

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.03.006

CSTR:32311.14.rswc.2026.03.006

王巧玲, 柳超超, 王瑞霞, 等. 人工固沙不同建植年限林下草本群落及土壤结皮变化特征[J]. 水土保持研究, 2026, 33(3):95-102, 111.

Wang Qiaoling, Liu Chaochao, Wang Ruixia, et al. Variation characteristics of understory herbaceous plant communities and soil crusts under different planting years of artificial sand fixation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(3):95-102, 111.

人工固沙不同建植年限林下草本群落及土壤结皮变化特征

王巧玲¹, 柳超超¹, 王瑞霞², 刘立超³, 杨昊天³, 田英¹

(1. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 银川 750002; 2. 宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区管理局, 宁夏灵武 750400; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘要: [目的] 探究干旱沙区人工固沙过程中, 不同建植年限下草本植物群落与土壤结皮的演替变化特征, 为干旱沙区生态恢复与人工固沙成效评估提供理论依据。[方法] 利用空间代替时间的方法, 调查了毛乌素沙地南缘白芨滩自然保护区人工植被建植后的 9, 12, 14, 16, 18, 28, 53, 70 a 共 8 个演替阶段以及自然恢复下柠条和油蒿群落中的林下草本植物及土壤结皮变化特征。[结果] (1) 随着人工建植年限的推进, 草本植物物种丰富度逐年增加, 人工建植地略低于天然群落地, 天然柠条和油蒿群落样地的草本植物物种丰富度最大; 盖度随年限变化基本呈增加的变化趋势, 由 4.92% 增加至 38.33%, 超过了天然柠条和油蒿群落样地; 地上生物量呈先增加后降低的变化趋势, 人工建植地低于天然群落地, 天然柠条和油蒿群落样地的草本植物地上生物量最大; (2) 在不同建植年限过程中, 土壤结皮已经成为地表覆盖的重要生态类型, 其厚度也随着固沙年限的增加而增加。(3) 相关性分析表明, 草本植物与土壤结皮存在显著的协同演替关系, 二者通过资源竞争与相互促进共同影响生态系统的恢复进程。[结论] 在人工固沙不同建植年限梯度下, 草本物种丰富度呈逐年递增态势, 土壤结皮类型趋于多样且厚度逐渐增加, 草本植物与土壤结皮协同演替, 共同推动干旱沙区人工固沙生态系统的恢复与发展。

关键词: 人工固沙; 建植年限; 草本植物; 土壤结皮

中图分类号: S181; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0095-08

Variation characteristics of understory herbaceous plant communities and soil crusts under different planting years of artificial sand fixation

Wang Qiaoling¹, Liu Chaochao¹, Wang Ruixia², Liu Lichao³, Yang Haotian³, Tian Ying¹

(1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Lingwu Baijitan National Nature Reserve Management Bureau, Lingwu, Ningxia 750400, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the succession characteristics of herbaceous plant communities and soil crusts under different planting years in the process of artificial sand fixation in arid sandy areas, thereby providing a theoretical basis for ecological restoration and effectiveness evaluation of artificial sand fixation in arid sandy areas. [Methods] The space-for-time substitution method was used to investigate the variation characteristics of understory herbaceous plants and soil crusts across eight succession stages of 9, 12, 14, 16, 18, 28, 53, and 70 years after the planting of artificial vegetation in the Baijitan Nature Reserve at the southern margin of Mu Us Sandy Land, as well as in naturally restored *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* communities.

收稿日期: 2025-04-10

修回日期: 2025-07-31

接受日期: 2025-08-14

资助项目: 宁夏重点研发计划项目“宁夏黄河东岸沙化土地生态修复与产业协同提升模式研究与示范”(2023BEG02040); 中央财政林业科技推广示范项目“毛乌素沙地生态修复与生产功能提升技术示范推广”(2024ZY06); 全职引进高层次人才项目“白芨滩沙地人工灌木林不同恢复年限的植被多样性和稳定性研究”(2024BEH04146)

第一作者: 王巧玲(1996—), 女, 宁夏固原人, 硕士, 科研助理, 主要从事林草资源利用研究。E-mail: 3118438129@qq.com

通信作者: 田英(1982—), 女, 陕西西安人, 博士, 副研究员, 主要从事林草资源与生态修复研究。E-mail: tianying_1982@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

[**Results**] (1) With the advancement of artificial planting years, the species richness of herbaceous plants increased year by year. The artificial planting plots were slightly lower than the natural community plots, with the highest species richness of herbaceous plants observed in the natural *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* community plots. The coverage showed an overall increasing trend with planting years, increasing from 4.92% to 38.33%, exceeding that of the natural *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* community plots. The aboveground biomass showed a trend of first increasing and then decreasing. The aboveground biomass in artificial planting plots was lower than that in natural community plots, and the aboveground biomass of herbaceous plants in natural *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* community plots was the largest. (2) During the progression of different planting years, soil crusts became an important ecological type of surface coverage, and their thickness also increased with the increase in sand fixation years. (3) Correlation analysis showed that there was a significant synergistic succession relationship between herbaceous plants and soil crusts, jointly affecting the restoration process of the ecosystem through resource competition and mutual facilitation. [**Conclusion**] Under the gradient of different planting years of artificial sand fixation, the richness of herbaceous species increases year by year, the types of soil crusts tend to be diverse and their thickness gradually increases, and the synergistic succession of herbaceous plants and soil crusts jointly promotes the restoration and development of artificial sand fixation ecosystems in arid sandy areas.

Keywords: artificial sand fixation; planting years; herbaceous plants; soil crusts

人工固沙植被修复是干旱沙区退化生态系统稳定性维持的有效途径,一直以来,人工固沙植被是减轻风沙危害以及改善生态环境的主要途径^[1-3]。宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区位于毛乌素沙地西南部,属宁夏中部典型干旱地区,作为生态环境保护与修复的第一线,白芨滩自然保护区具有构筑生态安全屏障、构建防风固沙生态廊道、保护生物多样性以及提升生态系统质量和稳定性的重要作用^[4],保护区自成立以来,一直致力于防沙治沙工作,通过不断地探索与实践,已构建起特有的“五位一体”防沙治沙模式。数代白芨滩人坚持不懈防沙治沙,累计治沙造林4.2万hm²,森林覆盖率达41%,有效遏制毛乌素沙地的南移和西扩,保护黄河、银川河东地区的生态安全,成为“三北”工程精准治沙、科学治沙的样板区^[5-6]。

白芨滩不同年代建立的人工植被,为系统研究固沙植被演替过程提供一个理想的场所。白芨滩的固沙植被是建立在植物非常稀少的流沙地区。在耐旱灌木引入后,为其他草本植物的入侵创造一个相对适宜的生长环境。随着时间的延续,群落与环境都会发生较大变化,植被种类逐渐丰富多样,土壤条件和水分条件也得到显著改善。对这一特定生态系统进行长期定位监测,对正确认识我国干旱半干旱地区土壤结皮的生态意义和植被建设区的生态恢复效果具有重要作用。研究表明,天然群落主要由灌木层与草本层组成,而草本植物在物种数以及数量上都占绝对优势^[7-8];在人工植被建立后,草本植物盖度也呈增加的趋势,草本植物在荒漠植被中占比大的主要原因是

其适应性强、生长快且需求低,草本植物的恢复不仅有利于荒漠生态系统物种多样性的增加,而且有利于土壤生境的恢复以及抑制土壤侵蚀。土壤结皮是由藻类、地衣、藓类等隐花植物和细菌、真菌等土壤中的微生物通过菌丝体、假根、分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的地表稳定复合体,广泛分布于干旱和半干旱区,是目前荒漠生态系统研究的重点和热点。土壤结皮在固定沙面、改善土壤理化性质及影响植物的演替与发展等方面具有重要作用。

研究表明,不同固沙灌木对生态环境会产生不同的影响。罗雅曦等^[9]在宁夏风沙区研究不同人工固沙灌丛林中发现,相比其他类型的灌木,油蒿林地对土壤环境的改善最为显著;而张立欣等^[10]在库布齐沙漠研究不同人工固沙灌木林中发现,几种灌木类型下油蒿+杨柴混交林对土壤环境的改善最为显著;杨晓娟等^[11]的研究发现,不同固沙灌木林地的土壤肥力条件不同,其中,柠条林地土壤肥力指数最高;前人研究大都集中在灌木层面的研究^[12-14],指出不同类型固沙灌木对土壤以及生态环境的改善存在一定的差异。但是,目前对于人工固沙区林下草本群落与土壤结皮在演替过程中的协同作用及相互影响机制尚未明确,因此,本研究以白芨滩自然保护区不同建植年限的人工固沙区为研究对象,结合天然群落,探究林下草本植物与土壤结皮的演替特征及二者的关系,旨在为干旱沙区人工固沙植被的管理与生态修复提供科学依据,进一步为人工固沙的发展提供有力的理论支持和保障。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区(37°49'05"—38°20'54"N,106°20'22"—106°37'19"E),

地处毛乌素沙地西南缘,面积70 921 hm²。该地区气候类型为大陆性季风气候。年平均降水量230 mm,7—9月较为集中,占全年降水量的61.6%,年平均蒸发量2 862.2 mm,为年降水量的10.5倍,属于中温带干旱气候区,土壤类型主要为灰钙土和风沙土。样地信息见表1。

表1 样地信息概况

Table 1 Overview of sample plot information

建植年限/a	经度E/(°)	纬度N/(°)	海拔/m	面积/hm ²	地形	主要灌木	株行距/(m×m)	林下草本植物
9	106.428592	37.95943	1166.70	0.5	平缓沙地	柠条、沙拐枣、花棒	2×2	虫实、虎尾草、狗尾草、沙生针茅、角蒿、刺沙蓬、沙米、雾冰藜
12	106.428295	37.961093	1176.50	0.6	缓坡沙地	柠条、沙拐枣、花棒	2×2	虫实、雾冰藜、沙米、刺沙蓬、沙生针茅、沙鞭
14	106.494748	38.073415	1206.90	0.5	平缓沙地	柠条、沙拐枣	1×2	虫实、雾冰藜、沙生针茅、刺沙蓬
16	106.478052	38.019294	1194.16	0.7	平缓沙地	柠条、沙拐枣、花棒	2×3	虫实、雾冰藜、沙茴香
18	106.489883	38.035186	1242.47	0.6	缓坡沙地	柠条	2×2	虫实、沙米、沙鞭
28	106.604497	38.034613	1282.31	0.8	平缓沙地	柠条、花棒	2×3	沙生针茅、沙鞭、草木樨、沙鞭、沙茴香、虫实、刺沙蓬、雾冰藜
53	106.743181	38.086581	1323.55	1	平缓沙地	柠条、花棒	1×2	刺沙蓬、雾冰藜、虫实、灰灰草、沙生针茅、狗尾草
70	106.740553	38.076496	1345.62	1.2	缓坡沙地	柠条、花棒	2×2	虫实、沙米、狗尾草、沙生针茅、沙米、雾冰藜、灰灰草
天然柠条群落	106.470976	37.934028	1132.42	1	缓坡沙地	柠条	自然形成	茵陈蒿、狗尾草、角蒿、雾冰藜、沙茴香、沙生针茅、狗娃花
天然油蒿群落	106.436085	37.921176	1098.76	0.8	平缓沙地	油蒿	自然形成	雾冰藜、狗尾草、刺沙蓬、沙鞭

1.2 研究调查方法

根据人工固沙建植年限,系统地按照建植年限布设群落调查点10个(人工固沙建植年限9,12,14,16,18,28,53,70 a,以及天然柠条群落(NT)和油蒿群落(YH),每个年限的样地设置3次重复,各样地间距均大于500 m,以避免空间自相关。每个样地均匀布设9个1 m×1 m草本样方调查测定草本特征,调查测定每个样方中物种的组成及物种的高度、密度、盖度、频度,计算物种多样性,并完成小样方生物量取样。草本地地上生物量的获取均采用齐地面刈割法。按样方装进信封袋带回实验室,65℃烘干后称重,获取草本地地上生物量干重数据。同时,调查测定该样地土壤结皮种类及特征。

结皮类型界定:生物土壤结皮指由藻、藓、地衣等生物组分与土壤颗粒胶结形成的结皮;物理结皮指仅由土壤颗粒胶结形成,无生物组分参与的结皮。

盖度测定:采用1 m×1 m样方,目测估算结皮在样方内的覆盖面积占比,每个样地重复3次。

厚度测定:在土壤干燥时,采用不锈钢薄片插入结皮层与下层土壤之间,轻轻剥离完整结皮,用游标卡尺测量其厚度,每个样地随机测定10个点,取平均值。

用Simpson指数(P ,优势度指数)、Shannon-Wiener指数(H' ,多样性指数)、Pielou指数(E ,均匀度指数)和Margalef指数(MA,丰富度指数)表示植物群落多样性。植物群落中物种的优势度由重要值(P_i)确定。计算公式如下:

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

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = H' / \ln S \quad (3)$$

$$MA = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (4)$$

$$P_i = \left[(\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 4 \right] \times 100 \quad (5)$$

式中: S 表示植物群落中物种数量; N 表示所有物种个体数总和; P_i 表示物种重要值。

1.3 数据处理与分析

用Excel 2021和Origin 2021软件对调查测定的数据进行分析与统计,用单因素方差分析(One-way ANOVA)不同建植年限下草本特征和土壤生物结皮等指标的差异显著性,用Origin 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 人工固沙不同建植年限植被变化特征

2.1.1 植被群落特征及物种多样性 在人工固沙不同建植年限草本样方调查中,通过调查物种多度、盖度、频度和高度以统计不同建植年限下物种组成和重要值

(表2),蒙古虫实、雾冰藜、刺蓬、狗尾草、沙生针茅等为不同建植恢复年限及天然灌木群落下草本样方植物主要类型,分别归于藜科和禾本科,说明不同建植恢复年限下草本优势物种变化差异相对较小。藜科草本植物优势种出现次数最多,高达9次,且占据优势地位较强。而禾本科草本植物出现类型最多,优势种出现类型次之。

表2 不同建植年限及天然灌木群落常见物种重要值

Table 2 Important values of common species in natural shrub communities under different planting years

科	物种	建植年限/a									
		9	12	14	16	18	28	53	70	NT	YH
藜科	蒙古虫实	90.67	73.73	95.80	67.19	43.99	13.03	4.82	56.18	—	—
	雾冰藜	—	6.82	1.22	6.13	12.25	10.15	4.90	15.76	43.71	23.80
	刺蓬	—	—	—	—	—	26.94	52.28	—	—	41.86
	刺沙蓬	—	10.00	—	1.06	4.49	—	—	—	—	—
禾本科	狗尾草	—	—	—	—	0.84	1.67	9.89	20.18	16.69	14.10
	沙生针茅	—	3.22	—	7.12	20.16	11.53	8.96	0.74	—	—
	沙鞭	1.02	—	—	0.91	—	8.66	—	—	—	1.79
	短花针茅	—	—	—	—	—	15.21	—	—	3.87	—
	小画眉草	—	—	—	1.73	3.07	—	—	1.45	—	18.45
紫葳科	角蒿	—	—	—	—	0.63	—	—	—	16.94	—
苋科	沙米	7.46	—	—	4.59	0.85	—	—	4.53	—	—

注:NT为天然柠条样地,YH为天然油蒿样地。

如图1所示,随着人工建植年限的变化草本植物物种丰富度指数、多样性指数、优势度指数、均匀度指数整体上逐年增加,人工建植地低于天然柠条群落地,天然柠条群落和天然油蒿群落的草本植物物种丰富度较大,物种丰富度指数与优势度指数在人工建植9~16 a与天然群落差异显著($p \leq 0.05$),在人工建植18~70 a与天然群落无显著性差异($p \geq 0.05$),多样性指数在人工建植9~28 a与天然群落间差异显著($p \leq 0.05$),均匀度指数在人工建植9~18 a与天然群落间差异显著($p \leq 0.05$),其余年份间无显著性差异($p \leq 0.05$)。

2.1.2 草本植物盖度变化特征 如图2所示,随着人工建植年限的推进草本植物盖度基本呈现增加的变化趋势,从人工建植9 a开始到人工建植70 a,其草本植物盖度由4.92%增加至38.33%,超过天然柠条群落和天然油蒿群落,其中在人工建植28 a,53 a,70年间草本植物盖度较高,分别达到38.08%,33.31%,38.33%,与人工建植9~18 a的盖度存在显著性差异($p \leq 0.05$),与天然柠条群落和天然油蒿群落无显著性差异($p \geq 0.05$),其中人工建植28 a较人工建植9~18 a分别显著提高9.16倍、6.75倍、2.19倍、3.97倍、4.40倍,人工建植53 a较人工建植9~18 a分别显著提高7.88倍、5.77倍、1.79倍、3.34倍、3.72倍,人工建植70 a较人工建植9~18 a分别显著提高9.22倍、6.79倍、2.21倍、3.99倍、4.43倍。

2.1.3 草本植物地上生物量变化特征 如图3所示,随着人工建植年限的推进草本植物地上生物量呈先增加后降低的变化趋势,人工建植地低于天然群落地,天然柠条群落和天然油蒿群落的草本植物地上生物量最大,鲜重分别为103.41 g,108.98 g,干重分别为50.33 g,45.20 g。其中天然柠条群落的草本鲜重较人工建植9~70 a的草本鲜重分别显著提高9.12倍、6.35倍、1.09倍、0.94倍、0.95倍、2.73倍、2.65倍、3.19倍,草本植物干重分别显著提高9.83倍、9.15倍、1.37倍、1.11倍、1.19倍、3.04倍、5.02倍、3.52倍;天然油蒿群落的草本植物鲜重较人工建植9~70 a的草本植物鲜重分别显著提高9.66倍、6.74倍、1.20倍、1.05倍、1.05倍、2.93倍、2.85倍、3.42倍,草本植物干重分别显著提高8.73倍、8.11倍、1.13倍、0.89倍、0.96倍、2.63倍、4.41倍、3.06倍。

2.2 人工固沙不同建植年限土壤结皮变化特征

2.2.1 结皮类型 通过在不同建植年限的人工固沙地表结皮类型调查(表3),在建植9 a的样地中没有地表结皮,其他建植年限及天然灌木群落下均有结皮。人工建植9 a的样地仍为流沙地,建植12 a的样地出现单一的藻结皮,建植14,16 a的样地出现物理结皮和藻结皮,建植18 a的样地出现物理结皮、藻结皮、藓结皮、藻结皮和藓结皮混合,建植28 a的样地出现物理结皮、藓结皮,建植53 a的样地出现物理结皮、

藓结皮、藻结皮和藓结皮混合,建植70 a的样地出现物理结皮、藓结皮,天然柠条群落为物理结皮、藻结皮,天然油蒿群落有物理结皮、藓结皮、藻结皮、藻结

皮和物理结皮混合、藓结皮和物理结皮混合。各样地结皮类型从多到少为天然油蒿群落>18>53>14>16>28>70>天然柠条群落>12。

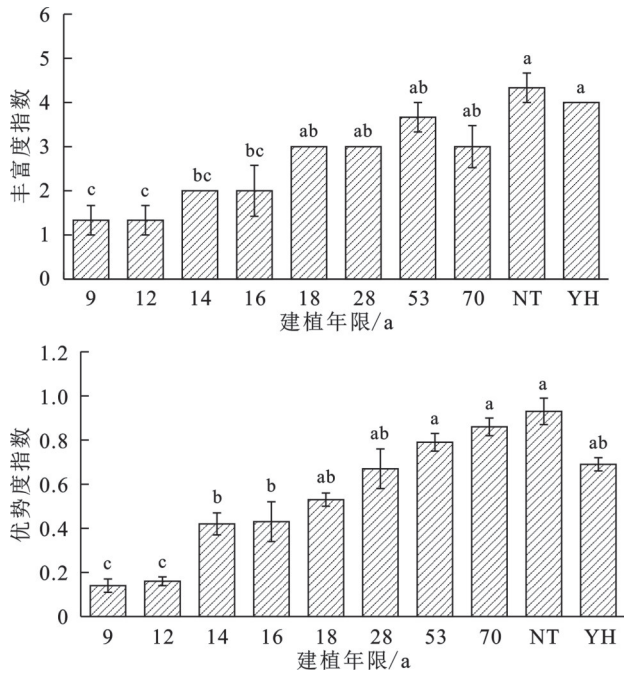


图1 不同建植年限林下草本植物物种丰富度变化

Fig. 1 Changes in species richness of understory herbaceous plants under different planting years

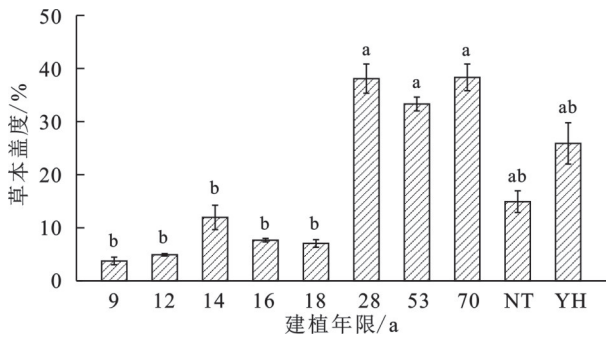


图2 不同建植年限林下草本植物盖度变化

Fig. 2 Changes in coverage of understory herbaceous plants under different planting years

表3 不同恢复年限及天然灌木群落地表结皮类型

Table 3 Types of surface crusts in natural shrub communities under different restoration years

建植年限/a	结皮类型
9	—
12	藻结皮
14	物理结皮、藻结皮
16	物理结皮、藻结皮
18	物理结皮、藻结皮、藓结皮、藻结皮和藓结皮混合
28	物理结皮、藓结皮
53	物理结皮、藓结皮、藻结皮和藓结皮混合
70	物理结皮、藓结皮
天然柠条群落	物理结皮、藻结皮
天然油蒿群落	物理结皮、藓结皮、藻结皮、藻结皮和物理结皮混合、藓结皮和物理结皮混合

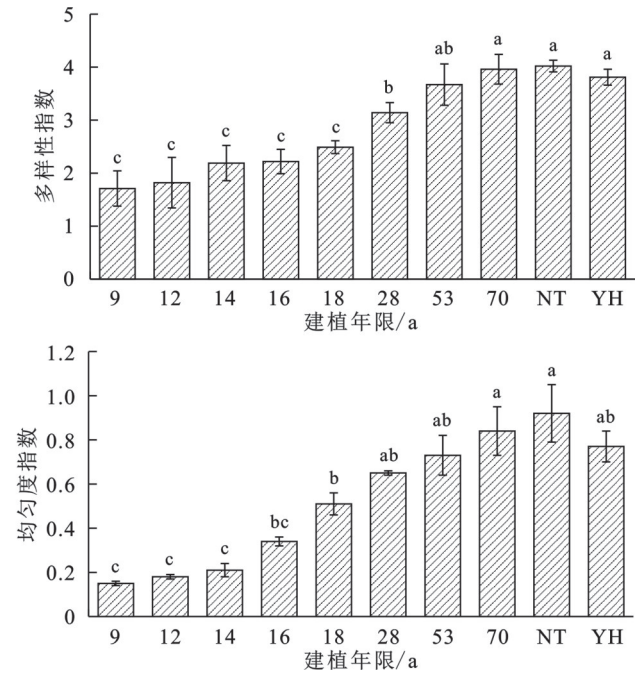


图3 不同建植年限林下草本植物地上生物量变化

Fig. 3 Changes in aboveground biomass of understory herbaceous plants under different planting years

2.2.2 结皮盖度 结皮盖度是反映土壤抗风蚀性的一个重要指标,土壤结皮能够通过增加地表粗糙度和起沙风速等来减轻风力侵蚀。如图4所示,人工建植9 a的样地,地表还未产生结皮,建植12 a的样地地表开始出现结皮,且结皮盖度随建植年限呈波动式变化。

2.2.3 结皮厚度 结皮厚度是在土壤较为干燥时施以外力使结皮层完整自然剥离的厚度。沙地植被群落演替的一个明显标志是地表的固定程度,通常来说沙地植被恢复得越好,沙地的固定程度也越高,反映沙区地表固定程度的最直观指标为生物结皮厚度。如图5所示为不同建植年限下地表结皮厚度,在建植53 a和70 a时地表结皮厚度显著($p < 0.05$)大于

其他建植年代。结皮厚度随建植年限的变化整体呈

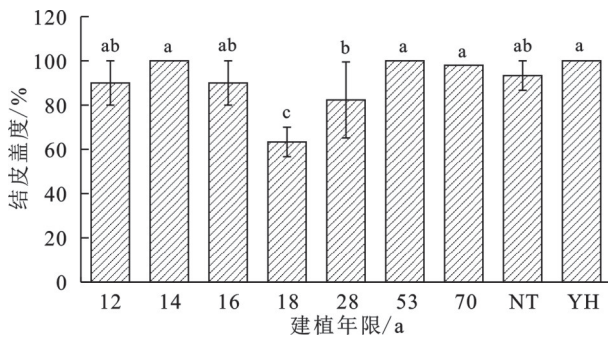


图 4 不同恢复年限及天然灌木群落地表结皮盖度变化

Fig. 4 Changes in surface crust coverage in natural shrub communities under different restoration years

2.3 林下草本植物与土壤结皮相互关系

由表 4 可知,草本植物多样性指数与生物量呈极显著正相关($p < 0.01$),表明草本植物多样性的增加会促进生物量积累;结皮盖度与草本植物多样性指数、草本植物盖度呈显著正相关($p < 0.05$),说明结皮通过固土保水、富集养分为草本植物创造更优生境,利于多物种共存,同时稳定表层土壤,减少风蚀,为

增大的趋势,并逐渐大于天然柠条和油蒿群落。

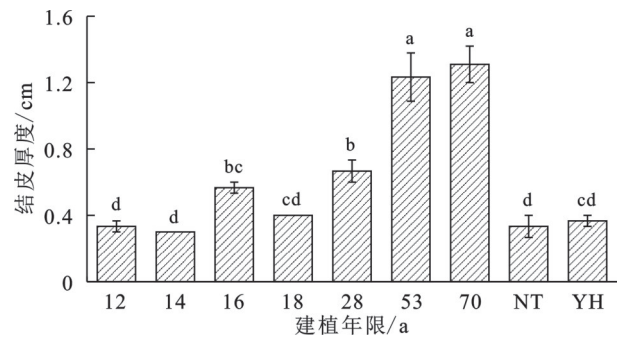


图 5 不同恢复年限及天然灌木群落平均地表结皮厚度变化

Fig. 5 Changes in average surface crust thickness in natural shrub communities under different restoration years

表 4 林下草本植物与土壤结皮相互关系

Table 4 Relationship between understory herbaceous plants and soil crusts

相关系数	多样性指数	草本植物盖度	生物量	结皮类型	结皮盖度	结皮厚度
多样性指数	1					
草本植物盖度	0.73*	1				
生物量	0.85**	0.77*	1			
结皮类型	0.51	0.32	0.55	1		
结皮盖度	0.68*	0.78*	0.48	0.41	1	
结皮厚度	-0.71*	-0.76*	-0.67*	0.09	0.45	1

注:**表示极显著相关,*表示显著相关。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 人工固沙植被演替过程中草本变化特征 沙地恢复过程中,通过自然演替而形成的植物群落结构与组成对生态系统的稳定性具有深远的影响,物种作为群落最基本的构成因素之一,揭示群落演替、物种共存以及生物多样性等重要信息^[15]。物种丰富度指数指的是某个群落中植物的种数,其值越高说明植物种类越多,植物的多样性也越高^[16]。本研究中,在人工建植地随着建植年限的推进物种丰富度不断增加并接近于天然群落,天然柠条群落物种丰富度最高,其次是天然油蒿群落,可能是因为柠条的生命力比较强、抗旱耐贫瘠、根系较为发达,具有较强的抗风蚀作用,从而为草本物种提供适宜的生存环境,这与于航等^[17]的研究结果相似。人工植被不同建植年限间草本层的植物群落特征存在差异,本

草本植物幼苗定植提供物理支撑,促进草本覆盖度扩张;结皮厚度与草本植物多样性指数、草本植物盖度、生物量呈显著负相关($p < 0.05$),表明随着结皮厚度的增加形成致密屏障,与草本植物开始竞争水分、养分等资源,抑制草本植物生物量积累和物种扩张,二者存在复杂的相互作用关系。

研究中,草本盖度在人工建植 28, 53, 70 a 最大,草本地上生物量天然群落最高,其次是人工建植 14, 16, 18 a。盖度和生物量从侧面反映了植物光合作用强弱及繁茂程度,二者共同表征着草地植物的结构特征,由于植被盖度的增加能够显著改善水土流失问题及区域小气候,因此成为植被恢复的重要指标。相关研究发现^[18-19],沙地自然恢复过程中恢复年限长的沙地植被盖度和生物量显著大于恢复年限短的,本研究中草本群落盖度和生物量整体呈现出随建植年限的延长而波动增加的趋势,这可能与建植时间、恢复措施以及植被的相互作用存在一定的关系。

3.1.2 人工固沙植被演替过程中生物土壤结皮变化特征 生物土壤结皮是荒漠生态系统的重要组成部分,并发挥着极为重要的生态功能。在不同人工建植年限的调查中发现,建植年限对生物土壤结皮的分布有重要影响,随着建植年限的增加,结皮盖度和厚度均呈现出先增加后降低随后又增加的趋势,这

可能与生物土壤结皮在不同的生存阶段表现出不同生长策略有关^[20-22],此外,不同人工建植年限中结皮种类分布和多样性也有差异,随着人工建植年限增加,结皮种类与多样性增加,人工建植初期阶段只有单一的藻结皮,中后期阶段出现物理结皮、藓结皮等,随着对生物土壤结皮研究程度的深入,采用人工干预措施促进生物结皮发育,协同维管束植物发挥流沙固定和生态修复作用已经进入了实践领域^[23]。也有研究指出^[24-25],当生物结皮发展至厚度达到1 cm后,一年生草本植物就会大量在上面生长繁殖,进一步增加了生物结皮的抗风蚀能力。在白芨滩不同年代建植的人工固沙灌木区的观测表明,生物结皮已经成为地表覆盖的重要生态类型。在人工固沙植被建设和管理中,如何更好地发挥生物结皮的生态功能,促进人工固沙灌木更为稳定的发挥防风固沙、碳氮固定、提高生物多样性等生态功能,是人工固沙植被建设及管理需要重点关注的问题。

3.1.3 草本植物与土壤结皮的协同演替关系 相关性分析表明,草本植物多样性指数与生物量呈极显著正相关,表明草本植物多样性的增加会促进生物量积累;结皮盖度与草本植物多样性指数、草本植物盖度呈显著正相关,说明结皮通过固土保水、富集养分为草本植物创造更优生境,利于多物种共存,同时稳定表层土壤,减少风蚀,为草本植物幼苗定植提供物理支撑,促进草本覆盖度扩大;结皮厚度与草本植物多样性指数、草本植物盖度、生物量呈显著负相关,表明随着结皮厚度的增加形成致密屏障,与草本植物开始竞争水分、养分等资源,抑制草本植物生物量积累和物种扩张,二者存在复杂的相互作用关系。结皮与草本植物形成“双向作用”,人工建植初期阶段,结皮通过固土、保水、富集养分形成“宜居微生境”,显著促进草本萌发、生长和多样性;随着演替进行,土壤结皮厚度增加,结皮与草本植物开始竞争水分、养分等资源,甚至形成物理屏障,可能抑制部分草本植物的生长,进而抑制生物量积累,而草本植物的繁茂也可能通过遮挡光照影响结皮的光合作用。这种动态平衡反映生态系统内部的自我调节机制,是长期协同进化的结果。荒漠修复中,优先培育“结皮盖度高、厚度适中、类型适配”的土壤结皮,可更高效促进草本植物定植;同时需警惕厚结皮对草本植物的竞争抑制,可通过适度干扰(如轻度放牧)打破结皮过度发育,平衡二者关系。本研究中人工固沙建植70 a时,草本植物盖度和结皮厚度均超过天然群落,表明长期人工干预可实现优于天然群落的生态恢复效果,形成近顶级群落模式;此外,结皮类型的演替与草本植物优势种的更替

存在同步性,说明二者可能通过物质循环相互影响。本研究基于多年人工建植固沙基础,但未长期监测,仅利用空间代替时间的方法监测一年的变化情况,存在一定的局限性,草本植物与土壤结皮的相互影响、协调演替关系还需后期的长期监测研究。

3.2 结论

(1) 随着人工建植年限的推进,草本物种丰富度逐年增加,人工建植地略低于天然群落地,天然柠条和油蒿群落的草本物种丰富度最大;盖度随年限变化基本呈现增加的趋势,由4.92%增加至38.33%,超过天然柠条和油蒿群落;地上生物量呈先增加后降低的变化趋势,人工建植地低于天然群落地,天然柠条和油蒿群落的草本地上生物量最大;

(2) 生物土壤结皮是荒漠生态系统的重要组成部分,并发挥着极为重要的生态功能,在不同年代建植的人工固沙灌木区的观测表明,生物结皮已经成为地表覆盖的重要生态类型,其厚度也随着固沙年限的增加而增加。

(3) 草本植物与土壤结皮存在显著的协同演替关系,二者通过资源竞争与相互促进共同影响生态系统的恢复进程。

参考文献(References):

- [1] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J].中国科学院院刊,2017,32(7):790-797.
Li X R, Zhang Z S, Liu Y B, et al. Long-term ecological research guides ecological restoration and recovery in sandy areas of northern China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(7):790-797.
- [2] 刘俊壕,周海盛,郭群.中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响[J].中国沙漠,2023,43(5):204-213.
Liu J H, Zhou H S, Guo Q. The effects of desertification control on the patterns of vegetation in arid and semi-arid regions of northern China [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5):204-213.
- [3] Li D J, Xu D Y, Wang Z Y, et al. Ecological compensation for desertification control: a review [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(3):367-384.
- [4] 王瑞霞,王娅丽,王兴东,等.宁夏白芨滩自然保护区沙产业发展现状及建议[J].林业科技通讯,2025,(02):87-91.
Wang R X, Wang Y L, Wang X D, et al. Development status and suggestions of sand industry in Baijitan nature reserve in Ningxia [J]. Forest Science and Technology, 2025, (02):87-91.
- [5] 宋超,余琦殷,王瑞霞,等.基于植被覆盖度的宁夏灵武白芨滩自然保护区防风固沙功能时空变化研究[J].生态学报,2021,41(8):3131-3143.

- Song C, Yu Q Y, Wang R X, et al. Spatio-temporal variation of windbreak and sand fixation functions based on vegetation coverage in Baijitan National Nature Reserve, Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8):3131-3143.
- [6] 宋春阳, 余维维, 郭焱培, 等. 毛乌素沙地植被恢复过程中物种多样性与功能多样性的关系[J]. *生态学报*, 2025, 45(13):6331-6348.
- Song C Y, She W W, Guo Y P, et al. Effects of vegetation restoration on species diversity and functional diversity in the Mu Us Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(13):6331-6348.
- [7] 周兰萍, 纪永福, 李亚, 等. 腾格里沙漠东南缘绿洲荒漠过渡带天然群落结构特征及其多样性研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(19):80-84.
- Zhou L P, Ji Y F, Li Y, et al. The study of structural characteristics and diversity of natural plant community in oasis desert ecotone in the southeast margin of the tengger desert[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(19):80-84.
- [8] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 等. 半干旱沙区3种优势固沙灌木生物量分配及其生态学意义[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5):149-157.
- Zhan J, Li Y L, Han D, et al. Biomass allocation and its ecological significance of three dominant sand-fixing shrubs in the semi-arid desert area[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5):149-157.
- [9] 罗雅曦, 刘任涛. 宁夏风沙区不同人工固沙灌丛土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5):60-67.
- Luo Y X, Liu R T. Evaluation on soil quality of different sand-binding shrub plantations within straw checkerboard in the desertified area of Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5):60-67.
- [10] 张立欣, 段玉玺, 王博, 等. 库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12):3871-3880.
- Zhang L X, Duan Y X, Wang B, et al. Characteristics of soil microorganisms and soil nutrients in different sand-fixation shrub plantations in Kubuqi Desert, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12):3871-3880.
- [11] 杨晓娟, 廖超英, 孙文艳, 等. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤肥力质量评价[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4):604-608.
- Yang X J, Liao C Y, Sun W Y, et al. Assessment on soil fertility of planted forests in the northeast sandy area of the ulanbuh desert[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4):604-608.
- [12] 李海泉, 邱开阳, 谢应忠, 等. 固沙灌木配置模式对宁夏东部风沙区土壤生态化学计量特征的影响[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(6):28-38.
- Li H Q, Qiu K Y, Xie Y Z, et al. Effects of sand-fixing shrub patterns on soil ecological stoichiometric characteristics in eolian sand region of eastern Ningxia, China[J]. *Grassland and Turf*, 2022, 42(6):28-38.
- [13] Zhang D, Feng Y, Zhang B, et al. Unveiling the spatial variability of soil nutrients in typical karst rocky desertification areas[J]. *Water*, 2024, 16(23):3346-3346.
- [14] 何毅, 邱开阳, 苏云, 等. 毛乌素沙地南缘不同固沙灌木群落土壤质量评价[J]. *草业科学*, 2022, 39(10):2005-2015.
- He Y, Qiu K Y, Su Y, et al. Soil quality and its evaluation under different sand-fixing shrubs in the southern edge of Mu Us Sandy Sand[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(10):2005-2015.
- [15] 柴永福, 许金石, 刘鸿雁, 等. 华北地区主要灌丛群落物种组成及系统发育结构特征[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(9):793-805.
- Chai Y F, Xu J S, Liu H Y, et al. Species composition and phylogenetic structure of major shrublands in North China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(9):793-805.
- [16] 卜耀军, 张雄, 艾海舰, 等. 榆林风沙草滩区物种多样性研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4):80-85.
- Bu Y J, Zhang X, Ai H J, et al. Species diversity in the wind-sandy grass shoal area of Yulin Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4):80-85.
- [17] 于航, 海龙, 周冬梅, 等. 不同种植年限柠条林对沙化土壤有机碳及土壤养分的影响[J]. *林业调查规划*, 2025, 50(4):118-126.
- Yu H, Hai L, Zhou D M, et al. Effects of *Caragana korshinskii* planting duration on organic carbon and soil nutrients in desertified soil[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2025, 50(4):118-126.
- [18] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2):134-141.
- Zhao X L, Xie Y H, Ma X J, et al. Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2):134-141.
- [19] 武胜男, 张曦, 高晓霞, 等. 三江源区“黑土滩”型退化草地人工恢复植物群落的演替动态[J]. *生态学报*, 2019, 39(7):2444-2453.
- Wu S N, Zhang X, Gao X X, et al. Succession dynamics of a plant community of degraded alpine meadow during the human-induced restoration process in the Three Rivers Source region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7):2444-2453.
- [20] 熊文君, 徐琳, 张丙昌, 等. 生物土壤结皮结构、功能及人工恢复技术[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(2):190-195.
- Xiong W J, Xu L, Zhang B C, et al. The structure, function and artificial restoration technology of biological soil crust[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(2):190-195.