 种子长宽比、千粒重 > 种子长度、周长、直径、面积。8 个种源乌拉尔甘草种子表型性状的平均变异系数为 6.08%, 变异幅度为 0.30%~12.02%, 其中种子面积变异系数最高 (12.02%), 种子圆度变异系数最低 (0.30%), 其余性状的变异系数依次为千粒重 > 周长 > 直径 > 长度、宽度 > 长宽比。

表 1 不同种源乌拉尔甘草种子表型性状

Table 1 Seed phenotypic traits of 8 different provenances of *G. uralensis*

项目 Items	种子长 Seed length (mm)	种子宽 Seed width (mm)	面积 Area (mm ²)	周长 Perimeter (mm)	直径 Diameter (mm)	长宽比 Length/width	圆度 Circularity	千粒重 1000-seed weight (g)
YL	2.97±0.01d	2.60±0.01d	5.80±0.05d	10.55±0.04d	2.71±0.01d	1.17±0.00a	1.01±0.00b	9.43±0.22d
YC	3.22±0.01b	2.84±0.00b	6.89±0.04b	11.53±0.03b	2.95±0.01b	1.16±0.00a	1.02±0.00a	11.96±0.14a
CF	3.35±0.02a	2.93±0.02a	7.42±0.07a	11.98±0.06a	3.06±0.02a	1.16±0.01a	1.02±0.00a	11.70±0.24a
ALT	2.95±0.01d	2.58±0.01d	5.71±0.04d	10.48±0.04d	2.69±0.01d	1.16±0.00a	1.01±0.00a	9.02±0.11d
KEL	2.96±0.01d	2.60±0.01d	5.75±0.05d	10.50±0.04d	2.70±0.01d	1.16±0.00a	1.01±0.00a	9.11±0.13d
HJQ	3.35±0.02a	2.93±0.02a	7.45±0.08a	11.99±0.07a	3.06±0.02a	1.16±0.00a	1.02±0.00a	11.27±0.15b
HN	3.37±0.04a	2.94±0.03a	7.51±0.15a	12.06±0.13a	3.08±0.03a	1.17±0.00a	1.02±0.00a	11.83±0.37a
SHZ	3.05±0.01c	2.66±0.01c	6.10±0.05c	10.83±0.05c	2.78±0.01c	1.17±0.00a	1.02±0.00a	10.29±0.16c
CV (%)	5.80	5.80	12.02	6.19	5.94	0.61	0.30	11.99
H'	1.32	1.26	1.32	1.32	1.32	1.49	1.73	1.49

YL: 伊犁 Yili; YC: 盐池 Yanchi; CF: 赤峰 Chifeng; ALT: 阿勒泰 Aletai; KEL: 库尔勒 Kuerle; HJQ: 杭锦旗 Hangjinqi; HN: 会宁 Huining; SHZ: 石河子 Shihezi; CV: 变异系数 Variable coefficient; H' : 遗传多样性指数 Shannon Wiener. 表中数据为平均值±标准误差, 不同小写字母表示不同种源间差异显著 ($P < 0.05$)。The data in the table are mean±standard error, and different lowercase letters indicate the significant differences among different provenances ($P < 0.05$). 下同 The same blow.

2.2 种子萌发特性

2.2.1 种子发芽率 本研究结果表明, 不同种源乌拉尔甘草种子发芽率在同一温度条件下具有显著性差异 ($P < 0.05$, 图 1), 其中, YL、ALT 和 KEL 种源种子在各温度处理下均表现出较高的发芽率, 而 YC 的种子发芽率相对较低 ($P > 0.05$)。除 YL、ALT、KEL 外, 同一种源乌拉尔甘草种子发芽率在不同温度处理下有显著差异 ($P < 0.05$)。比如 YC 种子在 15 °C/20 °C 时发芽率最高; SHZ 在 25 °C/30 °C、30 °C/35 °C 的温度处理下种子发芽率较高; HN 在 10 °C/15 °C 温度处理下种子发芽率最高; HJQ 在 10 °C/15 °C、20 °C/25 °C 和 25 °C/30 °C 温度处理下种子发芽率较高; CF 种子在 30 °C/35 °C 处理下的发芽率显著低于其他温度; 而 YL 种源种子发芽率在各温度处理下均不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.2.2 种子发芽势 图 2 表明, 同一温度条件下不同种源乌拉尔甘草种子发芽势均有显著性差异 ($P < 0.05$)。在 15 °C/20 °C 和 25 °C/30 °C 中, KEL、ALT 和 YL 的种子发芽势均高于其他种源 ($P > 0.05$); 在 20 °C/25 °C 中, ALT 种子发芽势最高 ($P < 0.05$), 为 57.6%; 在 30 °C/35 °C 时, KEL 和 YL 种子发芽势较高, 而在 5 °C/10 °C 时, YL 和 ALT 种子发芽势较高。不同温度下乌拉尔甘草种子的发芽势均有显著性差异 ($P < 0.05$)。YC 种源的乌拉尔

甘草种子在15℃/20℃时发芽势显著高于其他温度($P<0.05$),发芽势为16.40%;KEL、HN、HJQ在10℃/15℃时种子发芽势显著高于25℃/30℃和30℃/35℃($P<0.05$)。

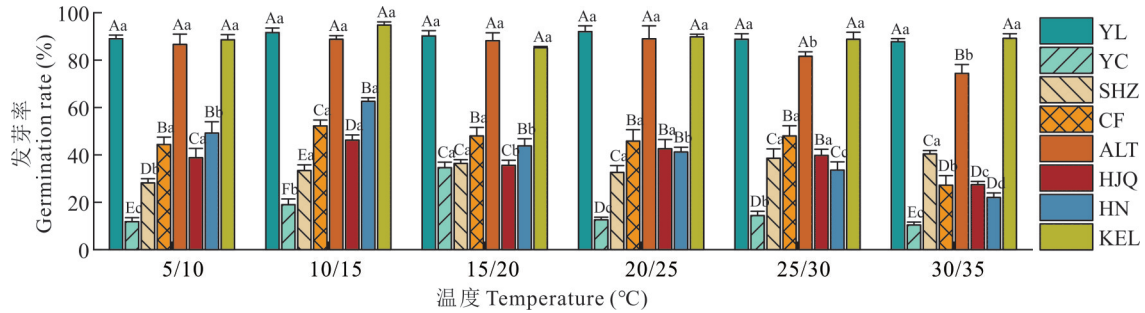


图1 乌拉尔甘草种子发芽率

Fig. 1 *G. uralensis* seed germination rate

大写字母表示在同一温度下种源间差异性显著($P<0.05$);小写字母表示同一种源在不同温度间差异性显著($P<0.05$)。其中温度处理为夜间/白天。The uppercase letters indicate that there is a significant differences among provenances at the same temperature ($P<0.05$); The lowercase letters indicate significant differences among different temperatures at the same provenances ($P<0.05$). The temperature treatment is night/day. 下同 The same below.

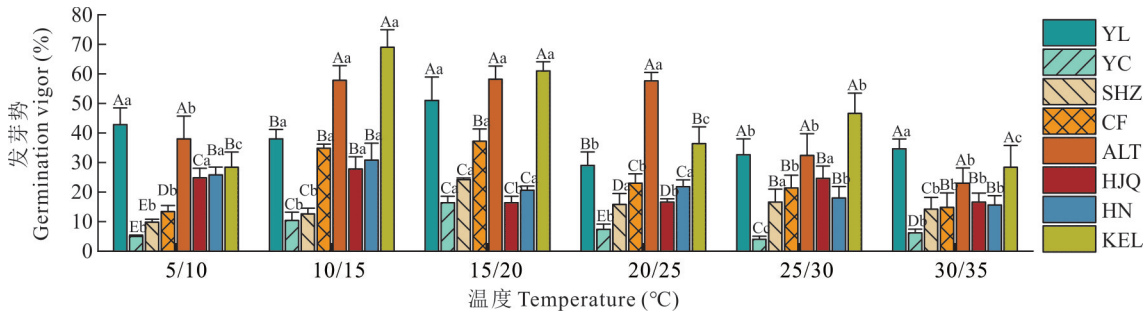


图2 乌拉尔甘草种子发芽势

Fig. 2 *G. uralensis* seed germination vigor

2.2.3 种子发芽指数 同一种源乌拉尔甘草种子发芽指数在不同温度下差异显著($P<0.05$)。YL种源乌拉尔甘草种子的发芽指数在25℃/30℃和30℃/35℃显著高于其他温度($P<0.05$,图3);KEL种源乌拉尔甘草种子在30℃/35℃时的发芽指数最高。同时,同一温度下不同种源乌拉尔甘草种子发芽指数也存在显著性差异($P<0.05$)。ALT的种子发芽指数在各温度梯度下均显著高于YC、SHZ、CF、HJQ和HN($P<0.05$);而YC的种子发芽指数在5℃/10℃、10℃/15℃、20℃/25℃、25℃/30℃和30℃/35℃下均显著低于其他种源($P<0.05$)。

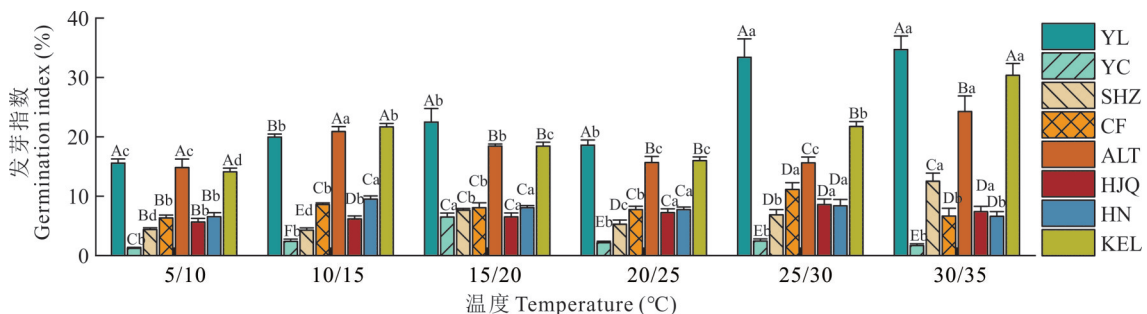


图3 乌拉尔甘草种子发芽指数

Fig. 3 *G. uralensis* seed germination index

2.3 幼苗表型性状

乌拉尔甘草幼苗表型性状(除 LI 外)均在不同种源间存在显著性差异($P < 0.05$, 表 2)。幼苗 14 个性状的变异系数为 11.05%~83.55%,各性状的变异系数依次为叶面积>叶片干物质含量>叶片鲜重>比叶面积>叶片干重>叶组织密度>冠幅>基茎>株高>叶片厚度>叶长>叶片总含水量>叶宽>叶形指数。其中叶面积、叶片干物质含量、叶片鲜重、比叶面积、叶片干重、叶组织密度的变异系数均大于 50%。ALT 种源乌拉尔甘草的比叶面积显著高于其他种源($P < 0.05$);CF 种源乌拉尔甘草的叶片干物质含量最大($P < 0.05$);YL 种源的叶组织密度最大($P < 0.05$),但与 YC、KEL、HJQ、HN 种源不存在显著性差异($P > 0.05$)。乌拉尔甘草幼苗 14 个性状的遗传多样性指数为 1.21~1.91,叶片总含水量的遗传多样性指数最大,株高的遗传多样性指数最小,其余性状的遗传多样性指数大小依次为叶长、叶组织密度>叶面积>叶宽、叶片干物质含量、基茎>冠幅、叶片干重、叶片鲜重、叶片厚度>比叶面积>叶形指数。

2.4 种子和幼苗性状相关性

乌拉尔甘草 24 个指标间存在显著的相关性(图 4),且各形态性状之间联系紧密。乌拉尔甘草种子长度、宽度、面积、周长、直径、圆度和千粒重两两之间极显著正相关($P < 0.01$);种子的发芽势、发芽指数、发芽率两两之间呈极显著正相关($P < 0.01$)。种子发芽率与种子宽度和周长呈极显著负相关($r = -0.64, P \leq 0.01$);种子发芽势与种子千粒重呈极显著负相关($r = -0.56, P \leq 0.01$);种子发芽指数与种子直径和面积呈极显著负相关($r = -0.82, P \leq 0.01$)。株高与种子长度、种子宽度、面积、周长、直径和千粒重两两之间呈极显著负相关($P < 0.01$),与发芽率呈极显著正相关($r = 0.59, P \leq 0.01$);千粒重与叶长之间呈极显著负相关($r = -0.56, P \leq 0.01$)。叶面积与比叶面积、叶宽、叶长、基茎、株高、叶片鲜重、冠

表 2 不同种源乌拉尔甘草幼苗表型性状比较分析

Table 2 Analysis of phenotypic traits of *G. uralensis* from different provenances

表型	种源 Provenance										CV (%)	H'
	YL	YC	CF	ALT	KEL	HJQ	HN	SHZ	SHZ	SHZ		
LDW (g)	0.84±0.08c	0.85±0.16c	1.43±0.17b	1.34±0.14c	1.60±0.18a	1.49±0.08b	2.18±0.18a	2.37±0.62a	2.37±0.62a	2.37±0.62a	62.30	1.49
LA (cm ²)	160.99±15.21c	297.47±77.32b	356.05±80.92b	742.60±170.10a	392.49±67.08b	313.57±17.50b	358.35±46.44b	479.72±145.14a	479.72±145.14a	479.72±145.14a	83.55	1.67
SLA (cm ² ·g ⁻¹)	195.66±12.36c	356.41±76.53b	297.70±74.82b	502.78±75.01a	243.30±22.37b	211.42±8.30b	162.16±12.34c	189.20±8.17c	189.20±8.17c	189.20±8.17c	66.25	1.39
LDMC (%)	4.18±0.19b	0.38±0.07d	6.25±0.93a	2.50±0.07c	2.36±0.10c	3.15±0.12c	0.27±0.01d	2.95±0.08c	2.95±0.08c	2.95±0.08c	76.36	1.56
LTD (g·cm ⁻³)	0.03±0.00a	0.02±0.00a	0.01±0.00c	0.01±0.00c	0.02±0.00a	0.02±0.00a	0.02±0.00a	0.01±0.00c	0.01±0.00c	0.01±0.00c	51.36	1.73
TWC (%)	0.76±0.01a	0.62±0.07d	0.79±0.04a	0.60±0.01d	0.57±0.02e	0.68±0.01b	0.73±0.01a	0.66±0.01c	0.66±0.01c	0.66±0.01c	17.80	1.91
CW (cm)	295.20±33.54c	344.60±45.37b	577.20±92.06a	502.80±56.22a	635.00±65.86a	485.70±43.71a	604.90±72.73a	604.90±89.95a	604.90±89.95a	604.90±89.95a	45.66	1.49
LFW (g)	3.49±0.36c	2.96±0.72c	7.89±1.00a	3.37±0.40c	3.79±0.46c	4.68±0.28b	8.40±1.08a	7.17±1.98a	7.17±1.98a	7.17±1.98a	68.01	1.49
LT (cm)	0.19±0.01c	0.18±0.01c	0.24±0.01b	0.21±0.01b	0.23±0.01b	0.24±0.01b	0.32±0.03a	0.24±0.01b	0.24±0.01b	0.24±0.01b	25.16	1.49
PH (cm)	31.30±1.23b	31.90±2.58b	32.70±1.22b	46.70±2.02a	51.20±2.52a	27.50±1.33b	27.70±1.16b	32.10±1.59b	32.10±1.59b	32.10±1.59b	28.23	1.21
BS (mm)	2.42±0.18c	2.42±0.26c	2.99±0.19bc	3.58±0.23a	3.85±0.35a	3.34±0.17a	3.89±0.19a	3.97±0.29a	3.97±0.29a	3.97±0.29a	28.37	1.56
LL (cm)	2.74±0.20e	2.61±0.22d	3.18±0.10c	4.13±0.22a	3.69±0.15a	2.98±0.08c	3.29±0.16b	3.31±0.14b	3.31±0.14b	3.31±0.14b	20.57	1.73
LW (cm)	1.88±0.12c	1.81±0.12d	2.32±0.10b	2.69±0.08a	2.42±0.09a	2.14±0.07b	2.31±0.09b	2.19±0.09b	2.19±0.09b	2.19±0.09b	17.67	1.56
LI	1.45±0.02a	1.44±0.06a	1.38±0.04a	1.54±0.08a	1.52±0.04a	1.39±0.03a	1.43±0.05a	1.53±0.07a	1.53±0.07a	1.53±0.07a	11.05	1.32

LDW: 叶片干重 Leaf dry weight; LA: 叶面积 Specific leaf area; LDMC: 叶片干物质含量 Leaf dry matter content; LTD: 叶组织密度 Leaf tissue density; TWC: 叶片总含水量 Total water content; CW: 冠幅 Crown width; LFW: 叶片鲜重 Leaf fresh weight; L.T: 叶片厚度 Leaf thickness; PH: 基茎 Basal stem; LL: 叶长 Leaf length; LW: 叶宽 Leaf width; LI: 叶形指数 Leaf index. 下同 The same blow.

幅两两之间呈极显著正相关($P < 0.01$);叶组织密度与叶片干物质含量呈极显著负相关($r = -0.36, P \leq 0.01$);比叶面积与叶组织密度呈极显著负相关($r = -0.50, P \leq 0.01$);叶片干物质含量与叶片总含水量呈极显著正相关($r = 0.45, P \leq 0.01$)。

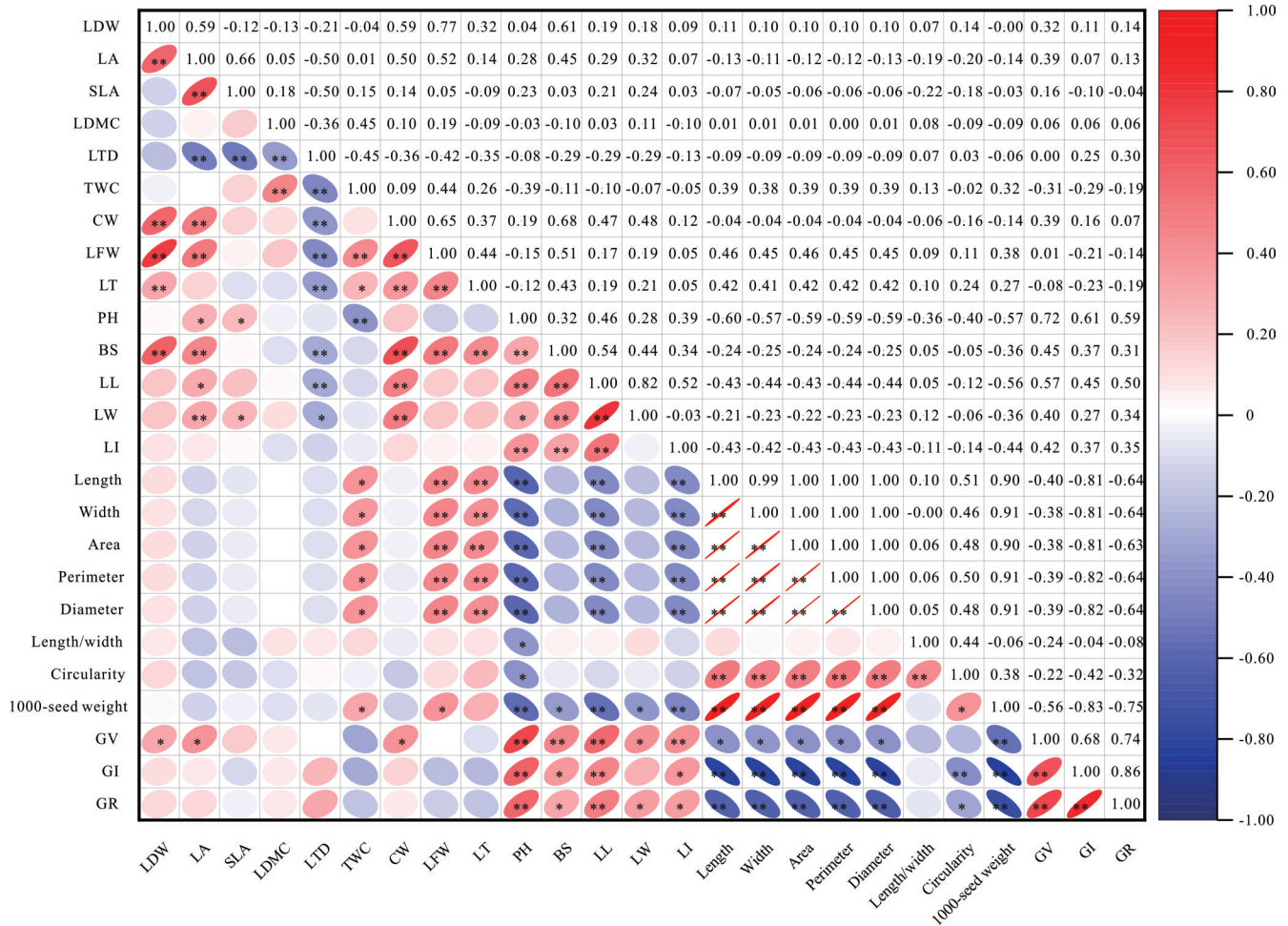


图4 不同种源乌拉尔甘草表型性状相关性

Fig. 4 Correlation of phenotypic traits of *G. uralensis* from different provenances

Length: 种子长度 Seed length; Width: 种子宽度 Seed width; Area: 面积; Perimeter: 周长; Diameter: 直径; Length/width: 长宽比; Circularity: 圆度; 1000-seed weight: 千粒重; GV: 发芽势 Germination vigor; GI: 发芽指数 Germination index; GR: 发芽率 Germination rate. 对角线左下部分为指标间相关显著性水平, 右上部分为指标间相关系数(*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$)。The lower left part of the diagonal is the correlation significance level among the indicators, and the upper right part is the correlation coefficient among the indicators (* indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$).

2.5 表型指标主成分分析

通过主成分分析可知(表3), 基于特征值大于1可以提取到5个成分, 其累计贡献率为78.58%, 包含了绝大多数乌拉尔甘草性状的主要特征信息。第1主成分特征值为9.40, 贡献率为37.61%, 正向载荷较高的性状有种子长度、宽度、面积、周长和直径, 这些性状反映了乌拉尔甘草种子的大小。第2主成分特征值为4.92, 贡献率为19.66%, 正向载荷较高的性状有叶面积、冠幅和鲜重, 其特征向量均高于0.30; 第3主成分特征值为2.28, 贡献率为9.14%, 正向载荷较高的性状是叶片干重、叶组织密度和叶片厚度, 特征值依次为0.40、0.29和0.24, 都属于乌拉尔甘草幼苗的表型性状。

2.6 综合评价

通过隶属函数进行综合评价, 不同种源乌拉尔甘草品质如表4所示, 品质最好的是CF种源的乌拉尔甘草, D值为0.89; 其次为HN种源的乌拉尔甘草, D值为0.83; 接下来为HJQ种源的乌拉尔甘草, D值为0.75。

表 3 表型性状主成分分析

Table 3 Principal component analysis of phenotypic traits

表型性状 Phenotypic traits	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
叶片干重 LDW	-0.01	0.23	0.40	0.18	-0.08
叶面积 LA	-0.08	0.31	-0.19	0.25	-0.21
比叶面积 SLA	-0.03	0.23	-0.45	0.15	-0.21
叶片干物质含量 LDMC	0.00	0.18	-0.29	-0.34	0.29
叶组织密度 LTD	-0.02	-0.32	0.29	0.00	0.31
叶片总含水量 TWC	0.14	0.20	-0.26	-0.31	0.36
冠幅 CW	-0.06	0.36	-0.01	0.00	0.10
叶片鲜重 LFW	0.11	0.36	0.02	-0.07	0.24
叶片厚度 LT	0.11	0.28	0.24	-0.13	0.06
株高 PH	-0.25	0.06	0.04	0.35	0.07
基茎 BS	-0.13	0.28	0.21	-0.05	-0.02
叶长 LL	-0.20	0.26	0.14	-0.09	-0.16
叶宽 LW	-0.12	0.29	0.12	-0.16	-0.19
叶形指数 LI	-0.17	0.04	0.06	0.09	-0.01
种子长 Seed length	0.31	0.08	0.09	0.08	0.07
种子宽 Seed width	0.31	0.08	0.07	0.14	0.10
面积 Area	0.31	0.08	0.09	0.11	0.09
周长 Perimeter	0.31	0.08	0.09	0.10	0.08
直径 Diameter	0.31	0.08	0.08	0.11	0.09
长宽比 Length/width	0.04	0.00	0.20	-0.55	-0.25
圆度 Circularity	0.16	0.00	0.29	-0.14	-0.33
千粒重 1000-seed weight	0.30	0.01	-0.02	0.17	0.02
发芽势 Germination vigor (GV)	-0.21	0.15	0.17	0.26	0.22
发芽指数 Germination index (GI)	-0.29	-0.01	0.11	-0.08	0.27
发芽率 Germination rate (GR)	-0.25	0.02	0.15	-0.02	0.34
特征值 Eigenvalue	9.40	4.92	2.28	1.77	1.27
贡献度 Contribution rate (%)	37.61	19.66	9.14	7.09	5.08
累计贡献度 Accumulative contribution rate (%)	37.61	57.27	66.41	73.58	78.58

表 4 各综合指标隶属函数值、D 值

Table 4 Membership function and D value of each comprehensive index

种源 Provenances	X_1	X_2	X_3	X_4	U_1	U_2	U_3	U_4	D 值 D value	排名 Ranking
ALT	-1.40	0.64	1.14	0.53	0.00	0.88	0.92	0.53	0.39	6
YL	-0.51	-1.60	-1.53	0.67	0.37	0.00	0.00	0.57	0.24	8
SHZ	-0.05	0.81	-1.02	-0.51	0.55	0.94	0.17	0.17	0.58	4
CF	0.95	0.41	0.41	1.93	0.97	0.79	0.67	1.00	0.89	1
YC	0.41	-1.46	1.38	-1.01	0.74	0.06	1.00	0.00	0.52	5
HJQ	0.92	-0.14	0.20	-0.10	0.95	0.57	0.59	0.31	0.75	3
HN	1.03	0.95	-0.48	-0.98	1.00	1.00	0.36	0.01	0.83	2
KEL	-1.34	0.39	-0.09	-0.54	0.02	0.78	0.49	0.16	0.30	7

X_i 为指标测定值; $U(X_i)$ 为测定各指标的隶属函数值。 X_i is the measured value of the index; $U(X_i)$ is the membership function value of each index.

3 讨论

3.1 种子萌发特性比较分析

种子在萌发过程中受到水分、温度和光照等因素的影响,其中温度被认为是影响种子萌发的关键因子^[34],温度过高或过低均会使种子萌发特性发生变化,进而影响种子萌发过程^[35-36]。童琪等^[37]研究温度对迷人杜鹃(*Rhododendron agastum*)种子萌发的影响,结果表明低温和高温不利于迷人杜鹃种子的萌发;王慧丽等^[38]研究表明藜麦(*Chenopodium quinoa*)种子在不同温度处理下的发芽势和发芽率差异较大。本研究发现在5℃/10℃和30℃/35℃下的乌拉尔甘草种子整体萌发特性低于其他温度,这与石金玉等^[39]对老芒麦(*Siberian wildrye*)种子和李阳等^[40]对苜蓿(*Medicago sativa*)在不同温度下的萌发特性研究结果一致,主要是由于低温影响种子的吸水能力和酶活性等生理生化过程,高温使酶失活并引起霉菌污染,进而影响种子的萌发^[40-42]。同时,与已有研究相似,本研究发现不同种源乌拉尔甘草种子萌发特性对温度的耐受性范围存在差异^[43-44],其中,伊犁种子对萌发温度具有较高的耐受性,其发芽率在各温度处理下无显著差异,剩余其他种源种子在5℃/10℃、10℃/15℃、15℃/20℃、20℃/25℃下存在较高的发芽率,说明这4个温度梯度下适宜乌拉尔甘草种子萌发。

种子作为有性繁殖的根本^[45],其表型特征在种源间的差异往往是遗传因素和环境因素共同作用的结果,种源差异越大,性状变异越大,进行遗传改良的可能性越大。本研究通过探究乌拉尔甘草种子的8个表型性状,发现不同种源乌拉尔甘草种子表型性状存在显著差异($P < 0.05$),说明乌拉尔甘草种子性状在种源间具有较强的遗传改良潜力^[46]。

3.2 幼苗表型性状比较分析

植物表型性状是环境和遗传因子共同决定的,同一物种的不同种群经过长期的自然选择可形成相对稳定的具有进化和适应意义的表型性状^[47]。变异程度和遗传多样性指数可直观地体现表型性状的丰富程度^[48]。本研究发现,不同种源乌拉尔甘草的幼苗表型性状表现出显著的差异性,遗传多样性指数为1.21~1.91,变异系数为11.05%~83.55%,这与代少山^[49]和佟汉文^[50]的研究结果一致。其中,LA变异系数最大,说明其具有较高的遗传改良潜力,而LW和LI变异系数较小,性状稳定。LDMC和SLA作为重要的植物表型性状,其反映了植物性状中生物量的快速生产(高SLA,低LDMC)和养分的有效保存(低SLA,高LDMC)^[51-52]。本研究发现,ALT种源乌拉尔甘草表现出生物量的快速生产,CF种源则表现出养分的有效保存。叶组织密度可反映植物抵御伤害和干旱的能力^[53],本研究中YL与YC、KEL、HN种源乌拉尔甘草的叶组织密度不存在显著性差异($P > 0.05$),与CF、ALT、HJQ存在显著差异,说明YL种源的乌拉尔甘草具有较强的抗旱能力。此外,已有研究表明,叶片的厚度与资源获取、水分保存和利用等生态功能紧密相连^[54]。叶片较薄的植物因其独特的生理结构而展现出高生长速率和出色的资源利用效率,而叶片较厚的植物则倾向于将更多的资源用于自身的养分储存和应对环境胁迫^[55-56]。本研究结果发现,YC种源的乌拉尔甘草叶片厚度显著低于HN种源,说明YC种源的乌拉尔甘草生长速率和利用资源能力强,HN种源抵抗外界干扰能力强。

3.3 性状相关性与综合评价

表型性状相关性分析是通过次要性状对主要性状遗传增益的评估,为后续育种提供理论参考^[57]。本研究发现,种子长宽比与种子周长和面积无显著相关性($P > 0.05$),这与谢文辉等^[58]发现百脉根(*Lotus corniculatus*)种子的长宽比与种子周长无显著相关性结果一致,表明种子长宽比主要用来描述种子形状,与种子大小性状无关,乌拉尔甘草的种子形状和大小可以独立遗传^[59]。同时,种子千粒重是体现种子大小和饱满程度的重要指标^[60]。乌拉尔甘草种子的千粒重与萌发指标呈极显著负相关,这与邓毅晖等^[61]对12种杜鹃花(*Rhododendron simsii*)种子发芽率与千粒重的相关性研究结论一致。比叶面积反映植物对资源的获取和利用^[62]。本研究中,乌拉尔甘草比叶面积和叶组织密度呈极显著负相关($r = -0.50$, $P \leq 0.01$),这与徐睿等^[63]的研究结果一致,说明乌拉尔甘草可以通过比叶面积和叶组织密度的权衡作用来维持体内水分平衡。此外,一般而言比叶面积与叶片厚度呈显著负相关^[64],但本研究发现,乌拉尔甘草的比叶面积与叶片厚度之间的负相关性并不显著($P > 0.05$),这与李超等^[65]的研究结果一致,可能是表型性状在不同研究尺度、生境和物种之间存在差异性所致^[66]。

主成分分析方法不仅能够简化选择的程序,还能根据不同种质指标的相关性和贡献度为种质资源的筛选提供依据^[67]。本研究通过对8个种源乌拉尔甘草24个指标进行主成分分析发现,前5个主成分累计贡献率达到了78.58%。其中,种子长度、宽度、周长、面积、直径、千粒重,叶片冠幅、叶组织密度、叶片干重、鲜重和叶片厚度的特征向量值大于其他性状,反映了其种子和幼苗特性在水分和营养物质吸收等方面的不同表现,可作为乌拉尔甘草品种改良和育种重点考虑的指标。同时,结合隶属函数法与主成分分析对不同种源乌拉尔甘草的指标进行综合评价^[68]。结果发现,CF、HN、HJQ、SHZ、YC种源的综合评价结果较好,可以作为后续育种研究工作的备选材料。

4 结论

本研究以不同种源乌拉尔甘草为对象,通过对种子萌发及幼苗生长特性进行比较研究,发现:1)不同种源乌拉尔甘草种子萌发特性和幼苗形态特征均存在显著差异($P < 0.05$),平均遗传多样性指数为1.41,平均变异系数为6.08%,其中种子圆度、千粒重、叶组织密度遗传多样性指数较高,叶面积、叶片干物质含量、叶片鲜重变异系数较大。2)伊犁种子在各温度下有较高的发芽率,说明其对萌发温度具有较高耐受性。3)种子与幼苗形态特征均与种子萌发具有相关性,其中,种子长度、宽度与种子发芽率呈极显著负相关($r = -0.64$, $P \leq 0.01$),种子千粒重与种子发芽率呈极显著负相关($r = -0.56$, $P \leq 0.01$),株高与种子发芽率呈极显著正相关($r = 0.59$, $P \leq 0.01$)。4)隶属函数法综合评价表明,赤峰、会宁和杭锦旗的D值较高,种子萌发特性和幼苗表型性状整体表现较好,可作为乌拉尔甘草幼苗培育生产的备选材料。

参考文献 References:

- [1] Wei S L, Wang W Q, Wang H. Study on licorice resources and their sustainable utilization in center and western area of China. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2003, 28(3): 13–17.
魏胜利,王文全,王海. 我国中西部地区甘草资源及其可持续利用的研究. *中国中药杂志*, 2003, 28(3): 13–17.
- [2] Li X B, Zhao Z F, Chen L, *et al.* The status and countermeasures of development on licorices industry of Ningxia. *Ecological Economy*, 2012(12): 132–135.
李学斌,赵志锋,陈林,等. 宁夏甘草产业发展现状及对策研究. *生态经济*, 2012(12): 132–135.
- [3] Bai K Y, Rong Y P, Xu B. Bio-diversity value and protection of liquorice and Chinese ephedra resources. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2009, 30(4): 64–69.
白可喻,戎郁萍,徐斌. 甘草和麻黄资源的生物多样性价值和保护. *中国农业资源与区划*, 2009, 30(4): 64–69.
- [4] Meng X Z, Su Y H, Zhu D Z. Sustainable utilization of *Radix Glycyrrhiza* for protection of ecology environment and herbal resources. *Journal of Chinese Integrative Medicine*, 2006, 4(6): 556–559.
孟宪泽,苏永华,朱德增. 科学利用甘草,保护我国生态环境和药材资源. *中西医结合学报*, 2006, 4(6): 556–559.
- [5] Yu F, Chen J, Li Y J, *et al.* Antioxidant and anti-inflammatory activities of six flavonoids separated from licorice. *Food Chemistry*, 2013, 141(2): 1063–1071.
- [6] Cho H J, Lim S S, Lee Y S, *et al.* Hexane/ethanol extract of *Glycyrrhiza uralensis* licorice exerts potent anti-inflammatory effects in murine macrophages and in mouse skin. *Food Chemistry*, 2010, 121(4): 959–966.
- [7] Nakatani Y, Kobe A, Kuriya M, *et al.* Neuroprotective effect of liquiritin as an antioxidant via an increase in glucose-6-phosphate dehydrogenase expression on B65 neuroblastoma cells. *European Journal of Pharmacology*, 2017, 815: 381–390.
- [8] Wang R, Zhang C Y, Bai L P, *et al.* Flavonoids derived from liquorice suppress murine macrophage activation by up-regulating heme oxygenase-1 independent of Nrf2 activation. *International Immunopharmacology*, 2015, 28(2): 917–924.
- [9] Gou S H, He M, Li B B, *et al.* Hepatoprotective effect of total flavonoids from *Glycyrrhiza uralensis* Fisch in liver injury mice. *Natural Product Research*, 2021, 35(24): 6083–6087.
- [10] Kim S H, Hong J H, Lee J E, *et al.* 18 β -Glycyrrhetic acid, the major bioactive component of *Glycyrrhiza radix*, attenuates airway inflammation by modulating Th2 cytokines, GATA-3, STAT6, and Foxp3 transcription factors in an asthmatic mouse model. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2017, 52: 99–113.
- [11] Mao Y J, Zhao S J, Yang S S, *et al.* An “essential herbal medicine”-licorice: A review of phytochemicals and its effects in combination preparations. *Journal of Ethnopharmacology*, 2020, 249: 112–439.

- [12] Lei J S. Present situation analysis and strategy of *Glycyrrhiza uralensis* resources in Jinta County, Gansu Province. Beijing Agriculture, 2014(6): 76.
雷建生. 甘肃省金塔县甘草资源现状分析与对策. 北京农业, 2014(6): 76.
- [13] Chen W J, He L, Pei H Y, *et al.* Paper neuroprotective effect of total flavonoids in stems and leaves of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. on oxidative stress in HT-22 cells and *Caenorhabditis elegans*. Aging, 2023, 15(12): 5290—5303.
- [14] Dong H C, Su Y, Gong H X, *et al.* Effect of licoflavone A on proliferation and glycolysis of gastric cancer cells under hypoxic conditions. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2024, 30(13): 120—127.
董焕成, 苏韞, 龚红霞, 等. 甘草黄酮A对低氧条件下胃癌细胞增殖和糖酵解的影响. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(13): 120—127.
- [15] Zhao J J, Yong J J, Lu Z Z, *et al.* Quality difference analysis of *Glycyrrhiza uralensis* from different origins based on amino acid components. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2024, 47(3): 661—664.
赵建军, 雍婧姣, 路宗志, 等. 基于氨基酸类成分的不同产地甘草质量差异分析. 中药材, 2024, 47(3): 661—664.
- [16] Li X F, Yu Z Y, Wang X X, *et al.* HPLC fingerprinting combined with stoichiometry for *Glycyrrhiza uralensis* Fisch quality evaluation study. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2020, 43(10): 2487—2492.
李晓芳, 于喆源, 王晓霞, 等. HPLC指纹图谱结合化学计量学对甘草品质评价研究. 中药材, 2020, 43(10): 2487—2492.
- [17] Wang Y, Yang S H. Effects of dual stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2018, 41(11): 2507—2510.
王妍, 杨世海. 双重胁迫对乌拉尔甘草种子萌发及幼苗生理特性的影响. 中药材, 2018, 41(11): 2507—2510.
- [18] Sun Q, Tong H W, Wu B, *et al.* Genetic diversity of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. detected by morphological and ISSR molecular markers. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(1): 56—63.
孙群, 佟汉文, 吴波, 等. 不同种源乌拉尔甘草形态和ISSR遗传多样性研究. 植物遗传资源学报, 2007, 8(1): 56—63.
- [19] Li W B, Wei S L, Luo L, *et al.* Analysis of genetic diversity of main morphological traits and chemical components in *Glycyrrhiza uralensis* germplasms. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(2): 517—525.
李文斌, 魏胜利, 罗琳, 等. 甘草种质主要形态性状和化学成分的遗传多样性分析. 中草药, 2019, 50(2): 517—525.
- [20] Wei S L, Wang W Q, Liu C S, *et al.* Study of the geographic variation of overground morphological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. wild population and it's ecology mechanism. Progress in Modern Biomedicine, 2011, 11(Supple1): 4614—4618.
魏胜利, 王文全, 刘春生, 等. 甘草野生种群地上植株形态地理变异及其生态学机制分析. 现代生物医学进展, 2011, 11(增刊1): 4614—4618.
- [21] Wei S L, Wang W Q, Qin S Y, *et al.* Study on geographical variation of morphologic and germination characteristic of different *Glycyrrhiza uralensis* provenance seeds. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008, 33(8): 869—873.
魏胜利, 王文全, 秦淑英, 等. 甘草种源种子形态与萌发特性的地理变异研究. 中国中药杂志, 2008, 33(8): 869—873.
- [22] Liu C L, Huang W J, Tang Z S, *et al.* Effects of drought stress on seed germination and seedling photosynthetic physiological characteristics of three species of licorice. Chinese Wild Plant Resources, 2023, 42(8): 10—17.
刘长乐, 黄文静, 唐志书, 等. 干旱胁迫对三种甘草种子萌发及幼苗光合生理特性影响的研究. 中国野生植物资源, 2023, 42(8): 10—17.
- [23] Wei S L, Wang W Q, Zhang Y, *et al.* Geographical variation of *Glycyrrhiza uralensis* seed germination character on water stress. China Journal of Chinese Materia Medica, 2009, 34(18): 2308—2311.
魏胜利, 王文全, 张羽, 等. 干旱胁迫下不同种源甘草种子萌发特性的地理变异研究. 中国中药杂志, 2009, 34(18): 2308—2311.
- [24] Qi H X, Zhou X C, Hu M J, *et al.* Diversity and distribution of endophytic actinomycetes strains in *Sophora alopecuroides* L. from Baijitan Nature Reserve of Ningxia. Microbiology China, 2015, 42(6): 990—1000.
祁鹤兴, 周星辰, 胡美娟, 等. 宁夏白芨滩自然保护区苦豆子内生放线菌多样性及其分布. 微生物学通报, 2015, 42(6): 990—1000.
- [25] Song C, Yu Q Y, Wang R X, *et al.* Spatio-temporal variation of windbreak and sand fixation functions based on vegetation coverage in Baijitan National Nature Reserve, Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3131—3143.
宋超, 余琦殷, 王瑞霞, 等. 基于植被覆盖度的宁夏灵武白芨滩自然保护区防风固沙功能时空变化研究. 生态学报, 2021, 41(8): 3131—3143.
- [26] Li X H, Jiang D M, Liu Z M, *et al.* Seed germination characteristics of annual species in temperate semi-arid region. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1194—1199.

- 李雪华, 蒋德明, 刘志民, 等. 温带半干旱地区一年生植物种子的萌发特性. 生态学报, 2006, 26(4): 1194—1199.
- [27] Gao Y. International seed testing association (ISTA). China Standardization, 2017(1): 150—155.
高燕. 国际种子检验协会(ISTA). 中国标准化, 2017(1): 150—155.
- [28] Yang G H, Tang L, Li S M, *et al.* Study on the difference of seed germination and salt tolerance of four *Brassica napus* varieties in Xizang. Seed, 2024, 43(2): 104—110.
杨广环, 唐琳, 李施蒙, 等. 西藏4个品种油菜种子萌发及耐盐性差异研究. 种子, 2024, 43(2): 104—110.
- [29] Chen L, Yang X G, Song N P, *et al.* A study on variations in leaf trait of 35 plants in the arid region of middle Ningxia, China. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 41—49.
陈林, 杨新国, 宋乃平, 等. 宁夏中部干旱带主要植物叶性状变异特征研究. 草业学报, 2014, 23(1): 41—49.
- [30] Qu B, Zhu M X, Chen X H, *et al.* Morphological character of bulliform cells in 22 species of Poaceae. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(8): 1595—1601.
曲波, 朱明星, 陈旭辉, 等. 22种禾本科植物叶片泡状细胞形态特征的初步研究. 西北植物学报, 2010, 30(8): 1595—1601.
- [31] Chen S S, Huang X Q. Plant functional traits and the factors influencing them in the islands of eastern China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7699—7707.
陈思思, 黄秀清. 中国东部海岛植物功能性状及其影响因子. 生态学报, 2018, 38(21): 7699—7707.
- [32] Zhou S, Huang Y X, Duan W X, *et al.* Genetic diversity assessment of sugarcane native of domestic with phenotypic traits. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(6): 1123—1134.
周珊, 黄玉新, 段维兴, 等. 国内甘蔗种质资源表型性状的遗传多样性分析. 热带作物学报, 2023, 44(6): 1123—1134.
- [33] Su S C, Wei X L, Yang B, *et al.* Comparison of seed traits and growth characteristics at seedling stage in different *Ormosia henryi* provenances. Seed, 2021, 40(3): 9—14.
苏石诚, 韦小丽, 杨彬, 等. 不同种源花榈木种子性状和苗期生长特性比较. 种子, 2021, 40(3): 9—14.
- [34] Jiang L, Zhao Z Y, Zhang K, *et al.* Effects of temperature and saline on germination characteristic of *Suaeda physophora* seeds. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(10): 115—120.
姜黎, 赵振勇, 张科, 等. 温度与盐分对囊果碱蓬种子萌发特性的影响. 中国草地学报, 2021, 43(10): 115—120.
- [35] Zhao W J, Zhang H Y, Xu Y N, *et al.* Effects of the alternative oxidase and cytochrome oxidase pathways on the germination of seeds and growth of roots of alfalfa seedlings under different temperatures. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(1): 84—92.
赵文静, 张浩阳, 徐燕妮, 等. 不同温度下AOX和COX途径对苜蓿种子萌发和幼根生长的影响. 草地学报, 2022, 30(1): 84—92.
- [36] Song Z W, Hao L Z, Huang Z Y, *et al.* Effects of light and temperature on the germination of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. and *Pugionium dolabratum* Maxim. seeds. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2562—2568.
宋兆伟, 郝丽珍, 黄振英, 等. 光照和温度对沙芥和斧翅沙芥植物种子萌发的影响. 生态学报, 2010, 30(10): 2562—2568.
- [37] Tong Q, Zhong Y, Li J, *et al.* Seed germination, seedling growth and physiological characteristics of *Rhododendron agastum* under different temperatures. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(3): 471—477.
童琪, 钟雁, 李婧, 等. 不同温度对迷人杜鹃种子萌发与幼苗生长及生理特性的影响. 西北植物学报, 2020, 40(3): 471—477.
- [38] Wang H L, Zhong Y N, Yang H, *et al.* Effects of water and temperature on seed germination and grain yield of quinoa. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, DOI: 10.12357/cjea.20240056.
王慧丽, 钟苑宁, 杨晗, 等. 水分和温度对藜麦种子萌发出苗及籽粒产量的影响. 中国生态农业学报, 2024, DOI: 10.12357/cjea.20240056.
- [39] Shi J Y, Sun S J, Ma W, *et al.* Study on germination characteristics and antioxidant physiology of *Siberian wildrye* seeds under different temperature conditions. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3151—3158.
石金玉, 孙守江, 马馥, 等. 不同温度条件下老芒麦种子萌发特性和抗氧化生理研究. 草地学报, 2024, 32(10): 3151—3158.
- [40] Li Y, Qi W W, Li S Y, *et al.* Seed germination and seedling growth of *Medicago sativa* in response to the variations of temperature, light, and burial depth. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 332—339.
李阳, 亓雯雯, 李邵阳, 等. 苜蓿种子萌发和幼苗生长对温度、光照和埋深的响应. 生态学杂志, 2021, 40(2): 332—339.
- [41] Tahar T, Gorai M, Neffati M. Germination responses of *Diploaxis harra* to temperature and salinity. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2008, 203(5): 421—428.

- [42] Wang X Y, Zhou Y P, Xue Y F, *et al.* Seed germination characteristics of *Spartina alterniflora* from high and low latitude populations in relation to temperature. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(9): 2763–2772.
汪秀岩, 周宇鹏, 薛雨霏, 等. 高低纬度种源互花米草种子萌发特性及其对温度的响应. *生态学杂志*, 2021, 40(9): 2763–2772.
- [43] Lei C Y, Zhang H, Zhang D D, *et al.* Effects of temperature, salinity and light on seed germination of *Belula halophila*. *Chinese Wild Plant Resource*, 2020, 39(11): 39–43.
雷春英, 张浩, 张丹丹, 等. 温度、盐分和光照对濒危植物盐桦(*Belula halophila*)种子萌发特性的影响. *中国野生植物资源*, 2020, 39(11): 39–43.
- [44] Li Y Y, Wang D Y, Gao J, *et al.* Responses of seed germination, seedling endogenous hormones and non-structural carbohydrates of different *Rheum* species to the interaction of temperature and osmotic stresses. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(7): 2033–2045.
李媛媛, 王多一, 高静, 等. 不同种类大黄萌发及幼苗内源激素与非结构性碳水化合物对温度与渗透胁迫交互的响应. *生态学杂志*, 2024, 43(7): 2033–2045.
- [45] Jia T, Du X J, Zhang L, *et al.* Comprehensive evaluation of seed traits and provenance-associated trait differences in *Toona ciliata* var. *pubescens*. *Journal of Forest and Environment*, 2023, 43(5): 548–554.
贾婷, 杜宣瑾, 张露, 等. 毛红椿种子性状的种源差异及综合评价. *森林与环境学报*, 2023, 43(5): 548–554.
- [46] Ren J J, Pang X B, Liu Z Y, *et al.* Diversity of phenotypic characters of *Quercus mongolica* seeds from different provenances. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(6): 1221–1228.
任俊杰, 庞新博, 刘昭阳, 等. 不同种源蒙古栎种子表型性状的多样性. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(6): 1221–1228.
- [47] Wang Z, Gao X Z, Han J G, *et al.* Study on phenotypic diversity of *Caragana korshinskii*. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(3): 201–205.
王赞, 高新中, 韩建国, 等. 柠条锦鸡儿表型多样性研究. *草地学报*, 2006, 14(3): 201–205.
- [48] Jia Y Y, Qiu Y P, Zhou X Y, *et al.* Genetic diversity analysis of *Clematis macropetala* based on morphological markers and ISSR molecular makers. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 75–86.
贾艳艳, 邱玉鹏, 周欣莹, 等. 基于形态标记和ISSR分子标记的长瓣铁线莲遗传多样性分析. *草地学报*, 2024, 32(1): 75–86.
- [49] Dai S S. Study on germplasm resources and medicinal quality of *Glycyrrhiza uralensis*. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011.
代少山. 乌拉尔甘草种质资源与药材质量研究. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [50] Tong H W. Genetic diversity of *Glycyrrhiza uralensis* germplasm resources. Beijing: China Agricultural University, 2005.
佟汉文. 乌拉尔甘草种质资源遗传多样性研究. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [51] Hiram M F, Medeiros C D, Silva Bárbara L R, *et al.* Phenotypic plasticity and ecophysiological strategies in a tropical dry forest chronosequence: A study case with *Poincianella pyramidalis*. *Forest Ecology and Management*, 2015, 340: 62–69.
- [52] Garnier E, Laurent G, Bellmann A, *et al.* Consistency of species ranking based on functional leaf traits. *New Phytologist*, 2001, 152(1): 69–83.
- [53] Gong H D, Cui Q J, Gao J. Latitudinal, soil and climate effects on key leaf traits in northeastern China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e00904.
- [54] Shi Y, Wen Z M, Gong S H. Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6805–6814.
施宇, 温仲明, 龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化. *生态学报*, 2011, 31(22): 6805–6814.
- [55] Christine S, Athena D M, Michael R, *et al.* Dynamics of leaf hydraulic conductance with water status: quantification and analysis of species differences under steady state. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(2): 643–658.
- [56] Xu M S, Huang H X, Shi Q R, *et al.* Responses of soil water content to change in plant functional traits in evergreen broadleaved forests in eastern Zhejiang Province. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 857–866.
许沼山, 黄海侠, 史青茹, 等. 浙东常绿阔叶林植物功能性状对土壤含水量变化的响应. *植物生态学报*, 2015, 39(9): 857–866.
- [57] Li H Y, Li Y X, Li J, *et al.* Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of 143 *Agropyron* germplasm resources in Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(8): 1254–1267.
李鸿雁, 李悦焯, 李俊, 等. 内蒙古143份冰草属种质资源表型多样性分析与综合评价. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(8):

1254—1267.

- [58] Xie W H, Zhao W W, Wang L T, *et al.* Genetic diversity analysis of 22 *Lotus corniculatus* germplasm resources based on phenotypic quantitative traits. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 173—179.
谢文辉, 赵文武, 王雷挺, 等. 22份百脉根种质资源表型数量性状的遗传多样性分析. *草地学报*, 2023, 31(1): 173—179.
- [59] Leishman M R, Westoby M. Seed size and shape are not related to persistence in soil in Australia in the same way as in Britain. *Functional Ecology*, 1998, 12(3): 480—485.
- [60] Pan M, Zuo F F, Sheng J L, *et al.* Comparison of 1000-seed weight, viability and chemical content in the seed of *Taxus chinensis* var. *mairei* from different areas and its relationship with ecological factors. *Bulletin of Botanical Research*, 2016, 36(3): 360—367.
潘苗, 左菲菲, 盛继露, 等. 南方红豆杉不同种源种子千粒重、生活力、营养化学成分含量的比较及其与生态因子的关系. *植物研究*, 2016, 36(3): 360—367.
- [61] Deng Y H, Luo C, Liu H, *et al.* Seed characters and germination characteristics of *Rhododendron* species. *Seed*, 2022, 41(11): 125—129.
邓毅晖, 罗婵, 刘宏, 等. 杜鹃花属植物种子性状及萌发特性. *种子*, 2022, 41(11): 125—129.
- [62] Feng Y, Wang Y Q, Li Y K, *et al.* Relationship between leaf functional traits of *Populus euphratica* and soil factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1717—1726.
冯宇, 王雨晴, 李沅楷, 等. 胡杨叶功能性状与土壤因子的关系. *生态学报*, 2024, 44(4): 1717—1726.
- [63] Xu R, Liu J, Wang L Y, *et al.* Analysis of root and leaf functional traits and C, N, P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* from different provenances. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6298—6310.
徐睿, 刘静, 王利艳, 等. 不同地理种源杉木根叶功能性状与碳氮磷化学计量分析. *生态学报*, 2022, 42(15): 6298—6310.
- [64] Long Q Z, Du H, Su L, *et al.* Variation of plant functional traits and adaptive strategies in karst evergreen deciduous broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 8875—8883.
隆庆之, 杜虎, 苏樑, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶林木本植物功能性状变异及其适应策略. *生态学报*, 2023, 43(21): 8875—8883.
- [65] Li C, Zhao G D, Shi Z M, *et al.* The leaf functional traits and their correlation analysis of three seedlings of Magnoliaceae. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, 38(1): 19—26.
李超, 赵广东, 史作民, 等. 3种木兰科植物幼苗叶片功能性状及关联性分析. *江西农业大学学报*, 2016, 38(1): 19—26.
- [66] Yu H, Zhong Q L, Huang Y B, *et al.* Relationships between leaf functional traits of *Machilus pauhoi* understory seedlings from different provenances and geographical environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2): 449—458.
余华, 钟全林, 黄云波, 等. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 449—458.
- [67] Zhou T, Lu R, Liu N F, *et al.* Analysis of genetic diversity in *Amaranthus gruentus* germplasm based on phenotypic traits. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2049—2058.
周涛, 卢蕊, 刘宁芳, 等. 基于表型性状的老鸦谷种质遗传多样性分析. *草地学报*, 2023, 31(7): 2049—2058.
- [68] Zhou F P, Shi H M, Zhang H Y, *et al.* Comprehensive evaluation of agronomic and qualitative traits of sorghum germplasm resources based on fuzzy membership function method. *Seed*, 2022, 41(1): 94—98.
周福平, 史红梅, 张海燕, 等. 应用模糊隶属函数法对高粱种质资源的农艺性状和品质性状进行综合评价. *种子*, 2022, 41(1): 94—98.