

DOI:10.11686/cyxb2025278

http://cyxb.magtech.com.cn

牛浴林, 包明芳, 王文虎, 等. 三江源地区10份无芒雀麦资源农艺性状与生产性能综合评价. 草业学报, 2026, 35(6): 83-92.

NIU Yu-lin, BAO Ming-fang, WANG Wen-hu, et al. A multivariate evaluation of agronomic traits, yield and seed production in ten accessions of *Bromus inermis* from the Three-River-Source Region. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 83-92.

## 三江源地区10份无芒雀麦资源农艺性状 与生产性能综合评价

牛浴林<sup>1,2</sup>, 包明芳<sup>1,2</sup>, 王文虎<sup>1,2</sup>, 陈鑫<sup>1,2</sup>, 刘凯强<sup>1,2</sup>, 刘文辉<sup>1,2</sup>, 秦燕<sup>1,2\*</sup>

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青藏高原种质资源研究与利用实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为了筛选出适宜在环青海湖地区种植的优异无芒雀麦资源,本研究以三江源地区10份野生无芒雀麦种质资源为对象,于青海省海北州分析和比较不同种质资源间农艺性状及饲草产量、种子产量等生产性能,通过构建结构方程模型(SEM)揭示影响产量的关键农艺性状,采用TOPSIS-多准则决策模型对供试无芒雀麦资源的各项指标进行综合评价,为环青海湖地区无芒雀麦种植提供理论依据。结果显示:1)2龄时,GN-2210的株高、茎粗、叶面积和单株种子产量较大,分别为137.20 cm、5.18 mm、30.69 cm<sup>2</sup>和114.29 g·株<sup>-1</sup>;3龄时,GN-2210株高、茎粗、叶面积和单株种子产量达到最大,分别为111.80 cm、4.33 mm、25.73 cm<sup>2</sup>和106.30 g·株<sup>-1</sup>;2)分段式结构方程(SEM)模型分析表明,叶面积和分蘖数是影响无芒雀麦饲草产量的关键因子,而影响无芒雀麦种子产量的驱动因子为叶面积和茎粗;3)TOPSIS-多准则决策模型表明,GN-221种质资源在生物量积累、单株结实量方面均显著优于其他资源,适宜在青藏高原东部种植与推广。

**关键词:**无芒雀麦;生产性能;资源;综合评价

## A multivariate evaluation of agronomic traits, yield and seed production in ten accessions of *Bromus inermis* from the Three-River-Source Region

NIU Yu-lin<sup>1,2</sup>, BAO Ming-fang<sup>1,2</sup>, WANG Wen-hu<sup>1,2</sup>, CHEN Xin<sup>1,2</sup>, LIU Kai-qiang<sup>1,2</sup>, LIU Wen-hui<sup>1,2</sup>, QIN Yan<sup>1,2\*</sup>

1. Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Xining 810016, China; 2. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Xizang Plateau Germplasm Resources, Xining 810016, China

**Abstract:** To screen for superior *Bromus inermis* genetic material suitable for cultivation in the area surrounding Qinghai Lake, this study utilized ten wild *B. inermis* germplasm lines from the Three-River-Source Region. The research was conducted in Haibei Prefecture, Qinghai Province and analyzed and compared agronomic traits of the germplasm lines, including forage yield and seed yield. A structural equation model (SEM) was constructed to identify key agronomic traits influencing yield. Additionally, the TOPSIS multi-criteria decision model was employed for a multi-trait evaluation of the tested *B. inermis* germplasm, to provide formal testing of *B. inermis* lines intended for cultivation around Qinghai Lake. It was found: 1) At two years old, variety GN-2210 exhibited greater plant height, stem diameter, leaf area, and seed yield per plant than other lines, measuring 137.20 cm, 5.18

收稿日期:2025-07-03;改回日期:2025-09-03

基金项目:青藏高原种质资源研究与利用实验室(2025)和现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-34)资助。

作者简介:牛浴林(1998-),男,青海海东人,在读硕士。E-mail:1468209515@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mule119@163.com

mm, 30.69 cm<sup>2</sup>, and 114.29 g·plant<sup>-1</sup>, respectively. At three years old, the plant height, stem diameter, leaf area, and seed yield per plant of GN-2210 reached their maximum values of 111.80 cm, 4.33 mm, 25.73 cm<sup>2</sup>, and 106.30 g·plant<sup>-1</sup>, respectively. 2) Analysis using a piecewise SEM indicated that leaf area and tiller number were key factors affecting the forage yield of *B. inermis*, while the key factors influencing its seed yield were leaf area and stem diameter. 3) The TOPSIS multi-criteria decision model demonstrated that the GN-221 germplasm lines was significantly superior to other varieties in terms of biomass accumulation and seed yield per plant, making it suitable for cultivation and promotion in the eastern Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words:** *Bromus inermis*; production performance; resources; comprehensive evaluation

青藏高原是我国重要的畜牧业生产基地之一<sup>[1]</sup>,但由于该地区气温较低、紫外线强、降水量少且不均匀,植物生长期较短<sup>[2]</sup>,严重制约当地畜牧业的发展<sup>[3]</sup>。此外,近年来在全球气候多变<sup>[4]</sup>和不合理利用的影响下,高寒地区草地退化、草地生产力降低、草畜季节性矛盾加剧<sup>[5]</sup>。因此,退化草地生态恢复是影响高寒地区社会发展的重要工程<sup>[6]</sup>,而适宜草种的选择是决定退化草地恢复成败的重要因素。

无芒雀麦(*Bromus inermis*)是禾本科雀麦属多年生优良牧草,其具有营养价值高,产量大,适口性好,利用季节长,耐寒、耐牧,适应性强等特点<sup>[7-8]</sup>,是建植人工草地和修复退化草地的重要草种。我国已通过国家品种审定委员会认证多个无芒雀麦栽培品种<sup>[9]</sup>,但由于无芒雀麦资源存在种子产量低及产量年际变异显著的生物学限制,商品种子生产体系不完善,且实际推广中仍存在生态适应性瓶颈,依旧无法满足修复退化草地的需求<sup>[6]</sup>,导致其草原生态修复与可持续发展受限。因此,亟须高产稳产、综合性好的优异乡土草种资源。前人已从无芒雀麦的产量<sup>[10-11]</sup>和遗传多样性<sup>[12-14]</sup>等角度开展了研究,显著加快无芒雀麦育种进程,挖掘了其在草畜牧业系统中的生产潜力,但这些研究还不能完全满足青藏高原地区生态修复和畜牧业发展的实际需求<sup>[15-16]</sup>。因此,对无芒雀麦资源进行综合评价,筛选出具有优异农艺性状组合,定向选育适应环青海湖高寒生境的新种质,为区域退化草地生态修复工程与可持续草畜牧业系统提供核心种源支撑。此外,以往对无芒雀麦饲草和种子生产性能的评价缺乏系统性,饲草产量和种子产量形成的驱动因子尚不明晰,导致无芒雀麦优异种质资源鉴定存在局限性,严重制约生态修复型品种的定向培育进程。

基于此,本研究聚焦三江源生态区(海南藏族自治州)野生的10份无芒雀麦种质资源,通过TOPSIS多准则决策模型构建综合评价体系,分段式结构方程模型(structural equation model, SEM)解析其饲草产量与种子产量的关键影响因素,旨在筛选具有高产稳产特性的优质种质资源,为缓解环青海湖地区草畜供需矛盾及退化生态系统修复提供优良牧草品种支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于青藏高原东部的青海省海北州西海镇(海北州牧草繁育基地),地理位置为36°59′36″N, 100°52′48″E。该区域为典型的高原大陆性气候,海拔为3156 m,气候以寒冷和湿润为主,无绝对无霜期,年均气温约为0.5℃,年降水集中在7—9月,年平均降水量约为369.1 mm,年蒸发量约为1538.50 mm,全年日照时数约为2980 h,无霜期约为93 d。土壤类型为栗钙土,pH值为8.30,有机碳含量为21.19 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为3.08 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量为0.28 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验材料来自青海省海南藏族自治州不同小生境(表1),试验地经深翻整平预处理,清除地表石块及杂草残留物后,采用随机区组设计,设置5次重复处理。2022年5月中旬进行大田播种,播种方式为穴播,每穴点播4~5粒种子,播种深度控制在3~4 cm,株行距均设置为50 cm。试验小区规格为3 m×5 m,四周设置1 m宽保护行,区间保留1 m作业通道。基肥施用磷酸二铵,施用量为75 kg·hm<sup>-2</sup>。幼苗出土后实施间苗作业,确保各穴位保留

单株健壮幼苗(无显著病虫害表征)。试验全程保持自然生长状态,未实施人工灌溉、追肥及放牧干预,田间管理方法为:2022年度实施3次除草作业,2023及2024年度每年开展4次除草作业。

表 1 试验材料的来源信息

Table 1 Sources of experimental materials

种质编号 Germplasm number	种质名称 Variety name	采集地点 Collection places	小生境 Microhabitat
GN-221	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县茫曲镇 Mangqu Town, Guinan County, Qinghai Province	茫拉河河边 Mangla river bank
GN-222	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县沙沟乡 Shagou Village, Guinan County, Qinghai Province	路边山坡 Roadside slopes
GN-223	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县塔秀乡 Taxiu Village, Guinan County, Qinghai Province	退化草场 Degraded grassland
GN-224	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县茫拉乡 Mangla Village, Guinan County, Qinghai Province	山坡阴坡 Hillside shady slopes
GN-225	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县塔秀乡 Taxiu Village, Guinan County, Qinghai Province	河边 Riverside
GN-226	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县森多乡 Senduo Village, Guinan County, Qinghai Province	路边灌丛 Roadside scrub
GN-227	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县沙沟乡 Shagou Village, Guinan County, Qinghai Province	土路中间 In the middle of the dirt road
GN-228	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县茫拉乡 Mangla Village, Guinan County, Qinghai Province	路边 Roadside
GN-229	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县沙沟乡 Shagou Village, Guinan County, Qinghai Province	围栏旁 Fenced area
GN-2210	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	青海省贵南县森多乡 Senduo Village, Guinan County, Qinghai Province	围栏封育草场 Fence off pastureland

### 1.3 试验取样及指标测定

取样标准参照王文虎等<sup>[17]</sup>的方法,于无芒雀麦开花盛期(2023年8月下旬—9月初,2龄期;2024年同期,3龄期)开展系统取样。采用系统抽样法在各试验区选取5株长势均一且无明显病虫害症状的样本植株,使用校准钢卷尺垂直测量其基部至最高生长点的距离(记录为绝对株高)、旗叶长度与宽度,游标卡尺测定茎粗,同步记录分蘖总数。完成形态指标测定后,进行基部齐地刈割,清除杂质后即刻测定鲜生物量。样品经密封转运至实验室后,105℃烘30min杀青处理,75℃恒温干燥至恒重后测定干物质含量。至完熟期(两年均于10月上旬)实施单株种子人工采收并进行称重。

$$\text{叶面积(leaf area, LA)} = 0.8317 \times L \times B$$

式中:L为叶长,B为叶宽,0.8317为校正系数<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用Excel 2016对数据进行初步整理。采用SPSS 27.0(芝加哥,IL,美国)首先对不同无芒雀麦资源的株高、叶面积、茎粗、总分蘖数、草产量和种子产量进行正态性(Kolmogorov-Smirnov)和方差齐性(homogeneity)检验。采用最小显著差异法(least significant difference, LSD)进行单因素方差多重比较( $\alpha=0.05$ ),并通过双因素方差分析(Two-way ANOVA)解析不同种质资源间的性状差异。基于factoextra与ggplot2程序包进行K均值聚类分析,筛选关键表型特征。运用plyr程序包构建TOPSIS多准则决策模型,系统评估农艺性状、单株饲草与种子生产效能。采用Mantel检验进行农艺性状与生产性能指标间的关联强度分析。通过piecewise SEM数据包构造SEM结构方程模型,量化各因素对饲草与种子产量的直接效应、间接效应及其路径系数,解析产量形成的调控路径。标准化效应值采用Origin 2022软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同无芒雀麦种质资源的农艺性状与产量

2龄时,GN-2210的株高、茎粗、叶面积达到最大,分别为137.20 cm、5.18 mm、30.69 cm<sup>2</sup>,显著高于GN-221( $P<0.05$ )(图1 a~c);GN-221总分蘖数最多、单株草产量最高,分别为430.80支·株<sup>-1</sup>、764.29 g·株<sup>-1</sup>(图1d, e),显著高于其他种质资源;GN-221、GN-2210单株种子产量较高,分别为111.67和114.29 g·株<sup>-1</sup>,显著高于其

他资源( $P < 0.05$ )(图1f)。3龄时,GN-2210株高、茎粗和叶面积最大,分别为111.80 cm、4.33 mm和25.73 cm<sup>2</sup>(图1a~c),显著高于其他种质资源;GN-221总分蘖数和单株草产量最高,分别为359.75支·株<sup>-1</sup>、695.71 g·株<sup>-1</sup>(图1d, e),GN-221、GN-2210单株种子产量较高,达104.29和106.30 g·株<sup>-1</sup>,显著高于其他资源( $P < 0.05$ )(图1f)。

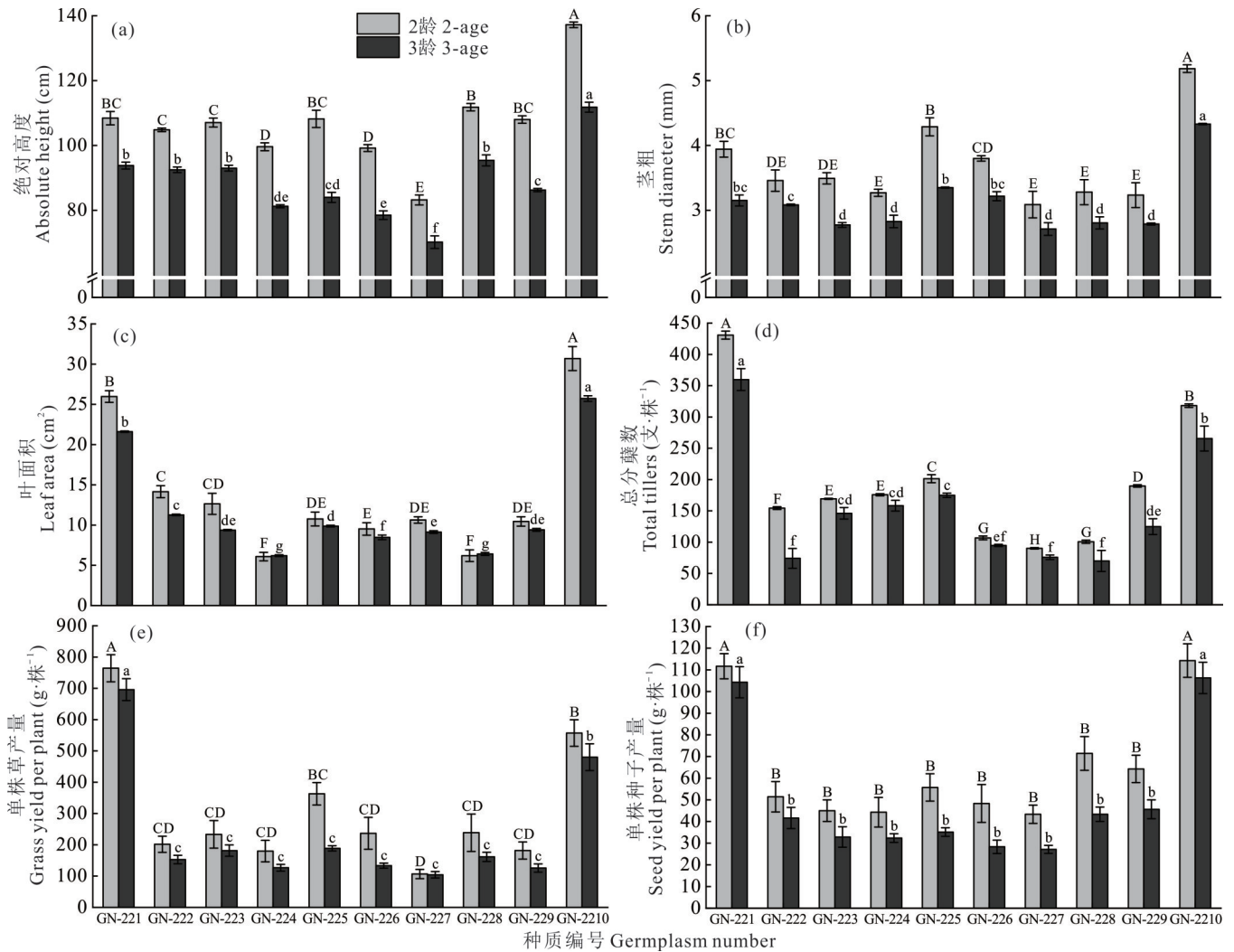


图1 无芒雀麦种质资源的农艺性状与产量

Fig. 1 Agronomic traits and yield performance of *B. inermis* germplasm resources

大写字母表示2龄时各种质资源间差异显著( $P < 0.05$ ),小写字母表示3龄时各种质资源间差异显著( $P < 0.05$ )。The capital letters indicate significant differences in 2 years old germplasm resources ( $P < 0.05$ ), the lowercase letters denote significant differences in 3 years old germplasm resources ( $P < 0.05$ ).

双因素ANOVA结果显示,资源和龄级在株高、茎粗、叶面积、总分蘖数及单株种子产量农艺性状上均达到极显著水平( $P < 0.01$ ),而单株草产量仅对资源因子敏感。资源和龄级的交互效应对株高呈现极显著影响( $P < 0.01$ ),对叶面积有显著影响( $P < 0.05$ ),对茎粗、总分蘖数、单株草产量和单株种子产量无显著影响(表2)。

## 2.2 无芒雀麦产量与农艺性状的相关性分析

基于Mantel检验对无芒雀麦种质资源农艺性状与产量的相关性分析(图2)表明,植株在2和3龄阶段均呈现相似规律:单株草产量和种子产量均与株高、茎粗、叶面积及总分蘖数结果存在显著正效应。两个生长周期内,4项农艺性状对饲草生物量和种子产量具有正向促进作用,表明这些表型特征对植株的饲草产量和种子产量均具有协同增效作用。

### 2.3 无芒雀麦种质资源的综合评价

对 10 份无芒雀麦种质材料进行多性状综合评价, 基于关键农艺性状构建 K 均值聚类分析(图 3), 结果表明: 在 2 和 3 龄期, 10 份无芒雀麦种质材料均呈现两类结构, 其中 GN-221 和 GN-2210 组成的优势类群(占比 64%~65%)表现出表型优越性。

为构建无芒雀麦种质资源综合评价模型实现精准选育, 采用熵权法-TOPSIS 耦合模型对无芒雀麦单株生物量(饲草/种子)和农艺性状进行综合评价(图 4), 结果表明, 2 龄时, 贴合度由高到低分别为 GN-221、GN-2210、GN-225、GN-229、GN-228、GN-223、GN-222、GN-224、GN-226、GN-227。其中, GN-221 的贴合度最高, 为 0.94, GN-227 的贴合度最低, 为 0.03。3 龄时, 贴合度由高到低分别为 GN-221、GN-2210、GN-225、GN-223、GN-229、GN-224、GN-228、GN-222、GN-226、GN-227。其中 GN-221 的贴合度最高, 为 0.96, GN-227 的贴合度最低, 为 0.02。综上所述, GN-221 的综合性能最好, 是适宜青藏高原东部栽培的理想资源。

### 2.4 无芒雀麦种质资源产量的影响过程及路径分析

为解析无芒雀麦单株饲草与种子生产性能的调控路径, 本研究采用关键驱动因子构建分段式 SEM 模型, 量化表达生物量积累与种子产量形成过程的驱动路径及其效应强度(图 5a 和图 5c)。结果表明, 龄级

表 2 种质资源和龄级对无芒雀麦表型性状和产量的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of the effects of varieties and age groups on phenotypic traits and yield in *B. inermis*

项目 Item	处理 Treatment	F	P
株高 Plant height	资源 Varieties	120.488	0.001
	龄级 Age group	639.544	0.001
	资源×龄级 Varieties×age group	5.413	0.001
茎粗 Stem diameter	资源 Varieties	44.965	0.001
	龄级 Age group	119.853	0.001
	资源×龄级 Varieties×age group	1.509	0.159
叶面积 Leaf area	资源 Varieties	245.412	0.001
	龄级 Age group	48.712	0.001
	资源×龄级 Varieties×age group	3.346	0.002
总分蘖数 Total tillers	资源 Varieties	162.928	0.001
	龄级 Age group	71.772	0.001
	资源×龄级 Varieties×age group	2.545	0.013
单株草产量 Grass yield per plant	资源 Varieties	22.833	0.001
	龄级 Age group	0.803	0.373
	资源×龄级 Varieties×age group	0.501	0.870
单株种子产量 Seed yield per plant	资源 Varieties	9.196	0.001
	龄级 Age group	12.578	0.001
	资源×龄级 Varieties×age group	0.600	0.793

注:  $P>0.05$  表示不显著;  $P<0.05$  表示显著;  $P<0.01$  表示极显著。

Note:  $P>0.05$  indicates no significant difference;  $P<0.05$  indicates significant difference;  $P<0.01$  indicates extreme significant difference.

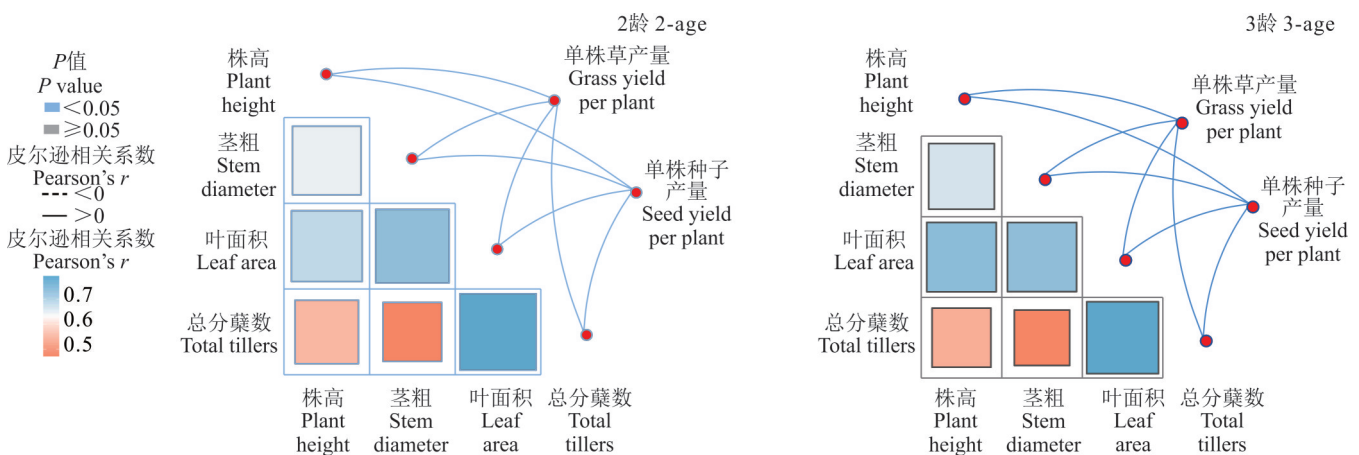


图 2 无芒雀麦产量与农艺性状的 Mantel 相关性分析

Fig. 2 Mantel correlation analysis between yield and agronomic traits in *B. inermis*

通过影响叶面积、株高、总分蘖数和茎粗间接影响单株饲草产量, 资源通过影响总分蘖数、株高间接影响单株饲草产量。叶面积、总分蘖数、株高对单株饲草产量均有正向作用, 路径系数为 0.344、0.397 和 0.207。茎粗对单株饲草产量有负向作用, 路径系数为 -0.065, 该模型拟合效果良好 ( $P=0.747$ , Fisher 组合检验 Fisher's  $C=0.583$ ) (图 5a)。

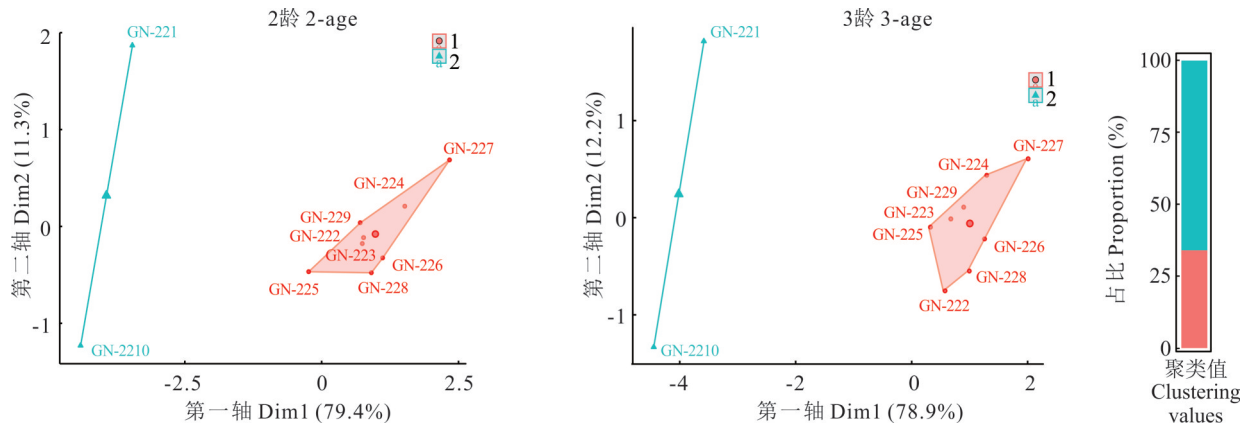


图3 无芒雀麦种质资源关键性状K均值聚类分析

Fig. 3 K-means clustering analysis of key traits in *B. inermis* germplasm resources

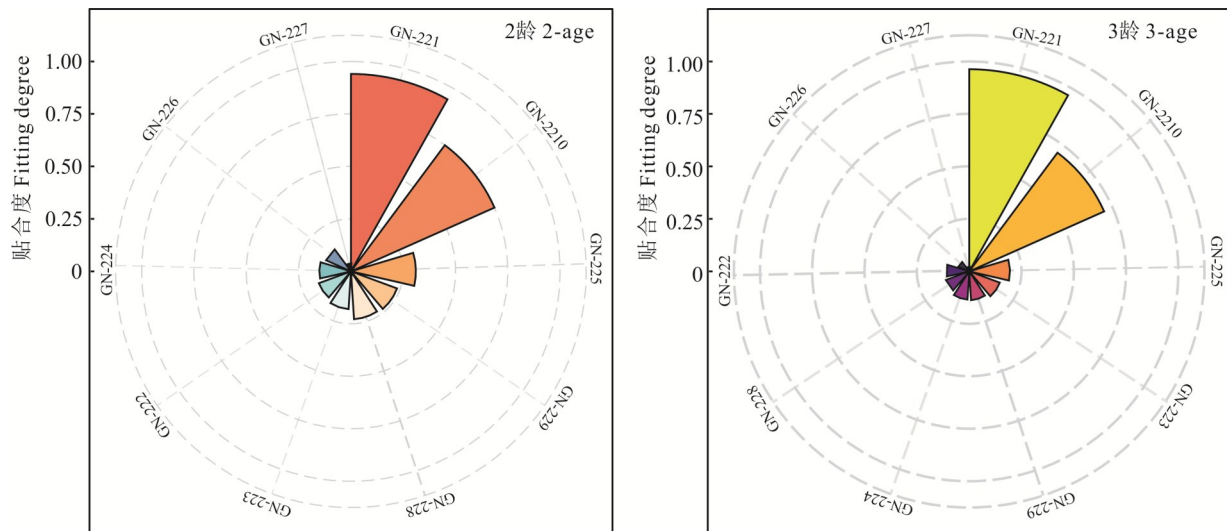


图4 无芒雀麦种质资源TOPSIS综合评价

Fig. 4 TOPSIS comprehensive evaluation of *B. inermis* germplasm resources

龄级通过影响叶面积、株高、总分蘖数和茎粗间接影响单株种子产量,资源通过影响叶面积、总分蘖数、株高间接影响单株种子产量。叶面积、总分蘖数、株高对单株种子产量均有正向作用,路径系数分别为0.381、0.278和0.137,该模型拟合效果良好( $P=0.321$ 、Fisher组合检验Fisher's  $C=4.684$ ) (图5c)。

基于分段式SEM模型的标准化路径系数,通过效应分解量化各因子贡献度:在饲草产量形成过程中,叶面积(总效应值0.396)与总分蘖数(总效应值0.397)被识别为核心驱动因子,路径解析表明,龄级与资源主要通过调控叶片扩展能力及分蘖动态,间接影响饲草产量形成(图5b和图5d)。对于无芒雀麦单株种子产量,叶面积和茎粗的总效应最高,分别为0.655和0.393。因此,龄级和资源主要通过影响叶面积和茎粗进而影响单株种子产量(图5d)。

### 3 讨论

农艺性状是植物科学研究中的重要指标,不仅是衡量作物生长发育状态的关键参数,也是评估植物适应环境能力、产量潜力和品质优劣的重要依据<sup>[19]</sup>。本研究中10个异源无芒雀麦均能在试验点完成生活史周期,资源GN-2210的株高、茎粗、叶面积和种子产量均最大,资源GN-221的总分蘖数和单株草产量最大,资源GN-227的株高、茎粗、总分蘖数、单株草产量和种子产量均最小,资源GN-224的叶面积最小。这可能是因为资源GN-2210取自围栏封育的草场,种植地和原生境类似,围栏封育的无芒雀麦经过自然选择,逐渐适应了当地的环境条件,如

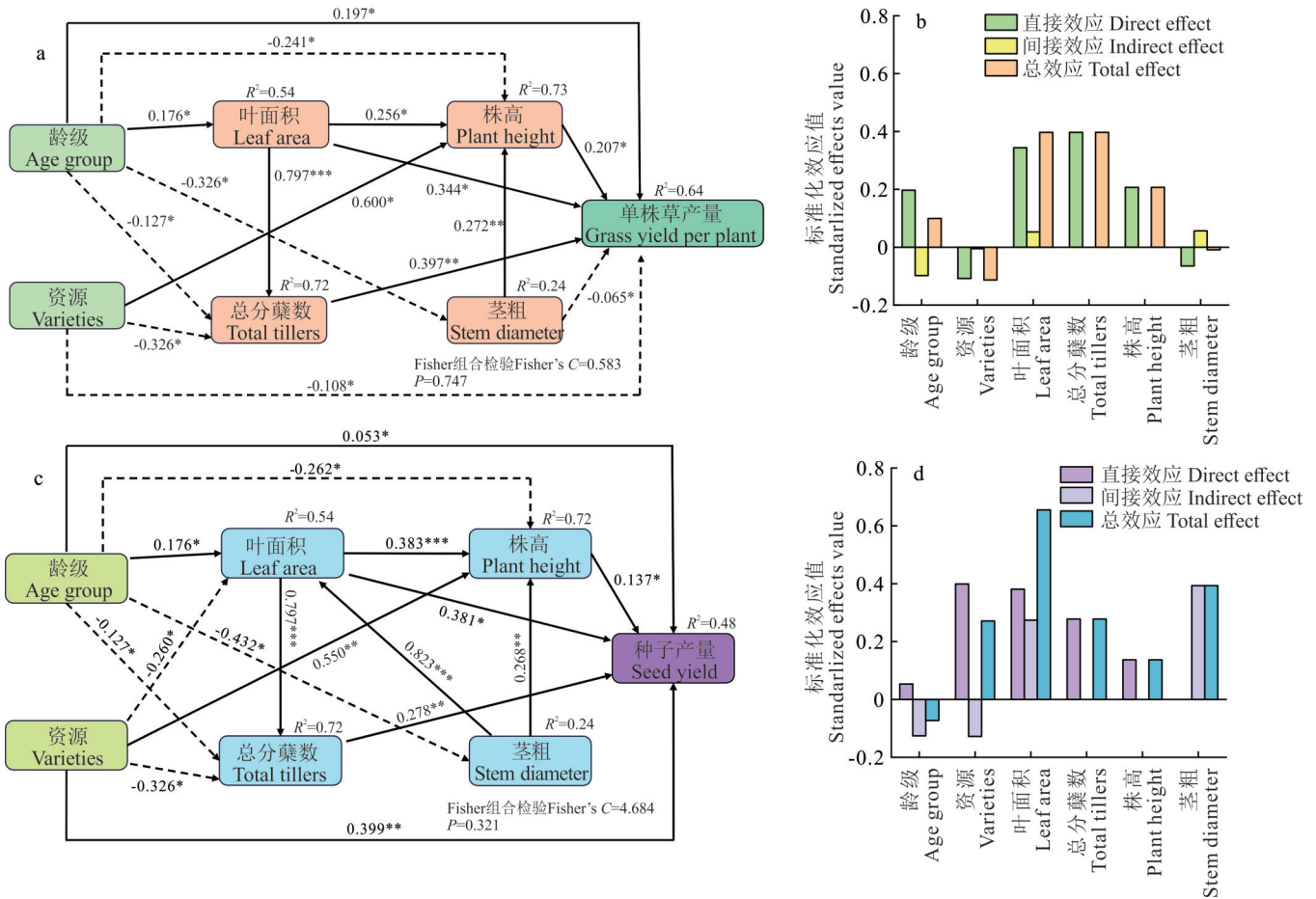


图 5 结构方程模型分析龄级和资源对单株草产量和种子产量的影响路径及各因子的标准化效应值

**Fig. 5 Structural equation modeling (SEM) analysis of the influence pathways of age groups and germplasm resources on individual plant forage yield, seed yield and standardized effect sizes of key factors**

图中实/虚向量线分别表征显著的正向/负向效应关系,数值对应的是标准化路径系数。\*表示在 0.05 水平上差异显著,\*\*表示在 0.01 水平上差异显著,\*\*\*表示在 0.001 水平上差异显著。Solid vectors indicate significant positive effect relationships, while dashed vectors represent significant negative effect relationships. Numerical labels correspond to standardized path coefficients. Asterisks denote significance levels: \*,  $P < 0.05$ , \*\*,  $P < 0.01$ , \*\*\*,  $P < 0.001$ .

土壤、气候等,具有较强的生命力和适应性,因此,在试验地长势较好,保持了优良的遗传特性。资源 GN-221 采自茫拉河河边,原生态为其提供了充足的水分、肥沃的土壤和较好的微环境,表现出分蘖数较多。此外,种植地较干旱,但依然保持较高的分蘖数和草产量,可能资源 GN-221 有一定的抗旱能力。资源 GN-227 采集于土路中间,首先,可能是由于其原生境无芒雀麦经常受到踩踏压力,植株的生长点被破坏,其次,土路中间的土壤可能因为经常被压实而导致结构紧密,影响土壤的通气性和渗透性限制根系对水分和养分的吸收,进而导致资源 GN-227 植株矮小。资源 GN-224 采集自山坡的阴坡,原生境在光照不足的阴坡环境中,植物为了有效捕捉光能,可能会调整叶片大小和形态,使叶面积变小,以降低光合作用的能量需求。微生物异质性驱动下的无芒雀麦种质研究表明,同一地理单元内不同微生境类型资源呈现显著的生态适应性分异,其表型可塑性对气候-土壤复合因子(温度、降水、光照及土壤属性)的响应阈值存在梯度差异<sup>[20-21]</sup>。这些差异主要由于无芒雀麦的生长发育既受遗传特性的影响,也受外部环境条件的制约<sup>[22-23]</sup>。

饲草产量是衡量植物生产效能的关键指标<sup>[24]</sup>,反映了植物种质资源在特定区域的生态适应性<sup>[25]</sup>,也是决定其在该区域是否能推广种植的主要考量因素。本研究表明无芒雀麦的饲草和种子产量及农艺性状存在显著年际动态变化,该趋势与吴雨涵等<sup>[15]</sup>和于爱萍等<sup>[20]</sup>关于无芒雀麦生态适应性分异规律的结论相印证,进一步通过 Mantel 检验网络解析与分段式 SEM 模型路径分析证实,叶面积和总分蘖数构成饲草生物量积累的关键表型模块,与王

文虎等<sup>[17]</sup>与袁艺等<sup>[26]</sup>结论相类似。这是由于分蘖能力强和叶面积大的植物可以吸收更多的阳光,实现高效的光合作用,促进有机物的合成,进一步提高其饲草产量<sup>[27]</sup>。种子产量是衡量作物繁殖效率的关键指标<sup>[28]</sup>,它反映了作物在特定生长条件下的生产潜力和繁殖成功率<sup>[29]</sup>。分段式结构方程模型表明,叶面积和茎粗是影响种子产量的关键因子,较大叶面积的植物能够捕获更多的阳光,从而增加光合作用的总量。这意味着植物可以合成更多的光合产物,为生长和发育提供更多的能量和原料,这些额外的光合产物可以用于种子的发育和成熟,从而提高其种子产量<sup>[30]</sup>。K均值聚类分析将不同的无芒雀麦资源划分为两个类别,表明即使是同一地区的无芒雀麦资源,也因为采集地的微环境差异或遗传特性的不同,其形态特征表现出明显的差异。本研究采用TOPSIS多准则决策模型对无芒雀麦单株生物量(饲草/种子)和农艺性状进行综合评价,结果表明,种质GN-221在饲草产量与表型稳定性方面均呈现显著优势,使其成为青藏高原东部高寒区生态修复工程的优先种质,具备规模化推广潜力。在未来的野生种质资源选育中,推荐采用综合性评比筛选方法,该方法全面考虑农艺性状和经济特性,提高评价的准确性和可靠性,有助于识别高产、适应性强的种质资源。此外,它还能减少单一性状评价的偏误,确保新品种在生产中的稳定性和适应性,综合性评比筛选将有效推动种质资源的利用和新品种的快速培育,提升农业生产的水平和可持续性。

#### 4 结论

本研究以10份无芒雀麦为对象,对其农艺性状和产量进行了系统的研究,通过构建分段式SEM模型探讨资源和龄级如何通过影响农艺性状进而影响饲草产量和种子产量,得出以下结论:

1) TOPSIS-多准则决策模型分析表明,资源GN-221具有高产、稳产的特性,饲草产量与种子产量显著优于其他种质资源,适于作为环青海湖地区草牧业系统优化的优良种质资源利用。

2) 分段式SEM模型表明:饲草生物量积累主要受叶面积与分蘖数构成的冠层结构调控,而种子生产性能则由光合器官发育(叶面积)和茎秆机械(茎粗)支持形成的源-库系统共同驱动。

#### 参考文献 References:

- [1] Liu Y Q, Lv C H, Fu B J, *et al.* Terrestrial ecosystem classification and its spatiotemporal changes in China during last 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3975–3987.  
刘亚群, 吕昌河, 傅伯杰, 等. 中国陆地生态系统分类识别及其近20年的时空变化. *生态学报*, 2021, 41(10): 3975–3987.
- [2] Ouyang Z Y, Zhang G S, Ying L X. Overview of the impacts of climate change on ecosystem distribution and functions across the Tibetan Plateau. *Climate Change Research*, 2024, 20(6): 699–710.  
欧阳志云, 张观石, 应凌霄. 气候变化对青藏高原生态系统分布范围和生态功能的影响研究进展. *气候变化研究进展*, 2024, 20(6): 699–710.
- [3] Mo X G, Liu W, Meng C C, *et al.* Variations of forage yield and forage-livestock balance in grasslands over the Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2415–2425.  
莫兴国, 刘文, 孟铖铖, 等. 青藏高原草地产量与草畜平衡变化. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2415–2425.
- [4] Tian H, Xu R, Canadell J G, *et al.* A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 2020, 586(7828): 248–256.
- [5] Cao J, Holden N M, Lv X T, *et al.* The effect of grazing management on plant species richness on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Grass and Forage Science*, 2011, 66(3): 333–336.
- [6] Zhang Q, Ma L, Zhang Z H, *et al.* Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: Degradation status, restoration measures, effects and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7441–7451.  
张骞, 马丽, 张中华, 等. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. *生态学报*, 2019, 39(20): 7441–7451.
- [7] Shi W G, Li Z Y, Li H Y, *et al.* Comparative analysis of description characters of *Bromus inermis* gemplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2007, 8(4): 510–513.  
师文贵, 李志勇, 李鸿雁, 等. 无芒雀麦种质资源主要描述性状比较分析. *植物遗传资源学报*, 2007, 8(4): 510–513.
- [8] Antonova E V, Fuchs J, Roder M S. Influence of chronic man-made pollution on *Bromus inermis* genome size. *Russian Journal*

- of Ecology, 2020, 51(4): 337–344.
- [9] Gong K, Jin G L, Sui X Q, *et al.* Analysis on the distribution, breeding and utilization of *Bromus inermis* germplasm resources in China. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2019(21): 29–32, 36.  
官珂, 靳瑰丽, 隋晓青, 等. 我国无芒雀麦种质资源分布、育种及利用现状分析. 黑龙江畜牧兽医, 2019(21): 29–32, 36.
- [10] Huang W, Chang W, Yu S Y, *et al.* Comprehensive evaluation of production performance and nutritional quality of 16 *Bromus inermis* germplasm resources. Pratacultural Science, 2021, 38(11): 2237–2246.  
黄薇, 常巍, 余淑艳, 等. 16份无芒雀麦种质资源生产性能与营养品质的综合评价. 草业科学, 2021, 38(11): 2237–2246.
- [11] Zhang Y, Shi F L, Zhao H X. Study on the seed germination of the *Bromus inermis* L. seed mutation induced by EMS. Seed, 2018, 37(12): 70–72.  
张玥, 石凤翎, 赵海霞. EMS处理对无芒雀麦种子萌发的研究. 种子, 2018, 37(12): 70–72.
- [12] Guo X Y, Gao S, Gao Y, *et al.* Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of agronomic traits in *Bromus inermis* germplasm resources. Seed, 2021, 40(10): 41–48.  
郭兴玉, 高山, 高阳, 等. 无芒雀麦种质资源农艺性状遗传多样性分析及综合评价. 种子, 2021, 40(10): 41–48.
- [13] Hao Y H, Li Y, Tang F, *et al.* Genetic diversity of agronomic characteristics of 29 *Bromus inermis* germplasms. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1770–1778.  
郝裕辉, 李瑶, 唐凤, 等. 29份无芒雀麦种质资源农艺性状的遗传多样性. 草业科学, 2020, 37(9): 1770–1778.
- [14] Chang W. Trait evaluation and genetic diversity analysis of *Bromus inermis* Leyss. germplasm resources. Yinchuan: Ningxia University, 2020.  
常巍. 无芒雀麦种质资源性状评价与遗传多样性分析. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [15] Wu Y H, Liu W H, Liu K Q, *et al.* Comprehensive evaluation and screening on the productive performance of 13 *Bromus inermis* Leyss. germplasm resources. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11): 3472–3483.  
吴雨涵, 刘文辉, 刘凯强, 等. 13份无芒雀麦种质资源生产性能的综合评价及筛选. 草地学报, 2023, 31(11): 3472–3483.
- [16] Liu M, Qin Y, Liu W H, *et al.* Seed yield comparison of *Bromus inermis* germplasm in the alpine Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(3): 70–80.  
刘慢, 秦燕, 刘文辉, 等. 青藏高原高寒区不同无芒雀麦种质资源种子产量评价. 中国草地学报, 2024, 46(3): 70–80.
- [17] Wang W H, Liang G L, Liu W H, *et al.* Comprehensive evaluation of agronomic traits and yield of eight *Elymus sibiricus* varieties in the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 123–132.  
王文虎, 梁国玲, 刘文辉, 等. 青藏高原区8份老芒麦资源农艺性状与生产性能综合评价. 草业学报, 2025, 34(2): 123–132.
- [18] Su L L. Effects of nitrogen and phosphorus on the productivity, soil nutrients and microbial characteristics of grass-bean mixed grassland. Xining: Qinghai University, 2023.  
苏乐乐. 氮磷添加对禾豆混播草地生产力、土壤养分及微生物特性的影响. 西宁: 青海大学, 2023.
- [19] Wang X P, Bai Y X, Yao X H, *et al.* Effect of mowing stubble height on forage and grain yield and forage quality characteristics of hulless barley. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(4): 513–523.  
王小萍, 白羿雄, 姚晓华, 等. 刈割留茬高度对青稞饲草与籽粒产量及饲用品质的影响. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 513–523.
- [20] Yu A P, Jiang A C, Zhang H H, *et al.* Comparison and comprehensive evaluation of agronomic traits and productivity of 14 *Bromus inermis*. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3205–3214.  
于爱萍, 蒋昂辰, 张浩浩, 等. 14份无芒雀麦种质农艺性状与生产性能的比较及综合评价. 草地学报, 2024, 32(10): 3205–3214.
- [21] Wu Y H. Evaluation and screening of forage production performance and drought resistance *Bromus inermis* Leyss germplasm resources in alpine region. Xining: Qinghai University, 2023.  
吴雨涵. 高寒区无芒雀麦种质资源饲草生产性能评价筛选及抗旱性研究. 西宁: 青海大学, 2023.
- [22] Wang R F, Hu Y S, Gao W R, *et al.* Functions of NAC transcription factors family in stress responses in plants. Plant Physiology Journal, 2014, 50(10): 1494–1500.  
王瑞芳, 胡银松, 高文蕊, 等. 植物NAC转录因子家族在抗逆响应中的功能. 植物生理学报, 2014, 50(10): 1494–1500.
- [23] Ballhorn D J, Kautz S, Jensen M, *et al.* Genetic and environmental interactions determine plant defences against herbivores. Journal of Ecology, 2011, 99(1): 313–326.
- [24] Fan Y K, Yun L, Li Z, *et al.* Correlation analysis of agronomic traits related to forage yield of *Psathyrostachys juncea*. Chinese

Journal of Grassland, 2020, 42(3): 119–125.

范亚坤, 云岚, 李珍, 等. 新麦草饲草产量相关农艺性状的关联性分析. 中国草地学报, 2020, 42(3): 119–125.

- [25] Sun W B, Ma H L, Hou X Y, *et al.* Comprehensive evaluation of production performance and nutritional value of 20 alfalfa cultivars in two ecological areas of Gansu Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 161–174.  
孙万斌, 马晖玲, 侯向阳, 等. 20个紫花苜蓿品种在甘肃两个地区的生产性能及营养价值综合评价. 草业学报, 2017, 26(3): 161–174.
- [26] Yuan Y, Chen D M, Liu W, *et al.* Correlation analysis and comprehensive evaluation of production and reproductive of forage oats in northwest Sichuan Plateau. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(6): 1116–1123.  
袁艺, 陈冬明, 刘伟, 等. 川西北高原饲用燕麦产量和生殖性状相关性分析及综合评价. 四川农业大学学报, 2023, 41(6): 1116–1123.
- [27] Thuyra P F N, Maia B S L D, Jr F L O D G, *et al.* Population dynamics and structural characteristics of ‘Survenola’ digit grass subjected to intermittent defoliation strategies. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2020, 55(5): 241–249.
- [28] Islam A, Fakir M S A. Reproductive efficiency methods and their relationship with siliqua production in Mustard. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 2012, 10(2): 223–228.
- [29] Aki M, Daisuke A, Kei T, *et al.* Seed production of wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.) under favorable, ruderal, and natural growing conditions. *PLoS One*, 2022, 17(9): 274–281.
- [30] Wang N, Fisher D B. Monitoring phloem unloading and post-phloem transport by microperfusion of attached wheat grains. *Plant Physiology*, 1994, 104(1): 7–16.