

引用格式: 邹佳彤, 于卫洁, 张正, 等. 播种量与基质厚度对沙基生态草毯成毯质量的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1868-1877. [ZOU J T, YU W J, ZHANG Z, et al. Influence of sowing amount and substrate thickness on the quality of sandy ecological grass blankets[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(12): 1868-1877.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240394

播种量与基质厚度对沙基生态草毯成毯质量的影响

邹佳彤, 于卫洁*, 张正, 冯志道, 张长林

(榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000)

摘要 【目的】在保证成毯质量情况下, 筛选生态草毯生产过程中适宜的基质厚度与播种量组合, 实现草毯生产生态效应与经济效应的协调统一。【方法】以早熟禾为试验草种, 设置由 3 个播种量 (15, 30, 45 g/m²) 和 4 个基质厚度 (3, 5, 7, 9 cm) 组合成的 12 个室内盆栽处理, 考察不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯成毯特征, 并综合评价成毯质量。【结果】早熟禾沙基生态草毯成毯质量指标在处理间均表现出一定差异性。Z_{9/45} (基质厚度 9 cm、播种量 45 g/m²) 处理草毯的植株密度、地上生物量、根系生物量最大, Z_{3/15} 处理草毯叶绿素含量最高, Z_{7/45} 处理草毯根系抗拉强度、根系活力最大, Z_{5/45} 处理草毯根长密度最大, 而 Z_{9/15} 处理草毯叶宽最小、质地最佳。Z_{9/45} 处理草毯成毯性状综合评分在信息量权重综合分析和隶属函数法分析中均最高。【结论】基质厚度 9 cm、播种量 45 g/m² 处理草毯不仅植株密度、地上生物量、根系生物量表现出色, 而且综合性能优良, 是早熟禾沙基生态草毯制备的最优组合。

关键词 早熟禾; 沙基生态草毯; 播种量; 基质厚度; 草毯质量

中图分类号 S543

文献标志码 A

Influence of sowing amount and substrate thickness on the quality of sandy ecological grass blankets

ZOU Jiatong, YU Weijie*, ZHANG Zheng, FENG Zhidao, ZHANG Changlin

(Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanxi North Mining Area, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract [Objective] Under the condition of ensuring the quality of the grass blanket, the study aims to select the appropriate combination of substrate thickness and seeding rate, and achieve the coordination and unity of ecological and economic effects in grass blanket production. [Methods] Using *Poa pratensis* as the grass species, 12 indoor potted treatments were established, combining 3 sowing rates (15, 30, and 45 g/m²) with 4 substrate thicknesses (3, 5, 7, and 9 cm). This was done to examine the characteristics of sandy ecological grass blankets under varying conditions of sowing rates and substrate thicknesses, and to holistically assess the quality of the blanket formation. [Results] The results revealed significant variations in the quality indicators of the *P. pratensis* grass-based ecological blankets across different treatments. Z_{9/45} treatment (substrate thickness of 9 cm and sowing rate of 45 g/m²) yielded the highest plant density,

收稿日期: 2024-07-09; 修改稿收到日期: 2024-08-21

基金项目: 国家自然科学基金委员会地区科学基金项目 (42067018); 榆林市科技局产学研项目 (CXY-2022-87); 榆林市科协人才托举项目 (20220406)

作者简介: 邹佳彤 (1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植被恢复与生态适应性研究。E-mail: jiatong010z@163.com

* 通信作者: 于卫洁, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态修复研究。E-mail: yuweijie0729@163.com

aboveground biomass, and root biomass. $Z_{3/15}$ treatment had the highest chlorophyll content, while $Z_{7/45}$ treatment had the highest root tensile strength and vitality. $Z_{5/45}$ treatment had the highest root length density, while $Z_{9/15}$ treatment had the smallest leaf width and the best texture. $Z_{9/45}$ treatment received the highest comprehensive score for blanket formation traits, as assessed by both variation analysis and membership function methods. [Conclusion] $Z_{9/45}$ treatment of the grass blanket not only demonstrated excellent plant density, aboveground biomass, and root biomass but also exhibited superior overall performance. The optimal combination for preparing the *P. pratensis* grass blanket with sand-based ecology was a substrate thickness of 9 cm and a sowing rate of 45 g/m².

Key words *Poa pratensis*; sandy base grass blanket; sowing quantity; substrate thickness; grass blanket quality

草毯是一种新生的草皮生产技术,随着生态文明建设的发展,人们对生态草毯的需求量也越来越大,草毯生产行业也随之急速发展^[1-2]。目前,草毯制备的研究主要集中在草种选择、播种量、基质选配及生产工艺等方面^[3-5]。

基质厚度是草毯制备的关键技术要素之一,并很大程度上影响草毯的生长。基质过薄会导致营养成分缺乏、固着性能差、不易成毯;基质过厚会阻碍新生枝条的生长,增加生产成本,且草毯重量过重不易起卷。在草毯生产上,因草种和基质种类的不同,目前较为适宜的基质厚度为 1.5~7 cm^[6-11]。例如,方振东等^[9]采用适宜的基质厚度(1.5 cm)研究不同基质配比与施肥对狗牙根草毯密度及成卷天数的影响;范希峰等^[7]研究 5 种厚度草炭土基质对草毯生长和外观质量的影响,比较草毯的质地、密度、高度、盖度、色泽等指标,认为 3 cm 左右为适宜的基质厚度;何雨昭^[6]以沙和草炭混合物为基质,通过 4 种基质厚度种植高羊茅和多年生黑麦草,认为 5 cm 基质是生产草毯的理想厚度。在草毯生产中,为保障草毯质量、成毯时间及成本,一般基质厚度不能过厚或过薄,草毯基质具体厚度应依据基质种类、草种、使用功能等选择。

播种量在一定程度上影响成毯时间与成毯质量,播种量过小时,苗木稀疏成毯时间长;播种量过大,成毯后草毯过密,通透性差,容易导致病害发生和蔓延。根据草毯的用途不同,播种量对成毯时间、草毯强度以及草毯生物量都有影响^[10-11]。贾儒康^[12]在干旱半干旱地区无土草毯建植技术研究中,发现 3 种混播草种草毯的综合质量随播种量增加呈上升趋势,播种量为 35 g/m² 时,草种使用量最小,成毯质量最佳。许诺等^[13]研究表明黑麦草播种量在 10~20 g/m² 时可以保证次年 3—4 月份暖季型草坪草与黑麦草交播草毯中适宜的黑麦草植株密

度。周桂珍等^[14]研究发现,种子发芽率 85% 以上时,以 15~25 g/m² 播种量最有利于高羊茅草坪生长。不同草毯草品种因为地域的差异以及使用需求的不同,在播种量的选择上会有所差异。而综合考虑种植成本、成毯时间和成毯质量,应将草种播种量控制在适当范围。

目前,对于草毯制备基质厚度的研究虽然较多,但结合陕北地区沙地特征制备沙基生态草毯的研究相对较少。因此,本研究旨在系统评估早熟禾播种量及基质厚度对沙基生态草毯成毯质量的影响,深入了解不同播种量、不同基质厚度下沙基生态草毯各生长指标的变化规律,为沙基生态草毯的高效制备提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验所选取草种为早熟禾,其千粒重为 1.93 g,发芽率为 78%。该草种具有喜光、耐阴、耐旱、耐贫瘠、不耐水湿、喜微酸性至中性土壤的生长特性。试验在榆林学院陕北矿区生态修复重点实验室进行,采用陕北地区榆林市本地沙土(土壤 pH 为 8.36,有机质含量为 1.51 g/kg,碱解氮含量为 139.04 mg/kg,速效磷含量为 2.21 mg/kg,速效钾含量为 85.41 mg/kg)和混合肥料(草坪专用缓释肥)在花盆中种植,花盆尺寸为 563 mm×380 mm×120 mm。

1.2 材料培养与处理

试验设置 4 个基质厚度(3,5,7,9 cm)以及 3 个播种量(15,30,45 g/m²),共组成 12 个处理组合,分别表示为 $Z_{3/15}$ 、 $Z_{3/30}$ 、 $Z_{3/45}$ 、 $\cdots$ 、 $Z_{9/15}$ 、 $Z_{9/30}$ 、 $Z_{9/45}$,每个处理组合 3 个重复。

室内试验于 2022 年 4 月—2023 年 4 月在榆林学院陕北矿区生态修复重点实验室进行。在 2022 年 4 月 28 日将沙土及混合肥料混匀后装入花盆进行栽培

试验。在播种之前将种子置于清水中浸泡 24 h 进行萌发,测定种子发芽率。依据种子发芽率计算播种量,将种子和沙土混合播种(可以使种子分布更加均匀),将种子均匀播撒到土壤后覆土 2~3 cm,并洒水使土壤保持湿润状态。播种后定时浇水养护。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标

(1)密度:播种 30 d 后,使用小样方法^[15]测定草毯单位面积上的枝条数,每隔 10 d 测 1 次,每个小区重复 3 次。(2)叶宽:这是衡量草毯质地的指标,通常认为叶片越窄草毯质地越优,播种 60 d 后直接测量草叶中部宽度(重复 10 次)^[6],每隔 7 d 测 1 次。(3)地上生物量:草毯成毯后,在草毯表面留茬 5 cm 剪下地上部烘干称重,测定时割取面积为 2 139.4 cm² (56.3 cm×38.0 cm)。(4)根系生物量:草毯成毯后,取 10 cm×10 cm 样方,用水冲洗清除杂质,烘干称重,每个小区重复 3 次。(5)根长密度:在沙基生态草毯取 10 cm×10 cm 样方,用水冲洗清除根部杂质,使用卷尺抽样(随机取样 10 根)测量根长(*L*,cm),称取测量样品重量(*A*₁,g),称取根系总重量(*A*₂,g),计算根长密度(*G*_r,cm/cm³)。

$$G_r = L \times (A_2 / A_1) / T \tag{1}$$

式中:*T* 为样方体积(根据基质厚度计算,cm³)。

1.3.2 生理指标

(1)叶绿素含量:草毯植物的颜色深度取决于叶片中叶绿素的浓度,草毯盖度达到 90% 以后,使用丙酮浸提法测定叶绿素含量^[16],每隔 10 d 测 1 次。(2)根系抗拉强度:指根系抵抗外部轴向拉伸作用时的最大能力,随机剪取大小不同、直径均匀、顺直且完整无损的根各 10 条[长度为(100±5) mm]用于单根抗拉试验^[17]。(3)根系活力:指草毯根系吸收和合成营养成分以及氧化还原的能力,是植物生长发育的重要生理指标之一,草毯盖度达到 90% 以后,采用 TTC-脱氢酶还原法测定^[18]。

1.4 草毯质量综合评价

1.4.1 信息量权重综合分析

信息量权重综合分析法的核心思想是利用数据的变异系数进行权重赋值。变异系数越大,说明数据的离散程度越大,其携带的信息量也就越大,因而对应的权重也会越大;反之,变异系数越小,数据的离散程度越小,携带的信息量少,权重则越小。首先计算每个指标的变异系数,然后对所有指标的变异系数进行归一化处理,得到各指标的权重。方法是

将某个指标的变异系数除以所有指标变异系数之和,即得到该指标的权重。

1.4.2 隶属函数分析

隶属函数值计算公式:

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{j,min}) / (X_{j,max} - X_{j,min}) \tag{2}$$

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{j,min}) / (X_{j,max} - X_{j,min}) \tag{3}$$

式中:*Z*_{ij} 为 *i* 处理 *j* 性状的隶属函数值;*X*_{ij} 为 *i* 处理 *j* 性状的测定值;*X*_{j,min} 和 *X*_{j,max} 分别为 *j* 性状测定的最小值和最大值。当性状与草毯质量呈正相关时用式(2),呈负相关时用式(3)。

1.5 数据分析

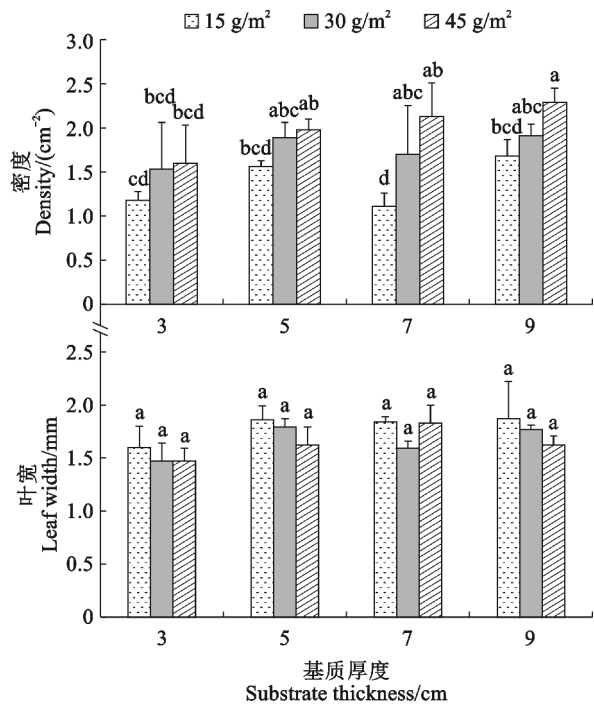
试验数据经 Excel 2023 初步整理,利用 SPSS 25.0 进行平均值、标准差、变异系数计算以及单因素方差分析、LSR 法多重比较等,用 Origin 2021 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 播种量和基质厚度对沙基生态草毯植株密度与叶宽的影响

植株密度是草毯质量最重要的指标,密集毯状的草毯最为理想。如图 1 所示,各播种量和基质厚度处理组合沙基生态草毯植株密度为 1.11~2.29 cm⁻²。其中,*Z*_{9/45}(基质厚度 9 cm,播种量 45 g/m²,下同)、*Z*_{9/30}、*Z*_{7/30}、*Z*_{7/45}、*Z*_{5/45}、*Z*_{5/30} 处理的植株密度相对较大,且这些处理间无显著性差异。*Z*_{7/15} 处理植株密度最小,并显著低于除 *Z*_{5/30}、*Z*_{5/45}、*Z*_{7/30}、*Z*_{7/45}、*Z*_{9/30}、*Z*_{9/45} 以外处理(*P*<0.05)。在相同基质厚度下,沙基生态草毯植株密度均随播种量增加而增加,但 3 cm 和 5 cm 基质厚度下播量间差异均不显著。随基质厚度增加,沙基生态草毯植株密度在播量 15,30 g/m² 时均呈升—降—升波动变化趋势,在播量 45 g/m² 时呈逐渐上升趋势,但基质厚度间多无显著差异。

草毯质地通常由叶宽来度量,一般认为叶片越窄品质越优^[6]。如图 1 所示,不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯叶宽为 1.47~1.87 mm。其中,沙基生态草毯叶宽在 *Z*_{9/15} 处理下最大,在 *Z*_{3/30}、*Z*_{3/45} 处理下最小,但与其他处理相比无显著性差异。在相同基质厚度下,沙基生态草毯植株叶宽随播种量增加基本呈逐渐下降趋势;在相同播种量条件下,叶宽在播种量 15 g/m² 时随基质厚度增加基本呈上升趋势,并在 9 cm 最高,在播量 30 g/m² 时呈波动变化,并在 5 cm 最高,在播种量 45 g/m² 下先升后降,并在 7 cm 最高。



不同小写字母表示不同播种量与基质厚度组合处理间在 0.05 水平存在显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯的植株密度与叶宽

Different normal letters indicate significant differences among treatment combinations of seeding rate and substrate thickness at 0.05 level ($P < 0.05$). The same as below.

Fig. 1 Plant density and leaf width of the ecological grass blankets in sandy soil substrate under different combinations of seeding rate and substrate thickness

2.2 播种量和基质厚度对沙基生态草毯的叶绿素含量与地上生物量的影响

叶绿素含量直接影响植物的光合作用效率和生长发育。图 2 显示,不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯叶绿素含量为 0.73~1.43 mg/dm²。其中,沙基生态草毯叶绿素含量在 Z_{3/15} 处理下最大,但与其他组合处理无显著性差异。在相同基质厚度的播种量间或者相同播种量的基质厚度间沙基生态草毯叶绿素含量均无显著差异。

地上生物量是草毯生长速度和再生能力的数量指标,地上生物量大的草毯密度也相对较大,可以抵抗杂草入侵,有效防治杂草^[5]。如图 2 所示,不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯地上生物量为 0.49~1.90 g/dm²。其中,沙基生态草毯地上生物量以 Z_{9/45} 处理最高,并与其他处理差异显著,在 Z_{3/15} 处理下最低,并与 Z_{5/15}、Z_{5/30}、Z_{5/45}、Z_{9/30}、Z_{9/45} 处理差异显著。沙基生态草毯地上生物量在基质厚度 7,9 cm 时随着播种量增加而升高,在基质厚度为

3 cm、5 cm、7 cm 时播种量间均无显著差异。以上结果说明,基质厚度较低时播种量对草毯的地上生物量影响并不显著;基质厚度较大时草毯的地上生物量随播种量增加而增大。

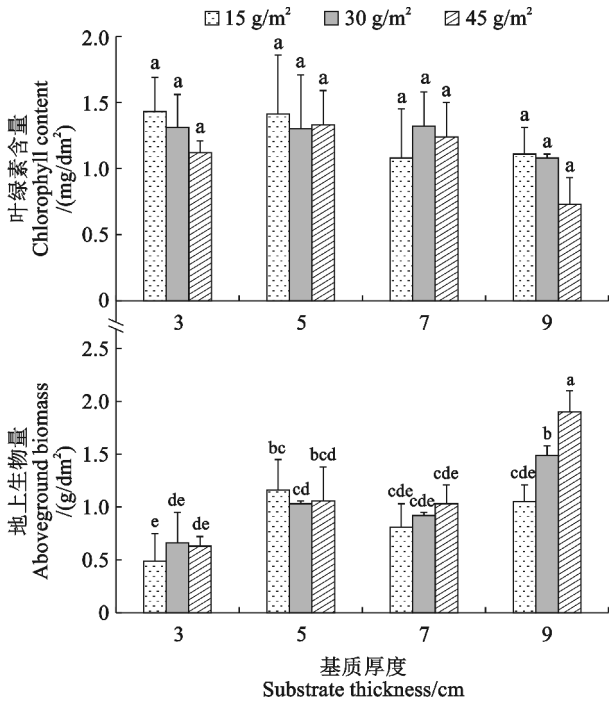


图 2 不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯的叶绿素含量与地上生物量

Fig. 2 Chlorophyll content and above ground biomass of the sandy ecological grass blankets under different combinations of seeding rate and substrate thickness

2.3 播种量和基质厚度对沙基生态草毯的根系生物量与根系抗拉强度的影响

根系生物量是草毯质量的内在指标,地下生物量大表明其根系发达,抗旱能力、抗寒越冬能力、耐修剪、耐践踏能力越强,其关系着草坪能否持久保持和适用^[5]。图 3 显示,不同播种量和基质厚度组合处理下早熟禾沙基生态草毯根系生物量为 1.16~1.91 g/dm²。其中,沙基生态草毯根系生物量在 Z_{9/45} 处理下最大,但与 Z_{5/30}、Z_{5/45}、Z_{9/15}、Z_{7/45} 处理均无显著性差异 ($P > 0.05$);早熟禾沙基生态草毯根系生物量在 Z_{3/15} 处理下最小,但仅与 Z_{5/30}、Z_{7/45}、Z_{9/15} 处理差异显著。沙基生态草毯根系生物量在基质厚度 3,5 cm 时播种量间均无显著差异,在基质厚度 7 cm 时播种量 45 g/m² 显著高于 15 g/m²,在基质厚度 9 cm 时播种量 45 g/m² 显著高于 30 g/m²。沙基生态草毯根系生物量在播种量 15 g/m² 时基质厚度之间均无显著差异,在播种量 30 g/m² 时仅基质厚度 3 cm 与 5 cm 间差异显著,在播种量 45 g/m²

时随着基质厚度增加而逐渐升高,且基质厚度 3 cm 与 7,9 cm 间差异显著。

植物根系通过与所接触的土体介质相互作用来发挥自身抗拉强度,从而达到加固土体的效果,植物根系的抗拉强度是最重要的力学指标^[19]。如图 3 所示,不同播种量和基质厚度组合处理下早熟禾沙基生态草毯根系抗拉强度为 130.90~205.33 MPa。其中,沙基生态草毯根系抗拉强度在 Z_{7/45} 处理下最大,但仅与 Z_{3/45}、Z_{5/15}、Z_{5/45}、Z_{7/30} 处理有显著性差异,而 Z_{3/45} 处理最小,但仅与 Z_{5/30}、Z_{7/15}、Z_{7/45}、Z_{9/45} 有显著性差异。相同基质厚度下,随着播种量增加,沙基生态草毯根系抗拉强度在基质厚度为 3 cm 时逐渐降低;在基质厚度为 5 cm 时先增大后减小,且 30 g/m² 显著高于其余播种量;在基质厚度为 7 cm、9 cm 时均先降低后升高,播种量 45 g/m² 均显著高于播种量 30 g/m²。相同播种量下,随着基质厚度增加,沙基生态草毯根系抗拉强度在 15 g/m² 时先降低后升高,在 30 g/m² 时呈升—降—升波动变化,在 45 g/m² 时基本呈升高趋势。

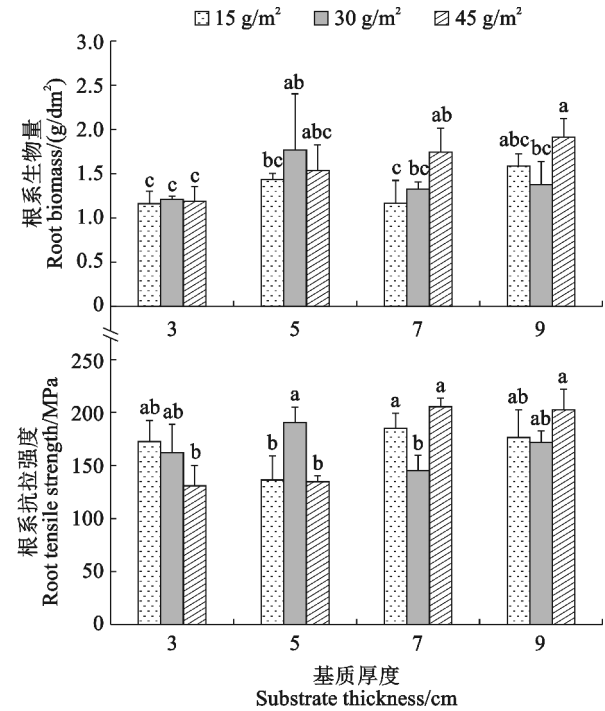


图 3 不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯的地下生物量与根系抗拉强度

Fig. 3 Underground biomass and root tensile strength of the sandy ecological grass blankets under different combinations of seeding rate and substrate thickness

2.4 播种量和基质厚度对沙基生态草毯的根系活力与根长密度的影响

植物根系活力是描述植物根系生理状态的指标

之一,它影响植物水分、养分吸收,以及碳代谢和生长发育,通常根系活力越大,草毯生长发育越好^[19]。图 4 显示,不同播种量和基质厚度组合处理下早熟禾沙基生态草毯根系活力为 0.002 8~0.003 7 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。其中,沙基生态草毯根系活力在 Z_{7/45} 处理下最大,在 Z_{5/30}、Z_{9/30} 处理下最小,但与其他处理间均无显著性差异。在相同基质厚度或者相同播种量下,沙基生态草毯根系活力均未受到播种量或者基质厚度的显著影响。

根长密度是衡量根系发育状况的一个重要指标,对根系水分和营养物质的吸收影响较大,根长密度的增加有助于提高草坪的吸水能力和养分吸收效率,促进草坪的生长和发育^[20]。如图 4 所示,不同播种量和基质厚度组合处理下早熟禾沙基生态草毯根长密度为 15.15~24.55 cm/cm³。其中,沙基生态草毯根长密度在 Z_{5/45} 处理下最大,但仅与 Z_{3/15} 处理存在显著差异。同一基质厚度下沙基生态草毯根长密度在不同播种量间均无显著差异;同一播种量下沙基生态草毯根长密度在不同基质厚度之间均无显著差异。

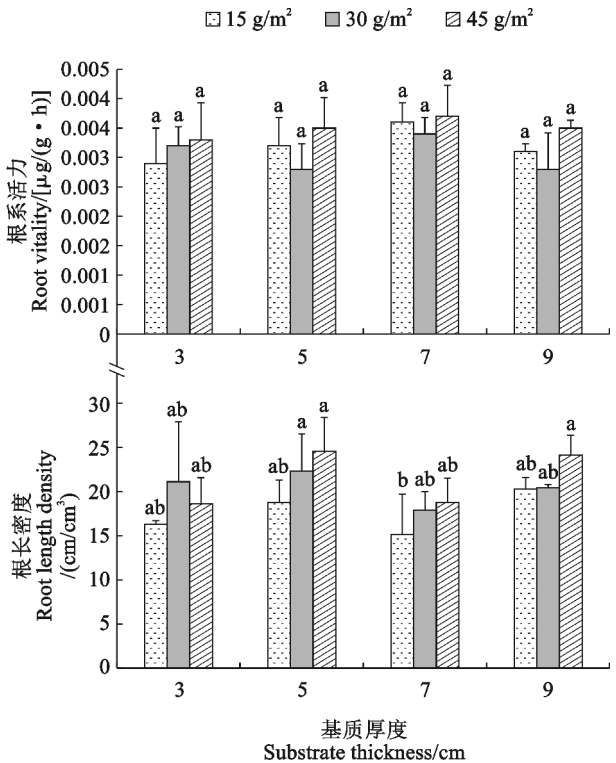


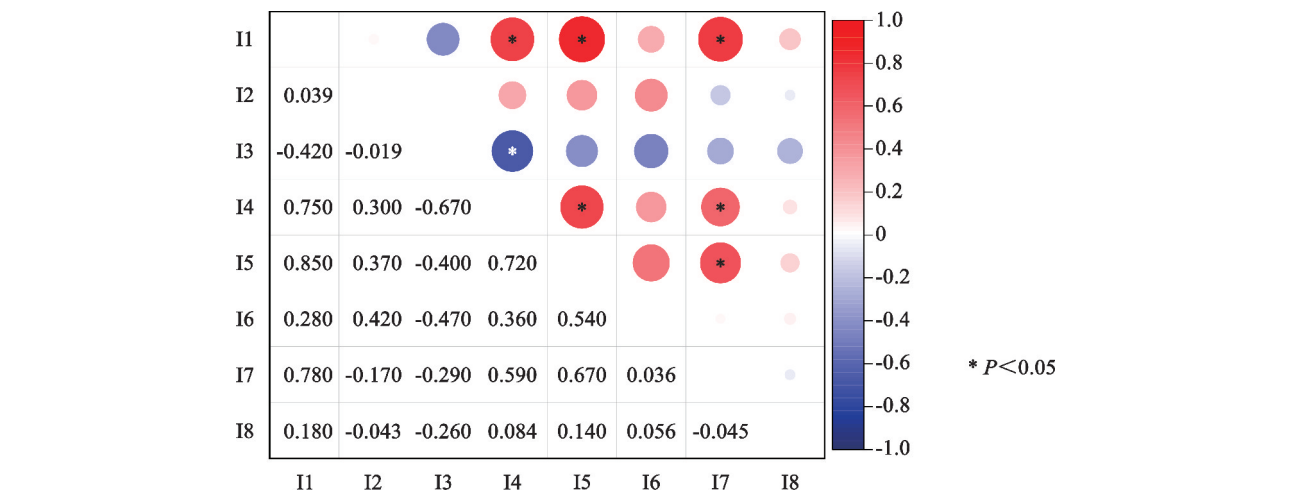
图 4 不同播种量和基质厚度组合下沙基生态草毯的根系活力与根长密度

Fig. 4 Root vitality and root length density of the sandy ecological grass blankets under different combinations of seeding rate and substrate thickness

2.5 早熟禾沙基生态草毯成毯指标之间的相关性分析

如图 5 所示,早熟禾沙基生态草毯密度与地上生物量、根系生物量、根长密度呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数值分别为 0.75、0.85、0.78;叶绿素含量与地上生物量呈显著负相关($P < 0.05$),相关

系数值为-0.67;地上生物量与根系生物量、根长密度呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数分别为 0.72、0.59;根系生物量与根长密度呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数为 0.67;其他各测定指标间均无显著相关性。



I1— I8 分别表示沙基生态草毯的密度、叶宽、叶绿素含量、地上生物量、根系生物量、根系抗拉强度、根长密度和根系活力。
图 5 不同播种量和基质厚度组合处理下沙基生态草毯成毯质量指标间相关系数
I1—I8 respectively represent the density, leaf width, chlorophyll content, aboveground biomass, root biomass, root tensile strength, root length density, and root vitality of ecological grass blankets in sandy soil substrates.
Fig. 5 Correlation coefficients of the quality indicators of the sandy ecological grass blankets under different combinations of seeding rate and substrate thickness

2.6 播种量和基质厚度组合处理沙基生态草毯质量综合评价

2.6.1 成毯指标变异分析

如表 1 所示,12 个组合处理早熟禾沙基生态草毯 8 个指标变异系数(CV)以地上生物量最大(0.377),叶宽最小(0.088)。其中,沙基生态草毯地上生物量权重最大(26.824%),叶宽权重最小(6.276%)。一般情况下,变异系数小于 20%表示

数据的变异程度比较小;在 20%~50%之间表示数据的变异程度适中;大于 50%表示数据的变异程度比较大。本试验中密度、地上生物量变异系数大于 20%,表明沙基生态草毯密度与地上生物量在 12 个基质厚度和播种量组合处理间差异相对较大,且变异程度适中,有利于沙基生态草毯制备方案的优选;沙基生态草毯叶宽不易受基质厚度和播种量处理的影响,表现相对稳定。

表 1 沙基生态草毯成毯指标的变异分析					
Table 1 Variation analysis of the ecological grass blanket indicators in sandy soil substrate					
成毯指标 Grass blanket indicator	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	权重 Weight/%	
密度 Density/(cm ⁻²)	1.713	0.353	0.206	14.665	
叶宽 Leaf width/mm	1.693	0.149	0.088	6.276	
叶绿素含量 Chlorophyll content/(mg/dm ²)	1.205	0.194	0.161	11.475	
地上生物量 Aboveground biomass/(g/dm ²)	1.019	0.384	0.377	26.824	
根系生物量 Root biomass/(g/dm ²)	1.450	0.259	0.179	12.716	
根系抗拉强度 Root tensile strength/MPa	167.799	26.141	0.156	11.078	
根长密度 Root length density/(cm/cm ³)	0.003	0.000	0.094	6.695	
根系活力 Root activity/[μg/(g·h)]	19.867	2.869	0.144	10.271	

如表 2 所示,进一步根据信息量权重综合分析沙基生态草毯的成毯指标,对不同处理进行综合评价并对比分析,得到综合评分前 5 名的处理分别依次为 $Z_{9/45}$ 、 $Z_{7/45}$ 、 $Z_{5/30}$ 、 $Z_{7/15}$ 、 $Z_{9/15}$ 。同时,在相同基质厚度下,草毯质量综合评分在 3 cm 基质厚度时随播种量增加而降低,在 5 cm 基质厚度时先增后减,并以播种量 30 g/m² 时最大,在 7 cm 和 9 cm 基质厚度时均先减后增,并以播种量 45 g/m² 时最大。在相同播种量条件下,随基质厚度增加,草毯质量综合评分在播种量 15 g/m² 时先减后增,并以 7 cm 和 9 cm 基质厚度时较大,在播种量 30 g/m² 时先增后减,并以 5 cm 基质厚度最大,在播种量 45 g/m² 时逐渐增加,并以 7 cm 和 9 cm 基质厚度时较大。

2.6.2 成毯指标隶属函数分析

如表 3 所示,采用模糊数学中的隶属函数法对早熟禾沙基生态草毯成毯性状进行评价及鉴定,以提高评价结果的客观性和准确性。根据草毯建植的目标及其农艺性状特征,以叶宽为负相关指标,其余为正相关指标,分别计算不同处理各性状的隶属函数值。早熟禾沙基生态草毯 12 个基质厚度、播种量

组合处理中隶属函数值前 5 名的处理依次为 $Z_{9/45}$ 、 $Z_{7/45}$ 、 $Z_{5/45}$ 、 $Z_{5/30}$ 、 $Z_{3/30}$ 。前 2 名与 2.6.1 节中综合评分结果完全一致。

表 2 沙基生态草毯成毯指标综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of the indicators for the formation of the ecological grass blankets in sandy soil substrates					
处理 Treatment	综合评分 Comprehensive rating	排序 Sort	处理 Treatment	综合评分 Comprehensive rating	排序 Sort
$Z_{3/15}$	2.62	7	$Z_{7/15}$	2.79	4
$Z_{3/30}$	2.52	8	$Z_{7/30}$	2.28	9
$Z_{3/45}$	2.07	12	$Z_{7/45}$	3.13	2
$Z_{5/15}$	2.17	11	$Z_{9/15}$	2.73	5
$Z_{5/30}$	2.95	3	$Z_{9/30}$	2.69	6
$Z_{5/45}$	2.20	10	$Z_{9/45}$	3.16	1

注: $Z_{3/15}$ 、 $Z_{3/30}$ 、 $Z_{3/45}$ 分别表示基质厚度 3 cm 下播种量分别为 15, 30, 45 g/m² 的组合处理,其余依此类推。下同。
Note: $Z_{3/15}$, $Z_{3/30}$, and $Z_{3/45}$ indicate the treatments where the seeding rates are 15, 30, and 45 g/m², respectively, under a substrate thickness of 3 cm. The same as below.

表 3 沙基生态草毯成毯性状的隶属函数法综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of the characteristics of the ecological grass blankets in sandy soil substrates using the membership function method

处理 Treatment	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	综合评分 Comprehensive rating	排序 Sort
$Z_{3/15}$	0.06	0.67	1.00	0.00	0.00	0.56	0.12	0.11	0.31	11
$Z_{3/30}$	0.36	0.98	0.83	0.12	0.07	0.42	0.64	0.44	0.48	5
$Z_{3/45}$	0.42	1.00	0.56	0.10	0.04	0.00	0.37	0.56	0.38	10
$Z_{5/15}$	0.38	0.04	0.97	0.47	0.36	0.07	0.39	0.44	0.39	9
$Z_{5/30}$	0.66	0.19	0.81	0.38	0.81	0.80	0.76	0.00	0.55	4
$Z_{5/45}$	0.74	0.62	0.86	0.41	0.50	0.05	1.00	0.78	0.62	3
$Z_{7/15}$	0.00	0.08	0.50	0.23	0.01	0.73	0.00	0.89	0.30	12
$Z_{7/30}$	0.50	0.70	0.84	0.31	0.22	0.19	0.29	0.67	0.47	6
$Z_{7/45}$	0.86	0.09	0.73	0.39	0.77	1.00	0.39	1.00	0.65	2
$Z_{9/15}$	0.48	0.00	0.54	0.40	0.57	0.61	0.55	0.33	0.43	8
$Z_{9/30}$	0.68	0.25	0.50	0.71	0.28	0.55	0.56	0.00	0.44	7
$Z_{9/45}$	1.00	0.63	0.00	1.00	1.00	0.96	0.95	0.78	0.79	1

注:I1— I8 分别表示沙基生态草毯的密度、叶宽、叶绿素含量、地上生物量、根系生物量、根系抗拉强度、根长密度和根系活力。
Note: I1—I8 respectively represent the density, leaf width, chlorophyll content, aboveground biomass, root biomass, root tensile strength, root length density, and root vitality of ecological grass blankets in sandy soil substrates.

3 讨 论

沙基生态草毯的制备对于陕北沙土区域的绿化与生态修复有重要意义。本文通过变异分析和隶属

函数分析评估播种量及基质厚度对沙基生态草毯成毯质量的影响,为沙基生态草毯的高效制备提供科学依据。

密度是衡量单位面积内植物株数的指标,密度

越大,草皮相应的盖度会在一定程度上增加,因此在评价草毯质量时,首先应该考虑的是密度^[4]。本试验结果表明,播种量 45 g/m^2 、基质厚度 5, 7, 9 cm 处理下,早熟禾沙基生态草毯的植株密度较大;且植株密度表现为 $45\text{ g/m}^2 > 30\text{ g/m}^2 > 15\text{ g/m}^2$,即植株密度随播种量增加而上升。与之类似,张雄^[21]研究表明草皮密度在一定范围内随播种量的提升而显著上升;刘杨等^[4]研究表明随播种量增加,草毯密度会随之增加。因此,合适的播种量在制备草毯过程中尤为重要。

叶片叶绿素含量是反映植株生理活性变化的重要指标之一,与叶片光合性能的大小密切相关^[22]。本研究中沙基生态草毯叶绿素含量随播种量增加表现出先缓慢增加后减少的趋势,基质厚度 5, 7 cm 时,随播种量增加沙基生态草毯叶绿素含量先增加后减少。这与王继玥等^[23]在油菜上的研究结果相似。较厚的基质提供了良好的土壤环境,有利于早熟禾的根系发育和养分吸收,从而促进了叶绿素合成。叶绿素含量高低影响植物的光合作用效率,进而决定植物的生长状况和生物量积累^[24]。地上生物量是草坪生长速度和再生能力的数量指标,地上生物量大的草坪密度也会相对较大,在本研究中播种量为 $30, 45\text{ g/m}^2$,基质厚度 9 cm 的处理沙基生态草毯地上生物量显著高于基质厚度为 3, 5, 7 cm 的处理。表明基质厚度为 9 cm 时,早熟禾的种子能够充分利用基质提供的养分和空间,为根系提供足够的生长空间,有利于其吸收养分和水分,进而促进地上部分的生长,实现更高的地上生物量累积。但是基质厚度过大以后会增加草毯重量,提高运输、人工等经济成本。所以在选择草毯制备的基质厚度和播种量时,要同时考虑生态适用性和经济适用性。

根系生物量的增加有助于增强草坪的稳定性和抗逆性,提高生态草毯的整体质量。本研究中基质厚度 7, 9 cm 时,沙基生态草毯根系生物量表现为播种量 $45\text{ g/m}^2 > 30\text{ g/m}^2 > 15\text{ g/m}^2$,表明在基质厚度较大时,较高的播种量有利于根系生物量的累积。根系抗拉强度是衡量草毯根系固土能力的重要指标,较高的抗拉强度和根系活力意味着草毯能够更好地抵抗风雨侵蚀和人为踩踏,保持草毯的完整性和美观性^[17]。本研究中,基质厚度为 3, 5 cm 时,随播种量增加沙基生态草毯根系抗拉强度先增大后减小,说明基质厚度较小时,过高的播种量可能导致根系抗拉强度减小,这与冯琴等^[25]研究燕麦 (*Avena sativa*) 与毛苕子 (*Vicia villosa*) 混播所得的结果一

致,表明过大的播种量会限制植物根系的发育。沙基生态草毯根系抗拉强度和根系活力均在基质厚度 7 cm、播种量 45 g/m^2 处理最大。基质厚度和播种量对沙基生态草毯成毯的影响复杂而多样,在不同基质厚度下,最适播种量会有所变化。较薄的基质需要更高的播种量,这样才能确保草种的成活率和覆盖率;而较厚的基质条件下则可以适当降低播种量,以减少种子间的竞争。因此,在实际应用中,需根据具体的基质厚度和播种条件确定最适宜的播种量。

播种量与基质厚度之间存在显著的交互作用。本研究中早熟禾沙基生态草毯密度与地上生物量、根系生物量、根长密度相关性显著,为节约成本、缩短成毯时间,适当增加草毯密度有利于草毯植被建成。叶绿素含量与地上生物量相关性显著,草毯密度和叶绿素含量对沙基生态草毯地上生物量之间关系密切,其二者对沙基生态草毯成毯质量的影响巨大。因此,在沙基生态草毯制备过程中应考虑将草毯密度和叶绿素含量作为关键指标。变异系数反映了各观测值相对于平均值的离散程度,也反映了某一指标可塑性的大小,指标的变异系数越大表明这些指标在该性状上的创新贡献率越高^[26]。在本研究中,根系生物量的变异系数超过 20%,这意味着不同处理对根系生物量的影响尤为显著。这可能是由于根系生物量对生长环境的反应更为敏感,不同处理条件下,如土壤质地、水分状况、养分供应等因素的变化都可能对根系生长产生较大影响,从而导致不同处理间性状差异较大。本研究依据变异分析确定早熟禾沙基生态草毯的坪用性状指标权重,根据其在各个指标上的表现,计算得到加权后的评分,然后对 12 个组合处理方案进行排序,得到沙基生态草毯综合评分前 5 名的处理依次为 $Z_{9/45}$ 、 $Z_{7/45}$ 、 $Z_{5/30}$ 、 $Z_{7/15}$ 、 $Z_{9/15}$ 。这些方案在多个成毯性状指标上均表现出较好的综合性能。隶属函数法是对多个指标的综合分析,可以避免单一指标的片面性,提高优异种质筛选的准确性^[27-29],在众多研究领域得到广泛应用。本研究中,针对沙基生态草毯制备的目标和各个成毯性状的特性,将质地设定为负相关指标,而其他指标则视为正相关指标。采用隶属函数综合分析法,筛选出了 5 个坪用性状上表现优良的处理依次为 $Z_{9/45}$ 、 $Z_{7/45}$ 、 $Z_{5/45}$ 、 $Z_{5/30}$ 、 $Z_{3/30}$ 。结果表明,这些被筛选出的组合处理沙基生态草毯在多个性状上都达到了较理想的水平,且在不同指标之间取得了相对均衡的表现。这意味着这些处理不仅在某些特定

性状上表现出色,而且整体上也具有较高的综合性能。

4 结 论

早熟禾沙基生态草毯成毯质量指标在处理间均表现出一定差异性。 $Z_{9/45}$ 处理草毯的植株密度、地上生物量、根系生物量最大, $Z_{3/15}$ 处理草毯叶绿素

含量最大, $Z_{7/45}$ 处理草毯根系抗拉强度、根系活力最大, $Z_{5/45}$ 处理草毯根长密度最大,而 $Z_{9/15}$ 处理草毯叶宽最小、质地最佳。采用信息量权重综合分析和隶属函数法分析所得草毯成毯性状综合评分最高处理均为 $Z_{9/45}$,即基质厚度 9 cm、播种量 45 g/m² 处理,它是本研究条件下早熟禾沙基生态草毯制备的最优基质厚度和播种量组合。

参考文献:

- [1] DE SOUSA RAATS L E, PAIVA P, RIBEIRO M N O. Comparative analysis grass carpets sizes and plugs for *Zoysia* grass cultivation[J]. *Ornamental Horticulture*, 2012, 18(2): 115-120.
- [2] 韩鹏, 杨志民, 何法慧, 等. 5 种毯式基质草皮的坪用和经济性状评价[J]. 中国草地学报, 2024, 46(2): 144-150.
- HAN P, YANG Z M, HE F H, *et al.* Evaluation for turf characteristics and economics performance of sod using five types of base materials[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 144-150.
- [3] IGNATIEVA M, HUGHES M, CHAUDHARY A K, *et al.* The lawn as a social and cultural phenomenon in Perth, western Australia[J]. *Land*, 2024, 13(2): 191.
- [4] 刘炆, 王晔, 李慧, 等. 层次分析和灰色关联分析的青绿苔草无土草皮适宜播种量筛选[J]. 草业科学, 2023, 40(12): 3009-3017.
- LIU Y, WANG Y, LI H, *et al.* Selection of the suitable seeding rate of *Carex breviculmis* soilless turf based on the analytic hierarchy process and grey relational analysis[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 3009-3017.
- [5] 和丹凤, 向佐湘, 湛迈城. 利用结缕草草屑生产无土草毯基质配方研究[J]. 作物研究, 2018, 32(1): 64-68.
- HE D F, XIANG Z X, ZHAN M C. Study on the matrix formulation to produce soil-free turf with the grass clippings[J]. *Crop Research*, 2018, 32(1): 64-68.
- [6] 何雨昭. 不同基质厚度对沙基草皮卷质量的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [7] 范希峰, 武菊英, 滕文军, 等. 基质厚度对青绿苔草生长和草皮质量的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(2): 383-387.
- FAN X F, WU J Y, TENG W J, *et al.* Effect of different substrate thickness on growth and sod quality of *Carex leucochlora*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 383-387.
- [8] 崔高磊, 徐翠, 罗富成, 等. 无土草皮生长介质的研究与应用进展[J]. 草学, 2020(6): 7-12.
- CUI G L, XU C, LUO F C, *et al.* Research and application progress of soilless turf growth substrate[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2020(6): 7-12.
- [9] 方振东, 易咏梅, 王铁梅. 不同基质配比与施肥对狗牙根无土草毯密度及成卷天数的影响[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2004, 22(2): 38-41.
- FANG Z D, YI Y M, WANG T M. Influence of non-soil-medium proportion and fertilizer on the sod density and days of carpet sod forming[J]. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition)*, 2004, 22(2): 38-41.
- [10] MAXEY G L, WALLACE V H, GUILLARD K, *et al.* Species, cultivar and seeding rate effects on non-irrigated, pesticide-free athletic fields playing surface quality[J]. *International Turfgrass Society Research Journal*, 2022, 14(1): 403-411.
- [11] NELSON J R, WILSON A M, GOEBEL C J. Factors influencing broadcast seeding in bunchgrass range[J]. *Journal of Range Management*, 1970, 23(3): 163.
- [12] 贾儒康. 干旱半干旱地区无土草毯建植技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [13] 许诺, 张翼维, 马攀, 等. 影响暖季型草与黑麦草交播草毯返青的因素[J]. 湖南农业科学, 2015(10): 102-106.
- XU N, ZHANG Y W, MA P, *et al.* Factors influencing warm-season turf carpet turning green while overseeding with ryegrass[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(10): 102-106.
- [14] 周桂珍, 周席华, 解丽珍. 高羊茅草坪不同播种季节对比试验研究[J]. 湖北林业科技, 2006, 35(4): 26-28.
- ZHOU G Z, ZHOU X H, XIE L Z. Study on contrast test in different seeding season under lawn of *Festuca arundinaces* Schreb. [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2006, 35(4): 26-28.
- [15] 李龙保, 林世通, 黎瑞君, 等. 广州亚运会足球场草坪质量的综合评价[J]. 草业科学, 2011, 28(7): 1246-1252.
- LI L B, LIN S T, LI R J, *et al.* Evaluation of football turf quality in the Guangzhou Asian Games[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(7): 1246-1252.
- [16] 昌梦雨, 魏晓楠, 王秋悦, 等. 植物叶绿素含量不同提取方法的比较研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(27): 177-180.
- CHANG M Y, WEI X N, WANG Q Y, *et al.* A comparative study on different extraction methods for plant chloro-

phyl[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32 (27): 177-180.

[17] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 188-194. ZHONG R H, BAO Y H, HE X B, *et al.* Root tensile properties and root cohesion of 4 herbaceous plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 188-194.

[18] 朱秀云, 梁梦, 马玉. 根系活力的测定(TTC 法)实验综述报告[J]. *广东化工*, 2020, 47(6): 211-212. ZHU X Y, LIANG M, MA Y. A review report on the experiments for the determination of root activity by TTC method [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(6): 211-212.

[19] 冯国建, 沈凡, 王世通. 护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(2): 115-118. FENG G J, SHEN F, WANG S T. Study on distribution characteristic and tensile strength of slope eco-engineering plant root [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2013, 30(2): 115-118.

[20] 孙启滨, 王建楠, 李毅念, 等. 大田不同播种间距单株小麦根长密度动态研究[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(8): 1456-1470. SUN Q B, WANG J N, LI Y N, *et al.* Study on the dynamics of root length density in soil layers of single plant wheat under controlled seed-to-seed distance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(8): 1456-1470.

[21] 张雄. 网草皮生产技术研究 with 质量综合评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.

[22] 王锐, 杨峰, 张勇, 等. 套作大豆后期叶片叶绿素荧光特性及光谱特征分析[J]. *核农学报*, 2015, 29(6): 1182-1189. WANG R, YANG F, ZHANG Y, *et al.* The analysis of chlorophyll fluorescence parameters and hyperspectral characteristics of soybean after maize harvest under relay intercropping systems[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(6): 1182-1189.

[23] 王继玥, 宋海星, 官春云, 等. 不同种植密度和施肥量对杂交油菜叶片叶绿素含量和产量的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(1): 13-17. WANG J Y, SONG H X, GUAN C Y, *et al.* Effects of planting densities and fertilizer application levels on the chlorophyll contents in functional leaf and the grain yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Acta Agricuturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(1): 13-17.

[24] JI T X, WANG B, YANG J, *et al.* Hyperspectral-based estimation on the chlorophyll content of turfgrass[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40: 2571.

[25] 冯琴, 王斌, 海艺蕊, 等. 毛苕子不同播种量与燕麦混播对群落竞争及燕麦生物量分配的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30 (9): 2423-2429. FENG Q, WANG B, HAI Y R, *et al.* Effects of mixed sowing of vetch and oat on community competition and biomass allocation of oats[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2423-2429.

[26] SHI Q, WANG R Z, LU W J, *et al.* Metabolomics analysis of variation in grain quality of high-quality Japonica rice[J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 430.

[27] 李兴国. 基于灰关联分析的犹豫模糊多属性决策模型构建与统计检验[J]. *统计与决策*, 2019, 35(24): 33-37. LI X G. Construction and statistical test of hesitant fuzzy multi-attribute decision-making model based on grey relational analysis[J]. *Statistics & Decision*, 2019, 35(24): 33-37.

[28] 贾祥, 多吉格桑, 赵爱民, 等. 4 种禾本科牧草苗期抗寒性综合评价[J]. *草地学报*, 2020, 28(5): 1372-1378. JIA X, DUOJI G S, ZHAO A M, *et al.* Comprehensive evaluation of cold resistance of 4 species of Gramineae at seedling stage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1372-1378.

[29] 王平, 王沛, 孙万斌, 等. 8 份披碱草属牧草苗期抗旱性综合评价[J]. *草地学报*, 2020, 28(2): 397-404. WANG P, WANG P, SUN W B, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of eight *Elymus* germplasms at seedling stage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 397-404.