

基于表型探讨 76 份沙芦草核心种质构建策略

张 婷¹ 闫伟红¹ 李志勇¹ 田青松¹ 张冬梅² 王永刚³

(¹ 中国农业科学院草原研究所, 内蒙古呼和浩特 010010; ² 黑龙江省农业科学院草业研究所, 哈尔滨 150086;

³ 内蒙古太仆寺旗红旗镇综合保障和技术推广中心, 锡林郭勒 026000)

摘要: 为了调查收集珍稀濒危沙芦草种质资源, 提高保护利用效率, 以 76 份沙芦草种质为材料, 测定 26 个表型性状数据, 采用 2 种遗传距离、3 种取样方法、8 种系统聚类方法和 7 种取样比例构建了 55 组候选沙芦草核心种质, 利用筛选得到的最佳构建方案构建初级核心种质; 应用均值差异百分率 (MD)、方差差异百分率 (VD)、极差符合率 (CR) 和变异系数变化率 (VR) 4 个参数检验各取样策略的优劣。同时, 以 t 检验对核心种质的变异程度及代表性进行评价, 并用主成分分析法对核心种质进行确认。结果表明: “多次聚类偏离度取样法 + 欧式距离 + 可变类平均法 + 25% 的取样比例” 是构建沙芦草初级核心种质取样最佳策略; 核心种质的主成分累计贡献率高于原种质, 表明核心种质均匀分布在原始种质范围内, 无重叠现象, 有效地避免了核心种质的冗余; 构建的 19 份沙芦草种质资源初级核心种质有效且质量较高, 能够在保证冗余较少的情况下充分代表原种质遗传差异。

关键词: 沙芦草; 种质资源; 表型性状; 初级核心种质

Exploring the Construction Strategies of Core Collection in 76 *Agropyron mongolicum* Based on Phenotype

ZHANG Ting¹, YAN Weihong¹, LI Zhiyong¹, TIAN Qingsong¹,
ZHANG Dongmei², WANG Yonggang³

(¹ Grassland Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, Inner Mongolia;

² Institute of Pratacultural Sciences, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086;

³ Comprehensive Security and Technology Promotion Centre of Hongqi, Xilin Gol League 026000, Inner Mongolia)

沙芦草 (*Agropyron mongolicum*), 又称蒙古冰草, 为禾本科 (*Poaceae*) 冰草属 (*Agropyron Gaertn*) 二倍体多年生草本植物, 属于小麦族的野生近缘种^[1-2], 是生态建设和饲草生产中重要的乡土牧草, 有抗旱、耐风沙、耐贫瘠、抗寒和耐盐碱等优良性状^[3-4], 在沙地植被中为优势种, 因而近几年常被用于围栏荒漠草原治理^[5-6]; 沙芦草广泛分布于我国河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、内蒙古等地区, 尤其在内蒙古的分布十分广泛^[1-3]。目前, 沙芦草已被列为

国家二级珍稀濒危植物和亟需保护的农作物野生近缘种^[7], 但是对沙芦草的系统化收集整理及精准鉴定评价工作还比较滞后。

核心种质的概念最早是由 Frankel 等^[8]提出的, 是以最少数量的遗传资源最大限度地保存整个资源群体的遗传多样性。目前已经在许多植物上应用, 如玉米^[9]、桑树^[10]、野生黄花苜蓿^[11]、菠菜^[12]等。于秀明等^[11]利用 70 份新疆野生黄花苜蓿种质的 19 个表型性状构建新疆野生黄花苜蓿核心种质, 郑福顺等^[13]基于前期调查的 480 份番茄种质资源的 20 个表型性状数据, 最终确定了“马氏距离 + 抽样比例为 15% + 偏离度取样法 + 离差平方和法”为番

基金项目: 内蒙古科技重大专项 (2021ZD0031); 内蒙古自然基金面上项目 (2023MS03033)

通信作者: 闫伟红

茄核心种质最优构建策略。

表型差异是种质筛选的重要依据。沙芦草具有极为丰富的遗传多样性,遗传差异主要来自于居群内个体之间^[14-15],其表型变异类型丰富^[16],同时沙芦草种群间、种群内表型性状差异大^[17-18],且生境变化对表型影响显著^[19-20]。目前,对沙芦草的表型多样性研究有一定的进展,而对沙芦草基于表型性状构建核心种质方面还未有相关报道。

综上所述,为了调查、收集、保护沙芦草核心种质资源,本研究收集整理了国家北方饲草种质资源中期库库存以及在内蒙古野外采集的76份材料,种植于多年生饲草种质资源圃,鉴定评价表型性状,筛

选初级核心种质,探讨构建策略,以期为沙芦草的搜集、评价和利用提供理论依据和基础材料。

1 材料与方法

1.1 材料 76份沙芦草种质资源见表1。供试沙芦草种植于中国农业科学院草原研究所沙尔沁试验基地,位于40°35'N,111°47'E,海拔1060m,土壤pH为8.2~9.0,有机质含量0.6%,含碳量0.928%,含氮量0.035%,含磷量0.65%,含硫量0.004%,属大陆性半干旱气候,干旱、寒冷、多风沙。年极端高温37.3℃,年极端低温-32.8℃。无霜期130d左右,年平均降水量350mm,土壤类型为沙质土。

1.2 表型指标测定 于沙芦草抽穗期一完熟期,根

表1 76份沙芦草收集整理名录

编号	名称	拉丁名	来源
S1	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗
S2	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区
S3	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	山西省忻州市偏关县
S4	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区巴彦淖尔市
S5	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区
S6	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	蒙古
S7	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟正镶白旗两面井
S8	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	未知
S9	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市清水河县
S10	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县
S11	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	未知
S12	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	未知
S13	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	俄罗斯
S14	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区吴忠市盐池县
S15	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区吴忠市盐池县
S16	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州
S17	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	美国
S18	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	山西省朔州市右玉县
S19	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	美国
S20	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
S21	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林浩特市
S22	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市
S23	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县新店子乡
S24	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区吴忠市盐池县
S25	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	陕西省榆林市靖边县
S26	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县
S27	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县
S28	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县
S29	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S30	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和

表 1 (续)

编号	名称	拉丁名	来源
S31	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S32	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S33	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S34	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区正蓝旗乌日图收费站
S35	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区正蓝旗乌日图收费站
S36	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区正蓝旗乌日图收费站
S37	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区正蓝旗乌日图收费站
S38	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
S39	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
S40	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
S41	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区桑根达来北正蓝旗 G207 路旁
S42	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区正蓝旗 105 国道旁克桑路
S43	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区正蓝旗乌日图收费站
S44	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S45	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林浩特九曲湿地公园
S46	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区四子王旗格根塔拉旅游区路旁
S47	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市清水河县
S48	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S49	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟朱日和
S50	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	未知
S51	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼和浩特市清水河县
S52	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区乌兰察布盟白旗高日罕
S53	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟正蓝旗贺日本音塔拉
S54	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	俄罗斯
S55	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	俄罗斯
S56	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区呼伦贝尔盟
S57	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	未知
S58	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	美国
S59	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	美国
S60	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	美国
S61	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州
S62	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古农业大学
S63	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区吴忠市盐池县
S64	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	甘肃省武威市
S65	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	甘肃省武威市
S66	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区吴忠市盐池县
S67	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	甘肃省武威市
S68	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	山西省忻州市偏关县
S69	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区巴彦淖尔市
S70	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	宁夏回族自治区
S71	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古农业大学
S72	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡盟西乌珠穆沁旗
S73	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区锡林郭勒盟
S74	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古农业大学
S75	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	山西省忻州市右玉县路边
S76	沙芦草	<i>Agropyron mongolicum</i> Keng	内蒙古自治区

据《沙芦草种质资源描述规范和数据标准》对 76 份沙芦草的表型,包括小穗长、小穗宽、小穗含小花数、穗轴第 1 节间长、叶鞘长度、第一颖长、第一颖宽、第一颖脉数、第二颖长、第二颖宽、第二颖脉数、外稃长、外稃宽、外稃芒长、垂直株高、茎粗、倒二叶长、倒二叶宽、旗叶长、旗叶宽、旗叶至穗基部长、穗下第 1 节间长、穗长、穗宽、小穗数、叶层高度等 26 个性状进行观察记录和数据测定。

1.3 表型多样性 数量性状依均值和标准差分级,进行质量化处理;各性状的遗传多样性采用 Shannon's 信息指数(H')进行评价,计算公式为 $H' = -\sum P_i \ln P_i$, P_i 表示第 i 种变异出现的频率,用所有相应的各个性状 H' 的平均值表示一组或所有种质的遗传多样性程度^[11]。

1.4 构建初级核心种质的策略

1.4.1 构建方法筛选 以 25% 取样比例进行构建方法的筛选^[21],采用 2 种遗传距离(欧氏距离、马氏距离)、3 种取样方法(多次聚类随机取样法、多次聚类偏离度取样法、多次聚类优先取样法)、8 种系统聚类方法(最短距离法、最长距离法、中间距离法、重心法、类平均法、可变类平均法、可变法、离差平方和法)共构建了 48 组核心种质候选群体。对不同的方法进行对比,并根据均值差异百分率(MD)、方差差异百分率(VD)、极差符合率(CR)和变异系数变化率(VR)4 个参数检验各取样策略的优劣^[9-10],选出最佳取样和聚类方法。评价标准为 MD<20% 且 CR>80% 时,初级核心种质的代表性较好,MD 值越小且 CR、VD 和 VR 值越大,初级核心种质的代表性越强^[22]。

1.4.2 总体取样比例的筛选 基于最佳取样和聚类方法,分别按照 10%、15%、20%、25%、30%、35%、40% 共 7 种取样比例构建出 7 个核心种质,通过比较各核心种质与原种质的评价参数来确定最佳的取样比例^[23]。

1.5 初级核心种质评价及验证 对已构建完成的沙芦草初级核心种质进行评价,对原群体和核心种质表型性状均值间是否有显著性差异进行检验,利用方差 F 检验分析两者表型性状变异的同质性,并基于主成分分析对最优核心种质的有效性进行验证^[24]。

1.6 数据处理 采用 Excel 2010 软件分析处理各

个性状的平均值、极值、变异系数及多样性指数;用 QGastation 2.0 软件进行核心种质相关数据的处理与分析;利用 SPSS 26.0 进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 表型多样性分析 76 份沙芦草种质的表型性状(表 2)变异系数在 10.30%~62.91% 之间,其中第二颖长的变异系数最小,为 10.30%;外稃芒长最大,为 62.91%。遗传多样性指数(H')在 1.790~2.080 之间,平均遗传多样性指数为 1.997,其中穗轴第 1 节间长的 H' 最小,为 1.790;旗叶长的 H' 最大,为 2.080。分析结果显示,76 份材料具有丰富的表型形态,有利于特异种质的筛选和核心种质的抽提。

2.2 核心种质构建方案筛选

2.2.1 取样方法的筛选 在 25% 的取样比例中,多次聚类偏离度取样法构建的 16 个核心种质方差差异百分率(VD)均大于 3.85%,极差符合率(CR)均大于 88%,变异系数变化率(VR)均大于 114%(表 3)。多次聚类随机取样法构建的 16 个核心种质方差差异百分率(VD)均小于 7.69%,极差符合率(CR)均小于 90.85%,变异系数变化率(VR)均小于 116.37%。多次聚类优先取样法构建的 16 个核心种质效果最差,其参数除极个别外都小于多次聚类偏离度取样法。同时采用同一遗传距离和聚类方法时,多次聚类偏离度取样法构建的核心种质大多具有更高的方差差异百分率(VD)、变异系数变化率(VR)。因此,多次聚类偏离度取样法更适合构建沙芦草核心种质。这与番茄^[13]、灰楸^[25]、高粱^[26] 等核心种质构建效果最好的研究结果相吻合。

2.2.2 遗传距离的筛选 根据表 3 结果,在多次聚类偏离度取样法下,欧式距离和马氏距离构建的核心种质均值差异百分率(MD)均小于 20%,且在欧式距离下的核心种质 D-D1C4、D-D1C6、D-D1C7 和马氏距离下的核心种质 D-D2C1、D-D2C8 都具有最大的方差差异百分率(VD) 19.23%,但核心种质 D-D1C6 具有较大的变异系数变化率(VR) 121.58%。此外,欧式距离构建的 3 种核心种质变异系数变化率(VR)在多次聚类随机取样法和多次聚类偏离度取样法下大多数表现为欧式距离大于马氏距离,即 S-D1、D-D1 大于 S-D2、D-D2。因此,欧式距离略优于马氏距离,更适合构建沙芦草核心种质。这进一步验证了标准化欧氏距

表 2 不同沙芦草种质材料表型性状基本统计分析

表型性状	最大值	最小值	平均值	变异系数 <i>CV</i> (%)	遗传多样性指数 <i>H'</i>
小穗长(mm)	18.42	8.42	14.02	15.39	2.078
小穗宽(mm)	12.14	2.71	5.76	28.73	1.939
小穗含小花数	12.67	3.33	8.07	24.29	2.022
穗轴第 1 节间长(mm)	24.98	0.92	5.88	60.05	1.790
叶鞘长度(mm)	3.26	0.76	1.69	35.66	1.999
第一颖长(mm)	8.99	4.69	6.61	12.24	2.015
第一颖宽(mm)	2.06	1.00	1.60	14.32	1.996
第一颖脉数(mm)	4.33	2.00	3.03	20.03	2.059
第二颖长(mm)	9.30	5.67	7.05	10.30	1.961
第二颖宽(mm)	2.32	1.06	1.73	16.05	2.071
第二颖脉数(mm)	4.67	2.00	3.23	19.56	2.029
外稃长(mm)	9.52	5.26	7.14	10.67	1.967
外稃宽(mm)	2.87	1.54	2.13	12.41	1.967
外稃芒长(mm)	3.59	0	1.36	62.91	2.072
垂直株高(cm)	128.27	43.40	83.18	16.46	1.906
茎粗(cm)	1.30	0.47	0.78	24.16	1.981
倒二叶长(cm)	22.13	6.70	13.14	25.72	1.995
倒二叶宽(cm)	0.87	0.17	0.49	30.59	1.994
旗叶长(cm)	18.50	2.93	9.75	33.74	2.080
旗叶宽(cm)	0.87	0.13	0.44	36.33	1.902
旗叶至穗基部长(cm)	48.77	3.93	28.87	28.96	2.062
穗下第 1 节间长(cm)	73.60	15.57	43.33	26.56	2.013
穗长(cm)	18.00	0.93	9.96	33.12	2.047
穗宽(cm)	2.60	0.43	1.04	47.88	1.907
小穗数	45.67	15.67	28.66	27.30	2.026
叶层高度(cm)	67.70	20.73	44.65	20.82	2.038

表 3 不同构建策略的比较

核心种质	均值差异百分率 <i>MD</i> (%)	方差差异百分率 <i>VD</i> (%)	极差符合率 <i>CR</i> (%)	变异系数变化率 <i>VR</i> (%)
S-D1C1	0	3.85	89.03	116.07
S-D1C2	0	0	85.93	109.54
S-D1C3	0	3.85	90.85	110.94
S-D1C4	0	7.69	89.67	115.39
S-D1C5	0	3.85	84.78	112.19
S-D1C6	3.85	3.85	88.41	116.37
S-D1C7	0	3.85	86.06	109.24
S-D1C8	0	3.85	82.02	103.65
S-D2C1	0	3.85	85.69	105.93
S-D2C2	0	0	83.44	106.71
S-D2C3	0	7.69	88.55	108.97

表 3 (续)

核心种质	均值差异百分率 MD (%)	方差差异百分率 VD (%)	极差符合率 CR (%)	变异系数变化率 VR (%)
S-D2C4	0	7.69	86.06	103.73
S-D2C5	0	7.69	85.94	109.03
S-D2C6	0	3.85	78.66	100.35
S-D2C7	0	0	78.99	97.30
S-D2C8	0	0	82.69	105.36
D-D1C1	0	3.85	89.03	116.07
D-D1C2	0	15.38	91.48	121.02
D-D1C3	0	15.38	88.94	121.16
D-D1C4	0	19.23	91.57	119.55
D-D1C5	0	7.69	90.02	121.55
D-D1C6	0	19.23	91.81	121.58
D-D1C7	0	19.23	91.83	120.48
D-D1C8	0	11.54	91.52	122.67
D-D2C1	0	19.23	94.48	117.70
D-D2C2	0	3.85	88.25	114.19
D-D2C3	0	15.38	93.96	118.41
D-D2C4	7.69	7.69	90.59	115.08
D-D2C5	3.85	15.38	91.97	115.05
D-D2C6	0	7.69	91.21	120.82
D-D2C7	0	11.54	91.95	121.68
D-D2C8	0	19.23	91.83	120.66
P-D1C1	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C2	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C3	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C4	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C5	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C6	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C7	0	3.85	87.84	111.03
P-D1C8	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C1	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C2	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C3	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C4	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C5	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C6	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C7	0	3.85	87.84	111.03
P-D2C8	0	3.85	87.84	111.03

S 为多次聚类随机取样法,D 为多次聚类偏离度取样法,P 为多次聚类优先取样法,D1 为欧式距离,D2 为马氏距离,C1 为最短距离法,C2 为最长距离法,C3 为中间距离法,C4 为重心法,C5 为类平均法,C6 为可变类平均法,C7 为可变法,C8 为离差平方和法;下同

离更适于处理含有较多不同类型性状的种质资源群体的观点^[12,25-26]。

2.2.3 聚类方法的筛选 在欧式距离下,采用多次聚类偏离度取样法时,可变类平均法(C6)和可变法(C7)构建的核心种质具有最大的方差差异百分率(19.23%),其中可变类平均法(C6)拥有较大的变异系数变化率(VR)121.58%,因此可变类平均法略优(表3)。故在25%的取样比例下,“多次聚类偏离度取样法+欧式距离+可变类平均法”是构建沙芦草核心种质的最佳组合。

2.2.4 总体取样比例的确定 采用筛选出的最佳核心种质构建策略,即以多次聚类偏离度取样法、欧氏距离和可变类平均法,按照7个不同的取样比例,即10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%构建7个初级核心种质子集(表4)。从表中可以看出,7个核心子集中,核心种质取样比例在10%时,极差符合率(CR)小于80%,不符合Hu等^[21]核心种质构建要求,应予以排除;其他6个核心种质极差符合率(CR)均大于80%,在取样比例为25%和

30%时,其方差差异百分率(VD)最大(19.23%),但取样比例为25%时,其变异系数变化率(VR)更大(121.58%),核心种质能在一定程度上去除原种质的遗传冗余,并且较好地保持原种质的遗传变异。

因此,选择“多次聚类偏离度取样法+欧式距离+可变类平均法+25%的取样比例”的策略构建沙芦草核心种质。

2.3 核心种质评价 利用均值、表型方差、极差、变异系数等评价核心种质是否具有代表性(表5)。根据表4与表5的结果,在D-D1C6-25%标准下构建的核心种质,其均值差异百分率(MD)为0且各性状均不存在显著差异;各性状的极差符合率(CR)为91.81%,表明核心种质保留了原始群体中的特殊种质;各性状指标的变异系数变化率(VR)为121.58%,变异系数整体上高于原始群体,表明核心种质具有良好的异质性;各项指标方差差异百分率(VD)为19.23%,小穗宽、垂直株高、旗叶至穗基部长、穗下第1节间长等4个性状的方差显著高于原

表4 7种取样比例构建的核心种质评价参数比较

核心种质	核心种质数量	均值差异百分率 MD (%)	方差差异百分率 VD (%)	极差符合率 CR (%)	变异系数变化率 VR (%)
D-D1C6-10%	7	11.54	23.08	77.90	140.77
D-D1C6-15%	11	0	15.38	87.44	132.99
D-D1C6-20%	15	0	0	88.69	125.52
D-D1C6-25%	19	0	19.23	91.81	121.58
D-D1C6-30%	22	0	19.23	92.12	117.22
D-D1C6-35%	26	0	7.69	93.22	114.36
D-D1C6-40%	30	0	3.85	93.62	111.72

表5 核心种质与原始种质各性状评价参数和t检验、F检验

性状	类别	均值	P _t 值 (均值)	显著性 (均值)	方差	P _F 值 (方差)	显著性 (方差)	极差	变异系数
小穗长(mm)	原群体	14.02	0.79	NS	4.66	0.07	NS	10.00	0.15
	核心库	14.18			7.67			9.92	0.20
小穗宽(mm)	原群体	5.76	0.95	NS	2.74	0.02	S*	9.43	0.29
	核心库	5.79			5.53			8.68	0.41
小穗含小花数	原群体	8.07	0.83	NS	3.85	0.16	NS	9.34	0.24
	核心库	8.19			5.39			7.84	0.28
穗轴第1节间长(mm)	原群体	5.88	0.70	NS	12.45	0.01	S**	24.06	0.60
	核心库	6.38			27.69			23.60	0.83
叶鞘长度(mm)	原群体	1.69	0.80	NS	0.36	0.28	NS	2.50	0.36
	核心库	1.64			0.44			2.19	0.40

表 5 (续)

性状	类别	均值	P _t 值 (均值)	显著性 (均值)	方差	P _F 值 (方差)	显著性 (方差)	极差	变异系数
第一颖长(mm)	原群体	6.61	0.62	NS	0.65	0.13	NS	4.30	0.12
	核心库	6.72			0.96			4.12	0.15
第一颖宽(mm)	原群体	1.60	0.90	NS	0.05	0.08	NS	1.06	0.14
	核心库	1.61			0.08			1.03	0.18
第一颖脉数(mm)	原群体	3.03	0.73	NS	0.37	0.30	NS	2.33	0.20
	核心库	3.09			0.44			2.33	0.21
第二颖长(mm)	原群体	7.05	0.30	NS	0.53	0.27	NS	3.63	0.10
	核心库	6.85			0.64			3.03	0.12
第二颖宽(mm)	原群体	1.73	0.24	NS	0.08	0.42	NS	1.26	0.16
	核心库	1.64			0.07			1.02	0.16
第二颖脉数(mm)	原群体	3.23	0.59	NS	0.40	0.30	NS	2.67	0.20
	核心库	3.14			0.47			2.67	0.22
外稃长(mm)	原群体	7.14	0.43	NS	0.58	0.15	NS	4.26	0.11
	核心库	6.97			0.82			3.46	0.13
外稃宽(mm)	原群体	2.13	0.32	NS	0.07	0.23	NS	1.33	0.12
	核心库	2.06			0.09			1.17	0.15
外稃芒长(mm)	原群体	1.36	0.55	NS	0.73	0.40	NS	3.59	0.63
	核心库	1.49			0.65			3.41	0.54
垂直株高(cm)	原群体	83.18	0.72	NS	187.52	0.01	S [*]	84.87	0.16
	核心库	81.40			404.21			84.87	0.25
茎粗(cm)	原群体	0.78	0.87	NS	0.04	0.27	NS	0.83	0.24
	核心库	0.77			0.04			0.57	0.27
倒二叶长(cm)	原群体	13.14	0.37	NS	11.42	0.09	NS	15.43	0.26
	核心库	13.99			17.83			15.00	0.30
倒二叶宽(cm)	原群体	0.49	0.58	NS	0.02	0.08	NS	0.70	0.31
	核心库	0.51			0.04			0.70	0.37
旗叶长(cm)	原群体	9.75	0.88	NS	10.82	0.26	NS	15.57	0.34
	核心库	9.61			13.32			13.24	0.38
旗叶宽(cm)	原群体	0.44	0.61	NS	0.03	0.11	NS	0.74	0.36
	核心库	0.46			0.04			0.70	0.42
旗叶至穗基部长(cm)	原群体	28.87	0.50	NS	69.91	0.05	S [*]	44.84	0.29
	核心库	27.26			123.74			44.84	0.41
穗下第1节间长(cm)	原群体	43.33	0.98	NS	132.50	0.02	S [*]	58.03	0.27
	核心库	43.44			262.48			52.83	0.37
穗长(cm)	原群体	9.96	0.51	NS	10.88	0.16	NS	17.07	0.33
	核心库	9.37			15.15			14.50	0.42
穗宽(cm)	原群体	1.04	0.61	NS	0.25	0.12	NS	2.17	0.48
	核心库	1.11			0.37			1.90	0.55
小穗数	原群体	28.66	0.69	NS	61.22	0.13	NS	30.00	0.27
	核心库	29.51			89.65			28.67	0.32
叶层高度(cm)	原群体	44.65	0.88	NS	86.41	0.01	S ^{**}	46.97	0.21
	核心库	44.10			203.11			46.97	0.32

NS 表示无显著差异; S^{*} 表示显著差异; S^{**} 表示极显著差异

始群体,叶层高度和穗轴第1节间长的方差极显著高于原始群体,表明核心种质差异可以代表原始群体的变异。

2.4 核心种质验证 如表6所示,利用主成分分析对获得的19份沙芦草核心种质资源(表7)与原种

质资源进行比较分析,二者均有7个主成分特征值大于1,包含各性状84%以上的遗传多样性信息,并且核心种质累计贡献率比原始种质累计贡献率高,也证明所构建的核心种质资源代表性和可靠性较高。

表6 原种质资源与核心种质资源表型性状主成分比较

因子	特征值		贡献率(%)		累计贡献率(%)	
	原始种质	核心种质	原始种质	核心种质	原始种质	核心种质
1	6.646	8.61	25.560	33.11	25.560	33.11
2	3.481	4.28	13.389	16.47	38.949	49.58
3	2.773	2.75	10.665	10.58	49.614	60.16
4	1.989	2.42	7.652	9.32	57.266	69.48
5	1.642	1.72	6.314	6.61	63.580	76.09
6	1.382	1.15	5.317	4.42	68.896	80.51
7	1.279	1.06	4.918	4.09	73.814	84.59

表7 19份沙芦草初级核心种质

序号	种质编号	序号	种质编号	序号	种质编号
1	S5	8	S32	15	S55
2	S6	9	S36	16	S64
3	S9	10	S38	17	S69
4	S21	11	S48	18	S74
5	S24	12	S49	19	S75
6	S26	13	S51		
7	S30	14	S53		

3 结论与讨论

种质资源是品种选育的物质基础,优良核心种质的获得是品种培育的芯片。沙芦草在生态防治上起着重要的作用,但是在核心种质构建方面的研究尚无。本研究基于26个表型性状进行了构建76份沙芦草初级核心种质的探讨,为今后沙芦草收集和新种质创新提供基础材料和理论依据。

目前最为常用的遗传距离为马氏距离和欧式距离。已有研究表明马氏距离并不适用于小规模核心种质构建^[27]。本研究通过对比两种遗传距离,发现欧式距离更适于构建沙芦草核心种质。这与菠菜^[12]、灰楸^[25]、切花小菊^[28]等植物的研究结果相似。取样方法一直是核心种质研究的重点。目前,基于表型构建核心种质常用的取样方法有多次聚类随机取样法、多次聚类偏离度取样法和多次聚类优先取样法3种^[29-31]。于秀明等^[11]研究表明优先取样法

是构建野生黄花苜蓿核心种质的最佳取样方法;郑福顺等^[13]研究结果表明偏离度取样法是构建番茄核心种质效果最佳的取样方法。本研究在对比3种取样方法后,最终确定多次聚类偏离度取样法为沙芦草最佳取样方法。

不同的聚类方法将植物分为不同的组,进而影响核心种质的代表性。目前基于表型构建核心种质常用的聚类方法有8种,分别为最短距离法、最长距离法、中间距离法、重心法、类平均法、可变类平均法、可变法和离差平方和法。彭枫等^[12]的研究表明离差平方和法构建效果优于其他7种;孙永强等^[32]研究结果表明,最长距离法对构建西伯利亚杏核心种质效果最佳。在本研究中,比较了8种聚类方法的构建效果,发现可变类平均法构建沙芦草核心种质效果最好。

主成分分析可以近似地描述样品在几何空间的分布特征,更好反映其遗传结构,更形象地用来比较核心种质和原种质的分布特征^[33]。本研究通过比较核心种质和原始种质的主成分结果,发现二者均有7个主成分特征值大于1,且核心种质累计贡献率比原始种质累计贡献率高,表明核心种质的建立在一定程度上去除了原始种质中的遗传冗余,进一步确认了在25%的取样比例下,采用欧式距离和可变类平均法并结合多次聚类偏离度取样法是沙芦草核心种质的最佳构建策略。

本研究利用 26 个表型性状数据对 76 份沙芦草核心种质进行构建时,明确了以欧氏距离、可变类平均法和 25% 的取样规模结合多次聚类偏离度取样是构建沙芦草核心种质的最适方法,以其进行筛选最终得到 19 份核心种质,这些核心种质的各项评价参数优良,能够代表原始种质的遗传差异,并且很好地去除原种质的遗传冗余,可以作为后续沙芦草种质资源研究的材料。

参考文献

- [1] 解新明,杨锡麟,余延年. 西伯利亚冰草 *Agropyron sibiricum* 和蒙古冰草 *A. mongolicum* 分类问题初探. 内蒙古师大学报:自然科学, 1988 (3): 20-22
- [2] 李志勇,陈凤林,陈立波,薛风华. 优良禾草新品种—蒙古冰草. 中国草地, 1993 (1): 74, 78
- [3] 马生花. 干旱胁迫条件下沙芦草水分利用效率与适应性研究. 银川:宁夏大学, 2020
- [4] 李旭青. 冰草属种间杂种 F_1 代群体农艺性状与耐盐性调查与分析. 秦皇岛:河北科技师范学院, 2019
- [5] 王君梅,马静姝,刘王锁. 小麦近缘植物沙芦草围封保护效果研究. 宁夏农林科技, 2016, 57 (10): 1-3
- [6] 王君梅,蒋旭亮,雍军. 宁夏盐池县小麦野生近缘植物蒙古冰草保护模式探究. 中国工程咨询, 2016 (1): 46-49
- [7] 郑殿升,杨庆文. 中国作物野生近缘植物资源. 植物遗传资源学报, 2014, 15 (1): 1-11
- [8] Frankel O H, Brown A H D. Genetic manipulation: impact on man and society. Cambridge: Cambridge University Press, 1984
- [9] 李永祥,李会勇,扈光辉,刘旭洋,李春辉,张登峰,黎裕,王天宇. 玉米应用核心种质的构建与应用. 植物遗传资源学报, 2023, 24 (4): 911-916
- [10] 万永辉,阿不都赛买提·艾买提,龚明,阿巴白克·扎克,阿不都拉·买提肉孜,丁天龙. 基于表型性状构建桑树初级核心种质研究. 北方蚕业, 2023, 44 (3): 12-19, 40
- [11] 于秀明,杜雨,汪鹏,李倩,王玉祥,张博. 基于表型性状的新疆野生黄花苜蓿核心种质构建. 草地学报, 2023, 31 (10): 3032-3039
- [12] 彭枫,李阳,戴雨柔,王雪美,杨蛟,王全华,蔡晓峰. 基于表型性状的菠菜核心种质构建. 上海师范大学学报:自然科学版, 2022, 51 (1): 9-19
- [13] 郑福顺,王晓敏,李国花,李洪磊,刘珮君,胡新华,付金军. 宁夏地区番茄种质资源核心种质构建策略. 浙江农业学报, 2022, 34 (9): 1877-1888
- [14] 罗玉. 基于基因组大小和表型性状以及叶绿素含量的冰草居群遗传分化研究. 雅安:四川农业大学, 2021
- [15] 兰保祥,李立会,王辉. 蒙古冰草居群遗传多样性研究. 中国农业科学, 2005, 38 (3): 468-473
- [16] 解新明,云锦凤,高艳春,卢小良,李秉滔. 蒙古冰草外稃微形态特征的变异式样. 植物研究, 2002, 22 (2): 168-172
- [17] 杨靖,张晓明,陈越,樊东昌,宛涛. 内蒙古 30 份冰草属种质资源表型性状遗传多样性分析. 中国草地学报, 2023, 45 (9): 1-11
- [18] 解新明,卢小良,云锦凤. 蒙古冰草种质资源的遗传变异. 华南农业大学学报, 2004 (S2): 68-72
- [19] 史佳梅. 异质生境下蒙古冰草表型性状及生理生态适应策略研究. 银川:宁夏大学, 2023
- [20] 解新明,云锦凤,卢小良,李秉滔. 蒙古冰草表型数量性状的变异与生境间的相关性. 生态学杂志, 2003 (4): 31-36
- [21] Hu J, Zhu J, Xu H M. Methods of constructing core collections by stepwise clustering with three sampling strategies based on the genotypic values of crops. Theoretical and Applied Genetics, 2000, 101 (1-2): 264-268
- [22] 徐海明,胡晋,朱军. 构建作物种质资源核心库的一种有效抽样方法. 作物学报, 2000 (2): 157-162
- [23] 胡晋,徐海明,朱军. 基因型值多次聚类法构建作物种质资源核心库. 生物数学学报, 2000, 15 (1): 103-109
- [24] 胡晋,徐海明,朱军. 保留特殊种质材料的核心库构建方法. 生物数学学报, 2001, 16 (3): 348-352
- [25] 于晓池,李凤,欧阳,张鹏,郭小龙,肖遥,赵秋玲,杨桂娟,王军辉,麻文俊. 基于表型的灰楸核心种质构建. 林业科学研究, 2021, 34 (6): 38-45
- [26] 李萌,秦慧彬,王宇楠,穆志新,杜慧玲. 基于农艺性状指标的山西高粱地方品种核心种质构建. 植物遗传资源学报, 2021, 22 (1): 174-182
- [27] 吴河饶,任青艳,陈莹,崔叶,陈思治,黄大玉,陈涛林. 基于农艺性状的榕江茶核心种质构建. 西北植物学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1091.Q.20231025.1616.036.html>
- [28] 赵立民,李嘉伟,张飞,苏江硕,房伟民,王海滨,蒋甲福,陈素梅,陈发棣,管志勇. 基于表型数据构建切花小菊核心种质. 园艺学报, 2022, 49 (10): 2273-2284
- [29] 周艳春. 无芒雀麦种质资源遗传多样性分析及其核心种质的构建. 长春:东北师范大学, 2021
- [30] 姚启伦,陈发波,方平. 武陵山区玉米地方品种核心种质的遗传多样性与评价. 湖北农业科学, 2014, 53 (7): 1506-1508, 1512
- [31] 李健英,解睿,李正莉,曹宇宾,郭俊宏. 玉米核心种质及构建方法研究进展. 山西农业科学, 2010, 38 (9): 81-85
- [32] 孙永强,陈建华,张剑,董胜君,刘权钢,刘青柏. 基于表型性状的西伯利亚杏核心种质构建. 沈阳农业大学学报, 2022, 53 (1): 43-54
- [33] 汪磊,王姣梅,汪魏,王玲,王力军,严兴初,谭美莲. 基于表型多样性构建向日葵核心种质. 中国油料作物学报, 2021, 43 (6): 1052-1060

(收稿日期: 2023-11-06)