

王乐,陆文家,南益聪,等.固沙年限对沙坡头荒漠土壤种子库及其与地上植被关系的影响[J].中国沙漠,2025,45(3): 253-261.

固沙年限对沙坡头荒漠土壤种子库及其与地上植被关系的影响

王乐^{1a},陆文家^{1a},南益聪^{2,3},牛富荣^{1b},鱼小军^{1a},白冰心⁴,石亚飞^{1a}

(1.甘肃农业大学 a.草业学院, b.林学院, 甘肃 兰州 730070; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.兰州市南北两山环境绿化工程指挥部, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 本研究旨在探究固沙年限对荒漠土壤种子库及其与地上植被关系的影响。以流沙、草方格(固沙5年)、固沙37年和固沙60年样地为研究对象,通过地上植被调查和土壤种子库萌发相结合的试验方法,重点围绕不同固沙年限土壤种子库和地上植被的特征及二者之间的关系进行研究。结果表明:(1)土壤种子库与地上植被主要由一年生草本植物构成,分别占71.43%、54.55%。随固沙年限增加,土壤种子库物种组成、密度均呈现先增加后下降的趋势,而地上植被变化规律与之不同;(2)土壤种子库的物种多样性指数随固沙年限增加呈先增加后降低趋势,而地上植被的多样性则随固沙年限增加呈持续上升趋势;(3)土壤种子库与地上植被组成之间的相似指数为0.28~0.07,随固沙年限增加呈逐渐降低趋势。总体来看,植被固沙初期能够促进土壤种子库积累和多样性增加,但长期固沙可能会导致种子库与地上植被的生态功能解耦,需结合人工干预以维持系统可持续恢复。

关键词: 植被固沙; 土壤种子库; 物种多样性; 物种相似性; 群落演替

文章编号: 1000-694X(2025)03-253-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00094

中图分类号: Q948

文献标志码: A

0 引言

荒漠化是全球面临的重大环境挑战^[1],受气候变化和人类活动的双重影响,荒漠化进程不断加剧,严重威胁着生态安全和区域可持续发展。人工固沙植被建设是荒漠化治理的主要方法和手段^[2]。中国陆续建立了一系列人工固沙植被,如包兰铁路沙坡头段植被固沙体系、“三北”防护林工程、新疆塔克拉玛干石油公路固沙体系等。这些防护体系的建立,改变了土壤理化性质、地表形态、风沙输移等立地微环境^[3],生物土壤结皮也将逐渐形成,进而将流动沙丘转变为固定和半固定沙丘。同时,人工固沙植被体系的建立也促进了荒漠植被系统的形成,提高了植被多样性,实现了沙区生态的恢复和重建。然而,随着年限增加,固沙植被逐渐发生自然演替,如部分固沙灌木衰退、一年生草本植物增

加等。因此,在植被演替与微环境变化的综合作用下,固沙植被繁殖更新过程可能产生变化。

土壤种子库是植被繁殖更新的关键环节,对维持荒漠人工固沙植被有重要作用。土壤种子库指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部有活力种子的总和^[4],不仅记录植物群落的过去和现状^[5],还与植被恢复、群落重建及生物多样性密切相关。在地表植被受到干扰破坏时,土壤中种子库能够保证植被的恢复和种群延续,这种作用对荒漠生态系统更加突出。然而,相较于荒漠地上植被,对固沙措施建立后的荒漠土壤种子库演变特征研究尚有不足。

固沙植被建立后,地上植被的演替通常先于土壤种子库^[6]。同时,居于土壤中的特征也使土壤种子库的变化不如地上植被直观,因此对其变化特征的系统研究较少。常选选^[7]对不同固沙年限人工柠

收稿日期:2025-02-25; 改回日期:2025-04-24

资助项目:国家自然科学基金项目(32301326);甘肃农业大学博士科研启动项目(GAU-KYQD-2022-13)

作者简介:王乐(2001—),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,研究方向为草地生态学。E-mail: 13644774811@163.com

通信作者:石亚飞(E-mail: shiyf@gsau.edu.cn)

条固沙林的研究表明,地上植被丰富度随固沙年限增加呈先增加后降低的变化趋势。罗维成等^[8]发现,科尔沁沙地樟子松人工固沙林演替过程中,随樟子松栽植年限增加,物种总数显著降低。此外,现有对荒漠土壤种子库的研究,多针对于某一阶段土壤种子库的组成及垂直分布等。针对阿拉善荒漠区的研究表明,土壤种子库的密度为56~326粒·m⁻²^[9]。藓类结皮覆盖区土壤种子库主要分布在0~5 cm土层,而地衣结皮和裸沙覆盖区主要在0~2 cm^[10]。

对此,本研究以沙坡头不同固沙年限(流沙、草方格固沙5年、固沙植被建立37年、固沙植被建立60年)的荒漠植被系统为研究对象,通过地上植被调查和土壤种子库萌发试验相结合的方法,旨在探究以下科学问题:①不同固沙年限下土壤种子库和地上植被的组成和结构如何变化?②土壤种子库与地上植被之间物种相似性随固沙年限如何变化?通过回答这些问题,本研究将揭示植被固沙过程中土壤种子库的动态变化规律,阐明其与地表植被的关系,为揭示荒漠植被演替机制、优化固沙措施以及荒漠生态系统的长期稳定性提供科学依据和实践指导。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况和样地概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘(37°32'N, 105°02'E),介于阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带^[11],为典型的干旱荒漠地区。该区海拔1330 m,年平均气温9.6℃,年降水量约180 mm,降水集中在5—9月^[10]。

为了确保包兰铁路在沙坡头流沙区的完全运行,建立了“以固为主、固阻结合”的植被固沙防护体系^[12]。首先,在流动沙丘上扎设麦草方格,待沙面稳定后栽植固沙灌木,此后固沙植被在无灌溉的条件下自行演替。为明确土壤种子库随固沙时间变化的特征,选择中国科学院沙坡头沙漠研究试验站周边流沙和3个固沙时期样地作为研究对象,分别为固沙初期(固沙5年)、固沙中期(固沙37年)和演替趋于稳定状态的固沙60年,以“空间代替时间”的方法开展土壤种子库和地上植被同步调查。固沙37年和固沙60年随着群落演替已经形成了稳定的生态系统,样地中没有草方格的存在,而在固沙5年样地中草方格是明显存在的。目前,该人工固沙

植被区地上植被主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等灌木以及小画眉草(*Eragrostis poaeoides*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)等草本^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤种子库取样方法

于2024年3月下旬植被自然越冬但生长季开始之前,对流沙样地、草方格样地、固沙37年样地以及固沙60年样地进行土壤种子库样品采集。为保护样地,固沙37年和固沙60年土壤种子库样品于保护区围栏外同一年限区域进行替代取样。用直径为4 cm的土钻沿4 m×4 m样方对角线进行采集,每10钻为一个混合样品,深度为0~4 cm。每个样地设置20个重复。4个样地共计获得80个土样,采样后样品即送至沙坡头站温室进行萌发试验。

1.2.2 萌发试验

由于部分荒漠植物种子较小,难以采用物理筛选法直接鉴别。本研究通过萌发法对物种组成进行了鉴定。选择内径为28.5 cm的托盘作为载体,底部铺设提前烘干处理的厚度1~2 cm流沙(120℃烘箱处理24 h),种子库样品均匀铺设在托盘流沙之上。同时,设置6个流沙对照以排除可能由于风力传播的种子。定期浇水并观察土壤种子库的出苗情况,详细记录新出幼苗的种类和数量,并将已确定的幼苗拔除。定期轻轻翻动托盘内的土壤以促进下层种子萌发,萌发进行到约120天时,喷洒浓度为500 mg·L⁻¹的赤霉素溶液促使可能休眠的种子萌发^[13]。连续4周没有幼苗萌发后停止试验。

1.2.3 地上植被调查

于2024年8月中旬植被生长旺盛期,对研究区域植被群落进行详细调查。灌木调查方法为设置20个4 m×4 m的样方,对样方内所有灌木个体进行全株调查。同时,在每个灌木样方中沿对角线方向均匀布设6个20 cm×20 cm的草本样方。调查内容包括灌木和草本植物的物种组成、多度等群落学特征指标以及各物种的生长状况等。

1.3 数据统计与分析

1.3.1 生物多样性指数

采用Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多

样性指数、Marglef丰富度指数和Pielou均匀度指数来衡量土壤种子库和地上植被的物种多样性。

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

Margalef 丰富度指数:

$$R = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数:

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

Simpson 优势度指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i^2) \quad (4)$$

式中: N 为土壤种子库和地上植被所有物种的个体总数; P_i 为第 i 种植物的个数占总个数的比例; S 表示物种总数。

1.3.2 土壤种子库与地上植被的相似性

采用 Sorensen 相似性系数来计算不同固沙年限土壤种子库间、地上植被间以及相同固沙年限二者之间的物种相似性。

$$SC = \frac{2w}{a+b} \quad (5)$$

式中: SC 为相似性系数; w 为共有的物种数; a 和 b 分别为两个不同群落的物种数。分别比较 5 年、37 年和 60 年样地与周边流沙样地的物种组成。

基于土壤种子库重要值 (IVSS) 和地上植被重要值 (IV) 来评估不同固沙年限土壤种子库间、地上植被间以及相同固沙年限二者之间的物种相似性^[14]。这一过程同样会采用 Sorensen 指数来进行计算, 以确保结果的准确性和可靠性。

采用盖度、高度、频度计算地上植被重要值 (IV)。

$$IV = \frac{RC + RH + RF}{3} \quad (6)$$

式中: IV 为地上植被重要值; RC 为相对盖度; RH 为相对高度; RF 为相对频度。

因无法测量土壤种子库的生物量, 所以采用密度、频度计算土壤种子库重要值 (Soil Seed Bank Importance Value, IVSS)

$$IVSS = \frac{RD + RF}{2} \quad (7)$$

式中: $IVSS$ 为土壤种子库重要值; RD 为相对密度; RF 为相对频度。

$$a' = \sum_{i_a=a}^{n_a} P_{ia} \quad (8)$$

$$b' = \sum_{i_b=b}^{n_b} P_{ib} \quad (9)$$

$$c' = \sum_{i_{ab}=1}^{n_{ab}} P_{iab} \times \sum_{i_{ba}=1}^{n_{ba}} P_{iba} \quad (10)$$

$$S' = \frac{2c'}{a' + b'} \quad (11)$$

式中: a' 和 b' 分别为土壤种子库和地上植被中不同群落植物物种的 IVSS 或 IV 的总和。对于样本 a 和 b 中的第 i 个植物物种, P_{ia} 和 P_{ib} 分别表示其 IVSS% 或 IV 值。此外, c' 表示两个样本中共同出现的物种的 IVSS% 或 IV 值的乘积。 P_{iab} 和 P_{iba} 则分别代表在两个样本中都出现的第 i 个植物物种的 IVSS% 或 IV 值。因土壤种子库中无灌木种子出现, 所以计算相似性时地上植被仅考虑草本层群落。

利用萌发试验统计到的土壤中种子数量和植物物种数来评价土壤种子库的组成和大小。通过统计萌发的种子总数和植物种类, 结合取样面积, 将土壤种子库密度标准化为每平方米种子数量表示。地上植被的计算方法与之类似。数据分析采用 SPSS 27.0 统计软件, 运用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 中的 Tukey HSD 多重比较法, 检验不同固沙年限处理下地上植被和土壤种子库的差异性。采用 Origin2024 进行绘图。

2 结果

2.1 土壤种子库与地上植被的物种组成和密度

4 种固沙年限样地中, 土壤种子库共记录到 7 种植物, 地上植被共调查到 11 种植物 (表 1)。其中, 流沙样地土壤种子库中未鉴别出物种, 地上植被仅有沙蓬 1 种; 固沙 5 年样地土壤种子库有 6 种, 地上植被有 8 种; 固沙 37 年样地土壤种子库有 4 种, 地上植被有 10 种; 固沙 60 年样地土壤种子库也只有 4 种, 地上植被有 6 种。总的来说, 各样地土壤种子库物种总数均少于地上植被。固沙措施的增加显著提高了土壤种子库和地上植被的密度。由表 1 可知, 随着固沙年限的增加, 土壤种子库和地上植被密度均呈现先增加后降低趋势, 在固沙 37 年达到最高值, 分别为 1 270.83 粒·m⁻² 和 14 331.21 粒·m⁻²。

从生活型来看, 土壤种子库主要由一年生和多年生草本植物组成, 而地上植被则由一年生和灌木植物组成 (图 1)。在流沙、固沙 5 年、固沙 37 年和固沙 60 年样地中, 一年生植物在地上植被的组成占比

表 1 土壤种子库与地上植被物种组成及密度(粒(株)·m⁻²)

Table 1 The composition and density of species within the soil seed bank and the aboveground vegetation

科	物种	生活型	流沙		固沙 5 年		固沙 37 年		固沙 60 年	
			地上	地下	地上	地下	地上	地下	地上	地下
藜科	刺沙蓬(<i>Salsola ruthenica</i>)	AH	—	—	112.50	796.16	316.67	2 488.00	162.50	398.08
	虫实(<i>Corispermum hyssopifolium</i>)	AH	—	—	300.00	99.52	4.17	99.52	—	—
	雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)	AH	—	—	500.00	895.68	4.17	199.04	4.17	199.04
菊科	叉枝鸦葱(<i>Lipschitzia divaricata</i>)	PH	—	—	—	99.52	—	—	—	—
	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)	S	—	—	—	—	675.00	—	387.50	—
	砂蓝刺头(<i>Echinops gmelinii</i>)	AH	—	—	4.17	—	33.33	—	8.33	—
蓼科	沙木蓼(<i>Atraphaxis bracteata</i>)	S	—	—	4.17	—	12.50	—	—	—
	沙拐枣(<i>Calligonum mongolicum</i>)	S	—	—	—	—	125.00	—	—	—
禾本科	狗尾草(<i>Corispermum hyssopifolium</i>)	AH	—	—	4.17	99.52	8.33	2 886.08	16.67	1 691.84
	针茅(<i>Stipa capillata</i>)	PH	—	—	—	99.52	—	8 658.24	—	4 677.44
豆科	柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)	S	—	—	—	—	—	—	83.33	—
	花棒(<i>Corethroedron scoparium</i>)	S	—	—	8.33	—	29.17	—	—	—
苋科	沙米(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	AH	12.5	—	8.33	199.04	—	—	—	—
唇形科	蒙古莸(<i>Caryopteris mongholica</i>)	S	—	—	—	—	62.50	—	—	—
总计			12.50	—	941.67	2 289.01	1 270.83	14 331.21	725.00	6 966.56

注:S为灌木;AH为一年生草本;PH为多年生草本。

分别为 100%、75.0%、50.0%、66.7%,在土壤种子库中的占比分别为 0、71.4%、80.0%、75.0%。4 个样地中,多年生草本在土壤种子库中的组成占比为 0、28.6%、20.0%、25.0%,灌木在地上植被中的组成占

比为 0、25.0%、50.0%、33.3%。土壤种子库以一年生草本植物为主,而地上植被中灌木和多年生草本的比例随固沙年限增加而上升,表明土壤种子库的演替滞后于地上植被的变化。

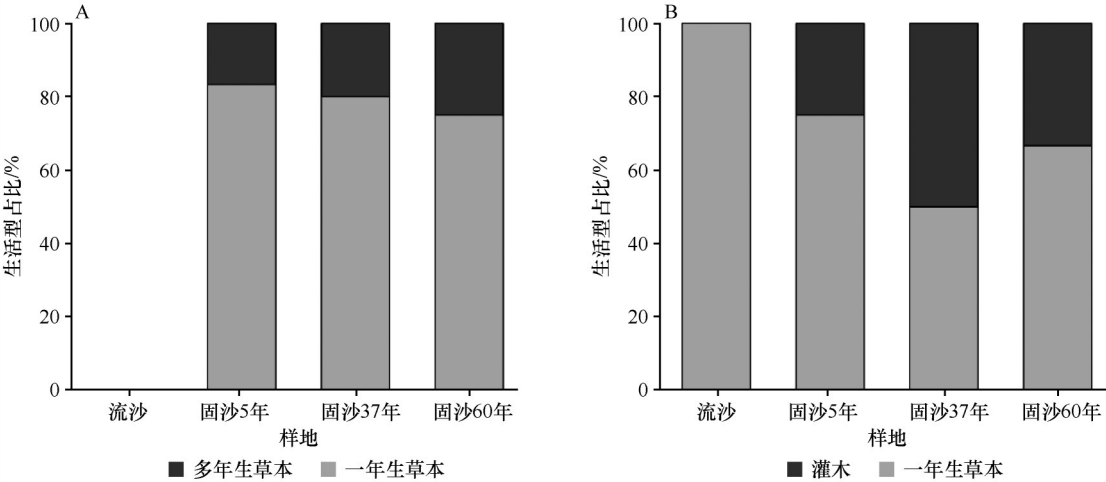


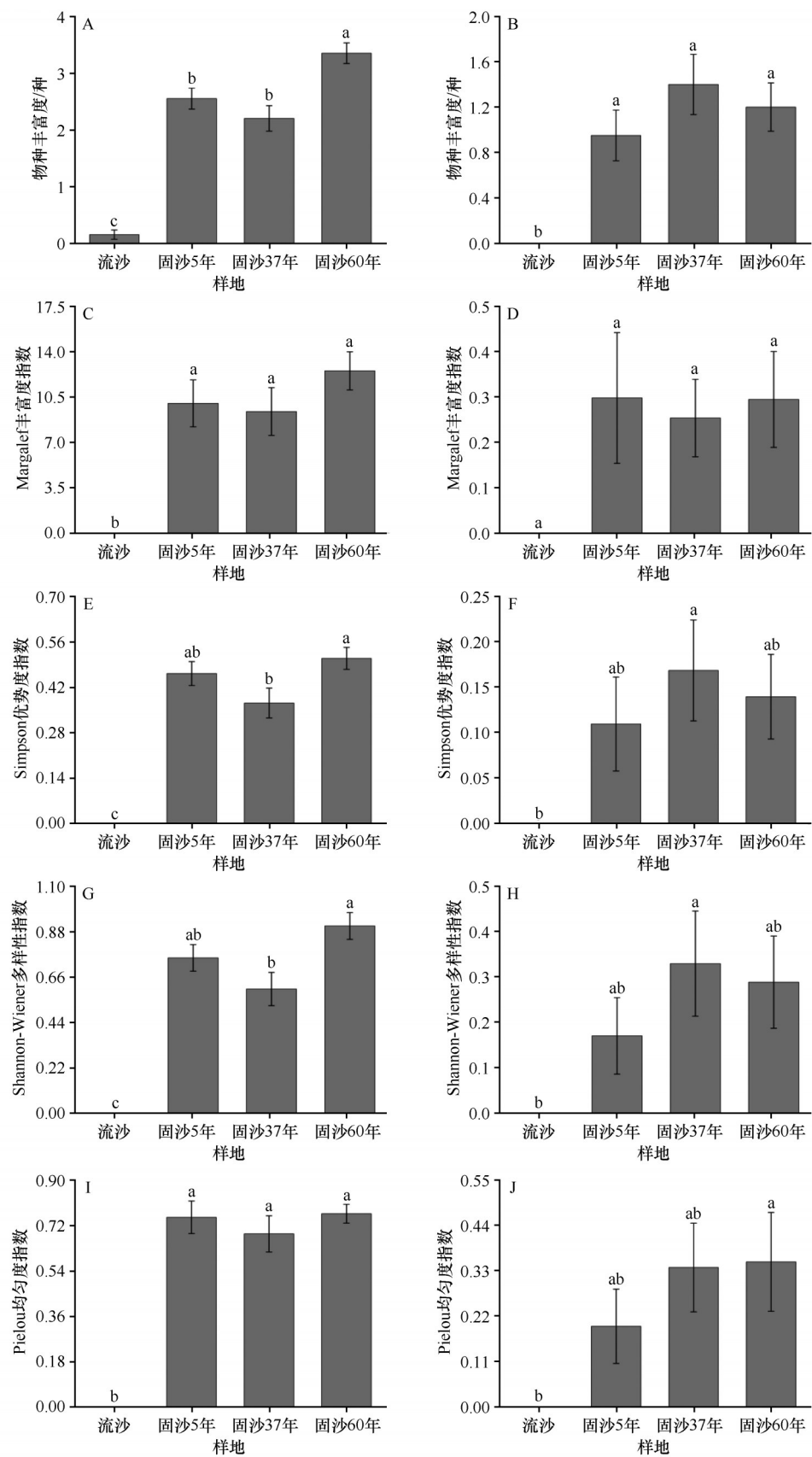
图 1 土壤种子库(A)与地上植被(B)生活型占比

Fig.1 Proportion of life forms in soil seed bank (A) and aboveground vegetation (B)

2.2 土壤种子库与地上植被的物种多样性

土壤种子库和地上植被在不同演替阶段(流沙、固沙 5 年、固沙 37 年、固沙 60 年)的多样性变化

(图 2)。对于地上植被,随固沙年限的增加,物种丰富度和多样性指数普遍上升,特别是在 60 年时达到了最高值。各固沙年限样地土壤种子库的 Margalef



注：图中A、C、E、G、I为地上植被多样性指数，B、D、F、H、J为土壤种子库多样性指数

图2 土壤种子库与地上植被多样性随固沙年限变化特征

Fig.2 Characteristics of soil seed bank and aboveground vegetation diversity with the duration of sand fixation

丰富度指数均高于流沙,但各固沙年限间并未呈现明显的差异。土壤种子库其他多样性指数随固沙年限均呈现先增加后降低趋势。

2.3 土壤种子库和地上植被的关系

2.3.1 不同固沙年限土壤种子库间的相似性

不同固沙年限土壤种子库间和地上植被间的

相似性均较低(表 2)。对于不同固沙年限,固沙 37 年和固沙 60 年土壤种子库之间相似性指数最高,为 0.26 和 0.14。流沙与其他固沙年限的相似性均为 0。固沙 5 年与固沙 37 年、固沙 60 年土壤种子库间相似性均为 0.06 和 0.01。地上植被之间相似性最高的为固沙 37 年和固沙 60 年,相似性指数为 0.58 和 0.31。

表 2 不同固沙年限土壤种子库间和地上植被间的相似性指数
Table 2 Similarities between soil seed banks and aboveground vegetation across different durations of sand fixation

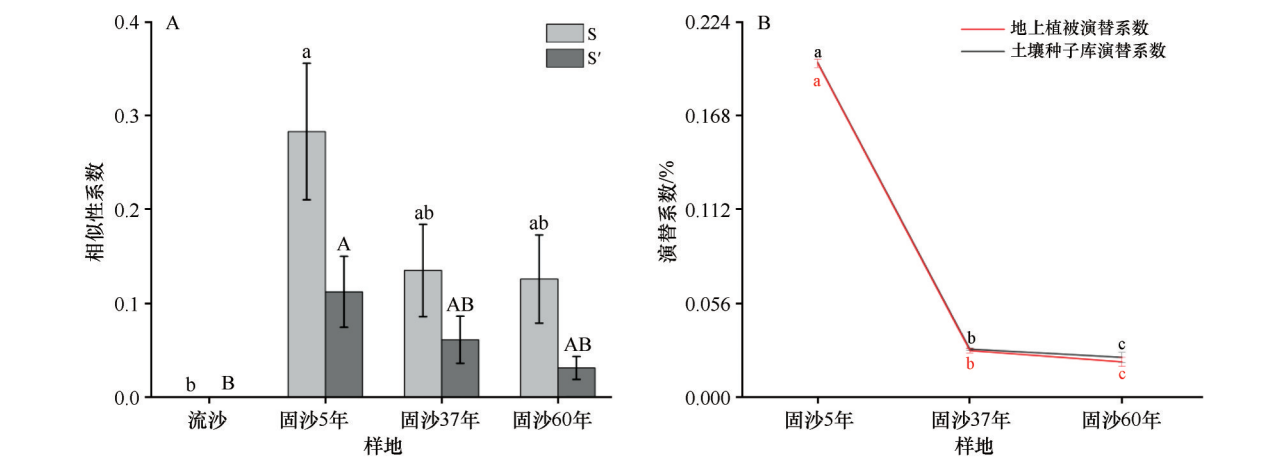
类型	地上植被间				P	土壤种子库间				P
	流沙/固沙 5 年	固沙 5 年/ 固沙 37 年	固沙 5 年/ 固沙 60 年	固沙 37 年/ 固沙 60 年		流沙/固沙 5 年	固沙 5 年/ 固沙 37 年	固沙 5 年/ 固沙 60 年	固沙 37 年/ 固沙 60 年	
S	0.02	0.21	0.13	0.58	<0.001	0	0.06	0.06	0.26	<0.001
S'	0.003	0.07	0.05	0.31	<0.001	0	0.01	0.01	0.14	<0.001

注:S 为群落间物种组成相似性,S'为群落间基于物种数和种类组成的相似性。因相似性指数为 0,所以去除流沙-固沙 37 年、流沙-固沙 60 年的相似性。

2.3.2 不同固沙年限土壤种子库与地上植被之间的相似性及群落演替特征

不论是通过物种组成来计算还是以重要值为基础计算,固沙样地土壤种子库与地上植被之间相似性随固沙年限增加均呈现逐渐降低趋势(图 3)。

流沙的相似性系数为 0,固沙 5 年的相似性较高为 0.28 和 0.26,而固沙 37 年和固沙 60 年的相似性逐渐降低,分别为 0.14、0.15 和 0.13、0.07。这表明,在不同固沙年限样地中,土壤种子库与地上植被各自的演替阶段并非完全一致。



注:不同大写字母表示不同固沙年限土壤种子库与地上植被之间 Sorensen 相似性差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示不同固沙年限土壤种子库与地上植被之间 Sorensen'相似性差异显著($P<0.05$)

图 3 不同固沙年限土壤种子库与地上植被间相似性(A)和群落演替系数变化趋势(B)
Fig.3 Trends in the similarity between the soil seed bank and aboveground vegetation (A) and changes in the community succession coefficient (B) across different sand-fixation years

土壤种子库和地上植被的演替系数均呈现下降趋势,且两者变化趋势相似(图 3)。各固沙年限之间的演替系数存在显著差异,且随固沙时间增加群落演替速率逐渐降低,最终趋于零。这表明各群落演替随着时间的推移逐渐趋于稳定。

3 讨论
3.1 不同固沙年限土壤种子库与地上植被的组成和密度
土壤种子库对干旱荒漠区植物多样性保护和

植被系统维持起着关键作用^[15]。通过对沙坡头人工固沙植被区土壤种子库和地上植被的研究,发现土壤种子库中共调查到7个物种,地上植被统计到11种,表明地上植被的物种数高于土壤种子库。同时,随着固沙年限的增加,土壤种子库和地上植被密度均呈现先增加后降低趋势。此外,一年生植物在土壤种子库中占据更大的优势,这与赵文智等^[16]对科尔沁沙地土壤种子库、刘晓霞^[17]对浑善达克沙地土壤种子库的研究结果类似。导致这一结果的原因可能包括地上植被的繁殖策略差异^[18]、土壤生物结皮的形成以及土壤种子库的萌发特征等。首先,不同荒漠植物在繁殖策略上存在差异。例如,油蒿等荒漠灌木可以通过沙埋等方式进行无性繁殖^[19],这保证了其种群数量的维持。尽管油蒿也可以产生大量种子,但其散布时间与草本植物不同,往往是在生长季后期开始。同时,其种子还会在冠层长期停留,形成植冠种子库^[20]。在本研究开始的前一年,沙坡头地区植物生长季出现极端干旱,油蒿等灌木大量死亡,这也可能是导致本研究未发现油蒿种子库的另一原因,但这需要进一步开展时间动态研究揭示其原因。与之相对,荒漠草本植物被认为是繁殖的“机会主义者”^[21],其在水热合适的条件下即可通过种子萌发形成当年生种群,完成种群更新。因此,繁殖策略的差异可能是导致土壤种子库物种较少且一年生植物更多的主要原因。其次,固沙植被建立后,土壤微环境产生变化、生物土壤结皮形成。在沙坡头37年和60年固沙植被区,形成了以苔藓为主、藻类伴生的土壤结皮,结皮整体厚度高于以地衣和藻类结皮为主的固沙5年样地^[22]。苔藓结皮可能在较大程度上阻碍了种子雨到种子库的输入过程,但揭示其具体过程还需要开展针对性研究。第三,尽管本研究采用的种子库萌发鉴定法是当前种子库研究的主要方法,在萌发试验时也满足了荒漠种子萌发的基础水热条件,但土壤种子库的萌发机制较为复杂,可能存在长期留存的“持久种子库”而无法被鉴定。因此,未来需针对土壤种子库的年际动态开展跟踪观测,还需要结合种子雨和幼苗萌发特征进一步探究荒漠土壤种子库类型和时空动态。

3.2 不同固沙年限土壤种子库与地上植被多样性差异

物种多样性和组成特征是反映人工固沙体系

稳定性的重要指标^[23]。本研究表明,随固沙年限增加地上植被丰富度和多样性整体呈现逐渐增加趋势,而土壤种子库变化趋势与之不完全相同。这与马全林等^[24]对腾格里沙漠花棒人工固沙林,也与赫磊^[25]对退化沙地恢复过程中地上植被与土壤种子库特征的研究结果类似。产生这一现象的原因可能包括土壤种子库演替滞后效应和环境筛选作用等。首先,土壤种子库是植被恢复的潜在资源,但其动态变化通常滞后于地上植被的变化^[6]。在固沙体系建立初期,土壤种子库可能包含过去植被群落的种子,在当前环境下这些种子无法萌发或者生存,使得土壤种子库组成与当前地上植被不匹配,导致演替阶段的滞后性。同时,种子传播主要依赖于重力、风、水、动物等,在地上植被发生变化时,新种子的传播可能无法及时覆盖整个区域。此外,地形、干扰等因素可能阻碍种子传播,导致土壤种子库的演替整体滞后于地上植被。其次,环境筛选可能在植被恢复和土壤种子库动态变化中起关键调节作用。土壤种子库中的种子可能来自不同时期的植被,其萌发和存活受到环境条件的严格筛选^[26]。例如,某些种子可能处于休眠状态,只有在特定条件下才能萌发,而另一些种子可能因环境不适而逐渐失去活性^[27]。然而,相较于种子库,地上植被恢复更容易直接受到土壤水分、养分、温度等环境条件变换的影响。随着固沙年限增加和环境条件的改变,植被通常能够更快速的适应^[28],进而导致了其与种子库多样性特征的不同步变化。

3.3 土壤种子库与地上植被的相似性关系变化及群落演替特征

土壤种子库与地上植被物种组成的相似性是判断群落未来演替方向的重要依据^[29]。本研究表明,土壤种子库与地上植被之间的相似性较低,这与孙瑜硕等^[30]对不同荒漠植被类型土壤种子库的研究结果类似。这表明荒漠土壤种子库与地上植被在物种组成上存在较大差异。本研究还表明,各阶段土壤种子库和地上植被相似性最高的均为固沙37年与固沙60年样地。产生这一结果的主要原因可能随着固沙时间增加,适应环境的物种占据主导,早期演替物种减少,导致两个阶段的物种组成更为相似^[6]。此外,本研究还表明,随固沙年限的增加土壤种子库与地上植被的相似性逐渐降低,群落演替系数逐渐趋于稳定,生态系统从早期的快速演

替逐渐过渡到稳定状态。灌木植物在土壤种子库中缺失而多年生草本植物则占比更多,可能是导致这一现象的直接原因。同时,一年生草本植物也在土壤种子库中占据更大的优势。这与前人研究类似,即预测未来沙坡头人工固沙植被中的灌木将逐渐衰退,进而形成以草本植物为优势的荒漠草地^[31]。相关结果与本研究中发现的土壤种子库的演替规律更为一致,地上植被和土壤种子库在固沙生态恢复中的协同作用,为生态系统的长期稳定性和恢复力提供了重要依据。另外,土壤环境尤其是生物土壤结皮的形成也在一定程度上影响地上植被与土壤种子库间的相似性。生物土壤结皮形成的致密表层可能阻碍种子进入土层形成土壤种子库,进而影响土壤种子库的输出^[32]。同时,土壤生物结皮也改变了土壤表面的温度、湿度和光照条件^[33],可能更适合某些特定物种种子萌发,从而导致地上植被与土壤种子库的物种组成出现差异。

4 结论

随着固沙年限的增加,土壤种子库物种组成和密度呈现先增加后下降的趋势,而在地上植被中这种趋势不明显,土壤种子库和地上植被主要由一年生草本植物构成;土壤种子库的物种多样性指数随固沙年限增加呈先增加后降低趋势,而地上植被的多样性则随固沙年限增加呈持续上升趋势;不同固沙年限样地土壤种子库与地上植被之间的相似性随固沙年限增加逐渐降低,表明荒漠土壤种子库和地上植被的演替并不完全同步。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,2017,37(22):7614-7623.
- [2] 李新荣,赵洋,回嵘,等.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J].地理科学进展,2014,33(11):1435-1443.
- [3] 程莉,宁志英,杨红玲,等.固沙措施对流动沙丘植被和土壤特性的影响[J].中国沙漠,2024,44(2):273-282.
- [4] Renée M B, Geurt L V, Jan P B, et al. Soil seed bank dynamics in hayfield succession[J]. Journal of Ecology, 2000, 88(4): 594-607.
- [5] Coffin D P, Lauenroth W K. Spatial and temporal variation in the seed bank of a semiarid grassland[J]. American Journal of Botany, 1989, 76(1): 53-58.
- [6] 赵凌平,程积民,苏纪帅.土壤种子库在黄土高原本氏针茅草地群落长期封禁演替过程中的作用[J].草业学报,2012,21(3):38-44.
- [7] 常选选.腾格里沙漠东南缘不同固沙年限人工柠条林土壤种子库动态研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- [8] 罗维成,赵文智,孙程鹏,等.科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J].中国沙漠,2018,38(1):126-132.
- [9] 曾彦军,莫训强,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[J].应用生态学报,2003,14(19):1457-1463.
- [10] 赵燕翘,连煜超,许文文,等.中国人工蓝藻结皮研究进展[J].中国沙漠,2023,43(5):214-222.
- [11] 李新荣,石庆辉,张景光,等.沙坡头地区人工植被演变过程中植物多样性变化的研究[J].中国沙漠,1998,18(增刊):23-29.
- [12] 赵兴梁.腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究[M].银川:宁夏人民出版社,1988:101-120.
- [13] 秦佳梅,张卫东,赵书巍.返魂草种子休眠机理及处理技术研究[J].种子,2006(2):4-5.
- [14] Liu J Y, Yu Y W, Mou X M, et al. Endozoochorous seed dispersal by yak and Tibetan sheep on alpine meadow and shrubland[J]. Rangeland Ecology & Management, 2023, 87: 198-205.
- [15] 杨磊,王彦荣,余进德.干旱荒漠区土壤种子库研究进展[J].草业学报,2010,19(2):227-234.
- [16] 赵文智,白四明.科尔沁沙地围封草地种子库特征[J].中国沙漠,2001,21(2):204-208.
- [17] 刘晓霞.浑善达克沙地土壤种子库结构与动态特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学.
- [18] 尚占环,任国华,龙瑞军.土壤种子库研究综述:规模、格局及影响因素[J].草业学报,2009,18(1):144-154.
- [19] 贺宇,丁国栋,汪晓峰,等.水分和沙埋对4种沙生植物种子萌发和出苗的影响[J].中国沙漠,2013,33(6):1711-1716.
- [20] 马君玲,刘志民.植冠种子库及其生态意义研究[J].生态学报,2005,24(11):1329-1333.
- [21] 苏金娟,刘永萍,刘丽燕,等.阿勒泰荒漠区草本植物生态位与种间关联[J].草业科学,2024,41(10):2217-2228.
- [22] 张志山,何明珠,谭会娟,等.沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性:以沙坡头沙漠研究试验站为例[J].土壤学报,2007(3):404-410.
- [23] Mamo N, Mihretu M, Fekadu M, et al. Variation in seed and germination characteristics among *Juniperus procera* populations in Ethiopia[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 225(1/2/3):320-327.
- [24] 马全林,张锦春,陈芳,等.腾格里沙漠南缘花棒(*Hedysarum scoparium*)人工固沙林演替规律与机制[J].中国沙漠,2020,40(4):206-215.
- [25] 赫磊.退化沙地恢复过程中地上植被与土壤种子库的特征及关系研究[J].畜牧业环境,2020(2):18.
- [26] 张景光,王新平,李新荣,等.荒漠植物生活史对策研究进展与展望[J].中国沙漠,2005,25(3):306-314.
- [27] Guttermann Y. Seed germination in desert plants[J]. Journal of Plant Physiology, 1995, 146(5/6):767-768.
- [28] 郭铁瑞,赵哈林,左小安,等.科尔沁沙地生物结皮的土壤种

- 子库特征[J].水土保持学报,2007(6):187-191.
- [29] 邵文山.荒漠草原区4种植物群落土壤特性和种子库的研究[D].银川:宁夏大学,2017:36
- [30] 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[J].应用生态学报,2022,33(9):2356-2362.
- [31] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站60年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.
- [32] 张元明,聂华丽.生物土壤结皮对准噶尔盆地5种荒漠植物幼苗生长与元素吸收的影响[J].植物生态学报,2011,35(4):380-388.
- [33] 王宁,刘俊娥,周正朝.生物土壤结皮对种子萌发和幼苗建植的影响研究进展[J].生态学报,2021,41(18):7464-7474.

Effects of sand-fixing age on soil seed bank and its relationship with aboveground vegetation in Shapotou Desert

Wang Le^{1a}, Lu Wenjia^{1a}, Nan Yicong^{2,3}, Niu Furong^{1b}, Yu Xiaojun^{1a}, Bai Bingxin⁴, Shi Yafei^{1a}

(1. a.Pratacultural College / b.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.Shapotou Desert Research and Experiment Station / National Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Lanzhou City North and South Two Mountains Environmental Greening Project Headquarters, Lanzhou 730030, China)

Abstract: This study aims to investigate the effects of different sand-fixation durations on desert soil seed banks and their relationship with aboveground vegetation. Using mobile sand dunes, straw checkerboard barriers (5-year fixation), 37-year and 60-year sand-fixation sites as research objects, the characteristics of soil seed banks and aboveground vegetation as well as their interrelationships were systematically studied through a combined approach of aboveground vegetation surveys and soil seed bank germination experiments. The results indicate: (1) Both the soil seed bank and aboveground vegetation were predominantly composed of annual herbaceous plants, accounting for 71.43% and 54.55% respectively. With increasing sand-fixation duration, the species composition and density of the soil seed bank initially increased and then decreased, while the aboveground vegetation showed a different pattern; (2) The species diversity indices of the soil seed bank exhibited a unimodal trend (initial increase followed by decrease) with prolonged sand-fixation, whereas the diversity of aboveground vegetation demonstrated a continuous increasing trend; (3) The compositional similarity between soil seed banks and aboveground vegetation ranged from 0.28 to 0.07, showing a gradual decline with extended sand-fixation duration. Overall, vegetation-based sand fixation initially promotes soil seed bank accumulation and diversity enhancement, but long-term fixation may lead to ecological decoupling between seed banks and aboveground vegetation, necessitating artificial interventions to maintain sustainable ecosystem restoration.

Key words: vegetation sand fixation; soil seed bank; species diversity; species similarity; community succession