

# 柴达木盆地8种高寒禾草耐盐碱性评价

段成伟<sup>1,2</sup>, 杨鑫光<sup>1,2</sup>, 孙华方<sup>1,2</sup>, 张湑泽<sup>1,2</sup>, 王丽蓉<sup>1,2</sup>, 李婷<sup>1</sup>

(1.青海民族大学生态环境与资源学院,青海 西宁 810007; 2.青海省特色经济植物高值化利用重点实验室,青海 西宁 810007)

**摘要:**为筛选出适宜在柴达木盆地盐碱地种植及适应性强的禾草先锋草种,以青藏高原草地恢复中主推的碱茅草(*Puccinellia distans*, PD)、芨芨草(*Neotrinia splendens*, NS)、羊草(*Leymus chinensis*, LC)、黑麦草(*Lolium perenne*, LP)、紫茅草(*Festuca rubra*, FR)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*, EN)、草地早熟禾(*Poa pratensis*, PP)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*, PT)等8种高寒禾草草种为试验材料,采用野外调查和室内分析相结合的方法探究种植三年禾草生长特性、土壤理化性质及二者相关性的变化规律,并采用灰色关联度综合评价了8种禾草的耐盐碱性。结果表明:盐碱胁迫下,NS、LP、PP的盖度和地上生物量分别为63.00%、60.75%、58.50%和16.05、16.50、10.05 g·m<sup>-2</sup>,均显著高于其他禾草( $P<0.05$ )。NS的土壤初始水量为11.16%,显著高于PD、LC、FR、EN、PT( $P<0.05$ );NS和LP的土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量分别为28.63%、27.09%、26.53%和27.98%、26.61%、26.01%,均显著高于其他禾草( $P<0.05$ );NS和LP的土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度相对较高,分别为2.32%、39.18%和2.00%、41.51%;NS的土壤容重和pH最低,分别为1.18 g·cm<sup>-3</sup>和8.53。FR的土壤有机质含量最高,为11.04 g·kg<sup>-1</sup>;PD、LC、FR的土壤速效氮含量分别为38.90、39.85、39.00 mg·kg<sup>-1</sup>,显著高于其他禾草( $P<0.05$ );LC的土壤速效磷和速效钾含量分别为19.73 mg·kg<sup>-1</sup>和398.98 mg·kg<sup>-1</sup>,均显著高于其他禾草( $P<0.05$ )。线性回归分析表明,禾草地上生物量与土壤物理性质和速效养分含量呈极显著相关关系;冗余度分析结果表明,土壤非毛管孔隙度、毛管持水量和毛管孔隙度是影响8种禾草生长特性的最显著因子( $P<0.05$ ),解释率分别为72.30%、4.30%和2.50%;灰色关联度综合评价结果表明,NS、LP、PP和EN表现优异,适宜在柴达木盆地盐碱地区推广种植。

**关键词:**高寒禾草;盐碱地;生长特性;理化性质;灰色关联度;柴达木盆地  
**中图分类号:**S156.4 **文献标志码:**A

## Evaluation of saline-alkali tolerance of eight alpine grasses in the Qaidam Basin

DUAN Chengwei<sup>1,2</sup>, YANG Xinguang<sup>1,2</sup>, SUN Huafang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuze<sup>1,2</sup>, WANG Lirong<sup>1,2</sup>, LI Ting<sup>1</sup>

(1. College of Eco-Environment and Resources, Qinghai Minzu University, Xining, Qinghai 810007, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of High Value Utilization of Characteristic Economic Plants, Xining, Qinghai 810007, China)

**Abstract:** In this study, the dynamic changes in grass growth characteristics, soil physicochemical properties, and their correlations were analyzed using eight alpine grass species — *Puccinellia distans* (PD), *Neotrinia splendens* (NS), *Leymus chinensis* (LC), *Lolium perenne* (LP), *Festuca rubra* (FR), *Elymus nutans* (EN), *Poa pratensis* (PP), and *Puccinellia tenuiflora* (PT) — which are primarily promoted for grassland restoration on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. These species were cultivated for three years, and their saline-alkali tolerance was comprehensively evaluated using the grey correlation degree method based on field investigations and laboratory studies. The aim was to select suitable and adaptable pioneer grass species for planting in the saline-alkali soil of the Qaidam Basin. The results showed that under saline-alkali stress, the coverage and aboveground biomass of NS, LP, and PP were 63.00%, 60.75%, 58.50%, and 16.05, 16.50, 10.05 g·m<sup>-2</sup>, respectively, significantly

收稿日期:2024-06-24

修回日期:2024-12-13

**基金项目:**青海省青海民族大学理工类科学研究项目(2024XJMD06);青海省2024年创新平台建设专项项目(2024-SF-J10);2023年中央科研创新平台建设专项项目(30160101141);青海省青海民族大学理工类科学研究项目(2024XJMD07)

**作者简介:**段成伟(1993-),男,青海西宁人,讲师,主要从事高寒生态修复、盐碱地生态修复与环境保护研究。E-mail: d\_chengwei@126.com

**通信作者:**杨鑫光(1979-),男,青海西宁人,副教授,主要从事应对气候变化、循环经济、节能减排、环境保护等研究。E-mail: yangxg618@163.com

higher than other species ( $P < 0.05$ ). NS had the highest soil initial gravimetric water content, which was 11.16%, significantly higher than PD, LC, FR, EN and PT ( $P < 0.05$ ). The soil saturated water-holding capacity, capillary capacity and field capacity of NS and LP were 28.63%, 27.09%, 26.53% and 27.98%, 26.61%, 26.01%, respectively, significantly higher than other species ( $P < 0.05$ ). NS and LP had relatively high soil noncapillary porosity and capillary porosity with 2.32%, 39.18% and 2.00%, 41.51%, respectively. NS had the lowest soil bulk density and pH, which were  $1.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  and 8.53, respectively. FR had the highest soil organic matter content, which was  $11.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The soil available nitrogen content of PD, LC and FR were 38.90, 39.85,  $39.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, significantly higher than other species ( $P < 0.05$ ); The soil available phosphorus content and available potassium content of LC were  $19.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $398.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, significantly higher than other species ( $P < 0.05$ ). Linear regression analysis revealed a highly significant correlation between the aboveground biomass of grasses and soil physical properties, as well as available nutrient content. Redundancy analysis identified soil non-capillary porosity, capillary capacity, and capillary porosity as the most significant factors influencing the growth characteristics of eight alpine grasses ( $P < 0.05$ ), with interpretation rates of 72.30%, 4.30%, and 2.50%, respectively. The comprehensive evaluation results based on the grey correlation degree indicate that NS, LP, PP, and EN exhibit excellent performance and are more suitable for promotion and cultivation in the saline-alkali soil of the Qaidam Basin.

**Keywords:** alpine grass; saline-alkali soil; growth characteristics; physicochemical properties; grey correlation degree; Qaidam Basin

土壤盐碱化已是全球性生态问题,如今全球范围内近 10 亿  $\text{hm}^2$  的土地受到盐碱化影响,导致土地严重退化、农业生产力降低<sup>[1]</sup>。随着全球气候的改变,土壤盐碱化的面积逐渐扩大,严重威胁农业的可持续发展<sup>[2]</sup>。在世界范围内,我国是盐碱地较多的国家之一,面积约为  $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[3]</sup>。就青海省而言,盐碱地面积达 320 万  $\text{hm}^2$ ,而柴达木盆地的盐碱地面积为 313.6 万  $\text{hm}^2$ ,这一面积大约占青海省盐碱地的 98%<sup>[4]</sup>。不容忽视的是,土壤盐碱化现象严重制约着当地畜牧业经济的发展。盐碱土中聚集的大量盐离子 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ) 在土壤的水平或垂直方向重新分配,使盐分在土壤表层逐渐积聚,发生板结现象,进而导致土壤孔隙度变小、透气和渗水性变差,影响土壤中功能微生物的活性,降低土壤有机质的转化速率<sup>[4]</sup>。长期以来,关于盐碱地改良基础理论方面已进行了卓有成效的研究<sup>[4]</sup>。其中,植物改良措施易于开展并可广泛应用,因此种植生长迅速、土壤改良效果良好而又具有可利用价值或畜牧业价值的耐盐碱植物,成为快速推进盐碱地改良的有效途径。盐碱地的治理方法包括生物治理、物理治理和化学治理等措施,其中选育耐盐碱植物是实现“生态+生产”的效益双赢模式。大量研究表明,草本植物是盐碱地生态植被重要的组成成分,有些是先锋植物或建群种,对盐碱地生态修复有重要作用<sup>[5]</sup>。筛选出适宜盐碱地种植的优质、高产牧草,可以为盐碱地

引种牧草和大规模人工栽培牧草提供理论依据<sup>[5]</sup>。

碱茅草 (*Puccinellia distans*) 是改良盐碱荒地的先锋优良草种,属禾本科多年生草本植物,具有耐旱、耐盐碱、耐寒和分蘖力强等优点<sup>[4]</sup>。芨芨草 (*Neotrinia splendens*) 属草禾本科芨芨草属,是盐碱化草原的建群种,可用于改良盐碱地、防止水土流失<sup>[6]</sup>。羊草 (*Leymus chinensis*) 俗称碱草,属禾本科赖草属多年生植物,品质优良,被誉为“禾草之王”,在寒冷、干燥地区生长良好,可以用作盐碱地改良、荒漠化土地治理、退化草地改良、林间种植<sup>[7]</sup>。黑麦草 (*Lolium perenne*) 是普遍引种栽培的优良牧草,具有良好的生态价值,对于防止水土流失、改善土壤质量等方面具有积极作用<sup>[8]</sup>。紫羊茅 (*Festuca rubra*) 属禾本科羊茅属多年生草本植物,抗寒、耐旱、耐荫和耐贫瘠土壤能力很强,还具有一定的耐水淹能力,适应性广。不仅环境适应能力强,生长速度快,而且在一定程度上具有固土的作用<sup>[9]</sup>。垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 具有较好的耐践踏、耐干旱以及耐盐等特性,其适应能力非常强,可以适应各种土地类型,并具有一定的耐盐性和抗寒能力<sup>[10]</sup>。草地早熟禾 (*Poa pratensis*) 有一定的营养价值,是优良饲料,常用饲养牲畜,其适应性很强,在盐碱地治理中有着广泛的应用<sup>[11]</sup>。星星草 (*Puccinellia tenuiflora*) 是一种盐生植物,对高盐度环境具有出色的耐受性,其根系有助于吸收土壤中的盐分,减轻土壤的盐碱化程度,有助于保持土壤的稳

定性,减少土壤侵蚀和风蚀等问题<sup>[12]</sup>。

柴达木盆地地处我国西北干旱地区,由于气候干旱,降水稀少,蒸发量较大,土壤盐渍化问题尤为突出,区域生态环境不断恶化,干旱和土壤盐渍化是影响该区域生态环境最主要的因素<sup>[4]</sup>。牧草作为一种典型的耐盐碱植物具有易于种植、生长快、再生能力强且生物量大、刈割方便等优点,有利于快速改良盐碱土壤<sup>[13]</sup>。同时,大部分禾本科植物具有耐寒、耐旱、耐盐碱等特点,成为改良盐碱地的优良牧草,而这些植物同时也是牲畜喜食的牧草。种植牧草可改善盐碱地的土壤环境,同时也可为畜牧业提供优良饲草资源<sup>[14]</sup>。但如何在盐碱地上科学、合理种植牧草是目前亟需解决的问题<sup>[15]</sup>。尽管前人已在柴达木地区盐碱地开展了紫花苜蓿品种生产性能综合评价研究,主要从生产性能和营养品质等角度筛选出了适宜在柴达木干旱区种植的品种,但试验主要集中在单一物种的多个品种方面,且评价指标仅限于干旱地区牧草抗逆性、生产性能、营养品质等方面<sup>[16-17]</sup>。然而在盐碱地连续种植多种多年生牧草,从牧草生长特性、土壤物理性质和养分含量等方面进行多重影响关联度及综合评价研究甚少。因此,为优选高耐盐碱性禾本科牧草,改良盐碱地生态系统,本研究将通过在柴达木盆地典型盐碱地种植 8 种禾本科植物,对种植三年的禾草生长特性和土壤改良效果进行研究,通过灰色关联度分析法全面评价 8 种禾草耐盐碱性,筛选出适宜改良盐碱地的优良禾草草种,为柴达木盆地耐盐碱牧草的选育以及大面积盐碱地的合理开发与利用提供资源和理论参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省海西蒙古族藏族自治州德令哈市尕斯库勒镇努尔村盐碱地(37°21'N、97°40'E,海拔 2 853 m),该区域属大陆性高原气候,是典型的荒漠、半荒漠地区,日照充足,干旱少雨,冬寒夏凉;年均气温 3.8℃,1 月平均气温-11.1℃,7 月平均气温 16.2℃;4—10 月气候干燥,紫外线强;气温日差较大,年平均降水量仅 120 mm,年蒸发量高达 2 439 mm,年相对湿度 34.7%。该地区 2021 年月均温与月降水量见图 1。

土壤为盐化耕灌棕钙土类型,原生植被主要以盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、盐梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria sibirica*)、骆驼刺(*Alhagi camelorum*)为主,生物量极低,植被总盖度<15%。

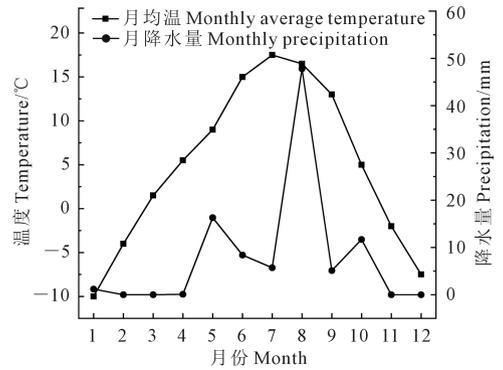


图 1 2021 年试验区月均温与月降水量

Fig.1 Monthly average temperature and monthly precipitation in the experimental area in 2021

### 1.2 供试材料

选择 8 种青藏高原常见的禾草,各植物种分别为碱茅草(*Puccinellia distans*, PD):禾本科多年生丛生型草本植物,千粒重 0.12 g,纯净度 97%,发芽率 90%,越冬率达 98.0%~99.5%,耐盐碱阈值为含盐量 0.20%,pH 值约 8~10;芨芨草(*Neotrinia splendens*, NS):禾本科多年生草本植物,千粒重 0.77 g,纯净度 99%,发芽率 100%,越冬率达 95%~98%,耐盐碱阈值为含盐量 9.00%,pH 值约 9;羊草(*Leymus chinensis*, LC):禾本科多年生草本植物,千粒重 2.00 g,纯净度 95%,发芽率 80%,越冬率达 95%以上,耐盐碱阈值为含盐量 0.15%,pH 值约 8.5~11.5;黑麦草(*Lolium perenne*, LP):禾本科多年生草本植物,千粒重 1.50 g,纯净度 99%,发芽率 90%,越冬率 92%,耐盐碱阈值为含盐量 0.5%~3.0%,pH 值约 8~10;紫羊茅(*Festuca rubra*, FR):禾本科多年生草本植物,千粒重 0.70 g,纯净度 98%,发芽率 95%,越冬率 85%,耐盐碱阈值为含盐量 0.2%~0.4%,pH 值约 9.5~10.5;垂穗披碱草(*Elymus nutans*, EN):多年生草本植物,千粒重 2.20 g,纯净度 98%,发芽率 97%,越冬率 90%,耐盐碱阈值为含盐量 0.5%,pH 值约 8;草地早熟禾(*Poa pratensis*, PP):多年生草本植物,千粒重 0.35 g,纯净度 98%,发芽率 95%,越冬率 98%,耐盐碱阈值为含盐量 0.3%,pH 值约 8~9;星星草(*Puccinellia tenuiflora*, PT):禾本科多年生草本植物,千粒重 0.70 g,纯净度 95%,发芽率 96%,越冬率 84.43%,耐盐碱阈值为含盐量 0.6%,pH 值约 9~10。种子均由当地草籽繁殖场生产。

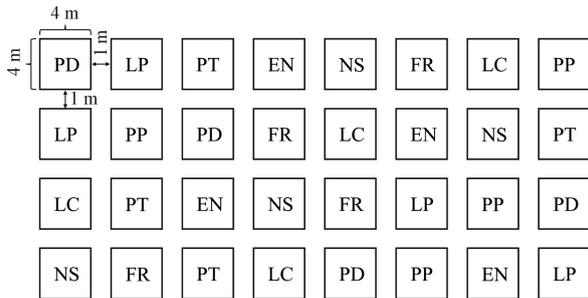
种肥尿素:总氮 $\geq 4.0\%$ ,执行标准:GB 2440-2001;种肥磷酸二铵:总养分(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) $\geq 4\%$ ,执行标准:GB 10205-2009;种肥购于云南云天化股份有

限公司。

有机肥:有机质 $\geq 45\%$ ,有机碳含量为 $261.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,水分 $\leq 30\%$ ,总养分( $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ ) $\geq 5.0\%$ , $\text{N} + \text{P} + \text{K}$ 含量为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,执行标准:NY525-2012;有机肥购于睿泽科技有限公司。

### 1.3 试验设计

于2021年5月底在试验区翻耕、耙地、平整土地和起垄后划定试验小区,采用随机区组设计在追施种肥、有机肥的基础上进行不同禾草草种播种,施肥和播种后铺设无纺布。播种前测定土壤本底理化指标,土壤pH值8.71,有机质 $9.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮、全磷、全钾分别为 $0.43$ 、 $0.52$ 、 $18.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效氮、速效磷、速效钾分别为 $35.93$ 、 $19.13$ 、 $371.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全盐量( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )为 $9.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。种肥、有机肥和禾草补播量依据前人研究<sup>[18]</sup>确定,具体为种肥尿素( $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) + 种肥磷酸二铵( $7.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) + 有机肥( $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) + 禾草播种( $22.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。小区面积为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,小区间缓冲带为 $1 \text{ m}$ ,4次重复,共计32个小区,样地面积 $700 \text{ m}^2$ 以上(图2)。种肥、有机肥和禾草播种方式为人工撒施,将种肥、有机肥和禾草草种按比例混合后人工撒施。出苗后移去无纺布,试验区四周设围栏保护,日常做好除杂、浇水等田间管理工作。播种后次年每年5月中旬追肥尿素( $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、磷酸二铵( $7.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )和有机肥( $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。



注:PD,碱茅草;NS,芨芨草;LC,羊草;LP,黑麦草;FR,紫羊茅;EN,垂穗披碱草;PP,草地早熟禾;PT,星星草。下同。

Note: PD, *Puccinellia distans*; NS, *Neotrinia splendens*; LC, *Leymus chinensis*; LP, *Lolium perenne*; FR, *Festuca rubra*; EN, *Elymus nutans*; PP, *Poa pratensis*; PT, *Puccinellia tenuiflora*. The same below.

图2 小区样地布局图

Fig.2 Experimental plot layout

### 1.4 样品采集

2023年8月底在试验小区植物生长旺盛期进行测定取样。在每个处理试验小区随机设置 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 样方进行植被调查,植被调查完后采集植被

及土壤样品。植被调查时记录样方内植物高度和盖度,植被调查结束后,将地上部分植被齐平地面进行刈割并装进信封,带回实验室在 $60^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干至恒重得到地上生物量。用环刀在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层垂直剖面水平方向采集土壤样品带回实验室进行土壤容重、土壤水分特征含量和孔隙度测定。利用土钻采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层植物地下部分样品和土壤样品,每个样方采取五点取样法取土壤样品。将采集的每个土钻新鲜土壤样品在 $5 \text{ mm}$ 筛下进行过筛,过完筛的每个样方内土样混合,剔除动物残体和小石块,制备成1个混合土样装低温保温箱( $4^\circ\text{C}$ )带回实验室,迅速将土壤过 $2 \text{ mm}$ 筛,将一部分置于 $4^\circ\text{C}$ 保温箱保存,测定土壤含水量;剩余部分置于通风处自然风干,用于测定土壤pH和碳、氮、磷、钾营养元素。

### 1.5 测定指标与方法

(1)植被生长指标测定:高度采用测量尺法;盖度采用估测法;地上生物量采用称重法。

(2)土壤物理性质测定:土壤初始水量采用铝盒烘干法测定;土壤容重和孔隙度采用环刀烘干法测定;土壤pH采用pH计测定(水土比为 $1:2.5$ )。

(3)土壤水分特征含量包括土壤饱和持水量、土壤毛管持水量和土壤田间持水量。土壤水分特征含量采用环刀法测定<sup>[19]</sup>,具体方法为:用环刀采集土壤结构不破坏的原状土壤,用水浸泡使其达到饱和,然后放置不同时间将土壤孔隙中多余的水排出,计算土壤不同持水性能下的持水量。

(4)土壤养分测定:土壤有机碳采用重铬酸钾- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 氧化外加热法测定;全氮和全磷采用AA3连续流动分析仪(Auto Analyzer 3-HR)测定;土壤硝态氮采用双波长紫外分光光度法测定;土壤铵态氮采用KCl浸提-靛酚蓝比色法测定;土壤速效氮=硝态氮+铵态氮;土壤速效磷采用 $\text{NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用火焰光度法测定。

### 1.6 耐盐碱适应性评价原理

本研究通过灰色关联度分析法全面评价耐盐碱的8种禾草的关系强弱、大小和次序。将种植一个生长季的禾草生长特性(盖度、高度、地上生物量)和土壤理化特性(初始水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、容重、pH、有机质、速效氮、速效磷、速效钾)等15个指标作为一个灰色系统,各个指标为灰色系统中的一个因素,计算8种禾草的15个性状与构建的理想禾草的关联度,数值越大,代表其越优异<sup>[20]</sup>。本研究选取禾草的盖度、高度、地上生物量、初始水量、

饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、有机质、速效氮、速效磷、速效钾的最大值和容重、pH 的最小值构建禾草理想禾草  $X_0$ ，其各项指标数据作为最优指标数列，记为  $[X_0(k)]$ ；测定的 8 种禾草的 15 个指标数据作为比较数列，记为  $[X_i(k)]$ 。为消除各指标单位和指标测定值的差异，本研究将各供试禾草指标除以理想禾草所对应的数值进行数据无量纲化处理，并根据处理后的数据计算各指标与标准性状的绝对值差： $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$ 。最后计算关联系数  $[\xi_i(k)]$ 、等权关联度 ( $r_i$ )、权重系数 ( $\omega_i$ ) 和加权关联度 ( $r'_i$ )，具体计算公式如下：

(1) 确定最优指标数列 (母序列)：

$$X_0(k) = (X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n))$$

式中， $X_0(k)$  为修复效果即最优指标数列； $k$  为每个元素的特征数量。

(2) 对数据进行初值化及无量纲化处理。由于相关数据的纲量不同，无法直接进行比较。因此，为了便于比较分析，需要将相关数据进行无量纲化处理。本研究选择初值化，初值化处理公式为：

$$X_i(k) = X_i(k) / X_i(1), (k=0, 1, 2, \dots, n)$$

式中， $X_i(k)$  为第  $i$  指标第  $k$  值； $X_i(1)$  为第  $i$  指标第 1 值； $n$  为指标的个数。

(3) 计算关联系数，关联系数表示某项与耐盐碱效果的相关程度；

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

式中， $\rho$  为分辨系数， $\rho$  值越小表明关联系数间的差异越大，分辨能力就越强；取值范围  $[0, 1]$ ，常规取值为 0.5。两级最小极差和两级最大极差分别为：

$$\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$$

$$\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$$

(4) 结合关联系数值计算各指标的等权关联度，指标等权关联度越大说明禾草耐盐碱性越好，反之则越小。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

(5) 计算权重系数，权重系数是表示某一指标项在指标项系统中的重要程度，其值越大说明该因素越重要。

$$\omega_i = \xi_i(k) / \sum \xi_i(k)$$

(6) 根据权重系数计算加权关联度，加权关联度越大说明禾草耐盐碱性越好，反之则越小。

$$r'_i = \sum_{k=1}^n \omega_i(k) \xi_i(k)$$

## 1.7 数据分析

Excel 2010 软件用于原始数据整理，运用 OriginPro 2021 和 SigmaPlot 13.0 进行绘图。采用 SPSS 26.0 软件对禾草生长特性、物理性质和土壤养分含量等相关指标进行单因素方差分析 (ANOVA)，采用 Tukey 进行差异显著性检验 ( $P < 0.05$ )。使用线性回归分析确定 8 种禾草植物地上生物量与土壤性质的关系，采用 Canoco 5.0 软件用于进一步分析盐碱胁迫下 8 种禾草的生长特性变化规律及其影响因子，通过灰色关联度分析法全面评价禾草的耐盐碱性。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐碱胁迫下 8 种禾草生长特性变化

由图 3 可知，芨芨草的盖度最高 (63.00%)，羊草的盖度最低 (11.25%)；芨芨草、黑麦草和草地早熟禾的盖度显著高于其他禾草 ( $P < 0.05$ )。垂穗披碱草的高度最高 (33.33 cm)，星星草的高度最低 (3.15 cm)；垂穗披碱草的高度显著高于其他禾草 (除芨芨草) ( $P < 0.05$ )。黑麦草的地上生物量最高 ( $16.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )，羊草的地上生物量最低 ( $4.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )；芨芨草和黑麦草的地上生物量显著高于其他禾草 ( $P < 0.05$ )。

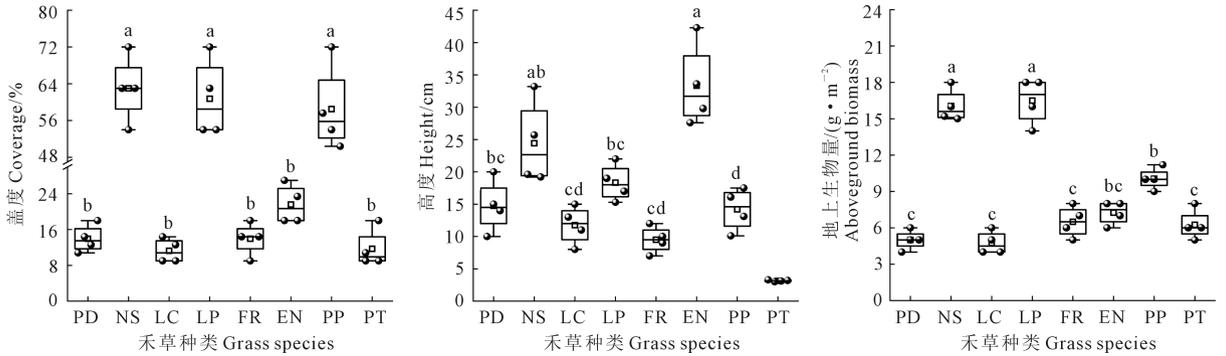
### 2.2 盐碱胁迫下 8 种禾草土壤物理性质变化

由图 4 可知，芨芨草的土壤初始水量最高 (11.16%)，显著高于碱茅草、羊草、紫羊茅、垂穗披碱草和星星草 ( $P < 0.05$ )；羊草的土壤初始水量最低 (6.68%)，显著低于芨芨草、黑麦草和草地早熟禾 ( $P < 0.05$ )。芨芨草的土壤饱和持水量最高 (28.63%)，显著高于其他禾草 (除黑麦草) ( $P < 0.05$ )；羊草的土壤饱和持水量最低 (24.22%)，显著低于其他禾草 ( $P < 0.05$ ) (除星星草)。8 种禾草的土壤毛管持水量和田间持水量变化趋势一致，不同禾草土壤毛管持水量和田间持水量表现为芨芨草 > 黑麦草 > 草地早熟禾 > 垂穗披碱草 > 碱茅草 > 紫羊茅 > 星星草 > 羊草，芨芨草的土壤毛管持水量和田间持水量最高，显著高于其他禾草 (除黑麦草) ( $P < 0.05$ )；羊草的土壤毛管持水量和田间持水量最低，显著低于碱茅草、芨芨草、黑麦草、垂穗披碱草和草地早熟禾 ( $P < 0.05$ )。

芨芨草的土壤非毛管孔隙度最高，显著高于其他禾草 ( $P < 0.05$ )；羊草的土壤非毛管孔隙度最低，显著低于其他禾草 ( $P < 0.05$ )。黑麦草的土壤毛管孔隙度最高，显著高于其他禾草 ( $P < 0.05$ )；羊草的

土壤毛管孔隙度最低,显著低于芨芨草、黑麦草、垂穗披碱草和草地早熟禾 ( $P<0.05$ )。羊草的土壤容重最高,显著高于芨芨草 ( $P<0.05$ ); 星星草的土壤

容重次之,芨芨草的土壤容重最低。羊草的土壤 pH 最高,显著高于芨芨草和黑麦草 ( $P<0.05$ ); 芨芨草的土壤 pH 最低,显著低于碱茅草和羊草 ( $P<0.05$ )。



注:不同小写字母表示 8 种禾草间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the 8 grasses ( $P<0.05$ ). The same below.

图 3 盐碱胁迫下 8 种禾草的生长特性变化

Fig.3 Changes in growth characteristics of eight grasses under saline-alkali stress

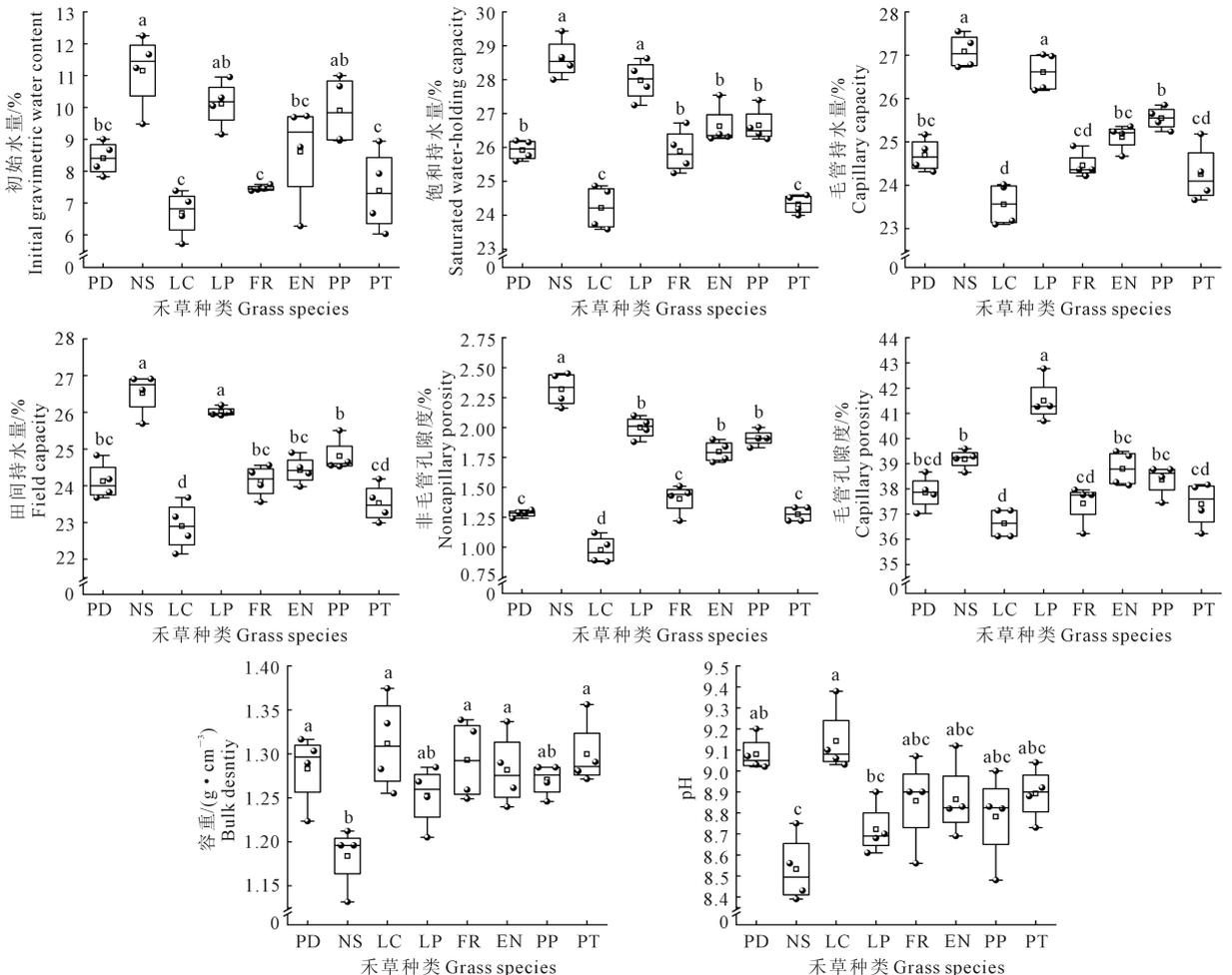


图 4 盐碱胁迫下 8 种禾草的土壤物理性质变化

Fig.4 Changes in soil physical properties of eight grasses under saline-alkali stress

### 2.3 盐碱胁迫下 8 种禾草土壤养分含量变化

由图 5 可知,紫羊茅的土壤有机质含量最高 ( $11.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),草地早熟禾的最低 ( $9.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );紫羊茅的土壤有机质含量显著高于草地早熟禾 ( $P < 0.05$ )。羊草的土壤速效氮含量最高 ( $39.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),芨芨草的最低 ( $32.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );碱茅草、羊草和紫羊茅的土壤速效氮含量显著高于草地早熟禾(星星草除外) ( $P < 0.05$ )。羊草的土壤速效磷含量最高 ( $19.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著高于其他禾草 ( $P < 0.05$ );芨芨草的土壤速效磷含量最低,显著低于碱茅草、羊草、紫羊茅、垂穗披碱草、草地早熟禾和星星草 ( $P < 0.05$ )。羊草的土壤速效钾含量最高 ( $398.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著高于芨芨草 ( $P < 0.05$ );芨芨草的土壤速效钾含量最低 ( $326.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著低于碱茅草、羊草和星星草 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 8 种禾草生长特性与土壤性质的关系

土壤性质与 8 种禾草植物地上生物量的线性回归分析表明,土壤初始水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度和毛管孔隙度与地上生物量之间均存在极显著正相关关系 ( $P < 0.001$ ),土壤容重、pH、速效氮、速效磷和速效钾与地上生物量之间均存在极显著负相关关系 ( $P < 0.001$ ),土壤有机质与地上生物量之间不存在显著相关性(图 6)。

冗余分析(RDA)可进一步深入探究盐碱胁迫下 8 种禾草的生长特性变化规律及其影响因子。对

8 种禾草的生长特性与土壤理化指标进行 RDA 排序(图 7),轴 1 和轴 2 分别解释总变异的 79.92% 和 2.05%。土壤非毛管孔隙度、毛管持水量、毛管孔隙度、速效氮、饱和持水量、初始水量、速效钾、速效磷、田间持水量、有机质、容重和 pH 分别解释了 8 种禾草生长特性总变异的 72.30%、4.30%、2.50%、0.80%、0.70%、0.70%、0.80%、0.60%、0.30%、 $<0.10\%$ 、 $<0.10\%$  和  $<0.10\%$ ,土壤非毛管孔隙度、毛管持水量、毛管孔隙度、速效氮、饱和持水量、初始水量、速效钾、速效磷、田间持水量、有机质、容重和 pH 对 8 种禾草生长特性的贡献率分别为 86.9%、5.10%、3.00%、1.00%、0.80%、0.90%、0.90%、0.80%、0.40%、 $<0.10\%$ 、 $<0.10\%$  和  $<0.10\%$ 。土壤非毛管孔隙度、毛管持水量和毛管孔隙度是影响 8 种禾草生长特性的最显著因子(表 1)。

### 2.5 耐盐碱综合评价

将 8 种禾草的 3 个生长特性指标和 12 个土壤理化特性指标看作一个整体,计算供试材料各指标的相似程度(表 2)。盖度、高度、地上生物量、初始水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、有机质、速效氮、速效磷和速效钾 13 个指标选其最大值,容重和 pH 指标选其最小值作为最优参考禾草数值。设为参考列  $X_0 = [4.52, 2.26, 3.30, 1.33, 1.10, 1.10, 1.10, 1.81, 1.10, 1.09, 1.02, 1.09, 1.01, 0.92, 0.94]$ ,分辨系数  $\rho = 0.5$ 。

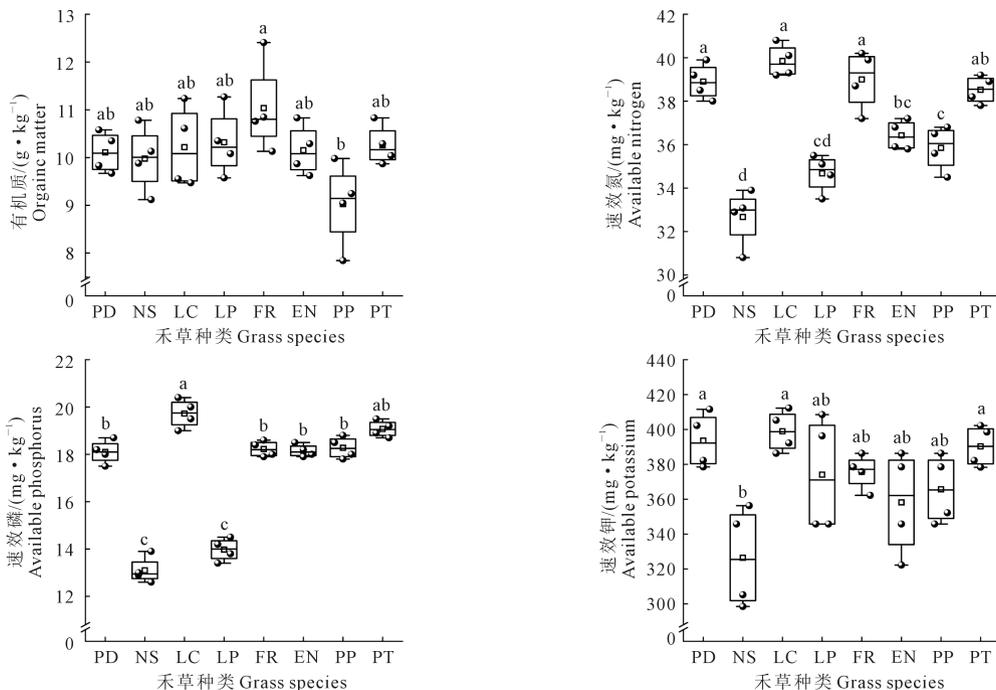


图 5 盐碱胁迫下 8 种禾草的土壤养分含量变化

Fig.5 Changes in soil nutrient content of eight grasses under saline-alkali stress

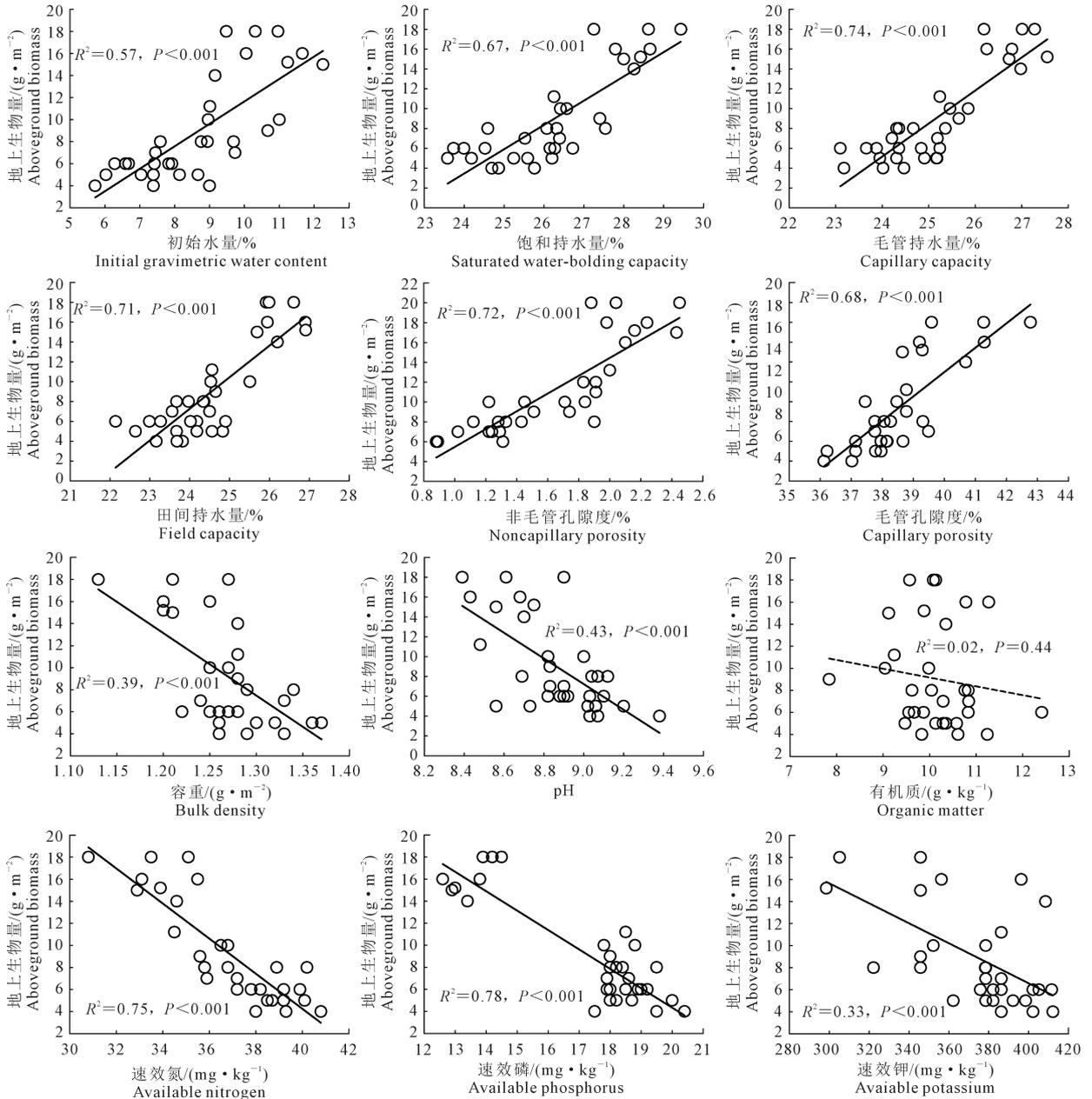


图 6 8 种禾草植物地上生物量与土壤性质的线性关系

Fig.6 Linear relationship between aboveground biomass and soil properties of eight grasses

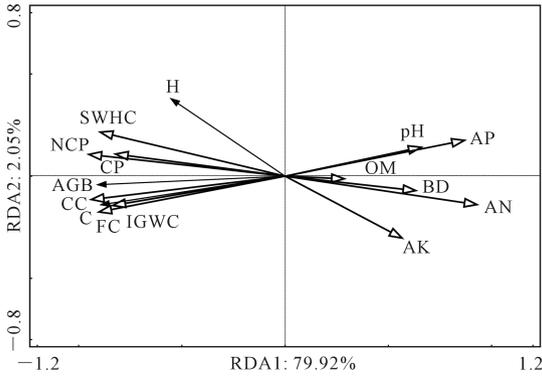
通过灰色关联度计算得出 8 种禾草的等权关联度和加权关联度值,使用关联度值对 8 个评价对象进行评价排序。芨芨草的等权关联度值最大,为 0.9007,综合性状表现最好,为最优材料;其次为黑麦草和草地早熟禾,其等权关联度值分别为 0.8900 和 0.8502;羊草综合表现最差,等权关联度值为 0.7890;8 种禾草的等权关联度表现为芨芨草>黑麦草>草地早熟禾>垂穗披碱草>碱茅草>紫羊茅>星星草>羊草(表 2)。加权关联度值最大的仍然为芨芨草,其值为 0.9057,其次为黑麦草和垂穗披碱草两种禾草,其加权关联度值分别为 0.8985 和 0.8732;星

草的加权关联度值最小,为 0.8448;8 种禾草的加权关联度表现为芨芨草>黑麦草>垂穗披碱草>草地早熟禾>碱茅草>紫羊茅>羊草>星星草(表 2)。

### 3 讨论

#### 3.1 8 种禾草生长特性差异分析

盖度是用来反映禾草覆盖状况、疏密程度和生态状况,高度能够反映禾草的生长发育特点,盖度和高度是构成禾草产量的重要因子,也是禾草生产性能形成的基础。由于不同禾草的耐盐碱性不同,导致植被的盖度也有所不同;加之禾草各种类之间



注: H, 植被高度; C, 植被盖度; AGB, 地上生物量; IGWC, 初始水量; SWHC, 饱和持水量; CC, 毛管持水量; FC, 田间持水量; NCP, 非毛管孔隙度; CP, 毛管孔隙度; BD, 容重; OM, 有机质; AN, 速效氮; AP, 速效磷; AK, 速效钾。

Note: H, Vegetation height; C, Vegetation coverage; AGB, Aboveground biomass; IGWC, Initial gravimetric water content; SWHC, Saturated water-holding capacity; CC, Capillary capacity; FC, Field capacity; NCP, Noncapillary porosity; CP, Capillary porosity; BD, Bulk density; OM, Organic matter; AN, Available nitrogen; AP, Available phosphorus; AK, Available potassium.

图 7 8 种禾草土壤性质与植被特征的冗余分析

Fig.7 Redundancy analysis of soil properties and vegetation characteristics of eight grasses

表 1 土壤理化指标对植物生长的贡献率

Table 1 Contribution rate of soil physicochemical properties indicators to vegetation growth

因子 Factor	解释率 Explanatory rate/%	贡献率 Contribution /%	F	P
非毛管孔隙度 Noncapillary porosity	72.30	86.90	78.10	0.002
毛管持水量 Capillary capacity	4.30	5.10	5.30	0.012
毛管孔隙度 Capillary porosity	2.50	3.00	3.30	0.036
速效氮 Available nitrogen	0.80	1.00	1.10	0.342
饱和持水量 Saturated water- holding capacity	0.70	0.80	0.90	0.378
初始水量 Initial gravimetric water content	0.70	0.90	1.00	0.312
速效钾 Available potassium	0.80	0.90	1.00	0.306
速效磷 Available phosphorus	0.60	0.80	0.90	0.524
田间持水量 Field capacity	0.30	0.40	0.40	0.668
有机质 Organic matter	<0.10	<0.10	0.10	0.930
容重 Bulk density	<0.10	<0.10	<0.10	0.954
pH	<0.10	<0.10	<0.10	0.960

表 2 供试 8 种禾草关联度排序

Table 2 Correlation degree ranking of the tested eight grasses

禾草种类 Grass species	等权关联度 Grey correlative		加权关联度 Weighted grey correlative	
	数值 Value	排序 Ranking	数值 Value	排序 Ranking
	PD	0.8008	5	0.8513
NS	0.9007	1	0.9057	1
LC	0.7890	8	0.8454	7
LP	0.8900	2	0.8985	2
FR	0.7986	6	0.8495	6
EN	0.8376	4	0.8732	3
PP	0.8502	3	0.8681	4
PT	0.7893	7	0.8448	8

注: PD, 碱茅草; NS, 芨芨草; LC, 羊草; LP, 黑麦草; FR, 紫羊茅; EN, 垂穗披碱草; PP, 草地早熟禾; PT, 星星草。

Note: PD, *Puccinellia distans*; NS, *Neotrinia splendens*; LC, *Leymus chinensis*; LP, *Lolium perenne*; FR, *Festuca rubra*; EN, *Elymus nutans*; PP, *Poa pratensis*; PT, *Puccinellia tenuiflora*.

存在遗传差异性,表现出植株的生长高度有所差异<sup>[21]</sup>。总体来看,芨芨草、黑麦草和草地早熟禾的盖度最高且稳定,表明其适应性较强、生长状况良好,从而提高植被盖度。芨芨草和垂穗披碱草的株高较高,说明其生长发育能力较强,有利于生物量的积累。

生物量(产量)是评价禾草种类重要的指标之一,禾草一次种植可连续利用多年,因此生产上选择高产、稳产禾草种类至关重要<sup>[22]</sup>。禾草的生物量受株高、分蘖数、茎粗、单株重、单丛生物量等因素的影响,禾草的产草量可以反映不同禾草的株型结构和生产性能<sup>[23]</sup>。比较分析种植三年后 8 种禾草的地上生物量生产数据,芨芨草、黑麦草和草地早熟禾的地上生物量最高。表明在柴达木盆地盐碱地上,此三种禾草可正常生长,生产性能均较好,可作为柴达木盆地盐碱地恢复与重建的适应性较强、生长状况良好的优良草种和先锋草种。这与温延臣等<sup>[24]</sup>和潘香逾等<sup>[25]</sup>研究结果一致。垂穗披碱草的株高虽然排名靠前,但地上生物量却排名不佳,这可能与侧枝数量和分蘖数较少有关。因此,我们必须通过选择合适的判定指标且连续多年进行田间试验才能客观、科学的评价不同禾草在柴达木盆地盐碱地的适应性、稳定性和丰产性。

### 3.2 8 种禾草土壤理化性质差异分析

土壤理化性质通过影响土壤孔性、质地、持水性及结构等性质来决定土壤中水、肥、气、热的分配,能有效评估土壤质量。通常土壤孔隙度、容重等理化性质很大程度上决定了土壤的贮水保水能力,孔隙度越大、容重越小,土壤涵养水源能力越

强, pH 降低<sup>[26]</sup>。盐碱地表层积聚过量盐离子, 导致土壤物理结构差、透水通气性差, 改善其土壤物理性质对促进盐碱地中的禾草生长发育具有重要意义<sup>[27]</sup>。本研究表明, 芨芨草、黑麦草和草地早熟禾3种禾草的土壤初始水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量和非毛管孔隙度较高, 这表明芨芨草、黑麦草和草地早熟禾具有耐寒、耐旱、耐盐碱能力, 适宜种植于柴达木盆地盐碱地, 而且对土壤的改良起到重要的作用。此外, 芨芨草、黑麦草和草地早熟禾3种禾草的土壤容重和 pH 最低, 表明其3种禾草能有效改善柴达木盆地盐碱地土壤环境。付鸾鸿等<sup>[28]</sup>和向慧昌等<sup>[29]</sup>等研究结果也是如此。种植禾草后, 土壤的孔隙度增大, 使得土壤贮水能力增强, 有利于水分渗透和底层土壤水分的增加, 土壤蓄水和抗蚀能力相应增强, 还能促进空气流通, 使土壤养分含量增加, 进而改善土壤结构; 土壤含水量和孔隙度的增加, 使土壤质地变得疏松, 提高了土壤的通透性, 使土壤的孔隙度增加, 改善了土壤结构和渗透性能, 从而提高土壤持水能力, 更有利于植物的生长发育<sup>[30]</sup>, 这与本研究中土壤非毛管孔隙度、毛管持水量和毛管孔隙度是影响不同禾草生长特性的最显著因子这一结论相符。毛管持水量与田间持水量增加, 其与土壤含水量成正相关, 故保水性能增强, 可减少灌溉水, 并能有效提高禾草产量<sup>[31]</sup>。综上所述, 种植不同种类禾草可增强土壤涵养水源的能力, 从而提高水资源利用效率, 能够有效改善土壤的物理性质。

在土壤养分方面, 8种禾草的土壤有机质和速效钾含量变化不大, 速效氮和速效磷含量差异显著, 芨芨草、黑麦草和草地早熟禾的速效氮和速效磷含量最低, 这可能与其生长特性显著相关。本研究中, 这3种禾草的盖度、地上生物量相对较高, 禾草在生长发育过程中吸收土壤中的速效养分导致土壤中的速效氮和速效磷含量相对较低<sup>[18]</sup>。土壤有机质和速效钾含量变化不大, 可能与禾草种植年限、有机肥肥效速度和土壤中腐殖质含量有关。本研究只测定了种植三年禾草生长特性和土壤理化性质, 土壤中除了施入的种肥和有机肥之外无任何生物有机肥料, 禾草的生长会吸收大部分种肥和有机肥, 最终土壤中剩余的肥料相对有限。此外, 返还到土壤中凋落物和施入土壤中的有机肥料只有经过土壤微生物的作用, 才能腐烂分解, 释放出营养元素, 供植物利用, 并形成腐殖质, 最终形成土壤有机质<sup>[32]</sup>。因此, 对于种植不同种类禾草对盐碱地土壤养分含量变化的影响有待进一步长期观测研究。

### 3.3 8种禾草耐盐碱性比较分析

植物的耐盐碱性是由多个性状基因调控的复杂性状, 仅用单一的指标评价耐盐碱性结果不可靠<sup>[33]</sup>。灰色关联度分析法可对8种禾草的生长特性和土壤理化特性指标进行综合分析, 从而解决耐盐碱禾草种类筛选的问题<sup>[32]</sup>。本研究运用灰色关联度法中的等权关联度值和加权关联度值对8种禾草进行综合评价。相同种类禾草在两种算法分析结果中排名略有不同, 如羊草和星星草, 结合田间试验期间8种禾草的表现, 加权后的排名更加科学可靠。因此, 加权关联度值用来评价8种禾草更准确, 可以更全面地了解禾草种类。通过8种禾草盐碱土壤改良的等权关联度值为芨芨草>黑麦草>草地早熟禾>垂穗披碱草>碱茅草>紫羊茅>星星草>羊草, 加权关联度值为芨芨草>黑麦草>垂穗披碱草>草地早熟禾>碱茅草>紫羊茅>羊草>星星草, 最好的禾草选择为芨芨草、黑麦草、草地早熟禾和垂穗披碱草, 它们不仅适宜种植于柴达木盆地盐碱地, 还有利于盐碱地土壤的改良效果。

## 4 结 论

1) 芨芨草的盖度最高(63.00%), 垂穗披碱草的高度最高(33.33 cm), 黑麦草的地上生物量最高( $16.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

2) 芨芨草的土壤初始水量、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均最高, 分别为11.16%、28.63%、27.09%和26.53%; 芨芨草和黑麦草的土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度相对较高, 分别为2.32%、39.18%和2.00%、41.51%; 芨芨草的土壤容重和 pH 最低, 分别为 $1.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和8.53。紫羊茅的土壤有机质含量最高, 为 $11.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 羊草的土壤速效氮、速效磷、速效钾含量均最高, 分别为39.85、19.73、398.98  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3) 植物地上生物量与土壤物理性质和速效养分含量呈极显著相关关系。土壤非毛管孔隙度、毛管持水量和毛管孔隙度是影响8种禾草生长特性的最显著因子, 因此在盐碱地种植禾草时耕翻有利于土壤的通透性, 提高土壤的透气性和保水性, 适合植物生长。

4) 应用灰色关联度法对在柴达木盆地盐碱地区引种的8种禾草的15个代表性指标进行了综合评价, 芨芨草、黑麦草、草地早熟禾和垂穗披碱草的综合表现较好, 适宜在该地区推广种植; 而紫羊茅、星星草和羊草表现不理想, 不建议在柴达木盆地盐碱地区大面积推广。

## 参考文献:

- [1] LI S, YAO Y Y, YANG M C, et al. Effects of different amendments on aggregate stability and microbial communities of coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(6): 1694-1707.
- [2] 范玉涛. 土壤盐碱化危害及改良方法研究[J]. *农业与技术*, 2020, 40(23): 114-116.  
FAN W T. Research on the harm and improvement methods of soil salinization and alkalization[J]. *Agriculture & Technology*, 2020, 40(23): 114-116.
- [3] 刘睿敏, 马学军, 刘文瑜, 等. 盐碱胁迫下藜麦种质幼苗生理特性及耐盐碱性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(6): 17-26.  
LIU R M, MA X J, LIU W Y, et al. Response of seedling growth and physiological characteristics of quinoa germplasm to saline-alkali stress and evaluation of saline-alkali tolerance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(6): 17-26.
- [4] 严小功, 张金旭, 杨占云, 等. 柴达木盆地盐碱地现状及改良措施[J]. *农业与技术*, 2020, 40(7): 18-20.  
YAN X G, ZHANG J X, YANG Z Y, et al. Current situation and improvement measures of saline alkali land in the Qaidam Basin[J]. *Agriculture & Technology*, 2020, 40(7): 18-20.
- [5] 冯洁琼, 陈建钢. 南方滩涂盐碱地优质牧草品种筛选试验[J]. *上海农业科技*, 2022, (2): 19-21.  
FENG J Q, CHEN J G. Screening test of high quality forage varieties in mudflat saline alkali land in South China[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2022, (2): 19-21.
- [6] REN G P, JIANG Y Y, LI A, et al. The genome sequence provides insights into salt tolerance of *Achnatherum splendens* (Gramineae), a constructive species of alkaline grassland[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2022, 20(1): 116-128.
- [7] 赵宇, 李思宇, 董博文, 等. 鲜羊粪添加对中度盐碱退化羊草草地植被及土壤特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(9): 57-65.  
ZHAO Y, LI S Y, DONG B W, et al. Effects of fresh sheep manure addition on vegetation and soil characteristics of moderately saline-alkali degraded *Leymus chinensis* grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(9): 57-65.
- [8] 王佳文, 杨新宇, 刘哈, 等. 盐碱胁迫对黑麦草种子萌发的影响[J]. *东北农业科学*, 2023, 48(1): 60-62, 74.  
WANG J W, YANG X Y, LIU H, et al. Effects of salt and alkali stress on seed germination of *Lolium perenne*[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2023, 48(1): 60-62, 74.
- [9] 尹卫, 杨国柱, 田海宁, 等. 混合盐碱胁迫对紫羊茅种子萌发的影响[J]. *草学*, 2015, (2): 23-27.  
YIN W, YANG G Z, TIAN H N, et al. The effects of mixed salt and alkali stress on the seed germination of *Festuca rubra* L.[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2015, (2): 23-27.
- [10] 龙建廷, 高献磊, 包赛很那, 等. 垂穗披碱草抗逆性研究进展[J]. *草学*, 2022, (3): 1-8.  
LONG J T, GAO X L, BAO S H N, et al. Research progress on stress resistance of *Elymus nutans*[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2022, (3): 1-8.
- [11] 卢建男, 张琼, 刘铁军, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤及草地早熟禾生长的影响[J]. *草业科学*, 2017, 34(6): 1141-1148.  
LU J N, ZHANG Q, LIU T J, et al. Effect of soil conditioners on saline-alkali soil and growth of Kentucky bluegrass[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(6): 1141-1148.
- [12] 张良, 杨春雪. 盐碱胁迫对星星草-丛枝菌根真菌共生体酶活性及游离氨基酸的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(11): 91-96.  
ZHANG L, YANG C X. Enzyme activities and free amino acids of *Puccinellia tenuiflora*-arbuscular mycorrhizal symbiont under saline-alkali stress[J]. *Journal of North-East Forestry University*, 2018, 46(11): 91-96.
- [13] 窈晓慧, 李红丽, 盖文杰, 等. 牧草种植对黄河三角洲盐碱土壤改良效果的动态监测及综合评价[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 394-401.  
DOU X H, LI H L, GE W J, et al. Dynamic monitoring and comprehensive evaluation of the effect of pasture cultivation on saline soil improvement in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 394-401.
- [14] 乔艳辉, 王月海. NyPa 牧草对滨海盐碱地土壤改良效应研究[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(24): 67-72.  
QIAO Y H, WANG Y H. The effect of NyPa forage on soil improvement of coastal saline-alkali land[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(24): 67-72.
- [15] 孙伟, 陈晓玲. 国内盐碱地研究热点分析[J]. *北方农业学报*, 2020, 48(5): 130-134.  
SUN W, CHEN X L. Analysis of research hotspots in saline-alkali land in China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2020, 48(5): 130-134.
- [16] 乔安海, 王晓彤, 马力, 等. 柴达木地区 6 个紫花苜蓿品种的产量及营养品质综合评价[J]. *青海草业*, 2021, 30(3): 2-5, 18.  
QIAO A H, WANG X T, MA L, et al. Comprehensive evaluation of yield and nutritional quality of 6 alfalfa varieties in Qaidam area [J]. *Qinghai Pratacultural*, 2021, 30(3): 2-5, 18.
- [17] 徐航, 何霖, 宋美琪, 等. 8 个紫花苜蓿品种在柴达木旱区的生产性能综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(2): 33-40.  
XU H, HE L, SONG M Q, et al. Comprehensive evaluation of the production performance of eight alfalfa varieties in the arid area of Qaidam [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(2): 33-40.
- [18] 段成伟, 李希来, 柴瑜, 等. 不同修复措施对黄河源退化寒草甸植物群落与土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7652-7662.  
DUAN C W, LI X L, CHAI Y, et al. Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7652-7662.
- [19] 张韞. 土壤·水·植物理化分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 31-33.  
ZHANG Y. Soil, water, and plant physical and chemical analysis tutorial[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 31-33.
- [20] 张佳平. 云台山野生草本植物资源的园林开发利用评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1): 37-43.  
ZHANG J P. Comprehensive evaluation of landscape exploitation and application of wild herbaceous plant resources of Yuntai mountain [J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2013, 37(1): 37-43.
- [21] 张峰, 郑佳华, 赵萌莉, 等. 刈割留茬高度对大针茅草原群落结构及稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1551-1559.  
ZHANG F, ZHENG J H, ZHAO M L, et al. Effects of mowing height on community structure and stability in *Stipa grandis* steppe [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1551-1559.
- [22] 周娟娟, 魏巍. 施肥和刈割协同对藏北高原禾草混播群落动态和超产的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(10): 28-39.  
ZHOU J J, WEI W. Interactive effect of fertilization and cutting on community dynamics and transgressive overyielding effect of grass pasture in the northern Tibetan Plateau [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(10): 28-39.
- [23] 李珍, 王彦龙, 鱼小军, 等. 13 份多年生禾草在三江源地区的生产性能与繁殖能力[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(12): 11-19.

- LI Z, WANG Y L, YU X J, et al. Productive and reproductive performance of perennial forages in Sanjiangyuan area[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(12): 11-19.
- [24] 温延臣, 孔少华, 赵同凯, 等. 黄河三角洲盐碱地区耐盐牧草与经济作物筛选[J]. 山东农业科学, 2019, 51(5): 42-46.
- WEN Y C, KONG S H, ZHAO T K, et al. Screening of salt-tolerant herbage and economic crops in saline-alkali areas of the Yellow River Delta[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(5): 42-46.
- [25] 潘香逾, 李瑜婷, 刘立军, 等. 盐胁迫下 14 种绿肥植物种子萌发特性及耐盐性评价[J]. 草原与草坪, 2019, 39(3): 98-105.
- PAN X Y, LI Y T, LIU L J, et al. Germination characteristics and evaluation of 14 green manure plants under salt stress[J]. Grassland and Turf, 2019, 39(3): 98-105.
- [26] 张艳, 刘小源, 李勋. 高冰草对土壤物理性质的影响研究[J]. 现代农业科技, 2023, (6): 151-154.
- ZHANG Y, LIU X Y, LI X. Study on effect of *Agropyron elongatum* on soil physical properties [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2023, (6): 151-154.
- [27] 闫茂鲁, 王晓鹏, 郑云珠, 等. 有机肥对我国盐碱地土壤改良及作物生长的影响[J]. 农业工程, 2023, 13(8): 56-62.
- YAN M L, WANG X P, ZHENG Y Z, et al. Effects of organic fertilizer on soil improvement and crop growth in saline-alkaline soil in China[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(8): 56-62.
- [28] 付鸾鸿, 于崧, 于立河, 等. 不同基因型燕麦苗期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 23-30.
- FU L H, YU S, YU L H, et al. Analysis of saline-alkaline tolerance in seedling stage and screening of identification indexes of different oat genotypes[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 23-30.
- [29] 向慧昌, 韩嘉辉, 徐文珠. 水稻种植年限对盐碱土壤性状的影响[J]. 水土保持应用技术, 2023, (3): 7-9.
- XIANG H C, HAN J H, XU W Z. The effect of rice planting years on saline-alkaline soil properties[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2023, (3): 7-9.
- [30] 付琳玉, 孙永玉, 胥汝宇, 等. 若尔盖地区主要覆被类型浅层土壤持水量和有机碳关系研究[J]. 草地学报, 2022, 30(4): 818-824.
- FU L Y, SUN Y Y, XU R Y, et al. Study on the relationship between water holding capacity and organic carbon in shallow soil of main plant cover types in the Zoige region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(4): 818-824.
- [31] 郝金梅. 田间持水量的测定与旱情分析[J]. 河北水利, 2021, (11): 42, 46.
- HAO J M. Determination of field water capacity and drought analysis [J]. Hebei Water Resources, 2021, (11): 42, 46.
- [32] 肖逸, 杨志富, 聂刚, 等. 12 个多花黑麦草品种(系)在成都平原的生产性能和营养价值综合评价[J]. 草业学报, 2021, 30(5): 174-185.
- XIAO Y, YANG Z F, NIE G, et al. Multi-trait evaluation of yield and nutritive value of 12 *Lolium multiflorum* varieties or lines in Chengdu Plain[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(5): 174-185.
- [33] 王苗苗, 周向睿, 梁国玲, 等. 5 份燕麦材料苗期耐盐性综合评价[J]. 草业学报, 2020, 29(8): 143-154.
- WANG M M, ZHOU X R, LIANG G L, et al. A multi-trait evaluation of salt tolerance of 5 oat germplasm lines at the seedling stage[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(8): 143-154.

## (上接第 10 页)

- [12] 何凤群, 刘恒, 贺秀文. 松桃县玉米-大豆带状复合种植模式下不同籽粒玉米品种筛选研究[J]. 园艺与种苗, 2024, 44(5): 87-90.
- HE F Q, LIU H, HE X W. Screening of different maize varieties under maize-soybean strip compound planting mode in Songtao county [J]. Horticulture & Seed, 2024, 44(5): 87-90.
- [13] 薛根祥, 花劲, 杨玉萍, 等. 2022 年适宜东台市大豆玉米带状复合种植模式的玉米品种筛选试验初报[J]. 上海农业科技, 2023, (6): 57-59.
- XUE G X, HUA J, YANG Y P, et al. Preliminary report on the screening experiment of corn varieties suitable for the strip intercropping mode of soybean and corn in Dongtai city in 2022[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2023, (6): 57-59.
- [14] 钱素菊, 周萍, 崔岭, 等. 适合江苏沿海地区大豆玉米带状复合种植模式的玉米品种的筛选[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(4): 16-24.
- QIAN S J, ZHOU P, CUI L, et al. Screening of maize varieties suitable for strip multiple cropping mode of soybean and maize in Jiangsu coastal areas[J]. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(4): 16-24.
- [15] 袁志发, 负海燕. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 211-228.
- YUAN Z F, YUN H Y. Experimental design and analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 211-228.
- [16] 杜伟莉, 高杰, 卜令锋. 玉米品种开花期抗旱性鉴定指标筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(59): 71-76.
- DU W L, GAO J, BU L D. Appraisalment for drought resistance index of the different genotype maize varieties at the anthesis stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(59): 71-76.
- [17] 马红珍, 许海涛, 冯晓曦, 等. 黄淮海玉米品种主成分分析和遗传距离测定及其适应性评价[J]. 农业科技通讯, 2023, (12): 35-41.
- MA H Z, XU H T, FENG X X, et al. Principal component analysis, genetic distance determination, and adaptability evaluation of corn varieties in the Huang-Huai-Hai Region [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023, (12): 35-41.
- [18] 陈传永, 赵久然, 吴珊珊, 等. 黄淮海夏玉米区南北部产量及相关性状差异分析[J]. 耕作与栽培, 2022, 42(5): 42-46.
- CHEN C Y, ZHAO J R, WU S S, et al. Analysis on yield difference between south and north of Huanghuaihai summer maize region[J]. Tillage and Cultivation, 2022, 42(5): 42-46.
- [19] 刘世敏, 王同芹, 刘兆雨, 等. 黄淮海玉米区试品种农艺性状与产量的相关性及其通径分析[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(21): 30-32.
- LIU S M, WANG T Q, LIU Z L, et al. Correlation and path analysis between agronomic characters and yield of maize varieties in Huang-Huai-Hai regional trials [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(21): 30-32.
- [20] 彭伟, 曾文兵, 孙开利, 等. 13 个玉米组合产量及产量相关性状的灰色关联度分析[J]. 农业科技通讯, 2024, (9): 91-96.
- PENG W, ZENG W B, SUN K L, et al. Grey correlation analysis of yield and yield related traits in 13 maize combinations[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2024, (9): 91-96.
- [21] 龙舟, 杨威, 冯艳飞, 等. 玉米杂交种产量与主要农艺性状的关联分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34(5): 1-5.
- LONG Z, YANG W, FENG Y F, et al. Correlation analysis of maize yield and agronomic traits[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2022, 34(5): 1-5.