

DOI:10.11686/cyxb2025329

<http://cyxb.magtech.com.cn>

石文杰, 李小伟, 任振强, 等. 毛乌素沙地不同年限柠条固沙林林下草本土壤种子库特征研究. 草业学报, 2026, 35(8): 1—13.

SHI Wen-jie, LI Xiao-wei, REN Zhen-qiang, *et al.* Characteristics of understory herbaceous soil seed banks in *Caragana korshinskii* sand-fixation thickets of different ages in the Mu Us Sandy Land. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 1—13.

毛乌素沙地不同年限柠条固沙林林下 草本土壤种子库特征研究

石文杰^{1,2,3,4}, 李小伟^{1,2,3,4*}, 任振强⁵, 刘吉德⁵, 刘玲⁵, 郝淑香⁵, 李云霞⁵

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 5. 内蒙古贺兰山国家级自然保护区管理局, 内蒙古 阿拉善盟 750300)

摘要: 土壤种子库是沙地植被恢复的重要种源库, 探究其随固沙年限的变化规律对荒漠沙化治理具有重要科学意义。本研究以毛乌素沙地不同固沙年限(10、30、50、70 a)柠条固沙林为对象, 结合野外调查、种子库萌发试验与土壤理化性质分析, 系统解析土壤种子库在不同固沙阶段的特征演变及驱动因子。结果表明: 土壤种子库共萌发出 28 种植物, 隶属 8 科 22 属, 以菊科、禾本科和苋科为主。随着固沙年限延长, 一年生草本植物占比逐渐减少, 而多年生草本植物占比逐渐增加。Shannon—Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数与 Simpson 优势度指数均随固沙年限的延长表现出递增趋势, 而 Pielou 均匀度指数则逐渐降低。土壤种子库密度随固沙年限延长显著增加, 种子库平均密度为 303.31~5719.72 粒·m⁻², 主要集中于 0~2 cm 和 2~5 cm 土层土壤, 且随土层深度的增加逐渐降低。除 30 a 样地外土壤种子库与地上植被均表现为中等相似性, 并随固沙年限的延长呈波动性增加。冗余分析表明, 地上植被物种均匀度($F=4.0$, $P=0.016$)是显著影响种子库的植被因子, 土壤速效氮($F=13.7$, $P=0.002$)则是主要的土壤驱动因子。综上, 随固沙年限延长, 土壤种子库呈多样性增强、密度升高的正向演替趋势。本研究可以为毛乌素沙地植被恢复及生态潜力提升提供科学依据。

关键词: 毛乌素沙地; 柠条; 土壤种子库; 生态恢复

Characteristics of understory herbaceous soil seed banks in *Caragana korshinskii* sand-fixation thickets of different ages in the Mu Us Sandy Land

SHI Wen-jie^{1,2,3,4}, LI Xiao-wei^{1,2,3,4*}, REN Zhen-qiang⁵, LIU Ji-de⁵, LIU Ling⁵, HAO Shu-xiang⁵, LI Yun-xia⁵

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grass and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Agriculture and Rural Ministry of Forage Efficient Production Mode Innovation Key Laboratory, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Northwest Land Degradation and Ecological Restoration State Key Laboratory Cultivation Base, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 5. Inner Mongolia Helan Mountain National Nature Protection Bureau, Alxa 750300, China

Abstract: The soil seed bank serves as a crucial seed source for vegetation restoration in sandy areas. Investigating how it changes during prolonged periods of sand fixation holds significant scientific importance for combating desertification. This study focused on *Caragana korshinskii* sand-fixing thickets of different ages (10, 30, 50, and

收稿日期: 2025-08-14; 改回日期: 2025-09-20

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2024AAC03102)资助。

作者简介: 石文杰(2000—), 男, 宁夏同心人, 在读硕士。E-mail: 1694560821@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lxwbq@126.com

70 years) in the Mu Us Sandy Land. By integrating field surveys, seed bank germination experiments, and soil physicochemical property analysis, we systematically analyzed the evolution of the soil seed bank and its driving factors across different periods of sand fixation. The results show that 28 plant species germinated from the soil seed bank. These 28 species belonged to 22 genera and 8 families, predominantly Asteraceae, Poaceae, and Amaranthaceae. As the period of sand fixation increased, the proportion of annual herbaceous plants gradually decreased, while that of perennial herbaceous plants progressively rose. The Shannon—Wiener diversity index, Margalef richness index, and Simpson dominance index all exhibited increasing trends with prolonged sand fixation, whereas the Pielou evenness index gradually declined. The soil seed bank density increased significantly as the period of sand fixation increased, from 303.31 to 5719.72 seeds·m⁻². The seed bank was primarily concentrated in the 0—2 cm and 2—5 cm soil layers, and decreased progressively with increasing soil depth. The similarity between the soil seed bank and aboveground vegetation exhibited moderate levels across all sites, except in the 30-year-old thicket, and showed a fluctuating increase with prolonged sand fixation. A redundancy analysis revealed that aboveground vegetation species evenness ($F=4.0$, $P=0.016$) was the significant vegetation factor affecting the seed bank, while soil available nitrogen ($F=13.7$, $P=0.002$) was the primary soil factor driving the seed bank. In conclusion, as the duration of sand fixation increased, the soil seed bank exhibited a successional trend characterized by enhanced diversity and increased density. This study provides a scientific basis for vegetation restoration and potential ecological enhancement in the Mu Us Sandy Land.

Key words: Mu Us Sandy Land; *Caragana korshinskii*; soil seed bank; ecological restoration

土壤种子库是自然存储在土壤凋落物及土壤中有生命力种子的统称^[1]。其被看作地上植被的潜在种群,并显著影响着植被的恢复与更新、演替进程和方向^[2]。土壤种子库的研究对于预测未来植被群落动态以及指导生态恢复实践均具有重要的科学意义。在荒漠生态系统中,土壤种子库的保护与利用对维系生物多样性、阐释植被更新潜力及促进区域生态可持续发展具有关键作用^[3]。

种子库在植物种群和群落动态中的关键作用,以及其在生态恢复领域的重要意义,使其成为生态学研究关注的重点领域之一^[4]。Oliveira等^[5]研究指出,在对亚马孙东部被火烧森林后的恢复中发现地上植被早期的恢复主要依赖于永久土壤种子库,即土壤种子库保证了先锋物种的快速补充,从而促进了森林的恢复过程;曲文杰等^[6]研究发现,在腾格里沙漠地区,土壤种子库特征与地上植被特征之间的关系随固沙年限的延长而愈发紧密;Wang等^[7]进一步指出,土壤种子库中占优势的先锋沙生植物和一年生草本植物,在固定沙丘植物多样性与群落稳定性建立中具有重要作用。土壤种子库在维持群落结构、促进先锋物种建立以及支撑生态系统恢复方面发挥着核心作用,其与地上植被之间的密切关系,已在多种生态环境中得到验证,成为生态恢复研究不可或缺的重要组成部分。

除了植物本身的种源贡献外,生境恢复也需要植被恢复与土壤环境的协同作用。土壤环境不仅为植物完成生活史提供必要的养分,也是种子贮存与萌发的关键场所。相关研究表明,土壤pH^[8]、有机质与速效磷^[9]等营养元素在调控土壤种子库物种组成的多样性特征格局方面具有显著作用,土壤环境特征在种子保存与植被重建过程中具有不可忽视的调控功能。干旱荒漠区因其较为恶劣的生态环境,使得植被恢复变得更加困难,然而土壤种子库中埋藏的有活力的种子,为地上植被恢复和种群延续提供了重要的种源基础^[10]。因此,深入掌握荒漠生态系统中土壤种子库的动态特征,并将其应用于生态修复实践,不仅有助于构建适应干旱环境的优势植物群落,更有助于科学预测未来植被演替趋势,为区域生态系统的恢复与治理提供理论支持^[11]。

毛乌素沙地位于干旱与半干旱气候过渡带,水分胁迫显著,生态系统极为脆弱^[12]。柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)为豆科锦鸡儿属多年生灌木,具有防风固沙、减少水土流失等生态功能^[13]。作为优良的本土固沙植物,已被广泛用于宁夏灵武白芨滩地区的植被恢复实践。已有研究表明,人工柠条林在改善地上植被结构^[14]与土

壤理化性质^[15]方面具有重要的生态功能,但有关其土壤种子库特征及其在生态恢复中作用的研究尚不足。土壤种子库作为地上植被的“潜在种源库”,在评估恢复潜力和揭示演替机制中具有重要价值^[16]。柠条固沙林土壤种子库的动态变化是驱动植被自然更新的关键过程,然而其随种植年限延长的响应规律与内在机制仍是当前研究的薄弱环节,制约着研究者对其长期的生态修复效果与稳定性的深入认知。因此,本研究以毛乌素沙地不同固沙年限柠条林为对象,系统探讨土壤种子库特征及其与地上植被的关系,识别主要影响因子,揭示其对植被自然更新能力的贡献潜力随时间演替的动态变化规律,以期为毛乌素沙地生态恢复实践及生态资源可持续管理策略优化提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设置于毛乌素沙地西南缘的宁夏白芨滩国家自然保护区(106°20′22″—106°37′19″E, 37°49′05″—38°20′54″N)内,为大陆性半干旱季风气候特征,气候干燥,常年多风,降水量少且集中,多年平均降水量为206.22~255.25 mm,年平均气温为8.60℃,蒸发量大,年平均蒸发量为1928.4 mm^[12]。常见植物有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条锦鸡儿、刺沙蓬(*Salsola tragus*)等^[17]。

1.2 土壤种子库取样与种子萌发测定

于2024年2月,在毛乌素沙地选择柠条种植年限为10、30、50和70年的固沙林分别设置样带(记10、30、50、70 a)。在每个样带中布设3个10 m×10 m的灌木样方(水平间距>100 m);并在每个灌木样方内按“S”形布设5个1 m×1 m的草本样方,调查样方中出现的植物物种并记录其高度、盖度、多度,计算其频度。共设置灌木样方12个、草本样方60个。记录样地海拔、经纬度等。在当年3月中旬种子尚未开始萌发前进行土壤种子库取样,在设置的10 m×10 m的柠条样地中沿对角线选择3个草本样方,选用直径为7 cm、高5 cm种子库取样器,按0~2 cm、2~5 cm和5~10 cm,3层分层采集土样并装袋。4个不同固沙年限柠条林共取得108份种子库土样。采样时清除地表枯枝落叶,所有土样标记后带回实验室风干备用。同时,在每个灌木样方使用直径5 cm的土钻按0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm进行土壤采样,每个样方5点混合,共获得45份混合样品,将混合土壤样品带回实验室风干后进行土壤理化性质的测定。

将采集的种子库样品带回温室,过3 mm筛混匀并去除残留植物器官,自然通风干燥10 d以上。萌发时,采用出苗法^[18]定量分析土壤中活种子的种类组成和数量。于萌发盘(31.0 cm×41.0 cm×5.8 cm)底部铺设厚度不超过3 cm的无菌沙土,将种子库样品均匀铺设于其上,厚度不超过3 cm。所有萌发盘每日定时浇水,保持土壤湿润。萌发期间,每3 d观测1次出苗情况,记录幼苗物种名称及数量,移除已鉴定幼苗;未识别幼苗单独移栽至额外萌发盘中,待可识别后鉴定。为减少温室空间异质性(光照和温度差异)对萌发产生的影响,每周随机调整萌发盘位置1次。萌发后期,进行约2周的土壤脱水处理,每周灌溉2次并定期松土,以促进种子萌发。若持续2周末萌发出幼苗则终止试验。萌发试验共持续6个月。

1.3 土壤理化性质测定

参照《土壤农化分析》^[19],采用烘干称重法测定土壤含水率(soil water content, SWC);采用环刀法测定土壤容重(soil bulk density, SBD);采用玻璃电极法测定土壤酸碱度(pH);采用重铬酸钾氧化法(外加热法)测定土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量;采用碱解扩散法测定土壤速效氮(soil available nitrogen, SAN)含量;采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效磷(soil available phosphorus, SAP)含量。

1.4 数据处理

将取样面积的种子数目按单位面积(1 m²)种子数量换算来表示种子库密度^[20]。

参照《宁夏植物志》^[21]对萌发出的幼苗进行鉴定并划分为一年生草本、多年生草本、藤本及灌木4种生活型,统计各生活型植物的萌发数量及占比。

基于地上植被群落特征的调查结果与萌发试验结果分别计算地上植被(aboveground vegetation)与土壤种子库(soil seed bank)的物种多样性指数,包括 Shannon—Wiener 多样性指数(H_A 、 H_S)、Margalef 丰富度指数(R_A 、

R_s)、Pielou 均匀度指数(E_A 、 E_s)和 Simpson 优势度指数(D_A 、 D_s)。各指数计算公式如下^[3]:

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$

$$R = (S - 1) / \ln N$$

$$E = H / \ln S$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

式中: S 为地上植被(或土壤种子库)的物种总数; P_i 为第*i*个物种数量占所有个体总数的比例; N 为地上植被(或土壤种子库)所有物种的个体总数^[3]。

地上植被和土壤种子库的 Sorensen 相似性系数(similarity coefficient, Sc)计算公式如下^[3]:

$$Sc = 2W / (a + b)$$

式中: W 为所统计地上植被与土壤种子库的共有物种数; a 代表地上植被物种数量; b 代表土壤种子库物种数量^[3]。

1.5 数据分析和作图

采用 Excel 2019 对数据进行初步的计算与处理,使用 SPSS 22.0 进行数据的多重比较与相关性分析,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(least significant difference, LSD)对不同固沙年限间柠条土壤种子库多样性特征和平均密度进行多重比较,以检验其差异显著性;采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)探究固沙年限与土层及其交互作用对土壤种子库密度的影响,检验其差异显著性,利用 Origin 2024 制图。采用 GraphPad prism 10.0 分别对土壤种子库多样性及平均密度随固沙年限的增加进行线性回归分析和作图。使用 Canoco 5.0 通过冗余分析(redundancy analysis, RDA)探究影响土壤种子库特征的植被因子与土壤因子,并作图。

2 结果与分析

2.1 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库物种组成

土壤种子库共萌发出 28 种植物,分属 8 科 22 属(表 1)。以菊科种类最多(8 种),其次是禾本科(7 种)。固沙 10 a 的样地中仅萌发出 3 种植物,30 a 样地萌发出 15 种,50 a 样地萌发出 12 种,70 a 样地萌发植物种类最多,为 23 种。由此可见,随固沙年限增加,地上植被群落的物种数逐渐增加。

在各个固沙年限中,土壤种子库生活型以一年生草本植物为主,平均占比约为 93.00%,多年生草本植物平均占比较少,约为 4.97%,藤本和灌木平均占比约为 1.31% 和 0.72%(表 2)。随着固沙年限延长,一年生草本植物仍占较大比例但逐渐减少,多年生草本植物虽占比较少但随固沙年限延长而增长。

2.2 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库的物种多样性

Shannon—Wiener 多样性指数平均值为 0.63~2.21(图 1),表现为 70 a>50 a>30 a>10 a,各固沙年限之间存在显著差异($P<0.05$)。Margalef 丰富度指数平均值为 0.91~2.30,其中固沙 70 a 样地显著高于 10 和 50 a 样地, Margalef 丰富度指数随固沙年限的延长呈波动性增长。Pielou 均匀度指数平均值为 0.44~1.00,固沙 10 a 样地显著高于 30、70 a 样地。Simpson 优势度指数平均值为 0.42~0.86,固沙 50 和 70 a 样地显著高于 10 和 30 a 样地。总体来说,固沙 70 a 样地的 Shannon—Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Simpson 优势度指数均显著高于其他样地,10 a 样地多样性、丰富度、优势度指数均为最低。土壤种子库 Shannon—Wiener 多样性指数($R^2=0.943$, $P<0.01$)、Margalef 丰富度指数($R^2=0.526$, $P<0.01$)和 Simpson 优势度指数($R^2=0.802$, $P<0.01$)均与固沙年限存在显著的正相关关系(图 2)。

2.3 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库密度与垂直分布特征

同一土层不同固沙年限样地中,土壤种子库密度在各土层深度中都随着固沙年限的延长而表现出递增趋势(图 3),具体表现为固沙 70 a 样地>50 a 样地>30 a 样地>10 a 样地。双因素方差分析表明,0~2 cm 与 5~10 cm 土层土壤的种子库密度,在固沙 70 a 样地均显著高于其他样地($P<0.05$),固沙 70 a 样地 2~5 cm 土层土壤种子库密度显著高于固沙 10 与 30 a 样地($P<0.05$),与固沙 50 a 样地土壤种子库密度无显著差异($P>0.05$)。在同一

表 1 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库物种组成及数量占比

Table 1 Species composition and quantitative proportions of soil seed banks in *C. korshinskii* sand-fixation forests with different sand-fixation durations

物种 Species	科 Family	属 Genus	LF	占比 Percentage (%)			
				10 a	30 a	50 a	70 a
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	禾本科 Poaceae	针茅属 <i>Stipa</i>	P	—	1.34±1.61	—	2.46±3.72
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	禾本科 Poaceae	画眉草属 <i>Eragrostis</i>	A	—	4.75±0.10	29.70±3.29	15.65±11.35
三芒草 <i>Aristida adscensionis</i>	禾本科 Poaceae	三芒草属 <i>Aristida</i>	A	—	3.31±2.91	—	4.79±1.45
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科 Poaceae	狗尾草属 <i>Setaria</i>	A	—	4.99±0.56	8.56±8.04	11.62±10.46
锋芒草 <i>Tragus mongolorum</i>	禾本科 Poaceae	锋芒草属 <i>Tragus</i>	A	—	—	—	2.06±1.33
无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	禾本科 Poaceae	隐子草属 <i>Cleistogenes</i>	P	—	—	—	0.75±0.13
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	禾本科 Poaceae	赖草属 <i>Leymus</i>	P	—	—	—	2.25±1.89
白沙蒿 <i>Artemisia blepharolepis</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	A	44.44±9.62	—	3.49±2.07	6.15±5.06
猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	A	—	1.60±1.42	27.70±13.26	18.32±8.08
圆头蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	S	—	—	—	0.53±0.72
黑沙蒿 <i>A. ordosica</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	S	—	—	4.01±3.67	1.77±1.06
栉叶蒿 <i>Neopallasia pectinata</i>	菊科 Asteraceae	栉叶蒿属 <i>Neopallasia</i>	A	16.67±28.87	—	—	0.82±0.43
中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i>	菊科 Asteraceae	苦苣菜属 <i>Ixeris</i>	P	—	0.35±0.20	0.64±0.11	0.50±0.47
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelinii</i>	菊科 Asteraceae	蓝刺头属 <i>Echinops</i>	A	—	0.30±0.12	—	—
花花柴 <i>Karelinia caspia</i>	菊科 Asteraceae	花花柴属 <i>Karelinia</i>	P	—	—	—	0.62±0.11
蒙古虫实 <i>Corispermum mongolicum</i>	苋科 Amaranthaceae	虫实属 <i>Corispermum</i>	A	55.56±9.62	4.29±3.66	1.60±2.77	—
藜 <i>Chenopodium album</i>	苋科 Amaranthaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	A	—	67.56±9.75	5.74±5.16	23.38±10.34
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	苋科 Amaranthaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	A	—	1.50±2.60	—	—
刺沙蓬 <i>S. tragus</i>	苋科 Amaranthaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	A	—	6.14±2.24	8.13±2.20	2.16±2.02
雾冰藜 <i>Grubovia dasyphylla</i>	苋科 Amaranthaceae	雾冰藜属 <i>Grubovia</i>	A	—	—	5.26±5.02	1.12±1.05
华北白前 <i>Vincetoxicum mongolicum</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	白前属 <i>Vincetoxicum</i>	P	—	0.35±0.60	—	—
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	鹅绒藤属 <i>Cynanchum</i>	P	—	—	—	2.00±0.55
蒙古葱 <i>Allium mongolicum</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	葱属 <i>Allium</i>	P	—	2.14±2.13	4.23±2.47	0.91±0.88
细叶韭 <i>Allium tenuissimum</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	葱属 <i>Allium</i>	P	—	—	1.60±1.56	0.43±0.73
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	远志科 Polygalaceae	远志属 <i>Polygala</i>	P	—	1.09±1.88	—	—
地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i>	大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 <i>Euphorbia</i>	A	—	0.30±0.12	—	0.53±0.62
沙生大戟 <i>Euphorbia kozlovi</i>	大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 <i>Euphorbia</i>	P	—	—	—	0.94±0.62
沙木蓼 <i>Atraphaxis bracteata</i>	廖科 Polygonaceae	木蓼属 <i>Atraphaxi</i>	S	—	—	—	0.24±0.41

LF: 生活型 Life form; —: 未萌发出该物种 No germination of the species; 下同 The same below; A: 一年生草本植物 Annual herbaceous plants; P: 多年生草本植物 Perennial herbaceous plants; S: 灌木或半灌木 Shrubs or subshrubs; 数据为平均值±标准差 Data are presented as mean±standard deviation (SD).

固沙年限不同土层深度中,随着土壤深度的增加,4个固沙年限土壤种子库密度均呈递减趋势,表现为0~2 cm土层>2~5 cm土层>5~10 cm土层,固沙30 a样地与70 a样地3个土层土壤种子库密度之间均存在显著差异($P<0.05$),固沙10与50 a样地0~2 cm土层土壤种子库密度显著高于2~5 cm和5~10 cm土层($P<0.05$)。

土壤种子库平均密度随固沙年限的延长表现为递增趋势(图4),表现为固沙70 a样地(5719.72粒·

表 2 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库生活型占比

Table 2 Life-form proportions in soil seed banks of *C. korshinskii* sand-fixation forests with different sand-fixation durations (%)

生活型 Life form	固沙年限 Sand-fixation durations			
	10 a	30 a	50 a	70 a
一年生草本 Annual herb	100.00	94.65	90.45	86.91
多年生草本 Perennial herb	—	5.02	6.27	8.57
灌木 Shrub	—	—	3.28	1.97
藤本 Liane	—	0.33	—	2.55

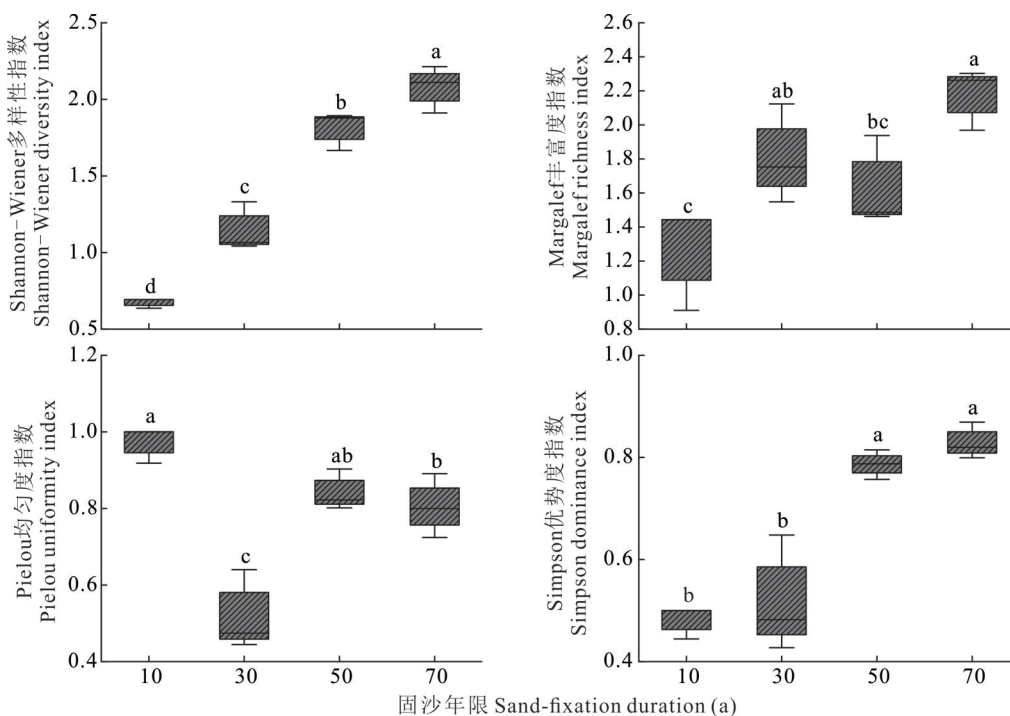


图1 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库的多样性特征

Fig. 1 Diversity attributes of soil seed banks in *C. korshinskii* sand-fixation forests with sand-fixation durations

不同小写字母表示不同固沙年限之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among the sand-fixation durations ($P < 0.05$), the same below.

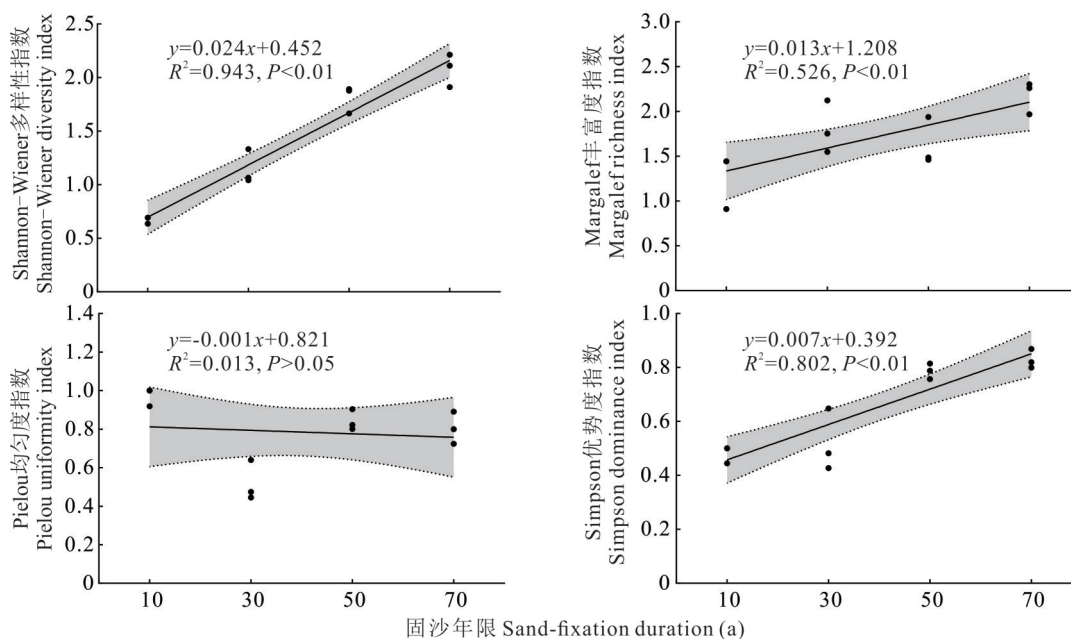


图2 土壤种子库多样性特征与固沙年限之间的回归分析

Fig. 2 Regression analysis between soil seed banks diversity and sand-fixation durations

m^{-2}) > 50 a样地 ($3403.53 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$) > 30 a样地 ($2795.40 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$) > 10 a样地 ($303.31 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$)。固沙 10 a样地土壤种子库平均密度显著低于其他 3 个固沙年限 ($P < 0.05$); 固沙 70 a样地土壤种子库平均密度显著高于其他 3 个固沙年限样地 ($P < 0.05$)。土壤种子库平均密度与固沙年限存在显著的正相关关系 ($R^2 = 0.930$, $P < 0.01$, 图 5)。

在 4 种固沙年限柠条固沙林下, 0~2 cm 土层中种子密度占比在 4 个样地中均为最大, 均超过 60% (图 6); 4 种固沙年限的柠条固沙林样地中超过 80% 的种子储量都分布在 0~2 cm 和 2~5 cm 土层。

2.4 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库与地上植被的相似性

不同固沙年限 (10、30、50、70 a) 土壤种子库与地上植被中共有的物种数量分别为 1、7、8 和 16 种 (表 3)。固沙 70 a 的样地相似性指数最高, 为 0.65; 其次为固沙 50 和 10 a, 相似性指数分别为 0.53 和 0.50; 固沙 30 a 的样地相似性指数最低, 为 0.48。除固沙 30 a 的样地相似性指数表现为中等不相似性外, 其他固沙年限的样地相似性指数均表现为中等相似性。整体来看, 土壤种子库与地上植被的相似性随固沙年限的延长而增加。

2.5 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库的影响因素

以不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库特征 (密度和物种多样性指标) 为响应变量, 以地上植被物种多样性指数 (R_A 、 D_A 、 E_A 和 H_A) 以及土壤理化性质 (SOM、pH、SAP、SAN、SBD 和 SWC) 作为解释变量, 进行冗余分析 (RDA)。

RDA 排序中前两轴累计解释度达到 87.99%, 表明这两轴能够有效反映地上植被物种多样性指数和土壤理化性质对土壤种子库特征的解释作用 (表 4)。土壤种子库密度及多样性相关指标 (多样性指数、丰富度指数和优势度指数) 均与植被丰富度和多样性指数呈正相关关系, 并与植被均匀度指数 ($F=4.0$, $P=0.016$) 呈显著正相关关系 (图 7); 同时与土壤速效氮、速效磷、有机质和土壤容重呈正相关关系, 其中与速效氮 ($F=13.7$, $P=0.002$) 呈显著正相关关系; 而与土壤 pH 和含水量呈负相关关系。综上, 植被均匀度指数是显著影响土壤种子库的主要植被因子, 土壤速效氮则是关键土壤因子。

3 讨论

3.1 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库的物种组成与多样性

土壤种子库多样性不仅是衡量植物群落稳定性潜力的关键指标, 同时也是预测群落演替进程的关键因素^[22]。随着固沙年限的增加, 地上植被类型的变化也影响着土壤种子库的物种组成^[6]。本研究中, 随着

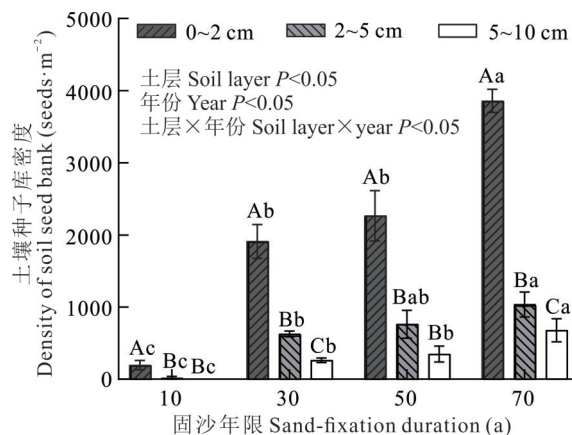


图 3 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库密度特征

Fig. 3 Characteristics of soil seed bank density in *C. korshinskii* sand-fixation forests with different sand-fixation durations

不同小写字母表示同一土层深度不同固沙年限种子库密度差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示同一固沙年限不同土层深度种子库密度差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in seed bank density among sand-fixation durations within the same soil depth, and different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in seed bank density among the different soil depths within the same sand-fixation duration.

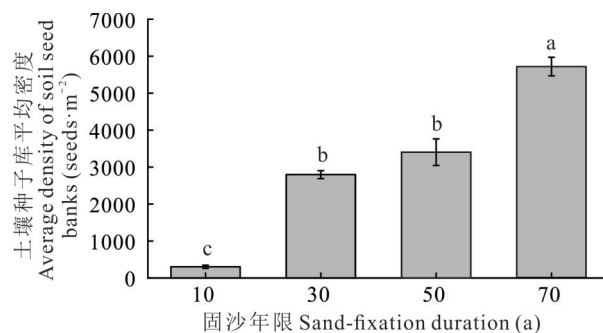


图 4 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库平均密度

Fig. 4 Mean density of soil seed banks in *C. korshinskii* sand-fixation forests with different sand-fixation durations

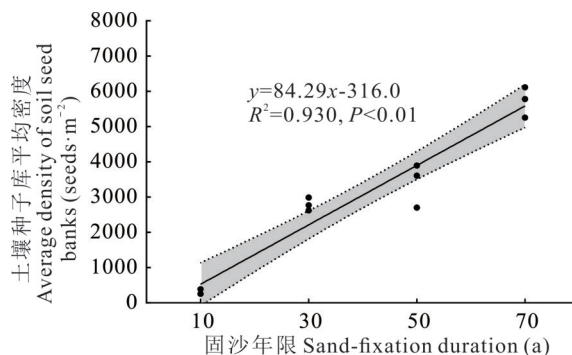


图 5 土壤种子库平均密度与固沙年限之间的回归分析

Fig. 5 Regression analysis between the average soil seed bank density and sand-fixation durations

固沙年限的延长,土壤种子库中逐渐出现多年生草本,如短花针茅、中华苦荬菜等,虽占比逐渐增大,但如画眉草、狗尾草、藜等一年生草本仍占较大比例,这与阿拉善沙漠区^[23]、河西走廊中央沙漠区^[24]等研究结果相似,这是因为一年生植物具有更独特的繁殖策略和更大的生态位宽度^[25]。此外,由于研究区降水量多集中在7至9月^[14],而一年生植物自身生命周期短,其在繁殖过程中能量多用于繁殖消耗且对环境的变化适应较快^[26],能有效利用降水期,这使得大多数一年生草本植物在这一时间迅速完成其生命周期并产生大量新种子。随着固沙年限的延长,种植柠条逐渐改善了研究区草本植物群落的生存环境,其水分^[27]、土壤^[28]、养分^[17]和群落结构^[12]变得更加稳定。生态环境的改善,使得对资源的利用效率更高,抗胁迫能力强的多年生草本逐渐入侵并占据优势,推动群落向更稳定、更复杂的阶段发展^[29]。这说明柠条种植对于毛乌素沙地生态环境的治理存在正向的促进作用,能够促进沙化土地的持续逆转与生态功能的逐步恢复。

物种多样性对生态环境的稳定与恢复有重要作用,也反映了生态系统的恢复潜力^[3]。在干旱荒漠区的人工植被区土壤种子库在植被多样性的保护与地上植被重建中,有着不可忽视的重要作用^[24]。本研究结果与 Wellstein 等^[29]的结果相似,均为土壤种子库 Shannon—Wiener 多样性指数与 Margalef 丰富度指数随着退化草地恢复年限的增加而增加,分析原因,则可能是在固沙初期(固沙 10 a)因其恶劣的生存环境,仅有少数耐旱的一年生植物能够存活,随着固沙年限的增加,先锋植物通过其生长改善了地表微环境如增加地上植被盖度,以及枯落物层的形成等,不仅有效降低了风蚀与水蚀对种子造成的无法留存与极端环境胁迫的影响,也为其他对环境要求苛刻的多年生草本的入侵和定居创造了条件,而随着固沙年限的增加(固沙 70 a),更多的地上植被物种成功定植并繁殖,植物群落结构由简单到复杂,土壤中种子的来源不断丰富和得到补充^[9]。此外,恢复过程中土壤有机质和养分的积累也可能为种子长期存留提供了更有利的条件^[30],这一结果也与王占军等^[31]对毛乌素沙地退化草原的研究结果相似;而 Pielou 均匀度指数随固沙年限增加呈波动性变化,整体上表现为递减趋势,固沙年限为 10 a 的样地显著高于固沙 30、70 a 的样地,占玉芳等^[24]对河西走廊沙漠人工植被区的研究表现出相似的结果。这种变化符合生态演替的基本规律,生态系统从初级恢复阶段植物的杂乱生长,逐渐转变为成熟阶段各种植物集中分布生长的过程^[32]。土壤种子库多样性的积累是生态系统恢复力增强的重要体现,为应对未来可能出现的环境变化提供了保障,也为地上植被群落持续演替和生态系统功能长期恢复提供了坚实的基础。

3.2 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库的密度与垂直分布特征

存在于土壤表面和土壤中的种子库,包括休眠和非休眠种子,在全世界几乎所有生态系统的种群动态和多样性维持中起着重要作用^[33]。土壤种子库密度不仅是判断地上植被恢复潜力的重要依据之一,同时也是种群更新

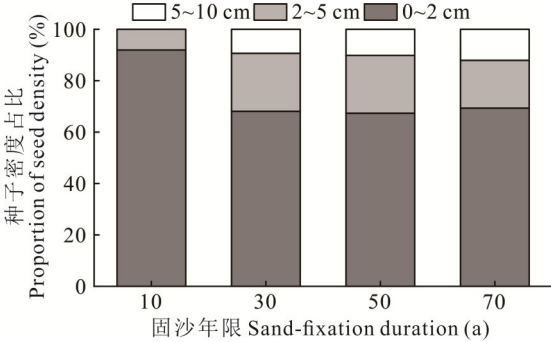


图6 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库不同土层的种子密度占比

Fig. 6 Proportion of seed density across different soil layers in soil seed banks of *C. korshinskii* sand-fixation forests with different sand-fixation durations

表3 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库与地上植被相似性
Table 3 Similarity between soil seed banks (SSB) and aboveground vegetation (AV) in *C. korshinskii* sand-binding forests with different sand-fixation durations

年限 Year (a)	物种数 Species			Sc
	地上植被 AV	土壤种子库 SSB	共有 Common	
10	1	3	1	0.50
30	14	15	7	0.48
50	18	12	8	0.53
70	26	23	16	0.65

注: Sorenson 相似性系数(Sc)在 0~0.24 表示极不相似; 0.25~0.49 表示中等不相似; 0.50~0.74 表示中等相似; 0.75~1.00 表示极相似。
Note: Sorenson similarity coefficient (Sc) in 0—0.24 indicates extremely dissimilar; 0.25—0.49 indicates moderate dissimilarity; 0.50—0.74 indicates moderate similarity; 0.75—1.00 indicates very similar.

表 4 冗余分析排序及蒙特卡洛置换检验

Table 4 Redundancy analysis (RDA) ordination and results of Monte Carlo permutation tests

项目 Item	环境因子 Environmental factors	解释量 Explains (%)	贡献率 Con- tribution (%)	F	P
地上植被 Aboveground vegetation	均匀度指数 Pielou index (E)	12.9	13.3	4.0	0.016*
	多样性指数 Shannon—Wiener index (H)	7.3	7.5	2.7	0.086
	丰富度指数 Margalef index (R)	2.6	2.7	1.2	0.356
	优势度指数 Simpson index (D)	2.5	2.6	1.2	0.382
土壤因子 Soil factors	土壤速效氮 Soil available nitrogen (SAN)	57.8	59.3	13.7	0.002**
	土壤酸碱度 Soil pH	4.5	4.6	1.8	0.188
	土壤速效磷 Soil available phosphorus (SAP)	4.0	4.1	1.8	0.172
	土壤容重 Soil bulk density (SBD)	1.9	2.0	0.9	0.492
	土壤含水量 Soil water content (SWC)	1.9	2.0	0.9	0.500
	土壤有机质 Soil organic matter (SOM)	2.0	2.0	0.8	0.558
特征参数 Characteristic parameter		轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	轴 3 Axis3	轴 4 Axis4
特征值 Eigenvalues		0.6337	0.2462	0.0558	0.0361
累计解释变异 Cumulative explained variation		63.37	87.99	93.56	97.17
多样性—环境因子相关系数 Correlation coefficient between diversity and environmental factor		0.9984	0.9576	0.9957	0.9860

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

的关键因素之一^[34]。本研究中,同一土层土壤种子库密度,随着固沙年限的增加呈递增趋势,其中固沙 70 a 样地种子库密度显著高于其他样地 ($P<0.05$),这一结果与刘静逸等^[9]的研究结果一致;固沙年限的延长促进了植物凋落物的积累,减少了土壤水分和养分的损失,提升了浅层土壤中的养分和有机质^[35],从而促进了地上植被的生长,使得地上植被的物种数量增加,也增强了其对土壤种子库的补给能力。在垂直方向上,土壤种子库密度随土层深度加深而逐渐降低,具体表现为 0~2 cm 土层>2~5 cm 土层>5~10 cm 土层,其中表层(0~2 cm)数量占比超过了 60%;这一分布特征与李国旗等^[8]对荒漠草原区 4 种植物土壤种子库的研究结果相似,土壤种子库的很大一部分种子,主要集中在接近地表的土层中,位于土壤表层(0~2 cm)和亚表层,其密度和可发芽种子的数量随着土壤深度的增加而下降^[24],而土壤深层(5~10 cm)中种子最少。分析原因,这可能是本研究区位于干旱荒漠区风沙活动频繁,种子易受风力搬运影响,表层土壤是风沙流的主要作用层,种子在风沙运动中易被捕获并沉积于地表或浅层裂缝中,生物结皮形成的微地形也会拦截小粒种子,使其难以进一步下沉,导致种子在浅层集中^[36];此外,绝大多数种子都

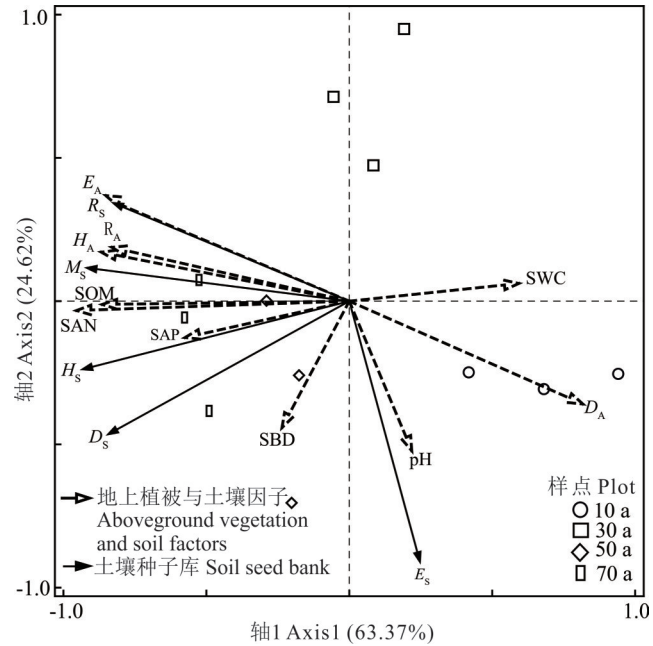


图 7 地上植被和土壤因子与土壤种子库的冗余分析
Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) of aboveground vegetation, soil factors, and soil seed bank metrics

空心箭头: 地上植被与土壤因子; 实线箭头: 土壤种子库指标; M_S : 土壤种子库密度; R_S : 土壤种子库丰富度指数; D_S : 土壤种子库优势度指数; E_S : 土壤种子库均匀度指数; H_S : 土壤种子库多样性指数; R_A : 地上植被丰富度指数; D_A : 地上植被优势度指数; E_A : 地上植被均匀度指数; H_A : 地上植被多样性指数。Hollow arrows: Aboveground vegetation characteristics and soil-related parameters; Solid arrows: Metrics associated with the soil seed bank; M_S : Soil seed bank density; R_S : Soil seed bank richness index; D_S : Soil seed bank dominance index; E_S : Soil seed bank evenness index; H_S : Soil seed bank diversity index; R_A : Aboveground vegetation richness index; D_A : Aboveground vegetation dominance index; E_A : Aboveground vegetation evenness index; H_A : Aboveground vegetation diversity index.

是通过“种子雨”的方式传播到地表,使得表层土壤的种子库密度最高,深层土壤种子库主要依靠蚂蚁或啮齿动物等的搬运,形成随着土壤深度增加,种子库密度不断减少的分布格局^[3],浅层土壤中的种子能在受到适宜的环境刺激时迅速萌发,这种垂直分布模式本身也是一种自然选择的结果。

3.3 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库与地上植被的相似性

土壤种子库研究中通常通过相似性系数来评估其维持现有植物群落的能力^[24]。土壤种子库作为自然植被再生的物质基础,与地上植被存在动态且密切的相互作用:一方面,土壤种子库中的种源主要来自地上植被;另一方面,土壤种子库中种子的萌发潜力在一定程度上决定了地上植被群落的结构和功能。但也有学者认为是由于环境因素和时空动态对种子库物种和地上植被生存状况的影响,这种关系在不同的植被类型和物种组成中也表现出不同的特征^[37]。本研究中,除固沙10 a样地土壤种子库与地上植被为中等不相似性外,其余固沙30、50和70 a样地均表现为中等相似性,且相似性随固沙年限延长而逐渐增加,共有物种数亦呈增长趋势。土壤种子库与地上植被的相似性从固沙初期表现为中等不相似性过渡到后期的中等相似性,这与于洁等^[38]在库布齐沙漠和赵丽娅等^[39]在科尔沁沙地研究中发现的相似性变化趋势一致,表明在地上植被恢复过程中,土壤种子库逐渐由“滞后于植被”向与地上植被群落协同演替转变,生态系统逐渐趋于稳定。本研究进一步分析表明,随着固沙年限的增加,地上植被物种群落种类和数量增加、群落结构趋于稳定,土壤养分状况改善,显著增强了种子的生存与萌发能力^[40]。因此,土壤种子库中活力种子数量增加,与地上植被的共有物种数上升,相似性显著增强。尤其在固沙50与70 a的样地中,其地上植被已形成相对稳定的生态系统,土壤种子库供给与地上植被更新建立了稳固的循环机制。

3.4 不同固沙年限柠条固沙林土壤种子库的影响因素

土壤环境因子为地上植被生长及土壤种子库的形成提供养分和生境条件,从而影响种子库的物种组成^[41]。已有研究表明,如土壤特性^[42]、海拔^[3]、人类活动^[25]等均是土壤种子库的制约因素。本研究表明,在植被因子中,地上植被均匀度指数对土壤种子库的影响最显著,高均匀度的群落通过促进多物种共存和增加种子雨种类,减少优势物种的资源垄断,使小种群物种也能生产种子并补充到土壤种子库中^[43];同时,地上植被较高的均匀度通过形成多层次冠层结构,能有效截留降水并削弱雨水带来的侵蚀,从而改善种子的存续环境^[43]。此外,地上植被丰富度指数和多样性指数均与土壤种子库密度、多样性指数呈正相关,这与鲁延芳等^[44]在河西走廊中部沙漠的研究结果相似,进一步验证了地上植被作为主要“种源库”对种子库的重要作用。土壤环境作为种子贮藏与萌发的主要场所,其理化性质亦显著影响着种子库特征。本研究中,土壤速效氮是显著影响土壤种子库的关键因素,这与杨竞艺等^[45]的研究结果一致,即氮作为限制部分地表植物生长的关键因素,其可以通过改变地上植物群落和土壤环境,间接地影响土壤种子库的密度及物种组成;而在固沙初期(10、30和50 a)样地土壤种子库中90%以上物种均为一年生草本植物,其在早期不稳定的生活环境中能够迅速定植并产生大量种子,而适量的土壤速效氮则能刺激种子萌发并为幼苗生长提供氮素营养,提高其存活概率,迅速建植。在土壤速效氮、土壤有机质与土壤速效磷协同作用的影响下,既提升了土壤肥力,又促使地上植被群落向着更稳定的阶段演替。RDA分析进一步揭示了土壤性质和地上植被的交互作用对土壤种子库的综合影响,深化了对毛乌素沙地土壤种子库随固沙年限演变规律的认识。

4 结论

本研究揭示了柠条固沙林林下草本土壤种子库的演替规律,可为毛乌素沙地植被恢复及固沙林可持续管理提供科学依据。固沙年限对土壤种子库特征具有显著影响,70 a固沙林土壤种子库的种子数量、物种丰富度及密度均达到最高水平。柠条固沙林通过改善土壤理化性质、抑制风蚀、减少土壤水分蒸发,促进了土壤种子库的正向演替;且生态修复效应随固沙年限的延长而增强。70 a固沙林土壤种子库展现出最高的自然更新潜力,为区域生态重建提供了关键种源保障。地上植被特征和土壤性质的综合影响共同塑造了不同年限柠条固沙林林下草本

土壤种子库特征,反映了植被恢复与土壤改良在促进种子库发育中的协同作用。基于上述结果,建议在柠条固沙林建设中增加乡土植物补播,并着力改善土壤理化性质,以进一步促进土壤种子库发育,提升柠条固沙林的恢复潜力与可持续性。

参考文献 References:

- [1] Tian M, Sun Z J, Li Y, *et al.* Response to increasing precipitation in *Artemisia* desert grassland of soil seed bank composition and species diversity of germinating plants. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12): 17–28.
田梦, 孙宗玖, 李莹, 等. 蒿类荒漠草地土壤种子库特征及其萌发植物多样性对降水增加的响应. *草业学报*, 2019, 28(12): 17–28.
- [2] Zhao P P, Li G Q, Shao W S, *et al.* Influence of herbivore exclusion on the soil seed bank and the aboveground vegetation characteristics of *Agropyron mongolicum* dominant desert steppe grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(1): 42–52.
赵盼盼, 李国旗, 邵文山, 等. 围封对荒漠草原区沙芦草群落土壤种子库及地上植被的影响. *草业学报*, 2018, 27(1): 42–52.
- [3] Shi W J, Ma Q, Yang J L, *et al.* Characteristics of soil seed banks and their influencing factors in *Ephedra rhytidosperma* communities at different altitudes on the eastern foothills of Helan Mountain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(5): 1361–1370.
石文杰, 马琴, 杨君珑, 等. 贺兰山东麓不同海拔斑子麻黄群落土壤种子库特征及其影响因子. *应用生态学报*, 2025, 36(5): 1361–1370.
- [4] Auffret A G, Ladouceur E, Haussmann N S, *et al.* A global database of soil seed bank richness, density, and abundance. *Ecology*, 2024, 105(11): e4438.
- [5] Oliveira V B, Jardim M A G, Barros M F, *et al.* The role of the soil seed bank in the recovery and restoration of a burned Amazonian terra firme forest. *Forests*, 2024, 15(9): 1513.
- [6] Qu W J, Wang L, Kang W Y, *et al.* Seed supply and regeneration potential of sand-fixing vegetation with different establishment years in the southeastern edge of the Tengger Desert. *Biodiversity Science*, 2025, 33(1): 5–17.
曲文杰, 王磊, 康文岩, 等. 腾格里沙漠东南缘不同年限固沙植被区种子雨和土壤种子库动态与植被更新潜力. *生物多样性*, 2025, 33(1): 5–17.
- [7] Wang Y C, Chu L, Daryanto S, *et al.* Sand dune stabilization changes the vegetation characteristics and soil seed bank and their correlations with environmental factors. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 500–507.
- [8] Li G Q, Shao W S, Zhao P P, *et al.* Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in a desert steppe region. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6282–6292.
李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征及其土壤理化性质. *生态学报*, 2019, 39(17): 6282–6292.
- [9] Liu J Y, Niu Y D, Guo K J, *et al.* Characteristics of soil seed bank and their correlations with soil factors in the early restoration period of *Populus deltoides* cutting slash in Lake South Dongting, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4042–4050.
刘静逸, 牛艳东, 郭克疾, 等. 南洞庭湖杨树清理迹地恢复初期土壤种子库特征及其与土壤因子的关系. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4042–4050.
- [10] Sun Y S, Chang X X, Zhang X, *et al.* Diversity of soil seed banks under different vegetation types in the southeastern margin of the Tengger Desert, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(9): 2356–2362.
孙瑜硕, 常选选, 张雪, 等. 腾格里沙漠东南缘不同植被类型土壤种子库多样性. *应用生态学报*, 2022, 33(9): 2356–2362.
- [11] Kúrová J. The impact of soil properties and forest stand age on the soil seed bank. *Folia Geobotanica*, 2016, 51(1): 27–37.
- [12] Yu S, Li X W, Wang R X, *et al.* Succession mechanism and dynamics in artificial *Caragana korshinskii* sand-fixing forests of different ages in Baijitan of Lingwu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 13–23.
于双, 李小伟, 王瑞霞, 等. 灵武白芨滩不同年限柠条固沙林林下草本群落演替规律及机制. *草业学报*, 2024, 33(3): 13–23.
- [13] Liu Y P, Ma C, Mo B R, *et al.* Relationship between herbaceous vegetation characteristics and soil characteristics under caragana plantation. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 468–473.

- 刘燕萍, 马驰, 莫保儒, 等. 柠条人工林下草本植被特征与土壤特性相关性研究. 草地学报, 2020, 28(2): 468—473.
- [14] Yu S, Li X W, Yang X X, *et al.* Characteristics of herbaceous plant diversity in the understory of *Caragana korshinskii* sand-fixing forest of Baijitan in Lingwu. Pratacultural Science, 2024, 41(9): 2084—2093.
于双, 李小伟, 杨学霞, 等. 灵武白芨滩柠条固沙林演替过程中林下草本植物多样性特征. 草业科学, 2024, 41(9): 2084—2093.
- [15] Ma L, Yang J, Yang J L, *et al.* Response of leaf anatomical structure strategy spectrum of *Caragana korshinskii* to the planting years in southwestern margin of Maowusu sandy land. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5): 1378—1385.
马龙, 杨钧, 杨君珑, 等. 毛乌素沙地西南缘柠条锦鸡儿叶解剖结构策略轴对年限的响应. 草地学报, 2023, 31(5): 1378—1385.
- [16] Kalamees R, Püssa K, Zobel K, *et al.* Restoration potential of the persistent soil seed bank in successional calcareous (alvar) grasslands in Estonia. Applied Vegetation Science, 2012, 15(2): 208—218.
- [17] Yang J, Wang R X, Wang J, *et al.* Microbial community characteristics and their influencing factors in *Caragana korshinskii* sand-fixing forests of different restoration years in the Mu Us Desert, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(7): 1807—1814.
杨钧, 王瑞霞, 王俊, 等. 毛乌素沙地不同恢复年限柠条固沙林微生物群落特征及其影响因素. 应用生态学报, 2024, 35(7): 1807—1814.
- [18] Ma M J, Dalling J W, Ma Z, *et al.* Soil environmental factors drive seed density across vegetation types on the Tibetan Plateau. Plant and Soil, 2017, 419(1): 349—361.
- [19] Bao S D. Soil agricultural chemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 10—29.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 10—29.
- [20] Li G Q, Shao W S, Zhao P P, *et al.* Effects of enclosure on the soil seed bank of two plant communities on the desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(6): 52—61.
李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响. 草业学报, 2018, 27(6): 52—61.
- [21] Hu F X, Ma D Z, Liu H L. Flora of Ningxia. Yinchuan: Ningxia people's Publishing House, 2007.
胡福秀, 马德滋, 刘惠兰. 宁夏植物志. 银川: 宁夏人民出版社, 2007.
- [22] Du Z Y, Wang J, An H, *et al.* Responses of soil seed banks to drought on a global scale. Science of the Total Environment, 2023, 864: 161142.
- [23] Zeng Y J, Wang Y R, Nan Z B, *et al.* Soil seed banks of different grassland types of Alashan arid desert region, Inner Mongolia. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1457—1463.
曾彦军, 王彦荣, 南志标, 等. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1457—1463.
- [24] Zhan Y F, Ma L, Teng Y F, *et al.* Analysis of soil seed bank characteristics of artificial revegetated desert area in Hexi Corridor. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 922—934.
占玉芳, 马力, 滕玉凤, 等. 河西走廊沙漠人工植被区土壤种子库特征. 生态学报, 2022, 42(3): 922—934.
- [25] Jia F Q, Tiyp T, Wu N, *et al.* Characteristics of soil seed banks at different geomorphic positions within the longitudinal sand dunes of the Gurbantunggut Desert, China. Journal of Arid Land, 2017, 9(3): 355—367.
- [26] Ortega M, Levassor C, Peco B. Seasonal dynamics of Mediterranean pasture seed banks along environmental gradients. Journal of Biogeography, 1997, 24(2): 177—195.
- [27] Yu L, Zhou Y R, Zhao Y N, *et al.* Responses of the soil seed bank to simulated rainfall levels and anthropogenically introduced shrub encroachment in the desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(4): 41—50.
于露, 周玉蓉, 赵亚楠, 等. 荒漠草原土壤种子库对灌丛引入和降水梯度的响应特征. 草业学报, 2020, 29(4): 41—50.
- [28] Wu K J, He L, Li H L, *et al.* Characteristics of soil seed banks in different degrees of desertified grass-lands in the alpine region of Northwest Sichuan. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1817—1825.
吴科君, 贺丽, 李红霖, 等. 川西北高寒区不同程度沙化草地土壤种子库特征. 草地学报, 2025, 33(6): 1817—1825.
- [29] Wellstein C, Tonin R, Peratoner G, *et al.* The role of the soil seed bank for the restoration potential of eroded alpine grassland. Restoration Ecology, 2024, 32(1): e14035.
- [30] Zhang M, Chen F Q, Wu Y, *et al.* Characteristics of the soil seed bank of planted and natural restored draw-down zones in the Three Gorges Reservoir Region. Ecological Engineering, 2017, 103: 127—133.
- [31] Wang Z J, Jiang Q, Pan Z B, *et al.* Changes of productivity and species diversity in resume succession on the degraded steppe of

- Maowusu sands in Ningxia. *Pratacultural Science*, 2005, 22(4): 5–8.
- 王占军, 蒋齐, 潘占兵, 等. 宁夏毛乌素沙地退化草原恢复演替过程中物种多样性与生产力的变化. *草业科学*, 2005, 22(4): 5–8.
- [32] Yang L, Wang Y R, Yu J D. Review of research on seed banks of desert regions. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(2): 227–234.
- 杨磊, 王彦荣, 余进德. 干旱荒漠区土壤种子库研究进展. *草业学报*, 2010, 19(2): 227–234.
- [33] Bakker J P, Bakker E S, Rosén E, *et al.* Soil seed bank composition along a gradient from dry alvar grassland to *Juniperus* shrubland. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7(2): 165–176.
- [34] Plue J, van Calster H, Auestad I, *et al.* Buffering effects of soil seed banks on plant community composition in response to land use and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(1): 128–139.
- [35] Bekker R M, Bakker J P, Grandin U, *et al.* Seed size, shape and vertical distribution in the soil: Indicators of seed longevity. *Functional Ecology*, 1998, 12(5): 834–842.
- [36] Chen M C, Zhang J G, Feng L, *et al.* The composition and vertical distribution characteristics of soil seed banks in soil coverage with biocrusts in the Shapotou Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7614–7623.
- 陈孟晨, 张景光, 冯丽, 等. 沙坡头地区生物结皮覆盖区土壤种子库组成及垂直分布特征. *生态学报*, 2017, 37(22): 7614–7623.
- [37] Hopfensperger K N. A review of similarity between seed bank and standing vegetation across ecosystems. *Oikos*, 2007, 116(9): 1438–1448.
- [38] Yu J, Gao L, Yan Z J, *et al.* Characteristics of soil seed bank of sand dune in different succession stages in the eastern Kubuqi Desert. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(4): 80–85.
- 于洁, 高丽, 闫志坚, 等. 库布齐沙漠东段不同演替阶段沙丘土壤种子库变化特征. *中国草地学报*, 2015, 37(4): 80–85.
- [39] Zhao L Y, Li Y Z, Chen H B, *et al.* Relationship between soil seed banks characteristics and aboveground colonization community along natural restoration gradients in Horqin sandy land. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(2): 199–208.
- 赵丽娅, 李元哲, 陈红兵, 等. 科尔沁沙地恢复过程中地上定植群落与土壤种子库特征及其关系研究. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 199–208.
- [40] Bekker R M, Verweij G L, Bakker J P, *et al.* Soil seed bank dynamics in hayfield succession. *Journal of Ecology*, 2000, 88(4): 594–607.
- [41] Shi C H, Li Q, Luo Q H, *et al.* Relationship between damaged soil seed bank and aboveground vegetation and soil properties in post-flooding forests in Nanping City, Fujian Province, China. *Mountain Research*, 2024, 42(5): 648–661.
- 石成华, 李奇, 罗清虎, 等. 福建南平市洪涝灾害致损森林土壤种子库与地上植被及土壤性质的关系. *山地学报*, 2024, 42(5): 648–661.
- [42] Luo C, Guo X P, Feng C D, *et al.* The characteristics of the soil seed bank in Wuhai and surrounding areas and the relationship with vegetation and soil factors. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 13–28.
- 罗超, 郭小平, 冯昶栋, 等. 乌海周边土壤种子库特征及其与地上植被和土壤因子的关系. *草业学报*, 2021, 30(11): 13–28.
- [43] Skuodienė R, Matyziūtė V, Šiaudinis G. Soil seed banks and their relation to soil properties in hilly landscapes. *Plants*, 2023, 13(1): 104.
- [44] Lu Y F, Ma L, Zhan Y F, *et al.* Characteristics of soil seed banks in an artificial desert vegetation in the Hexi Corridor. *Pratacultural Science*, 2019, 36(9): 2334–2341.
- 鲁延芳, 马力, 占玉芳, 等. 河西走廊中部沙漠人工植被中土壤种子库特征. *草业科学*, 2019, 36(9): 2334–2341.
- [45] Yang J Y, Zhao W Z, Luo W C, *et al.* Characteristics of soil seed bank in typical coal mine restoration areas at different altitudes in the Qilian Mountains Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1891–1900.
- 杨竞艺, 赵文智, 罗维成, 等. 祁连山自然保护区不同海拔典型煤矿修复区土壤种子库特征. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1891–1900.