

# 腾格里沙漠东缘花棒人工林植物组成和土壤粒径随林龄变化特征

崔健<sup>1,2,3</sup>, 马迎宾<sup>1,2,3</sup>, 包晓英<sup>4</sup>, 郝需婷<sup>1,3</sup>,  
黄雅茹<sup>1,2</sup>, 辛智鸣<sup>1,2,3</sup>, 卢嘉华<sup>1,2</sup>, 牧仁<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200; 2. 乌兰布和沙漠综合治理国家长期科研基地, 内蒙古 磴口 015200; 3. 内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站, 内蒙古 磴口 015200; 4. 内蒙古巴彦淖尔市临河区气象局, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

**摘要:** [目的] 明确不同林龄花棒人工林植物多样性和土壤粒径的关系, 为该地区的植被建设与土壤管理提供科学支持。[方法] 以腾格里沙漠东部种植的不同林龄花棒林为研究对象, 采用野外采样与室内分析相结合的方法, 研究不同林龄(2, 4, 6, 8, 10龄)花棒灌木林的植物多样性和土壤变化特征, 解析土壤粒径与植物群落多样性的关系。[结果] (1) 不同林龄花棒林土壤颗粒以细砂和中砂为主, 分别为30.62%~61.81%和23.83%~51.09%; 随着林龄的增加, 土壤颗粒分布越细, 分散程度减小, 粒度分布趋于近对称, 土壤分形维数和黏粉砂含量相关性最高,  $R^2$ 为0.837。(2) 5种不同林龄样地共有7科18属22种植物。随着林龄的增加, 植物多样性指数均呈现出明显的上升趋势。(3) 不同林龄花棒林中黏粉砂含量和极细砂含量分别与分形维数存在显著的正相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数分别为0.36, 0.83; 峰度与Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数均呈现极显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数分别为0.39, 0.26。[结论] 不同林龄花棒人工林能够提高植物多样性指数, 改变土壤粒径含量, 细砂含量与植物多样性呈现正相关关系。同时该地区生态恢复措施可为其他沙区沙漠化防治和干旱区植物恢复提供科学依据。

**关键词:** 不同林龄花棒; 土壤粒径; 分形维数; 土壤粒度参数; 植物多样性

中图分类号: S793.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0027-11

## Variation characteristics of plant composition and soil particle size with stand age in *Hedysarum scoparium* plantations on eastern edge of Tengger Desert

Cui Jian<sup>1,2,3</sup>, Ma Yingbin<sup>1,2,3</sup>, Bao Xiaoying<sup>4</sup>, Hao Xuting<sup>1,3</sup>,  
Huang Yaru<sup>1,2</sup>, Xin Zhiming<sup>1,2,3</sup>, Lu Jiahua<sup>1,2</sup>, Mu Ren<sup>1,2</sup>

(1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 2. National Long-Term Scientific Research Base for Comprehensive Management of Ulan Buh Desert, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 3. Dengkou Desert Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 4. Linhe District Meteorological Bureau, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to clarify the relationship between plant diversity and soil particle size in *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages, thereby providing scientific support for vegetation construction and soil management in the region. [Methods] Taking the *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages established in the eastern Tengger Desert as the research object, the plant diversity and soil

收稿日期: 2025-04-11

修回日期: 2025-07-07

接受日期: 2025-07-25

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项“乌兰布和沙漠防沙治沙综合示范区(CAFBB2024ZA010)”; 国家自然科学基金“人为干扰下梭梭灌丛水分利用与防风固沙效应的权衡机制研究”(32001374)

第一作者: 崔健(1997—), 男, 硕士, 内蒙古巴彦淖尔人, 助理工程师, 主要研究方向: 从事荒漠化防治工作。E-mail: 517632533@qq.com

通信作者: 马迎宾(1988—), 男, 博士, 河北秦皇岛人, 高级工程师, 主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治工作。E-mail: mayingbin1988@126.com

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

change characteristics of *Hedysarum scoparium* shrub plantations of different stand ages (2, 4, 6, 8, and 10 years old) were studied by using the methods of field sampling and laboratory analysis, and the relationship between soil particle size and plant community diversity was analyzed. [Results] (1) The soil particles in the *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages were mainly composed of fine sand and medium sand, accounting for 30.62%~61.81% and 23.83%~51.09%, respectively. With increasing stand age, the distribution of soil particles became finer, the degree of dispersion decreased, and the particle size distribution tended to be nearly symmetrical. The soil fractal dimension showed the highest correlation with clay-silt content, with an  $R^2$  of 0.837. (2) There were a total of 18 genera, 7 families, and 22 species of plants across 5 plots of different stand ages. With increasing stand age, the plant diversity indices showed a pronounced increasing trend. (3) In the *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages, clay-silt content and very fine sand content were both significantly positively correlated with the fractal dimension ( $p < 0.01$ ), with correlation coefficients of 0.36 and 0.83, respectively. The kurtosis showed a highly significant positive correlation with the Margalef richness index and Shannon-Wiener diversity index ( $p < 0.01$ ), with correlation coefficients of 0.39 and 0.26, respectively. [Conclusion] The *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages can increase plant diversity indices and alter soil particle size content, with a positive correlation observed between fine sand content and plant diversity. Furthermore, ecological restoration measures in the region can provide a scientific basis for desertification prevention and control in other sandy areas and plant restoration in arid areas.

**Keywords:** *Hedysarum scoparium* of different stand ages; soil particle size; fractal dimension; soil particle size parameters; plant diversity

生物措施是防治土地荒漠化重要且持久的有效手段之一,生物措施在降低风沙活动的同时能够改善土壤和提高生物多样性<sup>[1]</sup>。在荒漠生态系统中植被—土壤系统相互依存,相互制约。土壤作为植被生长发育的基础,为其提供所需养分<sup>[2]</sup>。而植被能改良土壤结构,增加土壤养分、拦蓄降水,对土壤起着重要的保护作用<sup>[3]</sup>。植物群落的存续与生长不仅反映了生态系统结构的优劣,还与水土保持的能力息息相关<sup>[4]</sup>。土壤在地面生态系统中发挥着至关重要的作用,它是营养元素循环、土壤水分保持以及枯枝落叶分解等多重生态过程的关键载体<sup>[5]</sup>。土壤条件不仅直接影响植物的生理活性,同时也对植物群落的构成、结构、物种多样性、生态功能以及生产效率具有深远的影响<sup>[6]</sup>。土壤粒度这一固有属性在荒漠化土地的治理中,可以作为重要的指示因素。因此,土壤理化性质和生物指标均可作为衡量生态修复工程的评价指标,同时植物的多样性、结构及其功能性已被认为是生态系统恢复过程中的重要指标<sup>[7]</sup>。例如,Li等<sup>[8]</sup>通过研究沙坡头建立50 a的人工植被发现,草本层植物多样性显著增加,人工固沙植被趋于原生植被方向演变。赵亚冲等<sup>[9]</sup>研究发现,不同林龄的四翅滨藜均能改善种植区植被与土壤状况,且随着林龄的增加改善效果越明显。60多年来,利用恢复沙区植被这一关键生态重建策略,我国北方已累积打造固沙植被约600万 $\text{hm}^2$ ,这在防治风

沙、促进生态恢复方面取得了显著的全局瞩目成就。然而,在实施过程中,植被退化及地下水位下降等一系列生态难题逐渐显现。因此,如何维持固沙植物的稳定生长,已成为沙区生态重建与可持续发展所面临的重要挑战<sup>[10]</sup>。

花棒(*Hedysarum scoparium*)作为一种防风固沙和水土保持的多年生灌木树种,具有抗风蚀、耐沙埋、防风固沙作用较强、根系发达等优点,该植物种在我国西北地区沙区均有广泛分布。目前,对于花棒的研究主要集中在关于花棒平茬方式以及平茬后植被生长状况、根系菌落<sup>[11]</sup>、根系<sup>[12]</sup>和光合生理特性<sup>[13-14]</sup>等内容,关于在沙漠边缘区域种植花棒对土壤理化特征及植物多样性影响的研究相对匮乏。

基于此,本研究选择以阿拉善左旗腾格里沙漠东缘不同林龄的花棒林为研究对象,旨在探讨不同林龄花棒林物种组成、优势种更替特征及其对林下土壤粒径分布和分形维数的影响,明确植物多样性与土壤粒径之间的关系,研究结果以期为其他沙区沙漠化防治和干旱区植物恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗境内(39°11'—39°18'N, 104°53'—104°57'E)的腾格里沙漠东部边缘区域。该地区为温带大陆性气候,干旱、

少雨、温差大、蒸发量高、光照强度高、降水稀少,土壤以风沙土为主。植被以沙生植被为主,主要以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等为主,伴生有蒙古韭(*Allium mongolicum*)、针茅(*Stipa capillata*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等旱生草本。

## 1.2 试验方法

2024年对腾格里沙漠东部边缘区域内按照林龄10 a(2014年栽植),8 a(2016年栽植),6 a(2018年栽植),4 a(2020年栽植)和2 a(2022年栽植)的人工花棒林划分样地(图1),对每种林龄的样地设置3个10 m×10 m的样方进行植被调查,调查内容主要为植物种类、个体数量、株高及冠幅等生长参数。

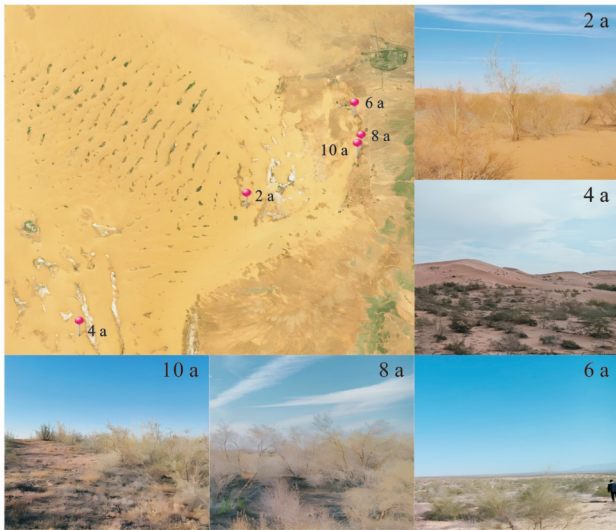


图1 样地布设

Fig. 1 Layout of sample plots

土壤采样采用分层取样法,将0—100 cm的土壤剖面划分为6个连续层次:0—5 cm,5—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm以及80—100 cm。为确保数据的可靠性,每个采样点均进行三次重复取样,最终共获得90份具有代表性的土壤样本。样品经塑封袋封装后转运至实验室,经过自然风干及2 mm筛网过滤后,采用荷兰(Eyetechn, the Netherlands)土壤粒子特性分析系统进行粒径测定。根据中国沙物质粒径分级标准,对土壤颗粒进行分类,划分为6个级别:极粗砂(1~2 mm)、粗砂(0.5~1 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)、细砂(0.1~0.25 mm)、极细砂(0.05~0.1 mm)以及黏粉砂(<0.05 mm)。

## 1.3 计算公式

1.3.1 土壤粒度参数计算公式如下 测量结果采用Krumbein等算法进行对数转换,把粒径值转变成 $\phi$ 值<sup>[15]</sup>。通过计算累计频率曲线上累计百分含量5%,

16%,25%,50%,75%,84%,95%所对应的粒度对数值 $\phi_5, \phi_{16}, \phi_{25}, \phi_{50}, \phi_{75}, \phi_{84}, \phi_{95}$ ,随后运用Folk-Ward图解法的公式计算土壤粒度参数<sup>[16]</sup>。

$$\phi = -\log_2 d \quad (1)$$

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (3)$$

$$KG = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (4)$$

$$SK = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (5)$$

式中: $d$ 代表土壤颗粒直径(mm);平均粒径( $M_z$ )反映沙物质粒度平均状况, $M_z$ 越大,表示细粒物质越多;标准偏差( $\sigma$ )反映沙物质粒径分布的分散程度, $\sigma$ 越小,颗粒越均匀,粒径分配的分散程度就越小;峰度(KG)反映颗粒粒度的集中程度,从比较分散过渡到比较集中;偏度(SK)反映沙物质粒度粗细分配的对称性,从细粒物质占比大过渡到粗粒物质占比大。

1.3.2 土壤分形维数计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V(r < R_i)}{V_T} \quad (6)$$

式中: $D$ 为土壤颗粒体积分形维数; $r$ 为土壤粒径(mm); $R_i$ 为第*i*级的土壤粒径(mm); $R_{\max}$ 土壤粒径的极大值(mm),本研究为2 mm。 $V(r < R_i)$ 为土壤粒径小于*R*的土壤体积分数(%); $V_T$ 为各粒径等级体积分数之和(%); $V(r < R_i)/V_T$ 是粒径小于*R*的土壤颗粒累积体积百分比含量(%)。

1.3.3 植被多样性指数计算公式如下<sup>[18]</sup>

Margalef丰富度指数:

$$M_a = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (7)$$

Shannon-Wiener多样性指数:

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (8)$$

Simpson多样性指数:

$$H' = 1 - \sum P_i^2 \quad (9)$$

Pielou均匀度指数:

$$J_{sw} = \frac{-\sum P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (10)$$

式中: $N$ 为样方内的总个体数; $S$ 为样方内的总种数; $P_i$ 为第*i*种的个体数量占总个体数量的比例; $P_i = n_i/N$ ;其中 $n_i$ 为第*i*个种的个数。

## 1.4 数据分析

数据分析由Excel 2010和DPS数据处理系统完成。采用单因素方差分析方法和最小显著差异法比

较不同林龄、处理指标的差异,置信水平设定为 95%。图表的绘制由 Origin 2019 和 Excel 2010 共同完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林龄人工花棒林的土壤粒径分布变化特征

由表 1 可知,不同林龄的人工花棒林中土壤颗粒主要由细砂和中砂组成且分布含量最多,分别为 30.62%~61.81% 和 23.83%~51.09%,极细砂分布含量次之,其组分含量为 5.2%~17.23%,黏粉砂和粗砂含量最少,分别为 0.08%~0.81% 和 0~14.26%,在研究区不同林龄的人工花棒林内土壤无极粗砂。进

一步分析可知,2 a 林龄的花棒林中细砂含量均显著高于其他林龄花棒林中的细砂含量( $p < 0.05$ ),呈现出  $2\text{ a} > 4\text{ a} > 10\text{ a} > 8\text{ a} > 6\text{ a}$  的趋势;而中砂含量表现出 6 a 林龄显著高于其他林龄花棒林中的中砂含量( $p < 0.05$ );10 a 林龄的花棒林极细砂含量显著高于其他林龄中极细砂含量( $p < 0.05$ )。同时随着土层深度的增加,10 a,8 a 和 6 a 林龄样地的极细砂和细砂组分含量呈现出先减少后增加分布特征,中砂组分含量则表现出先增加后减少的变化;在 4 a 和 2 a 林龄样地中,极细砂和细砂的组分含量随着土层深度的加深而逐渐降低,而中砂组分含量则呈现出随着土层深度的增加而逐渐增加分布。

表 1 不同林龄人工花棒林土壤粒径组成

Table 1 Soil particle size composition of *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages

土层深度/cm	林龄/a	颗粒含量/%				
		黏粉砂 <0.05 mm	极细砂 0.05~0.1 mm	细砂 0.1~0.25 mm	中砂 0.25~0.5 mm	粗砂 0.5~1 mm
0—5	10	0.28±0.03b	12.71±0.77a	53.21±1.45b	33.81±1.18c	0b
	8	0.41±0.24b	11.48±3.26ab	49.14±0.98c	38.82±2.43ab	0.13±0.22b
	6	0.81±0.21a	13.43±0.24a	39.93±1.84d	41.25±1.23a	4.58±1.31a
	4	0.35±0.06b	8.53±0.8b	53.45±0.87b	36.88±1.49bc	0.79±1.37b
	2	0.39±0.03b	12.05±1.02a	61.81±1.53	25.75±2.13d	0b
5—20	10	0.08±0.02c	6.93±0.23d	41.67±1.51c	51.09±1.16a	0.23±0.39a
	8	0.37±0.08a	11.34±0.23a	46.61±2.05bc	40.40±0.93c	1.29±1.11a
	6	0.36±0.08a	10.75±0.35b	41.32±2.20c	46.91±1.86ab	0.66±0.61a
	4	0.24±0.06b	6.55±0.35d	48.77±3.07b	43.07±2.53bc	1.36±1.56a
	2	0.34±0.03ab	10.14±0.32c	59.75±5.36a	29.76±5.04d	0a
20—40	10	0.19±0.01b	14.51±0.65a	47.95±1.04ab	37.34±1.65ab	0b
	8	0.28±0.03b	12.64±0.76b	44.16±9.36b	23.83±20.59b	5.75±4.97a
	6	0.29±0.03a	13.33±1.49ab	40.69±0.99b	43.73±1.03a	1.67±0.92ab
	4	0.14±0.03c	6.72±0.61c	52.01±1.87a	39.89±1.19ab	1.22±0.35ab
	2	0.17±0.01bc	7.54±0.54c	52.49±3.06a	34.89±2.05ab	4.91±2.44ab
40—60	10	0.19±0.04bc	17.14±0.89a	51.49±1.86a	30.75±2.03d	0.42±0.72c
	8	0.25±0.04b	12.53±0.93b	45.73±1.06b	35.26±2.41cd	6.38±1.96a
	6	0.59±0.01a	11.22±0.61b	33.74±1.34c	49.96±1.25a	4.47±1.32ab
	4	0.13±0.02c	5.59±0.44c	50.89±1.43a	41.08±2.86b	2.31±1.09bc
	2	0.17±0.04bc	7.30±0.53d	51.56±1.43a	38.54±4.40bc	2.42±2.51bc
60—80	10	0.24±0.03b	17.23±0.52a	48.49±1.41a	34.04±1.69c	0b
	8	0.28±0.01b	9.27±0.24b	36.88±1.30b	39.30±2.40b	14.26±2.36a
	6	0.55±0.01a	9.23±0.28b	30.62±1.94c	46.96±1.54a	12.64±1.25a
	4	0.19±0.03c	7.23±0.36c	49.45±1.36a	41.22±1.98b	1.90±1.76b
	2	0.25±0.04b	9.10±0.50b	49.89±2.62a	39.21±1.39b	1.55±1.09b
80—100	10	0.13±0.01c	9.94±1.09b	44.81±1.75ab	43.86±2.63ab	1.22±1.17b
	8	0.35±0.02a	13.08±0.84a	43.68±0.96bc	40.79±1.61c	2.08±0.52b
	6	0.33±0.04a	13.45±1.02a	42.25±1.90bc	41.59±1.12bc	2.38±1.48b
	4	0.15±0.02bc	5.20±0.37c	39.13±4.81c	45.67±1.67a	9.85±4.86a
	2	0.19±0.03b	8.45±0.36b	48.56±1.95a	39.91±2.25c	2.80±1.76b

注:表中小写字母为不同林龄花棒林在同一土层深度的差异显著( $p < 0.05$ )。

## 2.2 不同林龄人工花棒林土壤的粒度参数变化特征

通过图2A分析可知,在不同土层深度的条件下,不同林龄(2、4、6、8、10 a)花棒林的平均粒径分别在2.05~2.39, 2.04~2.40, 1.88~2.19, 1.90~2.20, 2.13~2.39之间;通过进一步分析可知,5种林龄花棒林的平均粒径呈现出随着土层深度的增加,平均粒径逐渐减小的趋势,但有个别林龄在40—60 cm土层深度出现波动的情况。由图2B可知,不同林龄花棒林的分选系数分别介于0.67~0.77, 0.77~0.91, 0.76~0.85, 0.65~0.75, 0.65~0.73,整体变化情况与平均粒径变化趋势相似,随着土层深度的增加分选系数虽表现出上下起伏不稳定的情况,但整体均呈现出

增大的趋势。由图2C可知,不同林龄花棒林的偏度分别介于-0.03~0.25, -0.08~0.16, 0.12~0.29, 0.04~0.14和-0.02~0.05,10 a, 8 a, 4 a和2 a林龄花棒林的土壤颗粒偏度均属于近对称,由此可说明,通过种植花棒林,地表粗糙度变大,增强对近地表沙物质的拦截作用,以此改变土壤颗粒分布情况,从而使其偏度趋于近对称分布。由图2D可知,不同林龄花棒林的峰度分别介于0.77~0.93, 0.70~0.78, 0.73~0.86, 0.94~0.98, 0.85~0.99。10 a, 8 a和6 a林龄花棒林的土壤峰度属于宽平,4 a和2 a林龄花棒林的土壤峰度属于中等,由此可说明随着林龄的增加,土壤颗粒分散程度减小。

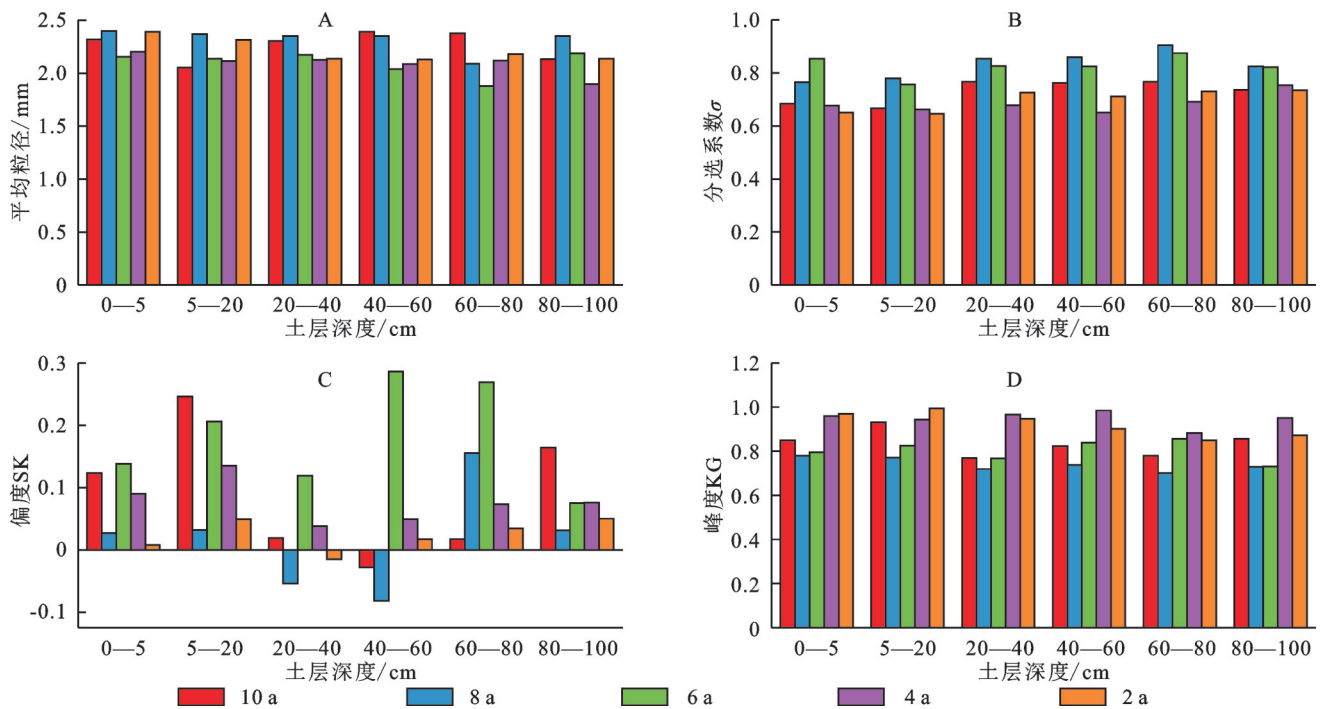


图2 不同林龄人工花棒林土壤粒度参数变化

Fig. 2 Changes in particle size parameters of soil in *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages

## 2.3 不同林龄人工花棒林土壤的分形维数变化特征

由图3可知,不同林龄花棒林在0—100 cm的土层深度上,其分形维数在不同林龄之间同样存在显著差异。5种不同林龄的花棒林在0—100 cm土层深度的分形维数均值范围为1.44~1.98,随着土层深度的增加,分形维数呈现逐渐下降的趋势。然而,部分林龄的花棒林分形维数在40—60 cm土层深度时,呈现波动而表现出不稳定性。5种林龄花棒林的分形维数均值由高到低依次为6 a(1.88±0.07)>8 a(1.77±0.04)>2 a(1.73±0.10)>4 a(1.66±0.09)>10 a(1.62±0.11)。

## 2.4 不同林龄人工花棒林土壤粒径组成与分形维数的关系

通常情况下,可将0.1 mm的土壤颗粒视为分形维数变化的关键粒径。而针对粒径小于0.1 mm的土

壤颗粒,与其土壤分形维数呈正相关趋势,而大于0.1 mm的土壤颗粒则与其土壤分形维数呈负相关。从图4可以看出,分形维数与黏粉砂的含量存在显著的正相关关系( $p < 0.01$ ),相关系数 $R^2$ 达到0.837。这一结果表明,土壤分形维数对黏粉砂百分含量的变化十分灵敏;此外,分形维数与极细砂的百分含量存在显著的正相关性( $p < 0.05$ ),其 $R^2$ 为0.198。分形维数与细砂、中砂和粗砂百分含量均无显著关系( $p > 0.05$ ), $R^2$ 分别为0.119, 0.001, 0.031。

## 2.5 不同林龄人工花棒林植物组成变化特征

由表2可知,不同林龄花棒林的生长指标呈现显著差异( $p < 0.05$ ),具体表现为花棒株高和基径整体呈现出随着林龄的增加而增大的趋势,而冠长和冠宽则表现出随着林龄的增加呈现出上下波动的趋

势,转折点分别出现在 8 a 和 6 a 林龄的花棒林中。由表 2 中林下主要植物可知,5 种样地内共有 7 科 18 属 22 种植物。其中,植物种类数量由高到低依次为禾本科(6 种)、苋科(4 种)和菊科(3 种),这 3 大科植物占全部植物的 77.5%,表明禾本科、苋科和菊科对阿拉善花棒人工林种植区的气候和环境适应性很强,该地区植被主要由耐旱性植物组成;通过对林下植被组成进一步分析可知,随着林龄的增加,林下植被的种类以及数量也逐渐增加,由此可见,随着年限的增加将极大地提升人工花棒林地内植物的多样性。

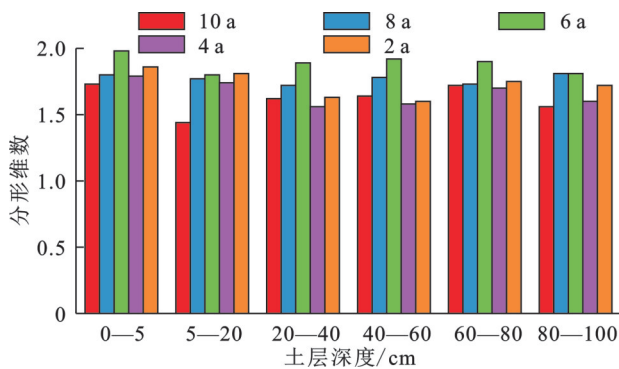


图 3 不同林龄人工花棒林土壤的分形维数变化

Fig. 3 Changes in fractal dimension of soil in *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages

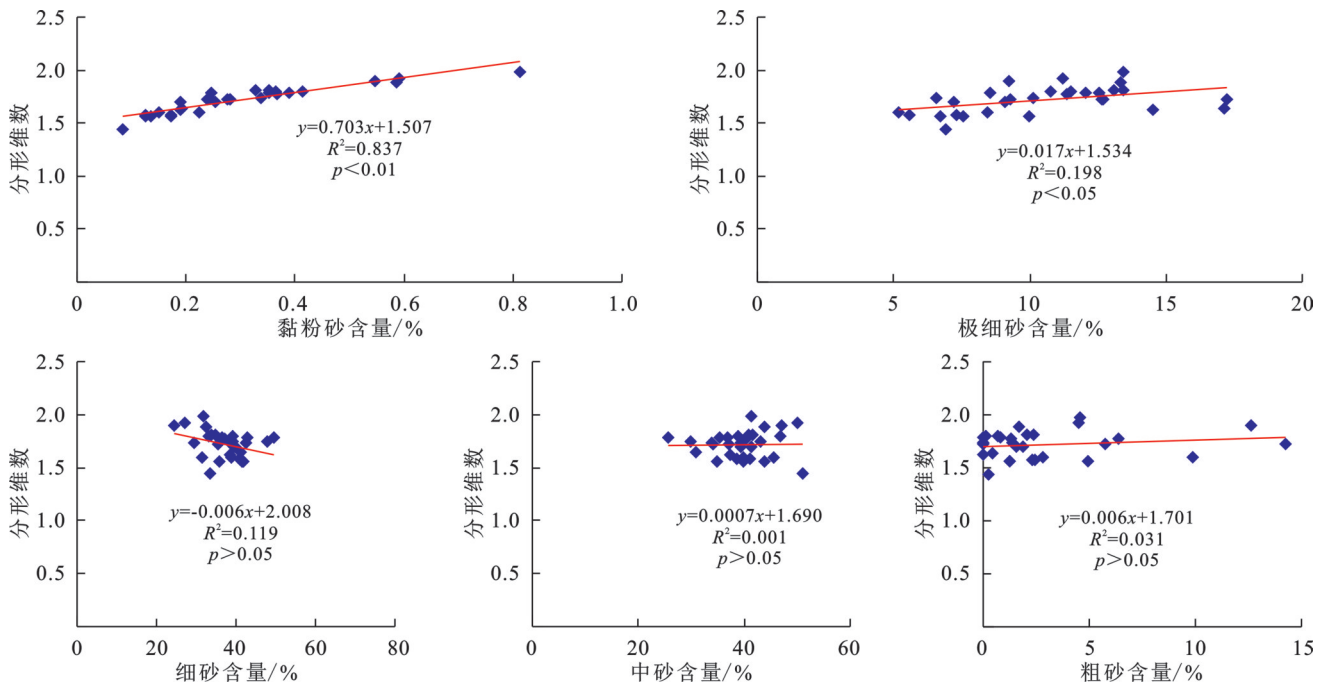


图 4 土壤粒级组成与分形维数的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between soil particle size composition and fractal dimension

## 2.7 不同林龄人工花棒林土壤粒径组成和植物多样性相关关系

通过对土壤粒径与粒度参数、多样性指数的相关关系图(图 5)可知,黏粉砂含量与分形维数和极细砂含量存在极显著正相关性( $p < 0.01$ ),其相关系数分别

## 2.6 不同林龄人工花棒林植被多样性指数变化特征

由表 3 可知,人工花棒林在不同林龄阶段的植被多样性指标呈现出显著差异( $p < 0.05$ )。进一步研究结果表明:Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数以及 Simpson 多样性指数,和林龄的增长呈现出正相关的关系。具体而言,随着林龄的递增,这 3 个关键性生物多样性指标均表现出持续上升的趋势。Margalef 丰富度指数具体表现为( $p < 0.05$ )为 10 a(1.05) > 8 a(1.02) > 6 a(0.96) > 4 a(0.66) > 2 a(0.2); Shannon-Wiener 多样性指数具体表现为( $p < 0.05$ )为 10 a(1.51) > 8 a(1.27) > 6 a(1.16) > 4 a(0.95) > 2 a(0.27); Simpson 多样性指数表现( $p < 0.05$ )为 10 a(0.72) > 8 a(0.66) > 6 a(0.61) > 4 a(0.52) > 2 a(0.14)。由此可见,样地林下植被种类、数量均随着林龄的增加而增加,这与上文 2.5 不同林龄人工花棒林植物组成变化特征分析中得出的结论相符。在相同树龄的花棒林中,10 a, 8 a, 6 a 和 4 a 的植物多样性指标由高到低依次表现为 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数。然而,对于 2 a 树龄的林分,由于其栽植时间较短,导致林地内植物种类相对较少,因此其 Pielou 均匀度指数反而显得较高。

达到 0.83, 0.36。此外,黏粉砂含量与分选系数也存在显著的正相关性( $p < 0.05$ ),相关系数为 0.33。但是,黏粉砂含量与峰度则表现出显著的负相关关系( $p < 0.05$ )相关系数为 -0.29,这表明黏粉砂含量与其他颗粒特征参数的相互作用具有量化依据。极细砂与分

形维数、平均粒径和分选系数均呈现极显著正相关关系( $p < 0.01$ )相关系数分别为0.35, 0.52, 0.38, 与峰度呈现极显著负相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数为-0.51, 与Margalef丰富度指数呈现显著负相关关系( $p < 0.05$ ), 相关系数为-0.31; 细砂与中砂、粗砂、分选系数和偏度均表现出极显著的负相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数分别为-0.56, -0.39, -0.6和-0.36, 细砂与峰度则呈现极显著的正相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数为0.41, 与Margalef丰富度指数的正相关关系也达到显著水平( $p < 0.05$ ), 相关系数为0.26; 中砂与偏度存在极显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数为0.61, 而

与平均粒径则呈现极显著的负相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数为-0.52; 粗砂含量与平均粒径呈现出显著的负相关性( $p < 0.01$ ), 相关系数为-0.36, 与分选系数的正相关关系也极为显著( $p < 0.01$ ), 其相关系数为0.4; 峰度与Margalef丰富度指数同样呈现极显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 相关系数为0.39, 且与Shannon-Wiener多样性指数的正相关关系在统计上显著( $p < 0.05$ ), 相关系数为0.26, 而其余植物多样性指数与土壤粒径相关性不显著。综合分析说明, 不同林龄花棒林土壤粒径受到黏粉砂、极细砂和细砂的影响较大, 其次, 随着土层深度的增加, 植被种类和数量增多, 多样性降低。

表2 不同林龄人工花棒林植物组成情况

Table 2 Plant composition of *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages

林龄/a	花棒株高/cm	花棒冠长/cm	花棒冠宽/cm	花棒基径/cm	林下主要植被
10	191.33±8.9b	194±3.51ab	190.8±6.09ab	26.46±5.63a	狗尾草 ( <i>Setaria viridis</i> )、沙鞭 ( <i>Psammochloa villosa</i> )、画眉草 ( <i>Eragrostis pilosa</i> )、沙米 ( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )、五星蒿 ( <i>Bassia dasyphylla</i> )、蓝刺头 ( <i>Echinops sphaerocephalus</i> )、糜蒿 ( <i>Artemisia blepharolepis</i> )、刺沙蓬 ( <i>Salsola tragus</i> )、虫实 ( <i>Corispermum hyssopifolium</i> )、沙芥 ( <i>Pugionium cornutum</i> )
8	178.33±5.68b	183.73±5.84ab	176.2±6.47ab	25.39±3.31a	针茅 ( <i>Stipa capillata</i> )、画眉草 ( <i>Eragrostis pilosa</i> )、三芒草 ( <i>Aristida adscensionis</i> )、狗尾草 ( <i>Setaria viridis</i> )、无芒隐子草 ( <i>Cleistogenes songorica</i> )、黄蒿 ( <i>Artemisia scoparia</i> )、蓝刺头 ( <i>Echinops sphaerocephalus</i> )、碱蓬 ( <i>Suaeda glauca</i> )、刺沙蓬 ( <i>Salsola tragus</i> )、骆驼蓬 ( <i>Peganum harmala</i> )
6	177.93±8.48b	221.73±7.41a	186.86±7.95ab	22.32±5.37a	白花黄芪 ( <i>Astragalus galactites</i> )、画眉草 ( <i>Eragrostis pilosa</i> )、刺沙蓬 ( <i>Salsola tragus</i> )、针茅 ( <i>Stipa capillata</i> )、三芒草 ( <i>Aristida adscensionis</i> )、沙鞭 ( <i>Psammochloa villosa</i> )、五星蒿 ( <i>Bassia dasyphylla</i> )、沙米 ( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )、油蒿 ( <i>Artemisia ordosica</i> )、鹌鹑 ( <i>Takhtajaniantha austriaca</i> )、蓝刺头 ( <i>Echinops sphaerocephalus</i> )、蝶果虫实 ( <i>Corispermum patelliforme</i> )、虫实 ( <i>Corispermum hyssopifolium</i> )
4	178.93±8.50b	199.13±8.13a	231.66±2.08a	18.20±5.22ab	沙鞭 ( <i>Psammochloa villosa</i> )、蓝刺头 ( <i>Echinops sphaerocephalus</i> )、沙米 ( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )、沙芥 ( <i>Pugionium cornutum</i> )、沙拐枣 ( <i>Calligonum mongolicum</i> )
2	94±7.34b	116±11.73b	112.8±10.13b	10.97±2.02b	沙米 ( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )

注:表中同列小写字母表示不同林龄花棒林在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

表3 不同林龄人工花棒林植物多样性指数

Table 3 Plant diversity indices of *Hedysarum scoparium* plantations of different stand ages

多样性指数	10 a	8 a	6 a	4 a	2 a
Margalef	1.05±0.01a	1.02±0.15a	0.96±0.21a	0.66±0.16b	0.2±0.02c
Shannon	1.51±0.11a	1.27±0.27ab	1.16±0.18ab	0.95±0.23b	0.27±0.08c
Simpson	0.72±0.05a	0.66±0.03a	0.61±0.10ab	0.52±0.11b	0.14±0.06c
Pielou	0.72±0.05a	0.66±0.05ab	0.55±0.4b	0.66±0.03ab	0.39±0.12c

注:表中同行写字母表示不同林龄花棒林在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

### 3 讨论

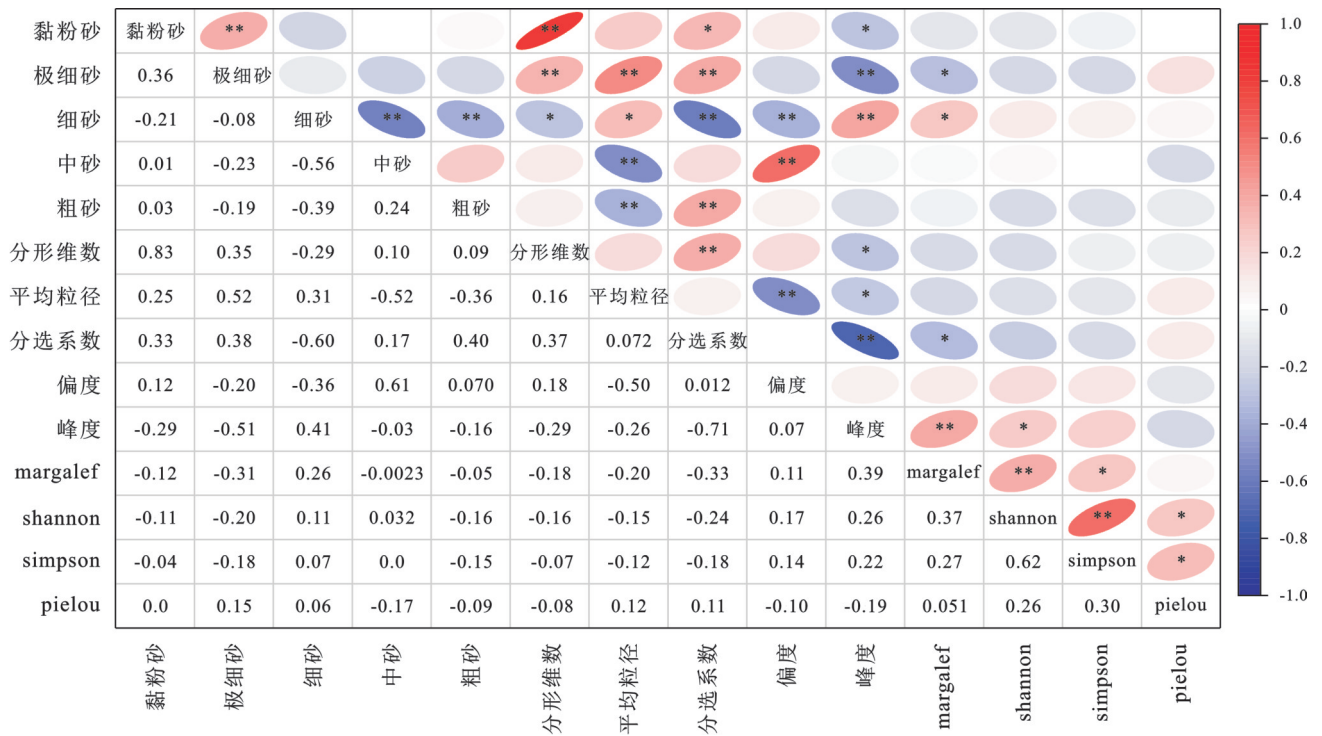
#### 3.1 不同林龄花棒林对土壤粒径的影响

在多种外部环境因素的影响下, 诸如降水量、温度、地形及坡度等, 与植被—土壤体系内部组成要素, 这些内部要素包括植被根系产生的分泌物、凋落物和

微生物等共同作用下, 显著影响土壤的粒度构成<sup>[19]</sup>。通过对研究区不同林龄花棒林下土壤粒径特征分析发现, 土壤颗粒主要集中在0.05~0.5 mm, 粒径<0.05 mm的黏粉砂粒所占比例较小, 粒径在0.05~0.5 mm之间的粉粒所占比例最高, 这与王月玲等<sup>[20]</sup>的研究结论相似。在本研究中土壤颗粒含量由高到低

依次为粉粒、砂粒、黏粒,随着花棒林生长年限的增加,植被对土壤颗粒组成的影响愈发明显,土壤中黏

土和粉土的比例将逐渐提高,而砂粒的含量则显现出不断下降的趋势,这与陈宇轩等<sup>[21]</sup>的研究结果相似。



注:\*\*代表在  $p < 0.01$  水平,相关性极显著;\*代表在  $p < 0.05$  水平,相关性显著。

图 5 土壤粒度组成、粒度参数与植物多样性的相关关系

Fig. 5 Correlation between soil particle size composition, particle size parameters, and plant diversity

研究区土壤平均粒径在 1.90~2.40  $\phi$  之间,土壤颗粒较细,偏度为极正,峰度表现为尖窄。这一现象的形成,主要是由于土壤中粉粒含量显著增加,而黏粒含量占总体颗粒含量的比例减少,尤其是,砂粒中的极细砂占比达到 70%,这直接造成粒度分布的不对称性以及波峰的显著集中现象<sup>[22]</sup>。在土壤粒度参数的分布上,0—20 cm 土层深度的差异尤为显著,这一发现与杜满义等<sup>[23]</sup>的研究结果相符。土壤表层的植物凋落物、浅层根系及土壤生物残体,经过微生物分解后形成腐殖质。这些腐殖质在土壤养分转化方面发挥着重要的促进作用,这些腐殖质不仅促进土壤养分的转化,还增强土壤的呼吸能力<sup>[24]</sup>,从而对土壤的颗粒组成产生影响。本试验所分析的土壤粒度参数在不同深度下未表现出显著变化,这一结果与 Zhao 等<sup>[25]</sup>研究成果基本一致。

分形维数对细砂粒径含量的变化最为敏感,研究结果显示,土壤的分形维数与土壤的粒径存在显著关联,整体表现趋势为随着土壤粒径的减小,土壤的分形维数逐步增大。在本试验中,不同林龄花棒林样地内各土层深度均以细砂体积百分含量最高,不同粒径土壤颗粒的体积分布与其分形维数呈现显著差异,其中以土壤分形维数与黏粉砂粒径百分含量的相关系数最大,这与刁二龙等<sup>[26]</sup>研究结果相似。

### 3.2 不同林龄花棒林对植物多样性的影响

随着林龄的增加,一年生草本植物和多年生草本植物种类和数量均显著增加,这与王国华等<sup>[27]</sup>研究结果一致。这主要是因为营建人工花棒林后,一年生和多年生种源随着风沙流不断在林下聚集,而林下环境中水分与养分的含量较为充足,这为草本植物的生长提供良好的条件。此外,灌木林地展现出较强的防风固沙能力及生态保育作用。通过灌木的遮挡,能够使草本植物避免受到风沙吹蚀的侵害,不仅对微环境,表层土壤水分均能起到改善作用,而且可以降低植物受干旱和高温的影响<sup>[28]</sup>。通过对植物多样性指数的综合分析可知,研究区内随着花棒种植年限的增加,植物多样性指数均表现出 10 a > 8 a > 6 a > 4 a > 2 a, 总体呈现出逐渐增大的趋势,这一现象与部分学者关于落叶松林<sup>[29]</sup>和红锥林<sup>[30]</sup>草本层多样性指数呈现“先降后升”趋势的研究结果并不一致。这种差异的产生或与林分特征及立地条件相关。在本研究中,花棒作为一种种植于沙漠边缘的防风固沙灌木林,其林分结构特征明显不同于乔木林,因此在植物多样性方面也体现出区别。

### 3.3 不同林龄花棒林下植被多样性与土壤粒径的关联研究

植物多样性与土壤颗粒结构存在着显著的生态

交互作用。在沙漠地区,土壤粒径直接影响到土壤的理化性质,细砂具有更好的保水性和养分保持能力,为植物的生长提供有利的环境;粗砂则因水分和养分的快速流失,不利于植物的生长和繁衍<sup>[31]</sup>。因此,土壤颗粒的分布状况影响着特定地区植被的生长和繁衍,而植物群落的多样性又对土壤颗粒分布形成反馈。在本研究中,5种不同林龄的人工花棒林在其外形上差异显著,特别是株高和冠幅差异较为显著,10 a林龄花棒林呈现出高而宽的状态,2 a林龄花棒林呈现出矮而窄的状态。由此可说明植被的形态结构不同可导致林下土壤粒径的表现程度也不尽相同,在0—100 cm土层深度中,土壤分形维数存在差异,并且在相同土层不同林龄之间也存在一定的差异。通过罗凤敏等<sup>[32]</sup>学者的研究表明,在沙漠生态系统中,土壤分形维数呈现逐渐上升的趋势,这一现象的出现,归因于在植物的阻挡下,能够有效地拦截风沙流中细小的颗粒物。由此说明土壤分形维数对于土壤保护以及土壤结构状况起恢复作用,并且在判断样地内土壤修复能力以及植物的固沙等方面有显著效果<sup>[33]</sup>。

土壤颗粒与分形维数及植物多样性指数存在显著关联。在本文研究中,细砂含量与植物多样性具有显著正相关关系,具体而言,随着林龄的增加,花棒生长指标显著增加,样地内固沙植物种类和数量同样显著增加,出现这一现象可以说明花棒随着林龄的增加,株高、冠幅等生长指标显著增长,地表拦截沙物质能力增加,细砂含量增加,使得土壤水分保持能力提高,因此,导致植物多样性显著提升。此外,土壤的分形维数与黏粉砂百分含量的相关系数为0.83,二者呈现出极显著正相关关系( $p < 0.01$ )。这进一步说明,土壤分形维数对黏粉砂百分含量的变化极为敏感,这与马媛等<sup>[34]</sup>研究结果相似。

## 4 结论

对腾格里沙漠东缘不同林龄人工花棒林(2, 4, 6, 8, 10 a)的土壤粒径和植物组成变化特征进行研究,结果发现:

(1) 不同林龄花棒林土壤颗粒以细砂和中砂为主,随着林龄的增加,土壤颗粒分布越细,分散程度减小,粒度分布趋于近对称。

(2) 5种不同林龄样地共调查到7科18属22种植物,随着林龄的增长,植物多样性指数均呈现出明显的上升趋势。

(3) 不同林龄花棒林中黏粉砂含量和极细砂含量分别与分形维数存在显著的正相关关系( $p < 0.01$ );峰度与Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性

指数均呈现极显著正相关关系( $p < 0.01$ )。

综上所述,花棒林的种植能够改善种植区的植被与土壤状况。

### 参考文献(References):

- [1] 贾瑞庭.沙区光伏电站不同植被恢复措施对土壤理化性质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.  
Jia R T. Influence of different vegetation restoration measures of pv power station in sandy area on soil physical and chemical properties [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [2] 李鹏,刘晓君,刘苑秋,等.退化红壤区不同植被恢复模式的土壤养分空间分布特征[J].中南林业科技大学学报,2023,43(8):113-124.  
Li P, Liu X J, Liu Y Q, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients after vegetation restoration in degraded red soil regions [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43 (8) : 113-124.
- [3] 张水琳,马丽娜,王妍,等.断陷盆地不同石漠化生态修复类型下土壤碳氮磷化学计量及酶活性特征[J].水土保持研究,2023,30(4):69-74.  
Zhang S L, Ma L N, Wang Y, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and enzyme activity under different ecological restoration types of rocky desertification in fault basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):69-74.
- [4] 张建贵,王理德,姚拓,等.祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究[J].草业学报,2019,28(5):15-25.  
Zhang J G, Wang L D, Yao T, et al. Plant community structure and species diversity differences in alpine grassland in the Qilian Mountains with different levels of degradation [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5):15-25.
- [5] 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源[J].土壤学报,2004,41(1):1-6.  
Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):1-6.
- [6] 刘志民,蒋德明,高红瑛,等.植物生活史繁殖对策与干扰关系的研究[J].应用生态学报,2003,14(3):418-422.  
Liu Z M, Jiang D M, Gao H Y, et al. Relationships between plant reproductive strategy and disturbance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (3) : 418-422.
- [7] 常学礼,赵文智,李秀梅,等.基于生态服务价值的张掖绿洲生态安全评价[J].自然资源学报,2010,25(3):396-406.  
Chang X L, Zhao W Z, Li X M, et al. Ecological security assessment based on the ecosystem service value in Zhangye oasis [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (3):396-406.
- [8] Li X R, Tan H J, He M Z, et al. Patterns of shrub spe-

- cies richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009,52(5):669-680.
- [9] 赵亚冲,彭佳乐,沈留记,等.南疆沙区不同林龄四翅滨藜人工林植物多样性与土壤理化性质[J].西北林学院学报,2024,39(2):189-195.  
Zhao Y C, Peng J L, Shen L J, et al. Plant diversity and soil physico-chemical properties of *Atriplex canescens* plantations with different ages in the sandy area of southern Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(2):189-195.
- [10] 常兆丰,樊宝丽,王强强.我国防沙治沙的现状、问题与出路:以民勤沙区为例[J].西北林学院学报,2012,27(4):93-99.  
Chang Z F, Fan B L, Wang Q Q. Status quo, problems and solutions to desertification combating in China: a case study of Minqin Desert in Gansu[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012,27(4):93-99.
- [11] 刘海跃,李欣玫,张琳琳,等.西北荒漠带花棒根际丛枝菌根真菌生态地理分布[J].植物生态学报,2018,42(2):252-260.  
Liu H Y, Li X M, Zhang L L, et al. Eco-geographical distribution of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Hedysarum scoparium* in the desert zone of northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018,42(2):252-260.
- [12] 田佳,曹兵,及金楠,等.防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J].农业工程学报,2014,30(23):192-198.  
Tian J, Cao B, Ji J N, et al. Biomechanical characteristics of root systems of *Hedysarum scoparium* and *Salix psammophila*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(23):192-198.
- [13] 郭自春,曾凡江,刘波,等.灌溉量对2种灌木光合特性和水分利用效率的影响[J].中国沙漠,2014,34(2):448-455.  
Guo Z C, Zeng F J, Liu B, et al. Effects of irrigations on photosynthetic characteristic and water use efficiency of *Calligonum mongolicum* and *Hedysarum scoparium*[J]. Journal of Desert Research, 2014,34(2):448-455.
- [14] 贾玉奎,罗凤敏,张景波,等.乌兰布和荒漠生态系统12种沙生灌木苗期的抗旱性[J].水土保持通报,2015,35(5):95-99,105.  
Jia Y K, Luo F M, Zhang J B, et al. Drought resistance of twelve desert shrubs at seedling stage in ulan buh desert ecosystem[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(5):95-99,105.
- [15] 丁国栋.风沙物理学[M].2版.北京:中国林业出版社,2010.  
Ding G D. Aeolian Physics[M].2nd Ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [16] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957,27(1):3-26.
- [17] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.
- [18] 潘仁燕.不同种植密度对杉木人工林长势及林下植被多样性的影响[J].绿色科技,2025,27(1):124-127.  
Pan R Y. Effects of different planting densities on growth and understory vegetation diversity of cunningham cancellation plantation[J]. Journal of Green Science and Technology, 2025,27(1):124-127.
- [19] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,1957:108-115.  
Huang C Y, Xu J M. Soil Science[M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 1957:108-115.
- [20] 王月玲,许浩,安钰,等.宁南黄土区典型人工林下土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J].北方园艺,2023(24):81-88.  
Wang Y L, Xu H, An Y, et al. Relationship between fractal characteristics of soil particle size distribution and soil nutrients under typical plantations in loess region of southern Ningxia[J]. Northern Horticulture, 2023(24): 81-88.
- [21] 陈宇轩,高广磊,张英,等.呼伦贝尔沙地风沙土粒径分布特征[J].北京林业大学学报,2019,41(8):124-130.  
Chen Y X, Gao G L, Zhang Y, et al. Particle size distribution of aeolian soils in Hulun Buir Sandy Land, Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(8):124-130.
- [22] 陈宇轩,张飞岳,高广磊,等.科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J].干旱区地理,2020,43(4):1051-1058.  
Chen Y X, Zhang F Y, Gao G L, et al. Soil particle size distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2020,43(4):1051-1058.
- [23] 杜满义,张连金,裴顺祥,等.不同类型油松混交林土壤物理特性[J].生态学杂志,2020,39(11):3588-3595.  
Du M Y, Zhang L J, Pei S X, et al. Soil physical characteristics in different types of *Pinus tabulaeformis* mixed forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(11): 3588-3595.
- [24] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997,17(5):469-476.  
Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997,17(5):469-476.
- [25] Zhao C L, Shao M A, Jia X X, et al. Particle size distribution of soils(0-500cm) in the Loess Plateau, China[J]. Geoderma Regional, 2016,7(3):251-258.
- [26] 刁二龙,曹广超,刘英,等.黑河源区不同植被类型土壤粒径分形特征研究[J].草地学报,2024,32(5):1459-1470.  
Diao E L, Cao G C, Liu Y, et al. Fractal characteristics of soil particle size on different vegetation types in the source area of the Heihe river[J]. Acta Agrestia

- Sinica, 2024,32(5):1459-1470.
- [27] 王国华,王佳琪,刘婧.晋西北丘陵风沙区柠条锦鸡儿人工林植被和土壤随林龄变化特征[J].应用生态学报,2024,35(1):62-72.  
Wang G H, Wang J Q, Liu J. Characteristics of vegetation and soil in *Caragana korshinskii* plantations in the hilly and sandy areas of northwestern Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(1):62-72.
- [28] Reeder J D, Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands [J]. Environmental Pollution, 2002,116(3):457-463.
- [29] 郭万军,张丛哲,李倩茹,等.燕山西部山区不同年龄落叶松人工林草本植物多样性[J].河北林果研究,2011,26(1):9-12.  
Guo W J, Zhang C Z, Li Q R, et al. Herb biodiversity of the *Larix* forests with different ages in north region of Yanshan mountain [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2011,26(1):9-12.
- [30] 尤业明,徐佳玉,蔡道雄,等.广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释[J].生态学报,2016,36(1):164-172.  
You Y M, Xu J Y, Cai D X, et al. Environmental factors affecting plant species diversity of understory plant communities in a *Castanopsis hystrix* plantation chronosequence in Pingxiang, Guangxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(1):164-172.
- [31] 董智今,展秀丽,丁小花.毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J].水土保持研究,2022,29(3):43-48,56.  
Dong Z J, Zhan X L, Ding X H. Fractal features of soil particles under different land uses in the southwestern edge of the mu us sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):43-48,56.
- [32] 罗凤敏,高君亮,郝玉光,等.乌兰布和沙漠东北缘5种土地利用类型土壤粒度特征[J].水土保持研究,2017,24(5):172-177.  
Luo F M, Gao J L, Hao Y G, et al. Soil grain size characteristics of five land use types in the northeastern margin of ulan buh desert [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(5):172-177.
- [33] 王国玲,苏志珠,毛丽,等.中国北方农牧交错带鄂尔多斯高原段土壤表层粒度特征[J].中国沙漠,2019,39(3):183-190.  
Wang G L, Su Z Z, Mao L, et al. Characteristics of soil surface grain size in Ordos Plateau along the agro-pastoral ecotone of North China [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(3):183-190.
- [34] 马媛,辛智鸣,蔺方春,等.乌兰布和沙漠土壤粒径与植物群落多样性特征分析[J].中国野生植物资源,2024,43(11):98-105.  
Ma Y, Xin Z M, Lin F C, et al. Characteristics of soil particle size and plant community diversity in ulan buh desert [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(11):98-105.

(上接第26页)

- [17] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992,12(4):1-9,18.  
Zhang X K, Xu J H, Lu X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992,12(4):1-9,18.
- [18] Li P, Xu G C, Lu K X, et al. Runoff change and sediment source during rainstorms in an ecologically constructed watershed on the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,664:968-974.
- [19] Marchamalo M, Hooke J M, Sandercock P J. Flow and sediment connectivity in semi-arid landscapes in SE Spain: Patterns and controls [J]. Land Degradation & Development, 2016,27(4):1032-1044.
- [20] Tang C J, Liu Y, Li Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, Southern China [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107956.
- [21] Mayerhofer C, Meißl G, Klebinder K, et al. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator - Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments [J]. Catena, 2017, 156: 184-196.
- [22] Hlavčová K, Danáčová M, Kohnová S, et al. Estimating the effectiveness of crop management on reducing flood risk and sediment transport on hilly agricultural land-A Myjava case study, Slovakia [J]. Catena, 2019, 172:678-690.
- [23] Chen C F, Zou X, Singh A K, et al. Effects of hillslope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2021,299:113672.
- [24] Dai L C, Guo X W, Zhang F W, et al. Seasonal dynamics and controls of deep soil water infiltration in the seasonally-frozen region of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Hydrology, 2019,571:740-748.
- [25] Fu T G, Liu J T, Gao H, et al. Surface and subsurface runoff generation processes and their influencing factors on a hillslope in northern China [J]. Science of the Total Environment, 2024,906:167372.
- [26] Fang N F, Wang L, Shi Z H. Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China [J]. Journal of Hydrology, 2017,552:387-395.