



## 补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及植被生物量的影响

王博 蔺雄奎 冯占荣 闫聚辉 李志刚

### Effects of reseeded native forage species on soil water holding capacity and vegetation biomass in a desert steppe

WANG Bo, LIN Xiongkui, FENG Zhanrong, YAN Juhui, LI Zhigang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0890>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响

Effects of supplementary sowing on plant community and soil physical and chemical properties in Ningxia desert steppe

草业科学. 2020, 37(10): 1959 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0202>

#### 水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响

Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland

草业科学. 2018, 12(1): 36 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0167>

#### 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施的响应

Response of vegetation community structure, soil carbon sequestration, and water-holding capacity in returning farmland to grassland plots, in the agro-pastoral transitional zone in the Three Rivers Source Region

草业科学. 2017, 11(10): 1999 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0626>

#### 地下水位埋深对沙质草地典型植物群落土壤环境因子和根系生物量的影响

Effects of groundwater depth on soil environmental factors and root biomass of typical plant communities in sandy grassland

草业科学. 2021, 38(9): 1694 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0721>

#### 氮添加对荒漠草原一年生短命植物根系形态特征的影响及其生物量特征关系

Effects of nitrogen addition on the root morphology and biomass characteristics of ephemeral plants in a cold desert

草业科学. 2020, 37(10): 2003 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0128>

#### 基于HJ-HSI数据的伊犁绢蒿荒漠草地生物量估测

Estimation of biomass based on HJ-HSI data in Seriphidium transiliense desert grassland

草业科学. 2017, 11(12): 2504 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0059>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0890

王博, 蔺雄奎, 冯占荣, 闫聚辉, 李志刚. 补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及植被生物量的影响. 草业科学, 2023, 40(9): 2247-2256.

WANG B, LIN X K, FENG Z R, YAN J H, LI Z G. Effects of reseeded native forage species on soil water holding capacity and vegetation biomass in a desert steppe. Pratacultural Science, 2023, 40(9): 2247-2256.

## 补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及 植被生物量的影响

王 博<sup>1</sup>, 蔺雄奎<sup>1</sup>, 冯占荣<sup>1</sup>, 闫聚辉<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1,2</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为了探讨乡土牧草补播对退化草地植被恢复的作用, 在宁夏盐池县设置了以放牧地 (FM) 为对照, 以蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*) 单播 (M)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*) 单播 (N)、蒙古冰草 + 牛枝子混播 (MN)、蒙古冰草 + 沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 混播 (MS) 和蒙古冰草 + 草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*) 混播 (MX) 为补播模式, 研究不同补播措施对荒漠草地土壤持水性及地上地下生物量的影响。结果表明: 1) 不同处理间土壤持水性的综合排序为  $M > MS > MN > MX > N > FM$ 。2) 所有补播处理的地下生物量均高于放牧草地, 且单播牧草的地下生物量 M 高于 N; 而处理间地上生物量表现为  $MS > MX$ 、 $M$ 、 $MN > N > FM$  的趋势。3) 冗余分析 (RDA) 结果表明, 植被地下、地上生物量和表征土壤持水性的指标间显著相关 ( $P < 0.05$ )。本研究结果表明蒙古冰草由于具有较高的地下生物量, 单播或与豆科混播均可以显著改善土壤持水性, 进而利于植被的恢复, 故而在未来草地补播中应因地制宜采用根系生物量大的牧草进行单播或与其他牧草混播。

**关键词:** 补播; 乡土草种; 植被恢复; 持水性; 植物生物量; 根系生物量; 荒漠草地

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)09-2247-10

### Effects of reseeded native forage species on soil water holding capacity and vegetation biomass in a desert steppe

WANG Bo<sup>1</sup>, LIN Xiongkui<sup>1</sup>, FENG Zhanrong<sup>1</sup>, YAN Juhui<sup>1</sup>, LI Zhigang<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Centre, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

**Abstract:** To explore the impact of reseeded native species on vegetation restoration in degraded grasslands we assessed the effects of *Agropyron mongolicum* monoculture (M), *Lespedeza potaninii* monoculture (N), *A. mongolicum* × *L. potaninii* mixture (MN), *A. mongolicum* × *Astragalus adsurgens* mixture (MS), *A. mongolicum* × *A. melilotoides* mixture (MX), and grazing grassland (FM) on soil water holding capacity-related parameters, as well as aboveground and underground biomass in Yanchi County, Ningxia. The results showed that: 1) Soil water holding capacity differed among different treatments ( $M > MS > MN > MX > N > FM$ ). 2) All reseeded treatments led to higher underground biomass than FM, and underground biomass was higher under M than N, while aboveground biomass varied according to  $MS > MX$ ,  $M$ ,  $MN > N > FM$ . 3) Redundancy analysis (RDA) showed that underground and aboveground biomass were positively and significantly correlated with all the soil water holding capacity-related parameters. In conclusion, this study demonstrated

收稿日期: 2022-11-13 接受日期: 2022-12-18

基金项目: 宁夏重点研发项目 (2021BEG03010、2021BEB04002); 宁夏自然科学基金 (2022AAC05013)

第一作者: 王博 (1995-), 男, 宁夏贺兰人, 在读硕士生, 主要从事草地恢复与管理、草地微生物生态学研究。E-mail: wb\_0208@sina.com

通信作者: 李志刚 (1985-), 男, 宁夏海源人, 副教授, 博士, 主要从事草地恢复与管理、草地微生物生态学研究。E-mail: lizg001@sina.com

that both monocultures, or mixed reseeding, of *A. mongolicum* could improve soil water holding capacity and accelerate vegetation restoration due to its high biomass. Therefore, plants with high biomasses should be considered in future restoration plans of degraded grassland.

**Keywords:** reseeded; native species; vegetation restoration; soil water holding capacity; plant biomass; root biomass; desert grassland

**Corresponding author:** LI Zhigang E-mail: [lizg001@sina.com](mailto:lizg001@sina.com)

草地是中国主要的植被类型之一,在畜牧业生产和陆地生态系统服务、功能维持方面具有重要的地位<sup>[1]</sup>。然而受自然因素和人为因素的长期干扰,草地退化依然为中国严峻的环境问题之一<sup>[2]</sup>。补播、施肥、灌溉和围栏等许多措施被应用于退化草地的修复治理<sup>[3]</sup>。其中,补播是草地恢复最有效的措施之一,已被广泛应用于退化草地的恢复。此外,选择与恢复区域相适应的乡土草种进行补播是草地恢复与生态系统维持稳定的关键<sup>[4-5]</sup>。早在1979年,中国就开始采用乡土草种进行补播,且发现补播措施可有效缩短退化草地的恢复过程,加速草地生态系统功能和稳定性的恢复<sup>[6]</sup>。然而,土壤水分是影响干旱半干旱区农业生产和生态系统恢复的主要限制因素<sup>[7]</sup>,最大限度截存有限的降水资源对该地区生态恢复至关重要<sup>[8]</sup>。

持水性是土壤基本物理性质之一,它制约着土壤对降水的吸纳与存留<sup>[9]</sup>,是影响植物定居及生长的重要因素,也是草地植被恢复必须考虑的因素。值得注意的是,植物根系的生长会影响土壤性质的变化,植物根系在土壤中通过穿插交织、根土粘结和发生根系生物化学反应增加土壤有机质和土壤孔隙度、提高土壤团聚体数量,降低土壤容重,进而改善土壤持水性能<sup>[10-11]</sup>。据报道,根系占据草地总生物量的60%~80%<sup>[12]</sup>,其周转快慢对土壤有机质动态有重大影响<sup>[13]</sup>。根系的生长及死亡可有效增加土壤碳含量,影响土壤团聚体的发展,进而影响土壤孔隙度和保水能力<sup>[14-15]</sup>。此外还有学者报道了高的根系生物量可显著增加土壤有机碳和土壤孔隙度<sup>[16]</sup>。因此,选择适宜的植物进行草地补播可以有效改善草地的持水性,加速草地植被的恢复。然而,目前还缺少荒漠草地补播乡土牧草对土壤持水性能的影响的报道。为此,本研究探究了4种乡土牧草单播和混播模式下荒漠草地持水性差异及其与植被地下、地上生物量间的关系,旨在为干旱半

干旱区退化草地植被恢复中牧草的选择提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于宁夏回族自治区盐池县宁夏大学草业科学四墩子教学实验基地(107°15'40" E, 37°20'12" N)。属温带大陆性气候,降水稀少且时空分布不均,80%以上发生在7月—9月,年均降水量250~350 mm;多年平均气温8℃,年蒸发量2810 mm,年均无霜期162 d。研究区草地类型为荒漠草原,土壤类型为灰钙土,植被主要为蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、乳浆大戟(*Euphorbia esula*)、中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)等。其中蒙古冰草和牛枝子为优势物种。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 样地布置

在试验区选择地势平坦且退化程度一致的草地,隔带深翻耕(深耕带宽4 m,相邻带间距6 m)后,采用随机区组试验设计,参考当地多年(>10年)封育草地植被群落结构,分别以当地荒漠草地优势种蒙古冰草和牛枝子及伴生种草木樨状黄芪和沙打旺(*Astragalus adsurgens*)进行单播或禾豆混播,设置蒙古冰草单播(M)、牛枝子单播(N)、蒙古冰草+牛枝子混播(MN)、蒙古冰草+沙打旺混播(MS)和蒙古冰草+草木樨状黄芪混播(MX)5个补播措施。每小区面积5 m×10 m,小区间隔2 m,播种方式为条播,播深约2 cm,行距50 cm。根据以往该地区补播经验,确定播量为22.5 kg·hm<sup>-2</sup>,禾豆比例均为1:1。同时选择附近不做任何处理的自由放牧地(FM)作为对照,共6个处理,每个处理重复3次。

以上补播草种均来自研究地点的封育草地

(> 10 年), 其中蒙古冰草、牛枝子、草木樨状黄芪的纯净度分别为 90%、90% 和 85%; 发芽率分别为 76%、85% 和 80%。该试验于 2017 年 7 月完成样地布置, 补播后采用围封管理, 植物生长完全依赖降水, 无额外施肥和动物干扰。

### 1.2.2 植被地上地下生物量取样

于 2022 年 8 月在每个试验小区设置 3 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的样方, 将样方内所有植被齐地刈割后带回实验室, 在  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干 48 h, 称重记为地上生物量, 同时每个样方内按  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的面积在补播条带的位置挖取植物地下根系, 每 10 cm 为一层, 累积取样深度为 50 cm, 然后将取得土壤样品挑出砾石, 用 2 mm 筛网将根样从土壤样品中分离出来并装进信封袋, 带回实验室在水龙头下冲洗干净, 在  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干 24 h, 称重记为地下生物量。

### 1.2.3 土壤取样

原状土取样在植物根系取样的位置进行, 用环刀按 10 cm 为一层采集各样地 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 土层的土样, 测定土壤容重、孔隙度及持水量。同时, 在每个试验小区, 去除地表覆盖物后, 采用多点混合法采集 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 的土壤样品, 剔除其中杂质, 均质分成两部分, 一部分过 2 mm 筛网, 装入铝盒测定土壤水分含量, 另一部分过 0.15 mm 筛, 测定土壤有机质。

### 1.2.4 测定项目及方法

采用环刀法测定土壤容重、孔隙度及持水量<sup>[17]</sup>; 有机质含量采用重铬酸钾容量法测定<sup>[18]</sup>, 土壤质量含水量采用烘干法测定 ( $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘 24 h)。土壤蓄水量为一定深度土层所储存的水量, 计算公式<sup>[19]</sup>为:

$$SWS = \frac{1}{10} \times SWC \times BD \times H. \quad (1)$$

式中:  $SWS$  为土壤蓄水量 (mm);  $SWC$  为土壤质量含水量;  $BD$  为土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $H$  为土壤深度 (cm)。

### 1.2.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件整理数据, 利用 SPSS 26.0 进行处理间各项指标的单因素方差分析 (ANOVA), 进一步对不同补播地持水性指标采用主成分分析进行排序; 同时, 使用 R 语言对表征土壤持水性指标进行 Pearson 相关分析, 对土壤持水指标与植被地上地下生物量的进行冗余分析 (RDA), 确定出与

植物地上地下生物量关系显著的持水性指标。使用 Origin 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同补播模式对荒漠草地土壤持水性的影响

与放牧草地 FM 相比, 补播措施均不同程度地增加了土壤 0—30 cm 土壤蓄水量, 且以 MS、MX 和 M 表现出较高的趋势; 但当土层深度 > 30 cm 时所有处理间的土壤蓄水量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。同样, 与 FM 相比, 5 种补播措施均不同程度地增加 0—40 cm 深度土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、毛管持水量、饱和持水量和土壤有机质含量, 且总体上处理 M 的指标表现出高于其他补播处理的趋势。对于 40—50 cm 的土层, 土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、毛管持水量、饱和持水量和土壤有机质含量多在处理间变化差异不显著 ( $P > 0.05$ )。此外, 随着土层深度增加, 土壤有机质含量逐渐降低, 而土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量和毛管持水量呈先升后降趋势, 且在 10—20 cm 达到最大 (表 1)。主成分分析获得了不同补播模式土壤持水性各主成分得分及综合得分 (表 2), 即处理间的持水性为  $M > MS > MN > MX > N > FM$ , 说明以蒙古冰草为单播的模式对土壤持水性改善最佳, 其次是蒙古冰草与其他豆科牧草 (沙打旺、牛枝子和草木樨状黄芪) 的混播处理, 而 FM 持水性最差。

Pearson 相关性分析结果还表明, 土壤蓄水量与毛管孔隙度、总孔隙度、毛管持水量、饱和持水量显著相关 ( $P < 0.05$ ), 而非毛管孔隙度和非毛管持水量与土壤有机质极显著正相关 ( $P < 0.01$ ) (图 1)。

### 2.2 不同补播模式对荒漠草地植被地下及地上生物量的影响

研究结果显示, 补播牧草及放牧地 80% 以上的地下生物量主要分布于 0—20 cm 土壤中, 随土壤深度的增加, 不同处理措施的地下生物量均呈急剧递减趋势 (图 2)。与 FM 相比, 5 种补播措施均不同程度地提高了地下根系生物量; 而两种单播牧草间相比, M 表现出高于 N 的趋势; 同时 M 与 3 种豆科牧草混播后其地下生物量均表现出高于对照 FM 的趋势。处理间地上生物量变化不同于地下生物量, 总体上表现为  $MS > MX$ 、 $M$ 、 $MN > N > FM$  的趋势, 且

表 1 不同补播模式及放牧地土壤持水性的单因素方差分析  
Table 1 One-way analysis of soil water holding capacity under different reseeding patterns

| 土层<br>Soil<br>layer/<br>cm | 处理<br>Treatment | 土壤蓄水量<br>Soil<br>water<br>storage/mm | 总孔隙度<br>Total<br>porosity/% | 毛管孔隙度<br>Capillary<br>porosity/% | 非毛管孔隙度<br>Non-capillary<br>porosity/% | 饱和持水量<br>Saturation<br>moisture<br>capacity/% | 毛管持水量<br>Capillary<br>moisture<br>capacity/% | 非毛管持水量<br>Non-capillary<br>moisture<br>capacity/% | 有机质<br>Soil organic<br>matter/<br>(g kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 0—10                       | MS              | 2.09 ± 0.11a                         | 48.26 ± 0.50a               | 44.81 ± 0.12a                    | 3.45 ± 0.46b                          | 36.41 ± 1.90a                                 | 33.78 ± 1.46a                                | 2.63 ± 0.46b                                      | 7.50 ± 0.20c                                            |
|                            | MX              | 1.71 ± 0.09b                         | 42.61 ± 0.64b               | 39.49 ± 0.87b                    | 3.12 ± 0.41b                          | 29.73 ± 0.95bc                                | 27.57 ± 1.11cd                               | 2.17 ± 0.25bc                                     | 8.53 ± 0.14b                                            |
|                            | MN              | 1.69 ± 0.06b                         | 44.02 ± 0.65b               | 40.64 ± 0.58b                    | 3.37 ± 0.09b                          | 31.5 ± 1.43ab                                 | 29.08 ± 1.28bc                               | 2.42 ± 0.15bc                                     | 9.40 ± 0.08a                                            |
|                            | M               | 1.87 ± 0.1ab                         | 49.14 ± 1.80a               | 44.93 ± 0.91a                    | 5.31 ± 0.57a                          | 35.77 ± 2.85a                                 | 32.69 ± 2.23ab                               | 3.89 ± 0.50a                                      | 9.20 ± 0.17ab                                           |
|                            | N               | 1.31 ± 0.03c                         | 39.47 ± 0.80c               | 36.47 ± 0.66c                    | 3.00 ± 0.33b                          | 26.18 ± 1.08c                                 | 24.19 ± 0.99d                                | 1.99 ± 0.22bc                                     | 6.80 ± 0.03d                                            |
|                            | FM              | 0.96 ± 0.08d                         | 38.09 ± 0.35c               | 35.93 ± 0.13c                    | 2.15 ± 0.47b                          | 24.57 ± 0.60c                                 | 23.18 ± 0.59d                                | 1.39 ± 0.29c                                      | 6.55 ± 0.43d                                            |
|                            | <i>F</i>        | 23.708                               | 23.723                      | 38.375                           | 6.278                                 | 8.751                                         | 9.914                                        | 6.282                                             | 31.750                                                  |
| 10—20                      | <i>P</i>        | 0.000                                | 0.000                       | 0.000                            | 0.004                                 | 0.001                                         | 0.001                                        | 0.004                                             | 0.000                                                   |
|                            | MS              | 3.51 ± 0.32a                         | 54.65 ± 1.95a               | 50.94 ± 2.62a                    | 3.71 ± 0.70bc                         | 45.04 ± 3.24a                                 | 42.02 ± 3.69a                                | 3.01 ± 0.50bc                                     | 6.64 ± 0.53c                                            |
|                            | MX              | 2.75 ± 0.03b                         | 43.23 ± 0.58bc              | 41.04 ± 0.49c                    | 2.53 ± 0.49cd                         | 31.27 ± 0.41c                                 | 29.69 ± 0.27c                                | 1.83 ± 0.35c                                      | 7.86 ± 0.50abc                                          |
|                            | MN              | 2.48 ± 0.08bc                        | 46.23 ± 0.87b               | 42.34 ± 1.45bc                   | 4.78 ± 0.60ab                         | 35.46 ± 0.84bc                                | 32.46 ± 1.05bc                               | 3.69 ± 0.46ab                                     | 8.92 ± 0.98a                                            |
|                            | M               | 3.74 ± 0.22a                         | 51.95 ± 1.64a               | 46.18 ± 1.72b                    | 5.77 ± 0.64a                          | 40.8 ± 3.09ab                                 | 36.28 ± 2.90ab                               | 4.53 ± 0.56a                                      | 8.72 ± 0.05ab                                           |
|                            | N               | 3.32 ± 0.19a                         | 43.82 ± 0.62bc              | 41.19 ± 0.30c                    | 2.64 ± 0.39cd                         | 31.00 ± 0.52c                                 | 29.13 ± 0.29c                                | 1.87 ± 0.28c                                      | 7.14 ± 0.13bc                                           |
|                            | FM              | 2.09 ± 0.11c                         | 40.96 ± 0.62c               | 38.72 ± 0.29c                    | 1.87 ± 0.33d                          | 28.9 ± 1.68c                                  | 27.28 ± 1.17c                                | 1.89 ± 0.33c                                      | 6.31 ± 0.42c                                            |
| 20—30                      | <i>F</i>        | 12.015                               | 20.660                      | 9.570                            | 7.649                                 | 10.046                                        | 7.339                                        | 7.083                                             | 4.179                                                   |
|                            | <i>P</i>        | 0.000                                | 0.000                       | 0.001                            | 0.002                                 | 0.001                                         | 0.002                                        | 0.003                                             | 0.020                                                   |
|                            | MS              | 5.47 ± 0.53a                         | 49.21 ± 0.29a               | 45.91 ± 0.84a                    | 3.30 ± 0.55ab                         | 38.33 ± 0.33a                                 | 35.76 ± 0.74a                                | 2.57 ± 0.42ab                                     | 8.09 ± 0.09a                                            |
|                            | MX              | 6.12 ± 0.29a                         | 48.14 ± 0.64ab              | 45.38 ± 0.17a                    | 2.33 ± 0.22b                          | 37.7 ± 1.32ab                                 | 35.52 ± 0.87ab                               | 1.81 ± 0.19b                                      | 6.79 ± 0.82ab                                           |
|                            | MN              | 4.94 ± 0.54a                         | 45.77 ± 1.62b               | 43.35 ± 1.46a                    | 2.42 ± 0.16b                          | 34.02 ± 2.42bc                                | 32.21 ± 2.24bc                               | 1.80 ± 0.18b                                      | 7.40 ± 0.70ab                                           |
|                            | M               | 6.00 ± 0.43a                         | 47.70 ± 0.63ab              | 43.84 ± 0.46a                    | 3.86 ± 0.66a                          | 34.92 ± 0.7ab                                 | 32.09 ± 0.47bc                               | 2.83 ± 0.50a                                      | 8.25 ± 1.18a                                            |
|                            | N               | 4.87 ± 0.57a                         | 42.24 ± 0.38c               | 39.75 ± 0.47b                    | 2.49 ± 0.18b                          | 30.63 ± 0.63cd                                | 28.82 ± 0.62cd                               | 1.81 ± 0.14b                                      | 5.43 ± 0.53b                                            |
|                            | FM              | 3.11 ± 0.41b                         | 41.69 ± 0.49c               | 39.31 ± 0.56b                    | 2.38 ± 0.11b                          | 28.47 ± 0.02d                                 | 26.85 ± 0.08d                                | 1.62 ± 0.09b                                      | 6.02 ± 0.33ab                                           |
|                            | <i>F</i>        | 5.416                                | 15.386                      | 12.954                           | 2.816                                 | 10.510                                        | 10.911                                       | 2.858                                             | 2.593                                                   |
|                            | <i>P</i>        | 0.008                                | 0.000                       | 0.000                            | 0.066                                 | 0.000                                         | 0.000                                        | 0.063                                             | 0.082                                                   |

续表 1

Table 1(Continued)

| 土层<br>Soil<br>layer/<br>cm | 处理<br>Treatment | 土壤蓄水量<br>Soil<br>water<br>storage/mm | 总孔隙度<br>Total<br>porosity/% | 毛管孔隙度<br>Capillary<br>porosity/% | 非毛管孔隙度<br>Non-capillary<br>porosity/% | 饱和持水量<br>Saturation<br>moisture<br>capacity/% | 毛管持水量<br>Capillary<br>moisture<br>capacity/% | 非毛管持水量<br>Non-capillary<br>moisture<br>capacity/% | 有机质<br>Soil organic<br>matter/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 30—40                      | MS              | 10.26 ± 2.00a                        | 45.97 ± 0.71a               | 41.95 ± 1.29ab                   | 4.02 ± 0.58ab                         | 33.58 ± 1.22ab                                | 30.65 ± 1.55ab                               | 2.92 ± 0.39ab                                     | 4.04 ± 0.29b                                            |
|                            | MX              | 10.04 ± 0.72a                        | 45.48 ± 0.73a               | 42.19 ± 0.55ab                   | 3.75 ± 0.53ab                         | 32.86 ± 1.81ab                                | 30.47 ± 1.53ab                               | 2.77 ± 0.35ab                                     | 1.62 ± 0.06c                                            |
|                            | MN              | 8.85 ± 1.54a                         | 47.64 ± 1.21a               | 43.02 ± 0.74a                    | 4.62 ± 0.48ab                         | 36.50 ± 2.41a                                 | 32.94 ± 1.92a                                | 3.56 ± 0.50a                                      | 3.80 ± 0.23b                                            |
|                            | M               | 12.00 ± 0.90a                        | 45.42 ± 0.31a               | 40.2 ± 0.81bc                    | 5.21 ± 0.63a                          | 32.64 ± 1.09ab                                | 28.89 ± 1.07abc                              | 3.75 ± 0.49a                                      | 5.94 ± 0.35a                                            |
|                            | N               | 9.21 ± 0.58a                         | 42.46 ± 0.87b               | 38.42 ± 0.85cd                   | 4.04 ± 0.26ab                         | 29.65 ± 0.89bc                                | 26.83 ± 0.84bc                               | 2.82 ± 0.19ab                                     | 3.68 ± 0.45b                                            |
|                            | FM              | 10.61 ± 0.16a                        | 40.02 ± 0.96b               | 37.04 ± 0.65d                    | 2.99 ± 0.52b                          | 26.99 ± 1.06c                                 | 24.98 ± 0.84c                                | 2.23 ± 0.21b                                      | 0.91 ± 0.22c                                            |
|                            | <i>F</i>        | 0.929                                | 10.713                      | 7.700                            | 2.173                                 | 4.774                                         | 4.514                                        | 2.227                                             | 38.140                                                  |
| 40—50                      |                 | <i>P</i>                             | 0.000                       | 0.002                            | 0.126                                 | 0.012                                         | 0.015                                        | 0.119                                             | 0.000                                                   |
|                            | MS              | 9.93 ± 0.50a                         | 48.12 ± 1.17a               | 42.95 ± 0.35a                    | 5.17 ± 1.00a                          | 36.43 ± 1.00a                                 | 32.51 ± 0.32a                                | 3.91 ± 0.77a                                      | 2.13 ± 0.55a                                            |
|                            | MX              | 7.72 ± 0.33a                         | 45.27 ± 1.25ab              | 42.29 ± 1.56a                    | 2.98 ± 0.34b                          | 34.55 ± 2.17ab                                | 32.29 ± 2.25a                                | 2.49 ± 0.01b                                      | 1.52 ± 0.18a                                            |
|                            | MN              | 8.57 ± 0.95a                         | 44.29 ± 1.96ab              | 40.99 ± 1.35a                    | 3.84 ± 0.28ab                         | 31.67 ± 1.28ab                                | 29.31 ± 0.85a                                | 2.92 ± 0.07ab                                     | 1.67 ± 0.11a                                            |
|                            | M               | 9.52 ± 1.39a                         | 44.87 ± 0.47ab              | 41.10 ± 0.07a                    | 3.76 ± 0.52ab                         | 33.1 ± 0.36ab                                 | 30.33 ± 0.03a                                | 2.78 ± 0.38ab                                     | 1.90 ± 0.63a                                            |
|                            | N               | 8.94 ± 0.44a                         | 45.30 ± 2.16ab              | 41.91 ± 1.98a                    | 3.39 ± 0.18b                          | 34.69 ± 1.98ab                                | 32.09 ± 1.82a                                | 2.59 ± 0.15b                                      | 1.74 ± 0.20a                                            |
|                            | FM              | 8.22 ± 0.70a                         | 42.68 ± 0.63b               | 39.62 ± 0.30a                    | 3.06 ± 0.36b                          | 31.32 ± 0.87b                                 | 29.07 ± 0.66a                                | 2.42 ± 0.12b                                      | 0.96 ± 0.19a                                            |
|                            | <i>F</i>        | 1.038                                | 1.565                       | 0.979                            | 2.381                                 | 1.907                                         | 1.508                                        | 2.339                                             | 1.153                                                   |
|                            | <i>P</i>        | 0.439                                | 0.243                       | 0.469                            | 0.101                                 | 0.167                                         | 0.259                                        | 0.106                                             | 0.386                                                   |

MS, 蒙古冰草 + 草木樨状黄芩混播; MX, 蒙古冰草 + 沙打旺混播; MN, 蒙古冰草 + 牛枝子混播; M, 蒙古冰草 + 牛枝子单播; N, 牛枝子单播; FM, 放牧地。同列不同小写字母表示同一土层下不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

MS, *Agropyron mongolicum* × *Astragalus adsurgens* mixture; MX, *Agropyron mongolicum* × *Astragalus melilotoides* mixture; MN, *Agropyron mongolicum* × *Lespedeza potaninii* mixture; M, *Agropyron mongolicum* monoculture; N, *Lespedeza potaninii* monoculture; FM, grazing grassland. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between treatments at the same soil depth for each parameter at the 0.05 level. This is applicable for the following figures and tables as well.



表 2 不同补播模式土壤持水性主成分得分及综合得分  
Table 2 Principal component and comprehensive scores of soil water holding capacity under different reseeding patterns

| 处理<br>Treatment | 主成分得分<br>Principal component score |                | 综合得分<br>Comprehensive score | 排名<br>Rank |
|-----------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------|------------|
|                 | Y <sub>1</sub>                     | Y <sub>2</sub> |                             |            |
| MS              | 2.89                               | -1.23          | 2.10                        | 2          |
| MX              | -0.71                              | -0.94          | -0.68                       | 4          |
| MN              | 0.68                               | 0.13           | 0.55                        | 3          |
| M               | 2.72                               | 1.45           | 2.32                        | 1          |
| N               | -1.83                              | 0.35           | -1.39                       | 5          |
| FM              | -3.74                              | 0.24           | -2.93                       | 6          |

与 FM 相比, 5 种补播措施均显著提高了植被地上生物量 ( $P < 0.05$ )。

采用 RDA 模型进一步探究了补播后荒漠草地地下、地上生物量与土壤持水性之间的关系, 结果(图 3)表明, 轴 1 和轴 2 分别解释总变异的 64.75% 和 18.18%, 说明该模型能够很好地解释二者之间的关系。即, 草地地下、地上生物量 (UGB 和 AGB) 与所有表征土壤持水性的指标间存在显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$  或  $P < 0.001$ )。

3 讨论

补播是退化草地植被恢复的有效途径, 通过补播可以改变草地生态系统的微环境和资源状况, 进而改变物种间竞争格局, 影响草地群落生产力, 最直接的表现地上植被生物量的变化<sup>[20]</sup>。本研究

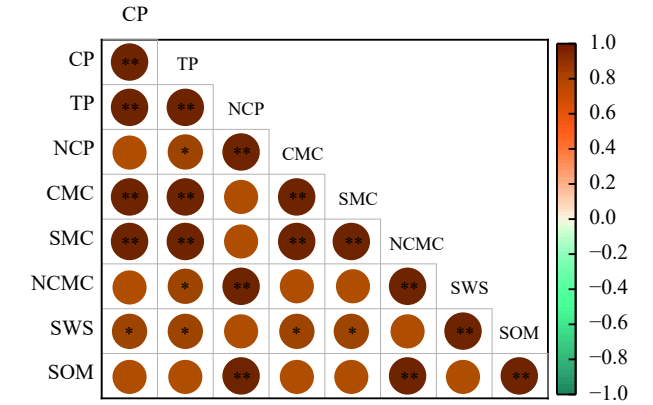


图 1 土壤持水性指标间相关性分析  
Figure 1 Correlation analysis among soil water holding capacity parameters

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 水平显著相关和 0.01 水平极显著相关。SOM: 土壤有机质; SWS: 土壤蓄水量; TP: 总孔隙度; CP: 毛管孔隙度; NCP: 非毛管孔隙度; CMC: 毛管持水量; SMC: 饱和持水量; NCMC: 非毛管持水量; 下同。

\* and \*\* indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively, SOM: soil organic matter; SWS: soil water storage; TP: total porosity; CP: capillary porosity; NCP: non-capillary porosity; CMC: capillary moisture capacity; SMC: saturation moisture capacity; NCMC: non- capillary moisture capacity. This is applicable for the following figures as well.

中, 乡土牧草补播后荒漠草原植物群落结构发生改变, 植被地上生物量较放牧地有较大幅度增加, 这与高寒草地<sup>[21-23]</sup> 及宁夏荒漠草地<sup>[24-25]</sup> 补播结果一致。究其原因, 主要是补播过程中对土壤的扰动改变了植物原有的生存环境, 加之补播的乡土草种适应性强、生长状况良好, 补播成功后草地群落原有

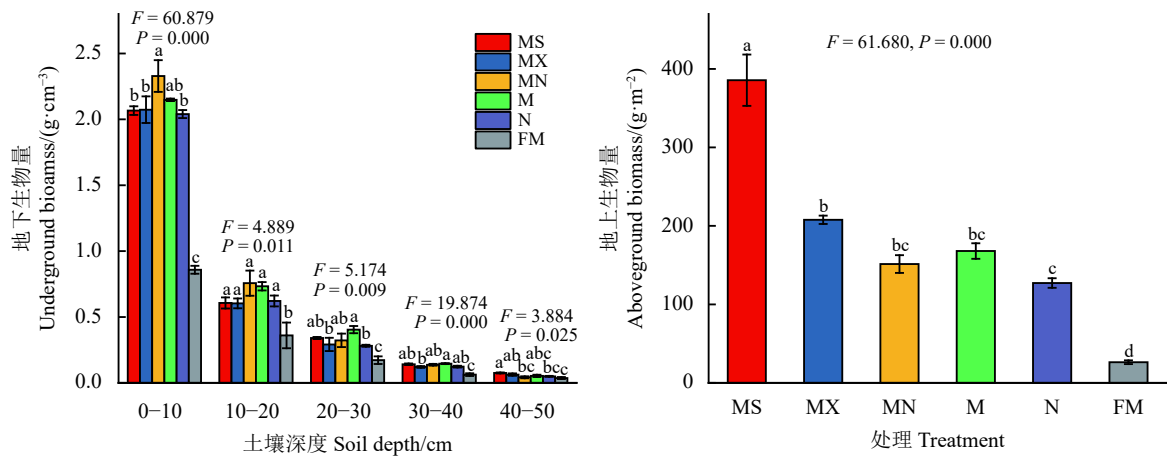


图 2 不同补播模式下植被地下和地上生物量特征  
Figure 2 underground biomass and Aboveground under different reseeded patterns and grazing grassland

不同小写字母表示同一土层下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the same soil depth for each parameter at the 0.05 level.

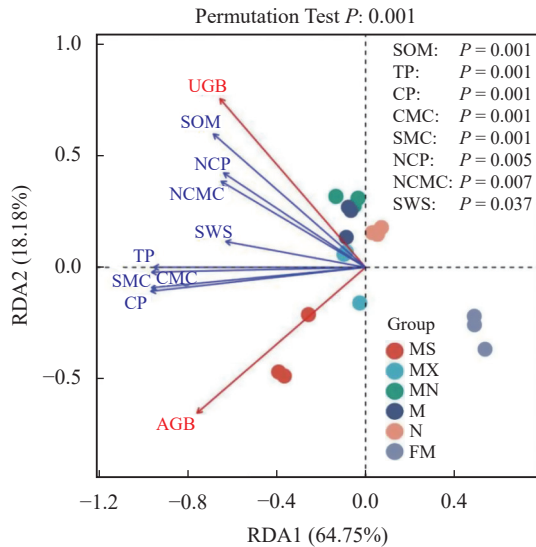


图3 植被地下、地上生物量和土壤持水性间的 RDA 分析  
Figure 3 RDA analysis of relationships between underground and aboveground biomass and soil water holding capacity

AGB: 地上生物量; UGB: 地下生物量。

AGB: aboveground biomass; UGB: underground biomass.

的空间格局被打破,形成新的生态位空间,从而使植被总覆盖度增加,植物群落数量特征发生显著变化<sup>[26-27]</sup>。此外,植被地下生物量与地上生物量分布较为一致,5个补播措施均显著提高了植被地下生物量。李愈哲等<sup>[28]</sup>研究认为植被地下生物量是草地植被恢复过程中群落特征变化的重要体现,是群落总生物量构成的重要组成部分,总生物量的积累将对不同恢复措施产生差异性响应。地下生物量主要由根系构成,其在土壤中的分布情况将直接影响地上植被对水分、养分等物质的吸收利用。Demenois等<sup>[29]</sup>研究发现,根系生物量高的土壤其团聚体稳定性也较高;Hudek等<sup>[30]</sup>研究结果也说明,根长密度高的根系能有效增加土壤团聚体的稳定性。还有研究表明,高的植被地下生物量可以改善土壤有机碳和空隙结构,进而增加对降水的入渗吸纳能力,最终促进地上植被生物量的增加<sup>[14, 16]</sup>。这些研究结果均支持了本研究结果,即通过补播提高了植物根系生物量,促进了土壤有机质积累和提高了土壤持水性能,为植物更好地生长和繁殖更新创造新的良好条件,从而加速退化草地恢复。

植物与土壤是相互作用、相互影响的有机整体<sup>[31]</sup>。特别是在干旱半干旱地区,植物的生长需要不断地从土壤中获取水分,而植物地上枯枝落叶及地下根

系的分解不仅可以改善土壤物理结构,还可以增加土壤水分及养分含量<sup>[25]</sup>。大量研究还表明,植物群落多样性和生物量不仅与其结构和功能有关,还与土壤持水性等理化因子有关<sup>[31-34]</sup>,而土壤持水性能主要受土壤毛管孔隙度、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、饱和持水量、非毛管持水量、土壤蓄水量及土壤有机质含量的影响<sup>[35-36]</sup>。其中植物根系性状有利于改善土壤基本物理性质,如减小土壤容重,增强土壤孔隙度和土壤持水率<sup>[10]</sup>。植物的根系性状又与其地上植被群落密切相关,因为植被群落结构的变化影响草地群落的根系分布以及对土壤有机碳的输入、微生物群落结构及其对地上地下凋落物的分解等生化过程<sup>[37-39]</sup>。本研究中,有机质含量、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、饱和持水量、非毛管持水量和蓄水量均与植被地上、地下生物量显著相关,结合前人研究结果,可进一步说明地下根系生物量的输入可以改善土壤有机质,进而改善土壤孔隙度和持水量,并最终促进了地上植被的恢复。本研究结果还显示,草本植物80%以上的根系生物量分布在0—20 cm,90%的根系生物量分布在0—30 cm,而且与土壤有机质含量的分布规律基本一致,这与一些学者在高寒退化草地<sup>[21]</sup>和宁夏荒漠草地<sup>[25]</sup>补播增加土壤有机质的结果一致,同时也说明草地植物根系对土壤水分的调控主要受0—30 cm根系性状的影响<sup>[16]</sup>。

本研究结果还表明,荒漠草地优势种蒙古冰草较优势种牛枝子具有较高的根系生物量,因此在所有补播处理中其对土壤的持水性最强,而且与其他豆科牧草补播后亦能显著提高混播草地土壤的持水性。李愈哲等<sup>[28]</sup>研究结果表明,在补播过程中多年生禾本科植物在群落中重要值大幅增加,其发达根系有助于降低土壤的侵蚀性,增加土壤中有机物的积累,改善生态系统的土壤团粒结构,正反馈于植物的生长。许爱云等<sup>[40]</sup>研究结果表明蒙古冰草聚集性的分布特征有利于提高种群群体竞争力,表现为即使在严酷的生存环境中,其种群内个体间彼此合作、相互庇护,进而维持其种群的正常发展。马艳红等<sup>[41]</sup>研究结果表明,蒙古冰草的根表面积和根体积可在干旱胁迫下迅速做出反应,从而提高对不同干旱环境的适应能力。以上均支持本研究的结果,进一步表明在未来草地补播中要选择适宜的禾



本科植物进行单播或与豆科牧草混播。

## 4 结论

植物根系可以显著影响土壤的持水性,生物量大的根系可以显著提高土壤有机质含量、促进土壤孔隙度的形成和提高土壤持水量,并最终提高地上

植物生物量及促进植被的恢复。本研究中,禾本科牧草蒙古冰草由于其根系生物量较大,不论单播或与其他豆科牧草混播均可以显著提高荒漠草地的持水性能,进而促进地上植物生物量的积累与植被的恢复,为未来退化草地的补播恢复提供了一定的理论和技术支持。

## 参考文献 References:

- [1] KANG L, HAN X G, ZHANG Z B, SUN O J. Grassland ecosystems in China: Review of current knowledge and research advancement. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [2] LIU G X, ZHANG Y J, HOVSTAD K A, MAO P S, HAN J G. Competition of *Leymus chinensis* and *Bromus inermis* in response to gap size and neighbouring root exclusion. *Grass and Forage Science*, 2014, 69(3): 479-487.
- [3] ZHANG Q, LIU K S, SHAO X Q, LI H, HE Y X, SIRIMUGI, WANG B J. Microbes require a relatively long time to recover in natural succession restoration of degraded grassland ecosystems. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107881.
- [4] RANTALA-SYKES B, CAMPBELL D. Should I pick that? A scoring tool to prioritize and value native wild seed for restoration. *Restoration Ecology*, 2019, 27(1): 9-14.
- [5] DE VITIS M, ABBANDONATO H, DIXON K W, LAVERACK G, BONOMI C, PEDRINI S. The European native seed industry: characterization and perspectives in grassland restoration. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1682.
- [6] ZHOU J Q, ZHANG Y J, WILSON G W T, COBB A B, LU W J, GUO Y P. Small vegetation gaps increase reseeded yellow-flowered alfalfa performance and production in native grasslands. *Basic and Applied Ecology*, 2017, 24: 41-52.
- [7] 康瑶, 银敏华, 马彦麟, 齐广平, 康燕霞, 姜渊博, 张宏斌. 西北内陆干旱区水分调控对豆禾混播草地群落稳定性的影响及评价. *草原与草坪*, 2022, 42(4): 121-132.
- KANG Y, YIN M H, MA Y L, QI G P, KANG Y X, JIANG Y B, ZHANG H B. Effect and evaluation of water regulation on the stability of bean-grain mixed seeding grassland communities in the inland dry zone of northwest China. *Grassland and Turf*, 2022, 42(4): 121-132.
- [8] LIU Y, GUO L, HUANG Z, LOPEZ-VICENTE M, WU G L. Root morphological characteristics and soil water infiltration capacity in semi-arid artificial grassland soils. *Agricultural Water Management*, 2020, 235: 106153.
- [9] 李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. *土壤学报*, 2010, 47(4): 611-620.
- LI Z, WU P T, FENG H, ZHAO X N, HUANG J, ZHUANG W H. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 611-620.
- [10] GOULD I J, QUINTON J N, WEIGELT A, DE DEYN G B, BARDGETT R D. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1140-1149.
- [11] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273.
- LIU J Y, ZHOU Z C, SU X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 267-273.
- [12] BAI W M, WAN S Q, NIU S L, LIU W X, CHEN Q S, WANG Q B, ZHANG W H, HAN X G, LI L H. Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: Implications for ecosystem C cycling. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1306-1316.
- [13] 李博文, 王奇, 吕汪汪, 周阳, 姜丽丽, 刘培培, 孟凡栋, 张立荣, 张苏人, 阿旺, 李耀明, 斯确多吉, 汪诗平. 增温增水对草地生态系统碳循环关键过程的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1668-1679.
- LI B W, WANG Q, LYU W W, ZHOU Y, JIANG L L, LIU P P, MEMG F D, ZHANG L R, ZHANG S R, Awang, LI Y M, Siqueduoji, WANG S P. The effects of warming and added water on key processes of grassland carbon cycle. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1668-1679.

- [14] HUANG Z, TIAN F P, WU G L, LIU Y, DANG Z Q. Legume grasslands promote precipitation infiltration better than gramineous grasslands in arid regions. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 309-316.
- [15] WU G L, CUI Z, HUANG Z. Contribution of root decay process on soil infiltration capacity and soil water replenishment of planted forestland in semi-arid regions. *Geoderma*, 2021, 404: 115289.
- [16] LIU Y, CUI Z, HUANG Z, LOPEZ-VICENTE M, WU G L. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *Catena*, 2019, 182: 104147.
- [17] 李志刚. 有机物料对宁夏人工草地的改良作用. 银川: 宁夏大学博士学位论文, 2016.  
LI Z G. Amended effects of organic materials on cultivated grassland in Ningxia, China. PhD Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis. Third Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 赵庆玲, 孙敏, 林文, 任爱霞, 王志鑫, 张蓉蓉, 李蕾, 高志强. 播种方式对旱地小麦土壤水分变化和籽粒蛋白质形成的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3977-3987.  
ZHAO Q L, SUN M, LIN W, REN A X, WANG Z X, ZHANG R R, LI L, GAO Z Q. Effects of sowing modes on soil water dynamics and grain protein formation in dryland wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3977-3987.
- [20] 葛庆征, 魏斌, 张灵菲, 卫万荣, 黄彬, 江小雷, 张卫国. 草地恢复措施对高寒草甸植物群落的影响. *草业科学*, 2012, 29(10): 1517-1520.  
GE Q Z, WEI B, ZHANG L F, WEI W R, HUANG B, JIANG X L, ZHANG W G. Influence of restoration measures on plant community in alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2012, 29(10): 1517-1520.
- [21] 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(5): 886-890.  
JI W Z, WANG Q H. Effects of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5): 886-890.
- [22] 张永超, 牛得草, 韩潼, 陈鸿洋, 傅华. 补播对高寒草甸生产力和植物多样性的影响. *草业学报*, 2012, 21(2): 305-309.  
ZHANG Y C, NIU D C, HAN T, CHEN H Y, FU H. Effect of reseeding on productivity and plant diversity on alpine meadows. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(2): 305-309.
- [23] 杨增增, 张春平, 董全民, 杨晓霞, 褚晖, 李小安, 魏琳娜, 张艳芬. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响. *草地学报*, 2018, 26(5): 1071-1077.  
YANG Z Z, ZHANG C P, DONG Q M, YANG X X, CHU H, LI X A, WEI L N, ZHANG Y F. Effects of reseeding on plant community composition and diversity of moderately degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1071-1077.
- [24] 季波, 何建龙, 王占军, 刘凤凤, 田波, 吴旭东, 俞鸿千, 任小玢, 蒋齐. 翻耕补播措施对宁夏荒漠草原土壤碳氮储量的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(1): 30-38.  
JI B, HE J L, WANG Z J, LIU F F, TIAN B, WU X D, YU H Q, REN X F, JIANG Q. Effects of tillage on soil carbon and nitrogen reserves in desert steppe of Ningxia. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(1): 30-38.
- [25] 吴宛萍, 马红彬, 陆琪, 周瑶, 宿婷婷, 朱琳. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响. *草业科学*, 2020, 37(10): 1959-1969.  
WU W P, MA H B, LU Q, ZHOU Y, SU T T, ZHU L. Effects of supplementary sowing on plant community and soil physical and chemical properties in Ningxia desert steppe. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 1959-1969.
- [26] 张伟, 王万林, 胡玉昆, 尹伟, 公延明, 房飞, 阿德列提·艾列吾塔力甫. 新疆伊犁荒漠草原恢复措施下植物群落生态位特征分析. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 358-362.  
ZHANG W, WANG W L, HU Y K, YIN W, GONG Y M, FANG F, Adelieti·Ailiwutalifu. Characteristics of plant niche under different restoration measures in Ili desert grassland of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 358-362.
- [27] TILMAN D. Niche tradeoffs, neutrality, and community structure: A stochastic theory of resource competition, invasion, and community assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 10854-10861.
- [28] 李愈哲, 樊江文, 于海玲. 京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响. *草业学报*, 2018, 27(5): 1-14.

- LI Y Z, FAN J W, YU H L. The effects of different restoration practices on temperate grassland ecosystems in the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 1-14.
- [29] DEMENOIS J, CARRICONDE F, BONAVENTURE P, MAEGHT J L, STOKES A, REY F. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. *Geoderma*, 2017(312): 6-16.
- [30] HUDEK C, STANCHI S, D'AMICO M, FREPPAZ M. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(1): 36-42.
- [31] 段成伟, 李希来, 柴瑜, 徐文印, 苏乐乐, 马盼盼, 杨鑫光. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响. *生态学报*, 2022, 42(18): 7652-7662.
- DUAN C W, LI X L, CHAI Y, XU W Y, SU L L, MA P P, YANG X G. Effects of different rehabilitation measures on plant community and nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7652-7662.
- [32] 刘玉玲, 王德平, 张泓博, 王国富, 李鹏珍, 戎郁萍. 补播时间和补播草种对退化草甸草原植物群落的影响. *草地学报*, 2022, 30(11): 3098-3105.
- LIU Y L, WANG D P, ZHANG H B, WANG G F, LI P Z, RONG Y P. Effects of reseeding time and species on plant community of meadow steppe in Hulunbeir. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3098-3105.
- [33] 李永康, 许冬梅, 撒春宁, 王星, 宋珂辰. 乡土物种对退化荒漠草原的改良效果研究. *中国草地学报*, 2022, 44(6): 36-45.
- LI Y K, XU D M, SA C N, WANG X, SONG K C. The study on the improvement effect of native species on degraded desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(6): 36-45.
- [34] 吴旭东, 蒋齐, 俞鸿千, 王占军, 何建龙. 沙质草地植物群落及土壤质地对补播和翻耕措施的响应. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 246-251.
- WU X D, JIANG Q, YU H Q, WANG Z J, HE J L. Response of plant community and soil texture of sandy grassland to the reseeding and plowing. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 246-251.
- [35] 富丽, 赵锦梅, 李永宁, 李亚红, 戴煜亮, 张伟飞. 陇东黄土高原不同林龄苹果林地枯落物及土壤的水文效应. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 40-45.
- FU L, ZHAO J M, LI Y N, LI Y H, DAI Y L, ZHANG W F. Hydrological effects of litters and soil in apple tree plantation at different stand ages of Longdong Loess plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 40-45.
- [36] 赵伟, 赵举, 魏占民, 尹春艳, 刘虎, 朱波. 气化渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 64-69.
- ZHAO W, ZHAO J, WEI Z M, YIN C Y, LIU H, ZHU B. Effect of aeolian sandy soil improved by gasification slag on soil water physical properties. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 64-69.
- [37] 季波, 何建龙, 杜建明, 王占军, 谢应忠, 吴旭东, 俞鸿千, 蒋齐. 不同补播配置模式对宁夏荒漠草原土壤有机碳和全氮储量的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(3): 60-66.
- JI B, HE J L, DU J M, WANG Z J, XIE Y Z, WU X D, YU H Q, JIANG Q. Effects of different reseeding modes on soil organic carbon and nitrogen reserves in Ningxia desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(3): 60-66.
- [38] 丁越岩, 杨劫, 宋炳煜, 呼格吉勒图, 张琳. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响. *草业学报*, 2012, 21(2): 18-25.
- DING Y K, YANG J, SONG B Y, HUGIJILETU, ZHANG L. Effect of different vegetation types on soil organic carbon in Mu Us desert. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(2): 18-25.
- [39] 乔有明, 王振群, 段中华. 青海湖北岸土地利用方式对土壤碳氮含量的影响. *草业学报*, 2009, 18(6): 105-112.
- QIAO Y M, WANG Z Q, DUAN Z H. Effects of different land-use types on soil carbon and nitrogen contents in the northern region of Qinghai Lake. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 105-112.
- [40] 许爱云, 许冬梅, 曹兵, 刘金龙, 于双, 郭艳菊, 马晓静. 宁夏荒漠草原不同群落蒙古冰草种群空间格局及种间关联性. *草业学报*, 2020, 29(3): 171-178.
- XU A Y, XU D M, CAO B, LIU J L, YU S, GUO Y J, MA X J. Spatial distribution patterns and interspecific relationships of *Agropyron mongolicum* populations in different desert steppe communities in Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(3): 171-178.
- [41] 马艳红, 刘旭婷, 张旭婷, 于肖夏, 姜超, 于卓. 干旱胁迫对蒙古冰草苗期根系特征及生理特性的影响. *种子*, 2017, 36(11): 66-69.
- MA Y H, LIU X X, ZHANG X T, YU X X, JIANG C, YU Z. Root and physiological characteristics of *Agropyron mongolicum* under drought stress at seedling stage. *Seed*, 2017, 36(11): 66-69.

(责任编辑 苟燕妮)