

# 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)

**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、相关性分析、主成分分析、聚类分析和灰色关联法等方法, 鉴定了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。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11.47%~93.92%之间, 平均为42.80%, 其中叶片宽度的变异系数最高, 种子长的变异系数最低; 遗传多样性指数(H')为1.279~2.025, 平均为1.721, 其中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, 17个表型性状间存在不同程度的相关性。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, 种子综合性状较好, 包含23份资源; 第III类综合性状较差, 株高较高, 包含93份资源。采用灰色关联方法综合评价冰草属种质的表现, 结果表明千粒重、小穗数、叶舌长度、叶片宽度和叶面积可作为种质评价指标, 并筛选出编号18、22、23、24、25、35和43等优异冰草材料及编号92、136和142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 Yuechao<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>Pratacultural 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 of *Agropyron* genus, which were collected from 10 cities and regions in Inner Mongolia, China, were studied for phenotypic variations at 17 traits. Appraise 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 11.47% to 93.92% ,

收稿日期: 2023-11-09 网络出版日期: 2024-01-15

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20231109006>

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

通信作者: 李志勇, 研究方向为草资源与育种, E-mail: zhiyongli1216@126.com

辛霞, 研究方向为农作物种质资源保存与技术, 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)

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 1.721. The diversity index of glume length was the highest, and lowest for spikelet length. There were correlations among 17 phenotypic traits to varying degrees. 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 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 18, 22, 23, 24, 25, 35, 43, as well as *A. cristatum* var. *pluriflorum* accessions 92, 136 and 142, can be used for genetic improvement and breeding of ice grass.

**Key words:** *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<sup>[1]</sup>提出的狭义冰草属的概念为主, 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 个变型是毛稈冰草 (*A. sibiricum* f. *pubiflorum*)<sup>[2]</sup>。冰草属主要生长在高山、平原、草甸、草原、荒漠、沙丘等环境, 主要分布于我国东北、华北、西北、黄河以北的干旱地区, 以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 mm, 内稃脊上具短小刺毛。沙生冰草茎秆成疏丛, 直立, 叶片多内卷成锥状, 穗状花序, 小穗含 4~7 朵小花, 颖舟形, 外稃舟形, 内稃脊上疏被短纤毛。沙芦草茎秆成疏丛, 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 朵

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的遗传多样性进行综合研究, 探索其遗传背景, 可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 1000~1500 m<sup>[9]</sup>。内蒙古是我国冰草属植物的广泛分布区, 对冰草属植物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。本研究以收集的冰草属中的冰草、沙生冰草、蒙古冰草和多花冰草共 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), 均来源于农业农村部的“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。

表1 供试材料信息

Table 1 The information of tested materials

编号 No.	种名 Species name	采集地 Collection places	编号 No.	种名 Species name	采集地 Collection places
1	冰草 <i>A. cristatum</i>	包头市固阳县大青山隧道旁	46	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市红山区
2	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市辉腾锡勒北	47	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市敖汉旗
3	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗那日图	48	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市奈曼旗
4	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达苏	49	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗彭安图
5	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗巴彦敖包	50	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗高日罕
6	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗陶海胡德格	51	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗两面井
7	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗沙拉牧场	52	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗翁贡大队
8	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗沙拉牧场	53	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达苏
9	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗给日苏	54	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗保胜村
10	冰草 <i>A. cristatum</i>	呼伦贝尔市伊敏东南玉维纳河 10公里	55	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗地房子村
11	冰草 <i>A. cristatum</i>	呼伦贝尔市满洲里呼伦湖边	56	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗新宝拉格镇
12	冰草 <i>A. cristatum</i>	包头市九峰山林场	57	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗翁贡乌拉苏木
13	冰草 <i>A. cristatum</i>	阿拉善盟贺兰山南寺	58	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗
14	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟白音花距霍林郭勒 83公里	59	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗查干敖包镇
15	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗以东白音花收费站	60	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
16	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市巴林左旗	61	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
17	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市克什克腾旗石林景区	62	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
18	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市经棚镇至石林景区途中	63	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	赤峰市贺日木音塔拉
19	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟莫根达赖浑善达克	64	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	赤峰市巴林右旗
20	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟	65	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	赤峰克什克腾旗经棚镇
21	冰草 <i>A. cristatum</i>	兴安盟阿尔山市伊尔施	66	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗毕克梯音 高勒
22	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市四子王旗	67	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	呼和浩特市保合镇保合村
23	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗北路70公里	68	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	呼伦贝尔市胡列也吐
24	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟西乌旗南巴拉嘎尔高勒	69	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	呼伦贝尔市东马格拉
25	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗彭安图	70	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	呼伦贝尔市黑山头口岸
26	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟毛登牧场	71	沙芦草 <i>A. mongolicum</i>	呼伦贝尔市额尔古纳
27	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗	72	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
28	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗	73	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
29	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟苏尼特右旗	74	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗高日罕
30	冰草 <i>A. cristatum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗	75	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗两面井
31	冰草 <i>A. cristatum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗毕克梯音高勒	76	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗恩宝
32	冰草 <i>A. cristatum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗巴音花镇	77	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎达苏
33	冰草 <i>A. cristatum</i>	巴彦淖尔市乌拉特前旗	78	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗翁贡大队
34	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市卓资县保安乡丰恒村	79	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	巴彦淖尔市乌拉特中旗
35	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市卓资县梨花镇	80	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	巴彦淖尔市乌拉特中旗
36	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市卓资县旗下营镇	81	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗
37	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市兴和县赛乌素镇	82	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
38	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市兴和县大淖尔乡小淖尔村	83	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟东苏旗西部
39	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市兴和县店子镇	84	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	赤峰市贺日木音塔拉
40	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市兴和县苏木山	85	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	赤峰市贺日木音塔拉
41	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市兴和县察尔湖	86	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	赤峰市经棚镇
42	冰草 <i>A. cristatum</i>	乌兰察布市化德县	87	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗两面井
43	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市浑善达克沙地边缘	88	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗恩宝
44	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市克什克腾旗石林风景区	89	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗阿拉腾嘎 达苏
45	冰草 <i>A. cristatum</i>	赤峰市克什克腾旗经棚镇	90	沙生冰草 <i>A. desertorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗翁贡大队

表 1 (续)

编号 No.	种名 Species name	采集地 Collection places	编号 No.	种名 Species name	采集地 Collection places
91	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	包头市固阳县金山镇	118	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
92	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	包头市固阳县银号镇	119	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
93	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	包头市固阳县大青山隧道旁	120	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
94	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	包头市希拉穆仁与百灵庙岔口	121	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
95	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	包头市希拉穆仁与百灵庙岔口	122	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗
96	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市四子王旗 029 县道	123	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗高日罕
97	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市四子王旗吉生太镇	124	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗宝日陶勒盖
98	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市四子王旗	125	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗宝昌县
99	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市四子王旗	126	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市四子王旗
100	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市察哈尔右翼中旗大滩乡	127	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市四子王旗
101	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市辉腾锡勒北	128	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟西乌旗以东白音花收费站
102	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗明安图镇	129	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	赤峰市经棚至石林景区
103	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正镶白旗星耀镇	130	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	呼伦贝尔盟红花尔基樟子松林
104	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来镇	131	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	阿拉善盟贺兰山南寺
105	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正蓝旗上都镇	132	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟阿巴嘎旗东部
106	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟正蓝旗哈毕日嘎镇	133	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟西乌旗以东白音花收费站
107	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗	134	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市商都县西井子镇
108	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗宝昌镇	135	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市商都县小海子镇
109	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗保胜村	136	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	呼和浩特市劈柴沟平顶山
110	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟太仆寺旗地房子村	137	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	呼和浩特市保合镇保合村
111	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗新宝拉格镇	138	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市卓资县保安乡丰恒村
112	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗翁贡乌拉苏木	139	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市兴和县大淖尔乡小淖尔村
113	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟镶黄旗新宝拉格镇	140	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市兴和县赛乌素镇
114	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗	141	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	乌兰察布市兴和县大库联乡
115	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗巴彦淖尔镇	142	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	浑善达克沙地克旗达尔罕乌拉苏木
116	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗	143	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	赤峰市敖汉旗
117	多花冰草 <i>A. cristatum</i> var. <i>pluriflorum</i>	锡林郭勒盟苏尼特左旗查干敖包镇			

## 1.2 试验方法

**1.2.1 田间种植** 试验于2015-2022年在国家种质多年生牧草圃(东经111°45',北纬40°36',海拔1065 m)进行。国家种质多年生牧草圃主要气候特点是干旱、寒冷、多风,年均气温为5.6℃,极端最高气温39.3℃,极端最低气温-35.6℃。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,移苗种植,保苗存活。第二年分别在返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期浇水,施有机肥1次,中耕除草3~4次。随机区组设计,3次重复,小区长5 m,宽4 m,种植的株距40 cm,行距60 cm,每小区之间相隔60 cm<sup>[14]</sup>。

**1.2.2 表型性状测定** 在开花期,每份材料随机选取长势一致的10个单株,分别测定其茎秆节数、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,取平均值。

## 1.3 数据分析

利用Excel 2016软件进行数据输入、整理和计算。使用Origin 2023软件进行相关性分析、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,用于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>的灰色关联系统理论进行灰色关联分析,将143份冰草属种质视为一个整体即灰色关联系统,依据实际生产需求,将所测指标的最优值设定为参考序列 $X_0$ ,将茎秆节数、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 $X_1 \sim X_{17}$ 。

(1)数据标准化处理: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,正向指标按公式 $X'_i(k) = X_i(k)/X_0(k)$ ,进行无量纲化处理,负

向指标按公式 $X'_i(k) = X_0(k)/X_i(k)$ ,进行无量纲化处理。再计算各性状与标准性状的绝对值差,计算公式为: $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$ 。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)关联系数计算公式: $\varepsilon_i(k) = [\min \Delta_i(k) + \rho \max \Delta_i(k)] / [\Delta_i(k) + \rho \max \Delta_i(k)]$ ,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>,熵值公式 $E_k = -K \sum_{i=1}^n P_{ik} \ln P_{ik}$ ,权重公式 $\omega(k) = (1 - E_k) / \sum_{k=1}^m (1 - E_k)$ ,加权关联度公式 $r'_i = 1/n \sum_{k=1}^n \omega(k) \varepsilon_i(k)$ ,式中, $P_{ik}$ 表示第*i*个品种第*k*个指标的比重, $K = 1/\ln n$ 。

## 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,表型性状有明显差异,在穗部的穗长、穗宽及颖毛的有无等性状方面,种间差距明显(图1)<sup>[20]</sup>。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)分析表明,17个表型性状的变异系数存在较大差异。17个表型性状的变异系数在11.47%~93.92%之间,平均为42.80%,其中叶片宽度的变异系数最高,其变幅为0.34~7.65 cm,均值为1.48 cm,其次是叶面积的变异系数(88.30%),变幅为1.12~25.87 cm<sup>2</sup>,均值为6.07 cm<sup>2</sup>,表明叶片宽度等性状变异系数较大,变异度丰富;种子长的变异系数最低,变幅为4.16~7.60 mm,均值为6.19 mm。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')范围为1.279~2.025,平均值为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。颖长度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个种的穗部特征

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 Characters	变异范围 Range of variation	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数(%) CV	遗传多样性指数 H'
茎秆节数 NSS	2~4	3	0.51	17.83	1.938
叶舌长度(mm)LTL	0.27~2.57	0.97	0.50	51.55	1.623
小穗数 NS	9~98	47	20.43	43.10	1.351
小穗长(cm)SL	1.1~35.7	10.97	5.53	50.41	1.279
小花数 FN	4~56	26	12.02	46.37	1.517
颖长度(mm)GL	1.88~20.30	8.48	3.12	36.79	2.025
颖果长度(mm)CL	4.85~15.96	7.45	1.82	24.43	1.846
株高(cm)PH	25.46~88.08	57.59	15.27	26.52	1.999
叶片长度(cm)BL	4.53~23.13	11.10	3.53	31.80	1.959
叶片宽度(cm)BW	0.34~7.65	1.48	1.39	93.92	1.333
叶面积(cm <sup>2</sup> )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(cm)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(mm)SL	4.16~7.60	6.19	0.71	11.47	1.960
种子宽(mm)SW	0.32~1.43	1.11	0.14	12.61	1.865
千粒重(g)TGW	0.98~5.48	2.76	1.22	44.20	1.956

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



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

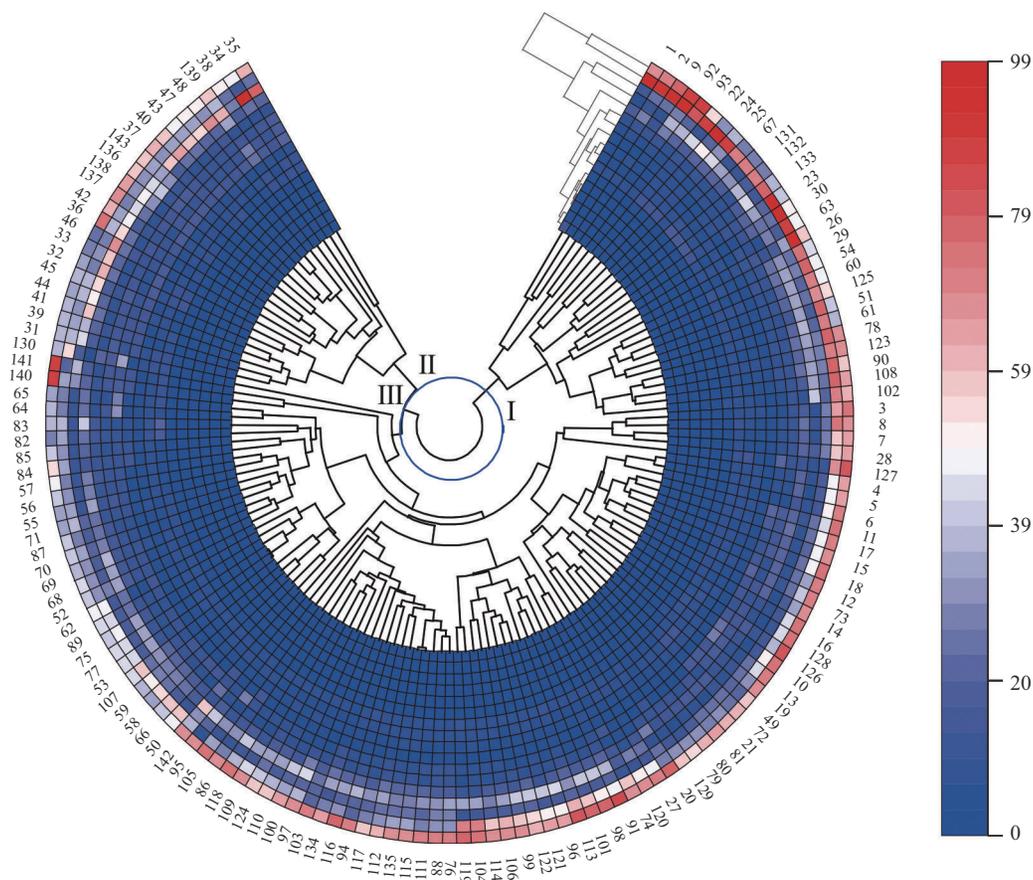
特征向量 Eigen vector	主成分 Principle factor					
	1	2	3	4	5	6
茎秆节数 NSS	-0.137	0.097	0.090	0.491	-0.362	0.363
叶舌长度 LTL	0.305	-0.494	-0.175	0.288	0.522	0.229
小穗数 NS	-0.423	0.492	0.093	0.323	0.055	0.122
小穗长 SL	0.436	0.005	-0.211	-0.499	-0.174	0.350
小花数 FN	-0.384	-0.091	-0.490	0.572	0.058	-0.088
颖长度 GL	-0.101	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 LLWR	-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
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

含 23 份资源, 主要特征为叶舌较长(1.213 mm)、小穗较长(12.714 cm)、颖果较长(8.152 mm)、叶片较长(14.605 cm)、叶面积较大(16.606 cm<sup>2</sup>)、叶周长长(54.632 cm)、种子较长(6.683 mm)、种子较宽(1.153 mm)和千粒重较高(4.039 g)。第 III 类包含 93 份资源, 主要特征为株高较高(61.008 cm)。整体聚类结果与地域来源无明显相关性。

### 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可判断两个系统或系统中的两个因素之间关联程度, 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(表 5), 结果表明 143 份冰草属资源关联度排位前 20 的种质编号依次为 24、23、25、22、142、35、92、43、136、18、9、48、139、8、34、13、2、19、17、91。其中来自于

锡林郭勒盟西乌旗南巴拉嘎尔高勒的冰草(编号 24)、锡林郭勒盟西乌旗北路 70 公里的冰草(编号 23)、锡林郭勒盟正镶白旗彭安图的冰草(编号 25)、乌兰察布市四子王旗的冰草(编号 22)和浑善达克沙地克旗达尔罕乌拉苏木的多花冰草(编号 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(编号 79)、锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗的沙芦草(编号 62)、锡林郭勒盟正镶白旗两面井的沙生冰草(编号 87)、锡林郭勒盟正镶白旗高日罕的沙芦草(编号 50)、赤峰市经棚至石林景区的多花冰草(编号 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, 千粒重、小穗数、叶舌长度、叶片宽度和叶面积可作为冰草属种质的评价指标。



种质材料编号同表 1; 聚类图由外向内性状依次是株高、小穗数、叶周长、小花数、叶长宽比、叶片长度、小穗长、叶面积、种子长、颖果长度、颖长度、叶片宽度、叶形指数、种子宽、叶舌长度、千粒重、茎秆节数

The code is same as table 1; The index of this chart from outside to inside is PH, NS, LC, FN, LLWR, BL, SL, LA, SL, CL, GL, BW, LSI, SW, LTL, TGW and NSS

图3 143份冰草属种质资源聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of 143 *Agropyron* Gaertn. germplasm resources

表4 不同类群 17 个表型性状的统计结果

Table 4 Statistical analysis on 17 agronomic traits of different group

性状 Characters	类群 Group		
	I	II	III
数目 Number	27	23	93
茎秆节数 NSS	3	3	3
叶舌长度(mm)LTL	0.856	1.213	0.948
小穗数 NS	81	32	41
小穗长(cm)SL	8.300	12.714	11.322
小花数 FN	32	24	24
颖长度(mm)GL	10.032	7.816	8.190
颖果长度(mm)CL	6.910	8.152	7.439
株高(cm)PH	52.839	49.332	61.008
叶片长度(cm)BL	10.390	14.605	10.444
叶片宽度(cm)BW	1.434	1.296	1.405
叶面积(cm <sup>2</sup> )LA	4.485	16.606	3.923
叶形指数 LSI	0.287	0.021	0.127

表 4 (续)

性状 Characters	类群 Group		
	I	II	III
叶周长(cm)LC	21.904	54.632	19.243
叶长宽比LLWR	18.783	10.296	16.247
种子长(mm)SL	6.256	6.683	6.043
种子宽(mm)SW	1.103	1.153	1.095
千粒重(g)TGW	2.639	4.039	2.486

表 5 143 份冰草属种质资源加权关联度与排序

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

编号 No.	种名 Species name	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	编号 No.	种名 Species name	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	编号 No.	种名 Species name	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking
1	冰草	0.484	103	29	冰草	0.529	29	57	沙芦草	0.488	94
2	冰草	0.547	17	30	冰草	0.521	38	58	沙芦草	0.469	127
3	冰草	0.524	34	31	冰草	0.517	44	59	沙芦草	0.467	128
4	冰草	0.510	55	32	冰草	0.530	28	60	沙芦草	0.518	41
5	冰草	0.512	52	33	冰草	0.515	48	61	沙芦草	0.495	79
6	冰草	0.498	73	34	冰草	0.548	15	62	沙芦草	0.441	142
7	冰草	0.521	37	35	冰草	0.571	6	63	沙芦草	0.480	110
8	冰草	0.552	14	36	冰草	0.510	56	64	沙芦草	0.486	96
9	冰草	0.558	11	37	冰草	0.515	47	65	沙芦草	0.461	131
10	冰草	0.536	22	38	冰草	0.493	85	66	沙芦草	0.460	133
11	冰草	0.518	43	39	冰草	0.492	87	67	沙芦草	0.488	92
12	冰草	0.511	54	40	冰草	0.520	40	68	沙芦草	0.508	61
13	冰草	0.547	16	41	冰草	0.507	62	69	沙芦草	0.490	89
14	冰草	0.505	64	42	冰草	0.527	31	70	沙芦草	0.484	102
15	冰草	0.535	24	43	冰草	0.565	8	71	沙芦草	0.484	100
16	冰草	0.531	27	44	冰草	0.509	58	72	沙生冰草	0.485	99
17	冰草	0.543	19	45	冰草	0.532	26	73	沙生冰草	0.499	70
18	冰草	0.559	10	46	冰草	0.513	51	74	沙生冰草	0.461	132
19	冰草	0.545	18	47	冰草	0.522	35	75	沙生冰草	0.456	135
20	冰草	0.525	33	48	冰草	0.555	12	76	沙生冰草	0.488	91
21	冰草	0.522	36	49	沙芦草	0.500	69	77	沙生冰草	0.472	119
22	冰草	0.598	4	50	沙芦草	0.445	140	78	沙生冰草	0.514	50
23	冰草	0.608	2	51	沙芦草	0.473	117	79	沙生冰草	0.427	143
24	冰草	0.629	1	52	沙芦草	0.475	115	80	沙生冰草	0.453	137
25	冰草	0.603	3	53	沙芦草	0.470	124	81	沙生冰草	0.452	138
26	冰草	0.539	21	54	沙芦草	0.505	65	82	沙生冰草	0.498	72
27	冰草	0.477	111	55	沙芦草	0.474	116	83	沙生冰草	0.535	23
28	冰草	0.510	57	56	沙芦草	0.456	136	84	沙生冰草	0.473	118

表5(续)

编号 No.	种名 Species name	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	编号 No.	种名 Species name	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	编号 No.	种名 Species name	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking
85	沙生冰草	0.464	130	105	多花冰草	0.493	86	125	多花冰草	0.476	113
86	沙生冰草	0.504	67	106	多花冰草	0.489	90	126	多花冰草	0.496	77
87	沙生冰草	0.442	141	107	多花冰草	0.481	109	127	多花冰草	0.521	39
88	沙生冰草	0.485	98	108	多花冰草	0.496	76	128	多花冰草	0.470	122
89	沙生冰草	0.464	129	109	多花冰草	0.469	126	129	多花冰草	0.451	139
90	沙生冰草	0.508	60	110	多花冰草	0.475	114	130	多花冰草	0.514	49
91	多花冰草	0.542	20	111	多花冰草	0.470	125	131	多花冰草	0.484	101
92	多花冰草	0.569	7	112	多花冰草	0.496	78	132	多花冰草	0.498	74
93	多花冰草	0.526	32	113	多花冰草	0.500	68	133	多花冰草	0.517	45
94	多花冰草	0.488	93	114	多花冰草	0.486	97	134	多花冰草	0.512	53
95	多花冰草	0.471	121	115	多花冰草	0.484	104	135	多花冰草	0.483	108
96	多花冰草	0.477	112	116	多花冰草	0.495	80	136	多花冰草	0.563	9
97	多花冰草	0.505	63	117	多花冰草	0.484	106	137	多花冰草	0.516	46
98	多花冰草	0.493	81	118	多花冰草	0.483	107	138	多花冰草	0.509	59
99	多花冰草	0.496	75	119	多花冰草	0.493	82	139	多花冰草	0.552	13
100	多花冰草	0.493	83	120	多花冰草	0.471	120	140	多花冰草	0.498	71
101	多花冰草	0.493	84	121	多花冰草	0.470	123	141	多花冰草	0.487	95
102	多花冰草	0.528	30	122	多花冰草	0.490	88	142	多花冰草	0.581	5
103	多花冰草	0.459	134	123	多花冰草	0.518	42	143	多花冰草	0.532	25
104	多花冰草	0.504	66	124	多花冰草	0.484	105				

表6 17个表型性状指标关联度及其排序

Table 6 Correlation degree and sort of 17 phenotypic characters

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

### 3 讨论

表型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

在11.47%~93.92%之间,平均为42.80%,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%)的变异系数较大,说明这些性状变异度丰富,这与王晓映等<sup>[27]</sup>和杨海龙等<sup>[28]</sup>的研究结果基本一致。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1.721,其中以颖长度的多样性指数最大,小穗长的多样性指数最小,这与耿慧等<sup>[24]</sup>和李赢等<sup>[25]</sup>的研究结果基本相同。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,有助于筛选出综合性状优良的种质材料。

表型性状间的相关性分析可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正相关系数最大(0.81),叶舌长度与颖长度的负相关系数最大(-0.48)。兰保祥等<sup>[9]</sup>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个形态学性状在变异系数和遗传多样性指数上均存在较大的变异。杨靖等<sup>[30]</sup>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呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。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>。143份冰草属种质资源的17个表型性状主成分分析表明,前6个主成分的累计贡献率达69.866%,说明这6个综合指标可代表全部数据绝大部分的信息,与杨靖等<sup>[30]</sup>研究结果相似。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>。143份冰草属种质资源可划分为3个类群,类群间具有明显差异,可以初步明确种质资源的大致类型。

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>。在数据比较少少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,可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,结果表明千粒重、小穗数、叶舌长度、叶

片宽度和叶面积可作为冰草属种质的评价指标;根据综合评价指标确定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。

目前,表型遗传多样性研究仍是最基本、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。千粒重、种子长、种子宽、叶片长度、株高、小穗数等表型性状鉴定可为冰草属种质资源种资源保护和利用提供详实的基础数据,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 L. 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. Lanzhou: 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. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1983
- [5] 车永和,杨欣明,杨燕萍,李秀全,何蓓如,李立会. 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种多样性研究. 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. Chendu: 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 L H, 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, 2000  
Sun Z M. Collection and genetic diversity analysis of *Agropyron Gaertn.* Beijing: 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. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 35-40  
Che Y H, Li H J, Yang Y P, Yang X M, 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, Xie 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.). Beijing: 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. Beijing: 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. Beijing: 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(5): 121-131  
Zhang G Y, 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). 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2014: 47-52  
Li Z Y, Liu L. Taxonomic map of gramineae in Northern China (Part 1). Hohhot: 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 Z H, 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  
Geng H, Wang Z F, Liu Z, Jin 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 C, 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, 万星, 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 germplasms 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 Agricultura 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