

## 内蒙古 143 份冰草属种质资源表型多样性分析与综合评价

李鸿雁<sup>1</sup>,李悦焯<sup>2,3</sup>,李俊<sup>4</sup>,武自念<sup>1</sup>,黄帆<sup>1</sup>,朱琳<sup>1</sup>,郭茂伟<sup>1</sup>,李志勇<sup>1</sup>,辛霞<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010; <sup>2</sup>中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; <sup>3</sup>甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070; <sup>4</sup>内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010070)<sup>1</sup>

**摘要:** 以来源于内蒙古 10 个盟市及地区的 143 份冰草属种质资源为研究对象, 通过变异系数、遗传多样性指数、相关性、主成分、聚类和灰色关联法等分析方法, 分析了 143 份内蒙古地区冰草属种质资源表型性状的多样性水平, 并筛选了优异种质资源材料。结果表明: 冰草属种质的 17 个表型性状变异较大, 遗传多样性丰富, 变异系数在 93.92%~11.47% 之间, 平均为 42.80%, 其中叶片宽度的变异系数最高, 种子长的离散程度最低; 遗传多样性指数 ( $H'$ ) 为 1.279~2.025, 平均为 1.72, 以颖长度的多样性指数最大, 小穗长的多样性指数最小; 相关性分析表明, 各性状间显著或极显著相关; 主成分分析显示, 前 6 个主成分因子贡献率为 5.934%~20.885%, 累计贡献率达 69.866%; 聚类分析将 143 份种质划分为 3 大类。第 I 类综合性状较好, 小穗数和小花数指标突出, 具有高产潜力, 包含 27 份资源; 第 II 类综合性状一般, 种子综合性状较高, 包含 23 份资源; 第 III 类综合性状较差, 株高较长, 包含 93 份资源; 采用灰色关联的方法综合评价冰草属种质的综合表现, 千粒重、小穗数、叶舌长度、叶片宽度和叶面积作为种质评价指标; 筛选出 A-24、A-23、A-25、A-22、A-35、A-43、A-18 等冰草材料及 A-142、A-92 和 A-136 等多花冰草材料, 综合性状协调, 可供冰草属种质遗传改良与育种利用。

**关键词:** 冰草属; 种质资源; 表型性状; 遗传多样性

## Phenotypic Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of 143 Agropyron Germplasm Resources in Inner Mongolia, China

LI Hongyan<sup>1</sup>, LI Yuexuan<sup>2,3</sup>, LI Jun<sup>4</sup>, WU Zinian<sup>1</sup>, HUANG Fan<sup>1</sup>, ZHU Ling<sup>1</sup>, GUO Maowei<sup>1</sup>, LI Zhiyong<sup>1</sup>, XIN Xia<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010; <sup>2</sup> Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; <sup>3</sup> Pratacult College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; <sup>4</sup> College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010070)

**Abstract:** A total of 143 germplasm resources in the *Agropyron* genus, which were collected from 10 cities and regions in Inner Mongolia, China, were studied for phenotypic variations at 17 traits. Statistical analysis were performed using the coefficient of variation, genetic diversity index, correlation, principal component, clustering and grey correlation analysis, and elite germplasm resources were identified. The results showed that the 17 phenotypic traits had great variation and rich genetic diversity. The coefficient of variation ranged from 93.92% to 11.47%, with an average of 42.80%. The coefficient of variation of leaf width was the highest, and the dispersion of seed length was the lowest. The genetic diversity index ( $H'$ ) ranged from 1.279 to 2.025, with an average of 1.72. The diversity index of glume length was the highest, and lowest for spikelet length. Significant or extremely significant correlations were observed among various traits. The contribution rate of the first six principal component factors was 5.934%~20.885%, with the cumulative contribution rate of 69.866%. These germplasms were divided into three groups by cluster analysis. Cluster I had the best comprehensive traits, with prominent spikelet number and floret number, and high yield potential, including 27

<sup>1</sup>收稿日期: 2023-11-09 修回日期:

第一作者研究方向为牧草种质资源与育种研究, E-mail: hongyli1964@126.com

通信作者: 李志勇, 主要从事草资源与育种研究, E-mail: zhiyongli1216@126.com

辛霞, 主要从事农作物种质资源保存与技术研究, E-mail: xinxia@caas.cn

**基金项目:** 农作物种质资源保护与利用项目(2023NWB037); 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0031); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2023PT02)

**Foundation projects:** Crop Germplasm Resources Protection and Utilization Project (2023NWB037); Key Projects in Science and Technology of Inner Mongolia (2021ZD0031); The special item of basic scientific research business expenses of the Central Public Welfare Scientific Research Institute (Y2023PT02)

accessions. Cluster II, containing 23 accessions, had general traits and higher seed traits. Cluster III was poor in general character with higher plant height, containing 93 accessions. By taking use of the grey correlation method to evaluate these germplasm, these traits including the 1000-grain weight, spikelet number, leaf tongue length, leaf width and leaf area could be deployed as indexes in germplasm evaluation. Elite germplasm resources showing coordinated comprehensive traits such as *A.cristatum* accessions A-24, A-23, A-25, A-22, A-35, A-43, A-18, as well as *A.cristatum var.pluriflorum* accessions A-142, A-92, and A-136, can be used for genetic improvement and breeding of ice grass.

**Keywords:** *Agropyron*; Germplasm resources; Phenotypic traits; Genetic diversity

冰草属 (*Agropyron* Gaertn.) 为禾本科 (Gramineae) 多年生牧草, 其种质资源十分丰富。我国冰草属的分类是以耿以礼教授提出的狭义冰草属的概念为主<sup>[1]</sup>。包括 5 个种、4 个变种和 1 个变型。5 个种分别是冰草 (*A.cristatum*)、沙生冰草 (*A.desertorum*)、根茎冰草 (*A.michnoi*)、西伯利亚冰草 (*A.sibiricum*)、沙芦草 (*A.mongolicum*), 4 个变种包括多花冰草 (*A.cristatum var.pluriflorum*)、光穗冰草 (*A.cristatum var.pectiniforme*)、毛沙生冰草 (*A.desertorum var.pilosiusculum*) 和毛沙芦草 (*A.mongolicum var.villosum*)。1 个变型是毛稃冰草 (*A.sibiricum f.pubiflorum*)<sup>[2]</sup>。冰草属主要生长于高山、平原、草甸、草原、荒漠、沙丘等环境条件下。主要分布于东北、华北、西北、黄河以北的干旱地区, 而内蒙古的分布种类最多, 拥有几乎全部的国产冰草种及其种下单位, 且分布密度最大<sup>[3]</sup>。冰草属在植物学上表现为冰草茎秆成疏丛, 分蘖横走或根茎, 叶质硬而且粗糙, 穗状花序呈矩圆形, 小穗紧密排列成两行, 整齐呈蓖齿状; 颖舟形, 外稃被有稠密的长柔毛或被稀疏柔毛, 顶端有短芒, 长 2-4 毫米, 内稃脊上具短小刺毛。沙生冰草秆成疏丛, 直立, 叶片多内卷成锥状, 穗状花序, 小穗含 4-7 小花, 颖舟形, 外稃舟形, 内稃脊上疏被短纤毛。沙芦草秆成疏丛, 有时基部横卧而节生根成匍茎状, 叶片内卷成针状, 穗状花序, 小穗含 3-8 朵小花, 颖两侧不对称, 外稃无毛或具稀疏微毛, 内稃脊具短纤毛。多花冰草花序粗壮、呈卵状披针形; 小穗含 9-11 小花<sup>[4]</sup>。冰草属植物具有很高的饲用价值和利用价值。作为牲畜四季可口的优质牧草而受到禾草学家的高度重视。因此从形态学水平、蛋白质水平、分子标记水平分别对冰草属植物遗传多样性进行综合研究探索其遗传背景, 为冰草属种质资源的创新利用提供理论依据<sup>[5-13]</sup>。据研究, 我国冰草属植物大多分布于北方地区, 以沙质地或沙质草原生境为多, 海拔集中于 1000-1500m。内蒙古是我国冰草属植物的广泛分布区, 对其进行系统的挖掘研究, 有利于对其进行有效的保护和利用。前人的研究主要针对冰草属的某一物种或者种质材料较少, 基于大样本表型性状数据的遗传多样性分析和综合评价及筛选冰草优异种质材料的研究鲜见报道。中国农业科学院草原研究所国家种质多年生牧草圃课题组于 2013-2019 年分别对内蒙古 10 个盟市及地区冰草属植物进行了考察收集。本研究以冰草属中的冰草、沙生冰草、蒙古冰草和多花冰草 143 份种质材料为研究对象, 对其 17 个性状进行表型遗传多样性分析和综合评价, 为冰草种质资源创新利用研究和新品种选育提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验材料包括 143 份冰草属种质资源 (表 1), “均选自农业农村部的“牧草种质资源安全保存及普查收集资源鉴定评价与繁殖编目入圃”项目”。

### 1.2 试验设计

试验于 2015-2022 年在国家种质多年生牧草圃中 (东经 111°45 'E, 北纬 40°36 'N, 海拔 1065 m) 进行。主要气候特点是干旱、寒冷、多风, 年均气温为 5.6 °C, 极端最高气温 39.3 °C, 极端最低气温 -35.6 °C。年均降水量 400 mm 左右, 多集中在 7~9 月份, 无霜期为 130 d 左右。土地有机质平均含量为 0.6 %, 缺氮、缺磷、钾适中。土壤盐碱化程度较高。在温室播种育苗, 全生育期浇水 4-5 次, 施底肥 1 次, 中耕除草 3-4 次。试验按随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 20 m<sup>2</sup>, 每小区之间相隔 60 cm<sup>[14]</sup>。

### 1.3 测定项目与方法

在开花期将每份材料随机选取长势一致的 10 个单株，分别测定其茎干节数、叶舌长度、小穗数、小穗长、小花数、颖长度、颖果长度、株高、叶片长度、叶片宽度、叶面积、叶形指数、叶周长、叶长宽比、种子长、种子宽、千粒重等 17 个表型性状。参照《冰草种质资源描述规范和数据标准》<sup>[15]</sup>和《作物种质资源繁殖更新技术规程》<sup>[16]</sup>执行。143 份供试材料均生长 3 年以上，17 个性状连续测定 2 年的平均值用于统计分析。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2016 软件进行数据输入、整理和计算。使用 Origin 2023 软件进行相关分析、主成分分析和聚类分析，采用灰色关联分析进行综合评价与指标筛选。

遗传多样性指数 (H') 采用 Shannon-Weaver 信息指数，以衡量种质资源群体遗传多样性大小，计算公式： $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 。式中的  $P_i$  为某一性状第  $i$  个级别出现的概率<sup>[17]</sup>。

依据郭瑞琳<sup>[18]</sup>的灰色关联系数理论进行灰色关联分析，可将 143 份冰草属种质视为一个整体，即灰色关系统。每一份种质均为系统中的一个元素，各因素之间的灰色关联程度越大，因素之间相似程度越高。依据实际生产需求，可将所测指标的最优值设定为  $X_0$ ，将茎干节数、叶舌长度、小穗数、小穗长、小花数、颖长度、颖果长度、株高、叶片长度、叶片宽度、叶面积、叶形指数、叶周长、叶长宽比、种子长、种子宽、千粒重分别设定为比较数列  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$ 、 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 。

数据标准化处理：由于各个性状之间的差异比较大，为确保数据的同序性与等效性，采用均值法进行无量纲处理，计算各性状与标准性状的绝对值差，按照公式

$$\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$$

计算各点绝对差。式中： $X_0(k)$ 表示参考序列第  $k$  个指标， $X_i(k)$ 表示第  $i$  个品种的第  $k$  个指标， $X_i'(k)$ 表示第  $i$  个品种第  $k$  个指标的无量纲化处理后的值。

(2) 关联系数计算：

$$\varepsilon_i(k) = [\min \Delta_i(k) + \rho \max \Delta_i(k)] / [\Delta_i(k) + \rho \max \Delta_i(k)]$$

式中分辨系数  $\rho=0.5$ ，认为同等重要。

(3) 关联度计算：等权关联度利用公式  $r_i = 1/n \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)$ ,

加权关联度采用熵值赋权法确定权重<sup>[19]</sup>,

$$\text{熵值公式为: } E_k = -K \sum_{i=1}^n P_{ik} \ln P_{ik},$$

$$\text{权重公式为: } \omega(k) = (1 - E_k) / \sum_{k=1}^m (1 - E_k),$$

$$\text{加权关联度: } r_i' = 1/n \sum_{k=1}^n \omega(k) \varepsilon_i(k),$$

式中： $P_{ik}$ 表示第  $i$  个品种第  $k$  个指标的比重， $K=1/\ln n$ 。

表 1 供试材料及原产地

Table 1 The selected material and country of origin

编号 No.	种名 Species name	采集地 Collection places	编号 No.	种名 Species name	采集地 Collection places
A-1	冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市固阳县大青山隧道旁	A-73	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
A-2	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市辉腾锡勒北	A-74	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗高日罕
A-3	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗那日图	A-75	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗两面井
A-4	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达苏	A-76	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗恩宝
A-5	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗巴彦敖包	A-77	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达
A-6	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗陶海胡德格	A-78	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗翁贡大队

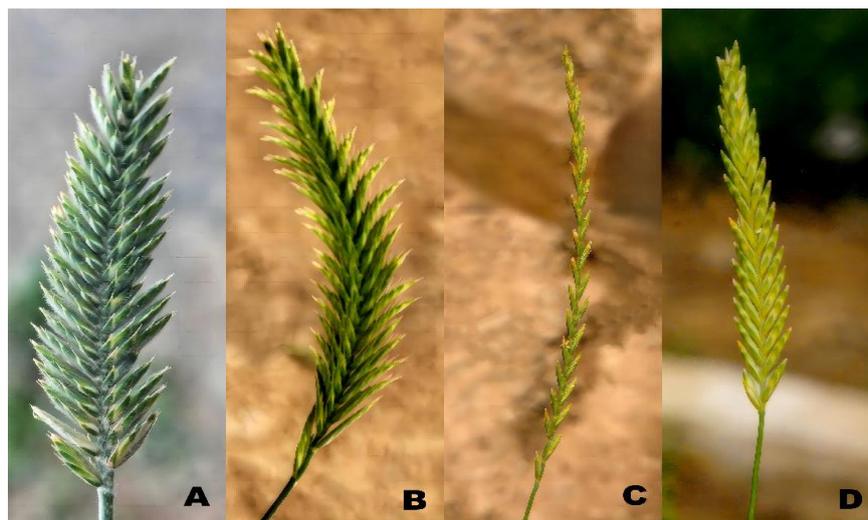
A-7	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗沙拉牧场	A-79	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	巴彦淖尔市乌拉特中旗
A-8	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗沙拉牧场	A-80	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	巴彦淖尔市乌拉特中旗
A-9	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗给日苏	A-81	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗
A-10	冰草 <i>A.cristatum</i>	呼伦贝尔市伊敏东南玉维纳河 10	A-82	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
A-11	冰草 <i>A.cristatum</i>	呼伦贝尔市满洲里呼伦湖边	A-83	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
A-12	冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市九峰山林场	A-84	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	赤峰市贺日木音塔拉
A-13	冰草 <i>A.cristatum</i>	阿拉善盟贺兰山南寺	A-85	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	赤峰市贺日木音塔拉
A-14	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟白音花距霍林郭勒 83	A-86	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	赤峰市经棚镇
A-15	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗以东白音花收费	A-87	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗两面井
A-16	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市巴林左旗	A-88	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗恩宝
A-17	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市克什克腾旗石林景区	A-89	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达
A-18	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市经棚镇至石林景区途中	A-90	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗翁贡大队
A-19	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟莫根达赖浑善达克	A-91	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市固阳县金山镇
A-20	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟	A-92	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市固阳县银号镇
A-21	冰草 <i>A.cristatum</i>	兴安盟阿尔山市伊尔施	A-93	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市固阳县大青山隧道旁
A-22	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗	A-94	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市希拉穆仁与百灵庙岔口
A-23	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗北路 70 公里	A-95	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	包头市希拉穆仁与百灵庙岔口
A-24	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗南巴拉嘎尔高勒	A-96	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗 029 县道
A-25	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗彭安图	A-97	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗吉生太镇
A-26	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟毛登牧场	A-98	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗
A-27	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗	A-99	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗
A-28	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗	A-100	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市察哈尔右翼中旗大滩
A-29	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特右旗	A-101	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市辉腾锡勒北
A-30	冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗	A-102	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗明安图镇
A-31	冰草 <i>A.cristatum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗毕克梯音高	A-103	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗星耀镇
A-32	冰草 <i>A.cristatum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗巴音花镇	A-104	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来镇
A-33	冰草 <i>A.cristatum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗	A-105	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正蓝旗上都镇
A-34	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市卓资县保安乡丰恒村	A-106	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正蓝旗哈日嘎嘎镇
A-35	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市卓资县梨花镇	A-107	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗
A-36	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市卓资县旗下营镇	A-108	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗宝昌镇
A-37	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县赛乌素镇	A-109	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗保胜村
A-38	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县大淖尔乡小淖尔	A-110	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗地房子村
A-39	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县店子镇	A-111	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗新宝拉格镇
A-40	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县苏木山	A-112	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗翁贡乌拉苏木
A-41	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县察尔湖	A-113	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗新宝拉格镇
A-42	冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市化德县	A-114	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗
A-43	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市浑善达克沙地边缘	A-115	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗巴彦淖尔
A-44	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市克什克腾旗石林风景区	A-116	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗
A-45	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市克什克腾旗经棚镇	A-117	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗查干敖包
A-46	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市红山区	A-118	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
A-47	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市敖汉旗	A-119	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
A-48	冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市奈曼旗	A-120	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
A-49	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗彭安图	A-121	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
A-50	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗高日罕	A-122	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
A-51	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗两面井	A-123	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗高日罕
A-52	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗翁贡大队	A-124	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗宝日陶勒盖
A-53	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达苏	A-125	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗宝昌县
A-54	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗保胜村	A-126	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗
A-55	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟太卜寺旗地房子村	A-127	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗
A-56	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗新宝拉格镇	A-128	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗以东白音花收
A-57	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗翁贡乌拉苏木	A-129	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市经棚至石林景区
A-58	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗	A-130	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	呼伦贝尔盟红花尔基樟子松林
A-59	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗查干敖包镇	A-131	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	阿拉善盟贺兰山南寺

A-60	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗	A-132	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟阿巴嘎旗东部
A-61	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗	A-133	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗以东白音花收
A-62	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗	A-134	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市商都县西井子镇
A-63	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	赤峰市贺日木音塔拉	A-135	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市商都县小海子镇
A-64	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	赤峰市巴林右旗	A-136	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	呼和浩特市劈柴沟平顶山
A-65	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	赤峰克什克腾旗经棚镇	A-137	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	呼和浩特保合镇保合村
A-66	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗毕克梯音高	A-138	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市卓资县保安乡丰恒村
A-67	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	呼和浩特市保合镇保合村	A-139	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县大淖乡小淖
A-68	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	呼伦贝尔市胡列也吐	A-140	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县赛乌素镇
A-69	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	呼伦贝尔市东马格拉	A-141	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	乌兰察布市兴和县大库联乡
A-70	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	呼伦贝尔市黑山头口岸	A-142	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	浑善达克沙地克旗达尔罕乌拉苏
A-71	沙芦草 <i>A.mongolicum</i>	呼伦贝尔市额尔古纳	A-143	多花冰草 <i>A.cristatum</i>	赤峰市敖汉旗
A-72	沙生冰草 <i>A.desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部			

## 2 结果与分析

### 2.1 表型性状的描述性统计

在内蒙古 10 个盟市及地区采集的冰草属植物统一种植在同一生境条件下，表型性状上有明显的差异，例如从穗部性状来看，在穗长、穗宽及颖毛的有无等,种间差距明显（图 1）<sup>[20]</sup>。分析冰草属种质资源表型性状的遗传变异情况及遗传多样性指数（表 2），17 个表型性状的离散程度存在较大差异。结果表明：变异系数变化范围为 93.92%~11.47%之间，平均为 42.80%，其中叶片宽度的变异系数最高（93.92%），变幅为 0.34-7.65，均值为 1.48，其次是叶面积的变异系数（88.30%），变幅为 1.12-25.87，均值为 6.07，表明这些性状离散程度较大，变异度丰富；种子长的离散程度最低（11.47%），变幅为 4.16-7.60，均值为 6.19，说明该性状遗传特性较稳定。一般变异系数大于 10%表示样本间差异较大<sup>[21]</sup>。本研究中 17 个表型性状的变异系数均大于 10%，说明 143 份冰草属种间差异较大，有利于优异种质材料的筛选。17 个表型性状的 Shannon-Wiener 遗传多样性指数（H'）为 2.025~1.279，平均变幅为 1.721。其中，颖长度、株高、种子长、叶片长度遗传多样性指数较大，表明这些性状具有较高的遗传多样性和分布均衡性，小穗长的遗传多样性指数最低，表明其分布相对集中。主花序色遗传多样性指数最高，表明该性状遗传多样性最丰富<sup>[22]</sup>。



A:冰草; B: 多花冰草; C: 沙芦草; D: 沙生冰草

A:*A.cristatum*; B: *A.cristatum* var. *pluriflorum*; C:*A.mongolicum*; D:*A.desertorum*

图 1 冰草属 4 个种的穗状特征图

Fig.1 Tassel characteristics of 4 species of *Agropyron* Gaertn.

表2 17个表型性状的变异情况及多样性分析

Table 2 Analysis of variation and diversity of 17 phenotypic characters

性状Character	变异范围 Range	平均值 Mean	标准差 Std.	变异系数 CV%	遗传多样性指数 H'
茎干节数 NSS	1.8-4.2	2.86	0.51	17.83	1.938
叶舌长度 LTL	0.27-2.57	0.97	0.50	51.55	1.623
小穗数 NS	8.88-98.4	47.40	20.43	43.10	1.351
小穗长 SL	1.1-35.7	10.97	5.53	50.41	1.279
小花数 FN	4.4-56	25.92	12.02	46.37	1.517
颖长度 GL	1.88-20.30	8.48	3.12	36.79	2.025
颖果长度 CL	4.85-15.96	7.45	1.82	24.43	1.846
株高 PH	25.46-88.08	57.59	15.27	26.52	1.999
叶片长度 BL	4.53-23.13	11.10	3.53	31.80	1.959
叶片宽度 BW	0.34-7.65	1.48	1.39	93.92	1.333
叶面积 LA	1.12-25.87	6.07	5.36	88.30	1.854
叶形指数 LSI	0.01-1.55	0.25	0.14	56.00	1.741
叶周长 LC	10.02-92.10	25.44	14.93	58.69	1.651
叶长宽比 LLWR	4.33-29.03	15.77	5.29	33.54	1.367
种子长 SL	4.16-7.60	6.19	0.71	11.47	1.960
种子宽 SW	0.32-1.43	1.11	0.14	12.61	1.865
千粒重 TGW	0.98-5.48	2.76	1.22	44.20	1.956

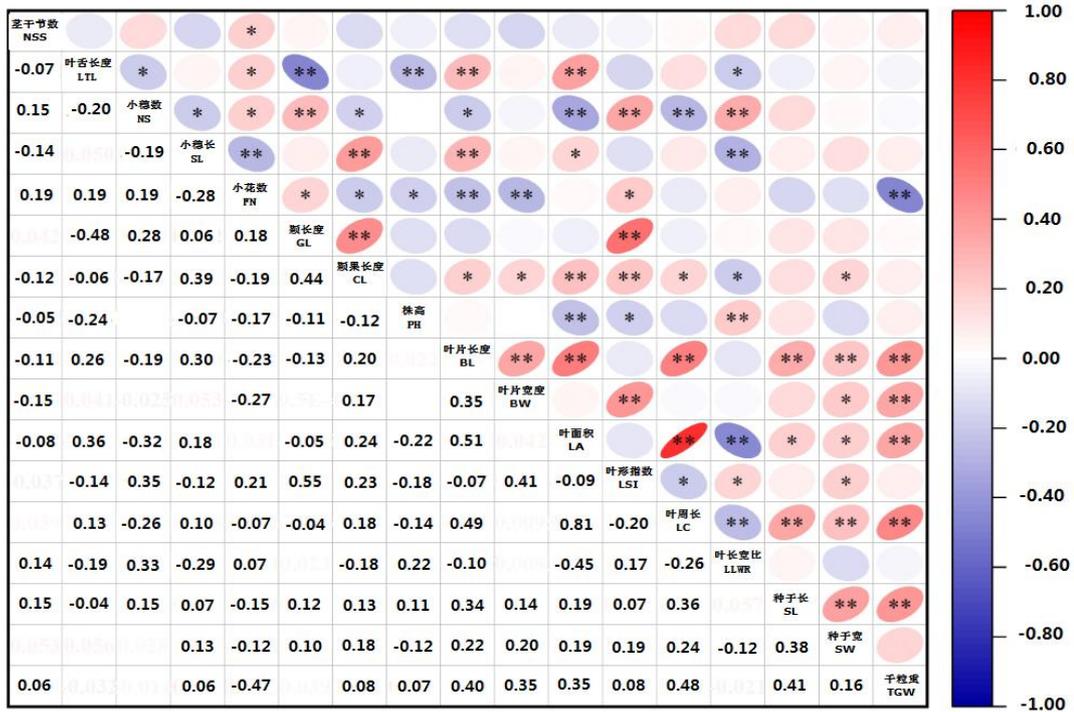
NSS: 茎干节数; LTL: 叶舌长度; NS: 小穗数; SL: 小穗长; FN: 小花数; GL: 颖长度; CL: 颖果长度; PH: 株高; BL: 叶片长度; BW: 叶片宽度; LA: 叶面积; LSI: 叶形指数; LC: 叶周长; LLWR: 叶长宽比; SL: 种子长; SW: 种子宽; TGW: 千粒重; 下同

NSS: Number of stem segments; LTL: Leaf tongue length; NS: Number of spikelets; SL: Spikelet length; FN: Floret number; GL: Glume length; CL: Caryopsis length; PH: Plant height; BL: Blade length; BW: Blade width; LA: Leaf area; LSI: Leaf shape index; LC: Leaf circumference; LLWR: Leaf length to width ratio; SL: Seed length; SW: Seed width; TGW: Thousand grain weight;

The same as below

## 2.2 表型性状的相关性分析

分析冰草属表型性状的相关性(图2)表明, 17个表型性状间存在不同程度的相关性, 且大部分达显著或极显著水平。茎干节数与小花数呈显著正相关; 叶舌长度与小花数呈显著正相关; 叶舌长度与叶片长度和叶面积呈极显著正相关; 叶舌长度与颖长度和株高呈极显著负相关; 小穗数与颖长度、叶形指数和叶长宽比呈极显著正相关, 与叶面积和叶周长呈极显著负相关; 小穗长与颖果长度和叶片长度呈极显著正相关, 与小花数和叶长宽比呈极显著负相关; 小花数与叶片长度、叶片宽度和千粒重呈极显著负相关; 颖长度与颖果长度和叶形指数呈极显著正相关; 颖果长度与叶片长度呈极显著正相关; 株高与叶长宽比呈极显著正相关, 与叶面积呈极显著负相关; 叶片长度与叶片宽度、叶面积、叶周长、种子长、种子宽和千粒重均呈极显著正相关; 叶片宽度与叶形指数和千粒重均呈极显著正相关; 叶面积与叶周长和千粒重均呈极显著正相关, 与叶长宽比呈极显著负相关; 叶周长与种子长、种子宽和千粒重均呈极显著正相关, 与叶长宽比呈极显著负相关; 种子长与种子宽和千粒重均呈极显著正相关。其中叶面积与叶周长的相关系数最大(0.81), 叶舌长度与颖长度的负相关系数最大(-0.48)。以上分析可以说明冰草属各表型性状间是相互影响、相互制约的, 在种质创新利用时应进行综合分析。



\* 和 \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 水平差异显著。

\* and \*\* means significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.

图 2 17 个表型性状的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of 17 phenotypic traits

### 2.3 表型性状的主成分分析

本试验 KMO 为 0.588, Bartlett's 球形检验显著性为  $p = 0.00$ , df 为 136, 说明该变量可以为主成分分析提供合理的基础。结果表明 (表 3), 前 6 个主成分的特征值分别为 3.550、2.413、1.818、1.744、1.342 和 1.009, 贡献率分别为 20.885%、14.197%、10.692%、10.262%、7.897% 和 5.934%, 累计贡献率达 69.866%, 表明这 6 个综合指标可代表全部数据绝大部分的信息量。第 1 主成分中小穗长、颖果长度、叶片长度、叶面积、叶周长、种子长和千粒重的特征向量较大, 说明第 1 主成分可作为叶型和种子因子相关的综合指标; 第 2 主成分中小穗数、颖长度和叶形指数的特征向量较大, 说明第 2 主成分是小穗数、颖长度和叶形指数的综合反映; 第 3 主成分中株高和叶长宽比的特征向量较大, 说明第 3 主成分反映的是株型因子; 第 4 主成分中茎干节数和小花数的特征向量较大, 说明第 4 主成分可作为茎干节数和小花数相关的综合指标; 第 5 主成分中叶舌长度和叶片宽度的特征向量较大, 说明第 5 主成分反映的是叶形因子; 第 6 主成分中种子宽的特征向量较大, 说明第 6 主成分是种子的综合反映。

表 3 各性状的主成分载荷和贡献率

Table 3 Factor loading matrix and contribution rates of principal components for each trait

主成分 Principle factor	表型性状 Phenotypic	1	2	3	4	5	6
特征值 Eigen value		3.550	2.413	1.818	1.744	1.342	1.009
贡献率 Contribution ratio (%)		20.885	14.197	10.692	10.262	7.897	5.934
累计贡献率Cumulative contribution ratio (%)		20.885	35.082	45.774	56.036	63.932	69.866
特征向量 Eigen vector	茎干节数 NSS	-0.137	0.097	0.090	0.491	-0.362	0.363
	叶舌长度 LTL	0.305	-0.494	-0.175	0.288	0.522	0.229
	小穗数 NS	-0.423	0.492	0.093	0.323	0.055	0.122
	小穗长 SL	0.436	0.005	-0.211	-0.499	-0.174	0.350
	小花数 FN	-0.384	-0.091	-0.490	0.572	0.058	-0.088

颖长度 GL	-0.101	0.730	-0.430	-0.044	-0.315	-0.229
颖果长度 CL	0.410	0.356	-0.420	-0.421	-0.175	0.036
株高 PH	-0.142	0.010	0.623	-0.245	-0.190	-0.131
叶片长度 BL	0.741	0.046	0.182	0.038	0.185	0.003
叶片宽度 BW	0.322	0.417	0.180	-0.213	0.639	-0.037
叶面积 LA	0.780	-0.172	-0.238	0.333	-0.055	-0.292
叶形指数 LSI	-0.133	0.749	-0.309	0.086	0.396	-0.141
叶周长 LC	0.759	-0.072	0.006	0.399	-0.268	-0.267
叶长宽比	-0.459	0.262	0.443	0.211	0.117	-0.046
种子长 SL	0.429	0.425	0.316	0.285	-0.208	0.280
种子宽 SW	0.397	0.356	-0.055	0.168	0.066	0.534
千粒重 TGW	0.562	0.320	0.467	0.148	-0.002	-0.256

## 2.4 冰草属种质资源表型性状的聚类分析

依据 17 个表型性状对参试冰草属种质资源进行聚类分析，143 份资源被分为 3 大类。由图 3 和表 4 可知，第 I 类包含 27 份资源，该类群的主要特征为茎干节数高(2.988)、小穗数多(81.422)、小花数多(32.435)、颖长长(10.032)、叶片宽度长(1.434)、叶形指数高(0.287)和叶长宽比高(18.783)。第 II 类包含 23 份资源，该类群的主要特征为叶舌较长(1.213)、小穗较长(12.714)、颖果较长(8.152)、叶片较长(14.605)、叶面积较大(16.606)、叶周长长(54.632)及种子长、宽和千粒重都较高(6.683)、(1.153)和(4.039)。第 III 类包含 93 份资源，该类群的主要特征为株高较高(61.008)。整体聚类结果与地域来源无明显相关性。

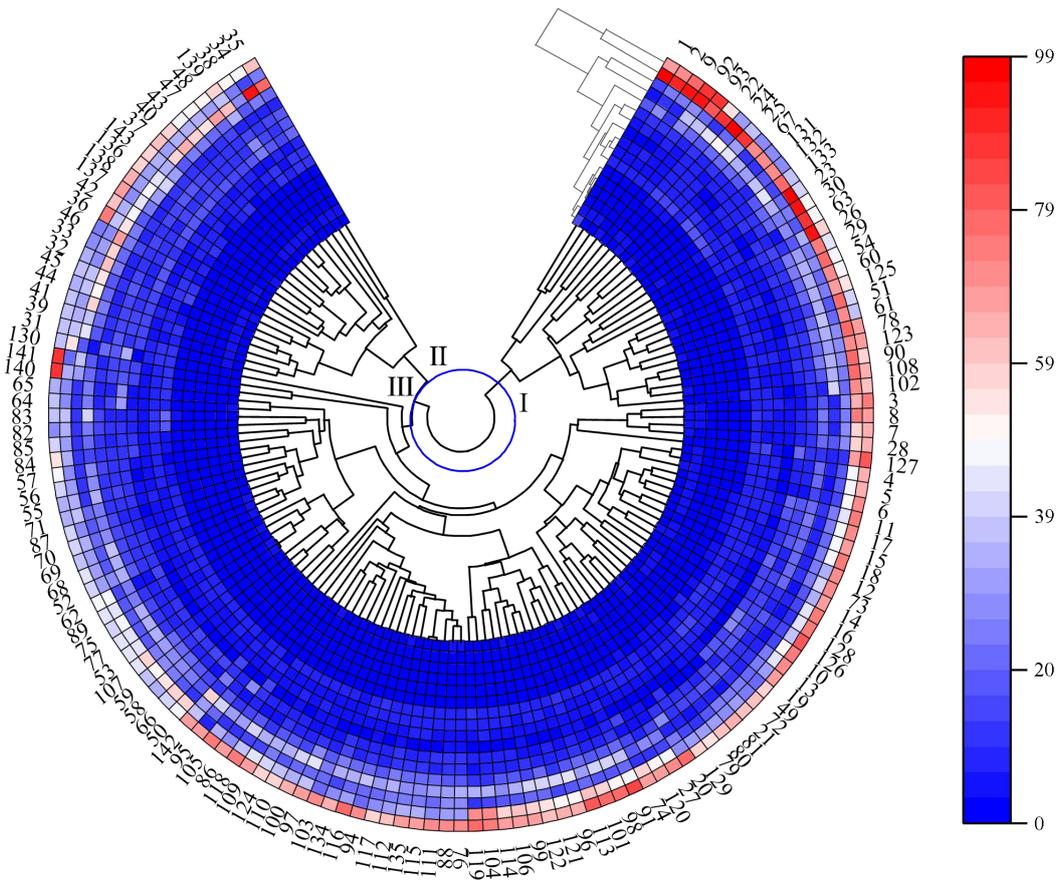


图 3 143 份冰草属种质资源聚类图

Fig.3 Cluster analysis in 143 *Agropyron* Gaertn. germplasm resources map

表 4 聚类后不同类群 17 个表型性状的统计结果

Table 4 Statistical analysis on 17 agronomic traits of materials after cluster analysis

性状 Character	种质群		
	I	II	III
数目 Number	27	23	93
茎干节数 NSS	2.988	2.843	2.826
叶舌长度 LTL	0.856	1.213	0.948
小穗数 NS	81.422	31.722	41.403
小穗长 SL	8.300	12.714	11.322
小花数 FN	32.435	24.148	24.464
颖长度 GL	10.032	7.816	8.190
颖果长度 CL	6.910	8.152	7.439
株高 PH	52.839	49.332	61.008
叶片长度 BL	10.390	14.605	10.444
叶片宽度 BW	1.434	1.296	1.405
叶面积 LA	4.485	16.606	3.923
叶形指数 LSI	0.287	0.021	0.127
叶周长 LC	21.904	54.632	19.243
叶长宽比 LLWR	18.783	10.296	16.247
种子长 SL	6.256	6.683	6.043
种子宽 SW	1.103	1.153	1.095
千粒重 TGW	2.639	4.039	2.486

## 2.5 冰草属种质资源表型性状的综合评价

根据灰色系统理论和应用数列间的相似程度来判断两个系统或系统中的两个因素之间关联程度的原理, 根据关联度分析原则, 关联度大的数列与标准数列最接近<sup>[23]</sup>, 对 143 份冰草属资源的 17 个表型性状进行综合评价。结果见表 5, 143 份冰草属资源的关联度大小排位前 20 的依次为 A-24>A-23>A-25>A-22>A-142>A-35>A-92>A-43>A-136>A-18>A-9>A-48>A-139>A-8>A-34>A-13>A-2>A-19>A-17>A-91。表明来自于锡林郭勒盟西乌旗南巴拉嘎尔高勒西的冰草 (A-24)、锡林郭勒盟西乌旗北路 70 公里的冰草 (A-23)、锡林郭勒盟正镶白旗彭安图的冰草 (A-25) > 乌兰察布市四子王旗的冰草 (A-22) 和浑善达克沙地克旗达尔罕乌拉苏木的多花冰草 (A-142) 的综合表现较好; 而来自于巴彦淖尔市乌拉特中旗的沙生冰草 (A-79)、锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗的沙芦草 (A-62)、锡林郭勒盟正镶白旗两面井的沙生冰草 (A-87)、锡林郭勒盟正镶白旗高日罕的沙芦草 (A-50)、赤峰市经棚至石林景区的多花冰草 (A-129) 综合表现相对较差。在灰色关联度分析中, 关联度的大小反映了各因子重要性的差异<sup>[24]</sup>。从表 6 可看出, 各性状关联度的大小顺序为: 千粒重>小穗数>叶舌长度>叶片宽度>叶面积>小花数>叶长宽比>叶形指数>株高>茎干节数>叶周长>小穗长>颖长度>叶片长度>颖果长度>种子长>种子宽。可筛选千粒重、小穗数、叶舌长度、叶片宽度和叶面积作为冰草属种质评价指标。

表 5 143 份冰草属种质资源加权关联度与序位

Table 5 Weighted correlation degree and sequence of 143 *Agropyron* Gaertn. germplasm resources

编号	种名	加权关联度	序位	编号	种名	加权关联度	序位	编号	种名	加权关联度	序位
No.	Species	Weighted	Sequenc	No.	Species	Weighted	Sequence	No.	Species	Weighted	Sequenc
	name	correlation	e		name	correlation			name	correlation	e
		degree				degree				degree	
A-1	冰草	0.484	103	A-49	沙芦草	0.5	69	A-97	多花冰草	0.505	63
A-2	冰草	0.547	17	A-50	沙芦草	0.445	140	A-98	多花冰草	0.493	81
A-3	冰草	0.524	34	A-51	沙芦草	0.473	117	A-99	多花冰草	0.496	75
A-4	冰草	0.51	55	A-52	沙芦草	0.475	115	A-100	多花冰草	0.493	83
A-5	冰草	0.512	52	A-53	沙芦草	0.47	124	A-101	多花冰草	0.493	84
A-6	冰草	0.498	73	A-54	沙芦草	0.505	65	A-102	多花冰草	0.528	30
A-7	冰草	0.521	37	A-55	沙芦草	0.474	116	A-103	多花冰草	0.459	134
A-8	冰草	0.552	14	A-56	沙芦草	0.456	136	A-104	多花冰草	0.504	66
A-9	冰草	0.558	11	A-57	沙芦草	0.488	94	A-105	多花冰草	0.493	86
A-10	冰草	0.536	22	A-58	沙芦草	0.469	127	A-106	多花冰草	0.489	90
A-11	冰草	0.518	43	A-59	沙芦草	0.467	128	A-107	多花冰草	0.481	109
A-12	冰草	0.511	54	A-60	沙芦草	0.518	41	A-108	多花冰草	0.496	76
A-13	冰草	0.547	16	A-61	沙芦草	0.495	79	A-109	多花冰草	0.469	126
A-14	冰草	0.505	64	A-62	沙芦草	0.441	142	A-110	多花冰草	0.475	114
A-15	冰草	0.535	24	A-63	沙芦草	0.48	110	A-111	多花冰草	0.47	125
A-16	冰草	0.531	27	A-64	沙芦草	0.486	96	A-112	多花冰草	0.496	78
A-17	冰草	0.543	19	A-65	沙芦草	0.461	131	A-113	多花冰草	0.5	68
A-18	冰草	0.559	10	A-66	沙芦草	0.46	133	A-114	多花冰草	0.486	97
A-19	冰草	0.545	18	A-67	沙芦草	0.488	92	A-115	多花冰草	0.484	104
A-20	冰草	0.525	33	A-68	沙芦草	0.508	61	A-116	多花冰草	0.495	80
A-21	冰草	0.522	36	A-69	沙芦草	0.49	89	A-117	多花冰草	0.484	106
A-22	冰草	0.598	4	A-70	沙芦草	0.484	102	A-118	多花冰草	0.483	107
A-23	冰草	0.608	2	A-71	沙芦草	0.484	100	A-119	多花冰草	0.493	82
A-24	冰草	0.629	1	A-72	沙生冰草	0.485	99	A-120	多花冰草	0.471	120
A-25	冰草	0.603	3	A-73	沙生冰草	0.499	70	A-121	多花冰草	0.47	123
A-26	冰草	0.539	21	A-74	沙生冰草	0.461	132	A-122	多花冰草	0.49	88
A-27	冰草	0.477	111	A-75	沙生冰草	0.456	135	A-123	多花冰草	0.518	42
A-28	冰草	0.51	57	A-76	沙生冰草	0.488	91	A-124	多花冰草	0.484	105
A-29	冰草	0.529	29	A-77	沙生冰草	0.472	119	A-125	多花冰草	0.476	113
A-30	冰草	0.521	38	A-78	沙生冰草	0.514	50	A-126	多花冰草	0.496	77
A-31	冰草	0.517	44	A-79	沙生冰草	0.427	143	A-127	多花冰草	0.521	39
A-32	冰草	0.53	28	A-80	沙生冰草	0.453	137	A-128	多花冰草	0.47	122
A-33	冰草	0.515	48	A-81	沙生冰草	0.452	138	A-129	多花冰草	0.451	139
A-34	冰草	0.548	15	A-82	沙生冰草	0.498	72	A-130	多花冰草	0.514	49
A-35	冰草	0.571	6	A-83	沙生冰草	0.535	23	A-131	多花冰草	0.484	101
A-36	冰草	0.51	56	A-84	沙生冰草	0.473	118	A-132	多花冰草	0.498	74
A-37	冰草	0.515	47	A-85	沙生冰草	0.464	130	A-133	多花冰草	0.517	45
A-38	冰草	0.493	85	A-86	沙生冰草	0.504	67	A-134	多花冰草	0.512	53
A-39	冰草	0.492	87	A-87	沙生冰草	0.442	141	A-135	多花冰草	0.483	108
A-40	冰草	0.52	40	A-88	沙生冰草	0.485	98	A-136	多花冰草	0.563	9

A-41	冰草	0.507	62	A-89	沙生冰草	0.464	129	A-137	多花冰草	0.516	46
A-42	冰草	0.527	31	A-90	沙生冰草	0.508	60	A-138	多花冰草	0.509	59
A-43	冰草	0.565	8	A-91	多花冰草	0.542	20	A-139	多花冰草	0.552	13
A-44	冰草	0.509	58	A-92	多花冰草	0.569	7	A-140	多花冰草	0.498	71
A-45	冰草	0.532	26	A-93	多花冰草	0.526	32	A-141	多花冰草	0.487	95
A-46	冰草	0.513	51	A-94	多花冰草	0.488	93	A-142	多花冰草	0.581	5
A-47	冰草	0.522	35	A-95	多花冰草	0.471	121	A-143	多花冰草	0.532	25
A-48	冰草	0.555	12	A-96	多花冰草	0.477	112				

表 6 17 个表型性状指标关联度及其序位

Table 6 Correlation degree and sequence of 17 phenotypic traits

性状 Character	关联度 Value	序位 Sequence
茎干节数 NSS	0.057	10
叶舌长度 LTL	0.076	3
小穗数 NS	0.081	2
小穗长 SL	0.05	12
小花数 FN	0.063	6
颖长度 GL	0.049	13
颖果长度 CL	0.042	15
株高 PH	0.061	9
叶片长度 BL	0.049	14
叶片宽度 BW	0.065	4
叶面积 LA	0.065	5
叶形指数 LSI	0.062	8
叶周长 LC	0.052	11
叶长宽比 LLWR	0.063	7
种子长 SL	0.039	16
种子宽 SW	0.037	17
千粒重 TGW	0.088	1

### 3 讨论

#### 3.1 冰草属种质资源表型多样性

表型性状受基因型和环境共同作用，表型多样性分析是研究作物遗传多样性的重要手段<sup>[25]</sup>。变异系数和遗传多样性指数是评价种质资源表型遗传多样性的重要指标。作物表型性状的变异系数越大，其离散程度就越大。多样性指数越高，表明性状多样性程度越丰富<sup>[26]</sup>。本研究中冰草属的变异系数为 93.92%~11.47% 之间，平均为 42.80%，表明各性状间存在明显差异，其中叶片宽度 (93.92)、叶面积 (88.30) 和叶周长 (58.69) 的变异系数最大，表明这些性状离散程度较大，变异度丰富，这与前人研究结果基本一致<sup>[27-28]</sup>；种子长 (11.47) 和种子宽 (12.61) 的离散程度最低，说明这 2 个性状遗传特性较稳定。本研究中冰草属的表型性状遗传多样性指数 (H') 范围为 1.279~2.025，平均为 1.72，其中以颖长度 (2.025) 的多样性指数最大，小穗长 (1.279) 的多样性指数最小。这与李赢和李欢等的研究结果基本相同<sup>[24-25]</sup>。对冰草属种质资源进行表型多样性分析，可以了解不同地域冰草属种质资源不同表型性状间的遗传差异，有助于筛选出综合表型性状优异的种质材料。

#### 3.2 冰草属种质资源表型性状的相关性、主成分和聚类分析

表型性状间的相关性分析主要是评估次要性状对主要性状遗传增益的影响，为育种中多个性状的有效选择提供理论参考<sup>[29]</sup>。本研究对 143 份冰草属种质资源的 17 个表型性状进行了相关分析，结果表明，17 个表型性状间存在不同程度的相关性，且大部分达显著或极显著水平。其中叶面积与叶周长的相关系数最大（0.81），叶舌长度与颖长度的负相关系数最大为（-0.48）。兰保祥等研究发现，35 个蒙古冰草居群的穗长、穗宽、小穗数、小花数、穗轴节间长 5 个形态学性状，变异系数和遗传多样性指数均存在较大的变异<sup>[9]</sup>。杨靖等研究表明性状间存在不同程度的相关性，其中株高与分蘖数、株高与叶片数、叶色与叶形等性状呈极显著正相关（ $P < 0.01$ ）；株高与小穗密度、叶片数与小穗密度等性状呈显著负相关（ $P < 0.01$ ）<sup>[30]</sup>。本研究的表型性状与上述的内容有不同，结果认为冰草属种质资源表型性状的变异程度相似，因为研究的冰草属的种有所不同。主成分分析通过降维的方法可以清晰地反映造成群体差异的主要原因<sup>[31]</sup>。根据对 143 冰草属种质资源的 17 个表型性状指标进行主成分分析，结果发现前 6 个主成分的累计贡献率达 69.866%，表明这 6 个综合指标可代表全部数据绝大部分的信息量，与杨靖等研究结果相似<sup>[30]</sup>。认为比较客观地反映了各主成分控制的性状间的关系，也可以对冰草属种质资源进行综合评价。聚类分析是研究作物种质资源的亲缘关系及起源的常用手段，可以直观体现种质个体间相关性的分类<sup>[32]</sup>。使用聚类分析的方法对 143 份冰草属种质资源进行划分，3 个类群间具有明显差异，可以初步明确试验材料的大致类型。

### 3.3 冰草属种质资源表型性状综合评价

遗传多样性评价是从整体上认识作物基因型和表型多样性程度、挖掘和利用优异基因资源的理论和实践基础<sup>[33]</sup>。目前，针对冰草属表型性状综合评价的研究还不多见。在数据比较少见的情况下相关分析的结果具有一定的局限性。而灰色关联分析是灰色系统理论中的一个重要内容用于分析系统内各因素的关联程度<sup>[34]</sup>。本研究应用灰色关联度理论，对 143 份冰草属资源的表型性状表现进行综合评价，结果表明，可筛选千粒重、小穗数、叶舌长度、叶片宽度和叶面积作为冰草属种质评价指标。4 份冰草和 1 份多花冰草综合表现好，可以作为育种备选材料。

### 3.4 冰草属种质资源的保护与利用

目前，关于冰草属种质资源遗传多样性的研究在表型遗传多样性仍是最基本、最直接简便的研究方法，一直发挥着重要的作用。通过对表型特征的鉴定和分类，可以更好地进行冰草属的分类和管理，保证这一资源的遗传多样性和稳定性。冰草属种质资源重要的表型性状指标，如千粒重、种子长、种子宽、叶片长度、株高、小穗数等性状丰富的表型遗传多样性可为冰草属种质资源种资源保护和利用提供详实基础数据，特别是我国沙芦草已被列为国家二级珍稀濒危植物和急需保护的农作物野生近缘种，通过对冰草属表型遗传多样性的研究，可深入了解冰草属材料的遗传特性和种质资源的丰富性，为冰草属种质资源的保护和利用提供科学依据和信息支持。

### 参考文献：

- [1] 耿以礼.中国主要植物图说-禾本科（第 1-2 册）.北京:科学出版社,1959  
Geng Y I.Illustration of the main plants in china-gramineae (vol. 1-2) . Beijing:Science Press,1959
- [2] 王方.冰草属植物种质资源遗传多样性研究.兰州:兰州大学,2009  
Wang F.Study on Genetic Diversity of *Agropyron Gaertn* Germplasm.Lan zhou:Lanzhou University,2009
- [3] 云锦凤,米福贵.冰草属牧草的种类与分布.中国草地,1989,(3):14-17  
Yun J F.Mi F G.The species and distribution of *Agropyron cristatum* ( L.). Chinese grassland,1989,(3):14-17
- [4] 内蒙古植物志编辑委员会.内蒙古植物志（第 7 卷）.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1983  
The Inner Mongolia Botany Editorial Committee. Botany of Inner Mongolia (Vol. 7) .Hhht :Inner Mongolia People's Publishing House,1983

- [5] 车永和,杨欣明,杨燕萍,李秀全.根茎冰草醇溶蛋白遗传多样性研究.江苏农业科学,2008,(4):74-76  
Che Y H ,Yang X M,Yang Y P,Li X Q,He P R,Li L H.Genetic Diversity of Prolamines in *Agropyron michnoi* Roshev.Jiangsu Agricultural Science,2008,(4):74-76
- [6] 李晓全,高有汉,刘扬,索培芬,韩冰.我国北方 9 份旱生-沙生植物蒙古冰草遗传多样性研究.草业学报,2016,25(3):77-85  
Li X Q,Gao Y H,Liu Y,Suo P F, Han B.The genetic diversity of 9 populations of drydesert *Agropyron mongolicum* collected in northern China.Acta Prataculturae Sinica,2016,25(3):77-85
- [7] 卓小凤.基于形态学和 *GBSSI* 基因对冰草的系统发育及选传多样性研究.成都:四川农业大学,2015  
Zhuo X F.The phylogenetic and genetic diversity studies of *Agropyron cristatum*(L.) Gaertner (Poaceae:Triticeae) based on morphology and *GBSSI* gene.Chen du:Sichuan Agricultural University,2015
- [8] 曾亮,袁庆华,王方,王瑜.冰草属植物种质资源遗传多样性的 ISSR 分析.草业学报,2013,22(1):260-267  
Zeng L,Yuan Q H,Wang F,Wang Y.Genetic diversity analysis of *Agropyron* germplasm resources by ISSR.Acta Prataculturae Sinica,2013,22(1):260-267
- [9] 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  
Lan B X, Li LH,Wang H. Genetic Diversity of *Agropyron mongolicum* Keng Populations.Scientia Agricultura Sinica,2005,38(3):468-473
- [10] 孙志民.冰草属植物的收集与遗传多样性研究.北京:中国农业科学院研究生院,2000  
Sun Z M.Collection and Genetic Diversity Analysis of *Agropyron Gaertn*.Bei Jing:Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences,2000
- [11] 车永和,杨欣明,杨燕萍,李秀全,何蓓如,李立会.沙生冰草醇溶蛋白遗传多样性研究.麦类作物学报,2007,27(5):767-771  
Che Y H,Yang X M,Yang Y P,Li X Q,He P R,Li L H.Genetic Diversity of Prolamines in *Agropyron desertorum* (Fisch ex Link ) Schult.Journal of Triticeae Crops, 2007,27(5):767-771
- [12] 解新明.蒙古冰草的遗传多样性研究.呼和浩特:内蒙古农业大学,2001  
Xie X M.Studies on the Genetic Diversity of Mongolian Wheatgrass (*Agropyron mongolicum* Keng).Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2001
- [13] 车永和,李洪杰,杨燕萍,杨欣明,李秀全,何蓓如,李立会.沙生冰草遗传多样性的 SSR 分析.麦类作物学,2008 28(1):35-40  
Che Y H,Yang X M,Yang Y P,Li X Q,He P R,Li L H.Genetic Diversity of *Agropyron Deserotum* Schult Originating from China Based on SSR.Journal of Triticeae Crops, 2008 28(1):35-40
- [14] 李鸿雁,李志勇,黄帆,师文贵,李俊,刘磊,解永凤.内蒙古扁蓿豆种质资源花性状的变异分析.植物遗传资源学报,2015,16(6):1223-1228  
Li H Y,Li Z Y,Huang F,Shi W G,Li J,Liu L,Jie Y F.Analysis of Flower Character Variation of *Medicago ruthenica* in Inner Mongolia.Journal of Plant Genetic Resources,2015,16(6):1223-1228
- [15] 袁庆华,赵来喜,高洪文.冰草种质资源描述规范和数据标准.北京:中国农业出版社,2007  
Yuan Q H,Zhao L X,Gao H W.Descriptors and Data Standard for Wheatgrass (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.).Bei jing:China Agriculture Press, 2007
- [16] 王述民,卢新雄,李立会.作物种质资源繁殖更新技术规程.北京:中国农业科学技术出版社.2013  
Wang S M,Lu X X,Li L H.Technical specification for propagation and renewal of crop germplasm resources.Bei jing:China Agricultural Science and Technology Press.2013
- [17] 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.草地学报,2021,29(3):495-503  
Liang G L,Liu W H,Ma X.Genetic diversity analysis of spike traits in 590 oat germplasm resources.Journal of grassland science,2021,29(3):495-503
- [18] 郭瑞林.作物灰色育种学.北京:中国农业出版社,1988: 26-40  
Guo R L.Grey breeding of crops.Bei jing:China Agriculture Press, 1988: 26-40
- [19] 张光雨,马和平,邵小明,王江伟,沈振西,付刚.西藏河谷区 9 个引进燕麦品种的生产性能和营养品质比较研究.草业学

报,2019, 28(05): 121-131

Zhang GY, Ma H P, Shao X M, Wang J W, Shen Z X, Fu G. A comparative study of yield and nutritive value of nine imported oat varieties in the Valley region of Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(5): 121-131

[20] 李志勇, 刘磊. 中国北方禾本科植物分类图谱 (上), 2014, 47-52

Li Z Y, Liu L. Taxonomic map of gramineae in Northern China (Part 1). Inner Mongolia University Press, 2014, 47-52

[21] 孙铭, 符开欣, 范彦, 张新全, 张成林, 郭志慧, 汪霞, 马啸. 15 份多花黑麦草优良引进种质的表型变异分析. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(4): 655-662

Sun M, Fu K X, Fan Y, Zhang X Q, Zhang C L, Guo ZH, Wang X, Ma X. Analysis of phenotypic variations in 15 introduced elite germplasm of *Lolium multiflorum* lam. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(4): 655-662

[22] 董承光, 王娟, 周小凤, 马晓梅, 李生秀, 余渝, 李保成. 基于表型性状的陆地棉种质资源遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(3): 438-446

Dong C G, Wang J, Zhou X F, Ma X M, Li S X, Yu Y, Li B C. Evaluation on genetic diversity of cotton germplasm resources (*Gossypium hirsutum* L.) on morphological characters. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(3): 438-446

[23] 李鸿雁, 李志勇, 李红, 蔡丽艳, 张静萍, 邢建军. 用灰色关联度法综合评价扁蓿豆生产性能. *草业科学*, 2012, 29(11): 1737-1743

Li H Y, Li Z Y, Li H, Cai L Y, Zhang J P, Xin J J. Comprehensive evaluation of production performance of *Medicago ruthenica* by grey correlation method. *Prataculture Science*, 2012, 29(11): 1737-1743

[24] 耿慧, 王志锋, 刘卓, 金春花, 庞建国, 徐安凯. 国内外苜蓿品种主要性状间的灰色关联度分析. *草业科学*, 2009, 26(10): 85-86

Gen H, Wang Z F, Liu Z, Jing C H, Pang J G, Xu A K. Grey relational grade analysis of main characters of alfalfa varieties at home and abroad. *Prataculture Science*, 2009, 26(10): 85-86

[25] 李赢, 刘海翠, 石晓旭, 石吕, 韩笑, 刘建, 魏亚凤. 398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(5): 1311-1320

Li Y, Liu H Ch, Shi X X, Shi L, Han X, Liu J, Wei Y F. Phenotypic Diversity Analysis of 398 Naked Barley Germplasm Resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(5): 1311-1320

[26] 李欢, 鄢小青, 杨占烈, 谭金玉, 黎小冰, 陈能刚, 吴荣菊, 陈惠查, 阮仁超. 贵州香禾糯地方稻种资源表型遗传多样性分析与综合评价. *中国农业科学*, 2023, 56(11): 2035-2046

Li H, Yan X Q, Yang Z L, Tan J Y, Li X B, Chen N G, Wu R J, Chen H C, Ruan R C. Analysis and Comprehensive Evaluation of Phenotype Genetic Diversity in Kam Sweet Rice Germplasm Resources in Guizhou. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2035-2046

[27] 王晓映, 张方玉, 王星, 王成琪, 刘焱, 肖本泽. 基于分子标记和表型性状的水稻地方品种遗传多样性研究. *植物遗传资源学报*, 2023, 24 (3): 636-647

Wang X Y, Zhang F Y, Wan X, Wang C Q, Liu Y, Xiao B Z. Diversity of Rice Landraces Revealed by Molecular Markers and Phenotypic Traits. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24 (3): 636-647

[28] 杨海龙, 王晖, 雷锦超, 蔡金洋. 浙江省早籼稻种质资源的表型多样性分析与评价. *浙江农业学报*, 2022, 34(8): 1571-1581

Yang H L, Wang H, Lei J C, Cai J Y. Analysis and evaluation of phenotypic diversities of early indica rice germplasm resources in Zhejiang Province. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(8): 1571-1581

[29] 周瑜, 李泽碧, 黄娟, 吴毓, 张亚勤, 张志良, 张晓春. 高粱种质资源表型性状的遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(3): 654-664

Zhou Y, Li Z B, Huang J, Wu Y, Zhang Y Q, Zhang Z L, Zhang X C. Genetic diversity of sorghum germplasm based on phenotypic traits. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(3): 654-664

[30] 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

Yang J, Zhang X M, Chen Y, Fan D C, Wan T. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 30 *Agropyron* genus germplasm resources in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(9): 1-11

- [31] 李鸿雁, 李俊, 黄帆, 李志勇, 刘磊. 内蒙古 78 份葱属野生种表型遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2017, 18(4): 620-628  
Li H Y, Li J, Huang F, Li Z Y, Liu L. Phenotypic Diversity of 78 Accessions of Wild *Allium* Species in Inner Mongolia. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 620-628
- [32] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 王广鹏. 211 份板栗种质资源花序表型多样性和聚类分析. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4667-4682  
Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Wang G P. Catkin phenotypic diversity and cluster analysis of 211 Chinese chestnut germplasms. *Scientia Agricultural Sinica*, 2020, 53(22): 4667-4682
- [33] CAMPBELL D R. Using phenotypic manipulations to study multivariate selection of floral trait associations. *Annals of Botany*, 2009, 103(9): 1557-1566.
- [34] 邓聚龙. 灰理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社 2003  
Den J L. Basis of grey theory. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press 2003