

DOI: 10.20103/j.stxb.202503180606

何文强, 王瑞霞, 田英, 李云飞, 王炳尧, 高艳红, 刘立超, 杨昊天. 毛乌素沙地南缘柠条固沙林演替过程中草本植物多样性与群落稳定性动态变化及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45(22): 11171-11183.

He W Q, Wang R X, Tian Y, Li Y F, Wang B Y, Gao Y H, Liu L C, Yang H T. Dynamics of understorey herbaceous plant diversity and community stability and its driving factors during succession of lemon strip sand fixation forests at the southern edge of the Mu Us Desert. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): 11171-11183.

# 毛乌素沙地南缘柠条固沙林演替过程中草本植物多样性与群落稳定性动态变化及其驱动因素

何文强<sup>1,2</sup>, 王瑞霞<sup>3</sup>, 田英<sup>4</sup>, 李云飞<sup>1,2</sup>, 王炳尧<sup>1,2</sup>, 高艳红<sup>1</sup>, 刘立超<sup>1</sup>, 杨昊天<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区管理局, 灵武 750400

4 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 银川 750002

**摘要:** 植物多样性对维持生态系统功能稳定性具有重要生态意义, 特别是在脆弱生态系统中。了解植被演替过程中林下草本植物多样性与稳定性之间的动态关系及其环境驱动因素对于有效的生态系统管理至关重要。以毛乌素沙地南缘不同演替阶段的柠条 (*Caragana korshinskii*) 固沙林为研究对象, 通过采用野外调查和室内分析相结合的方法, 系统探讨柠条林演替过程中林下草本群落多样性与稳定性的动态关系及其环境调控机制。研究表明: 随着演替的进行 (4—44a), (1) 草本群落盖度和株高显著增加 ( $P < 0.05$ ), 物种丰富度提升至 1.57 倍, 地上、地下生物量分别达到演替初期阶段的 3.45 和 2.70 倍; (2) Margalef 丰富度指数呈现单峰变化趋势, 于 28a 演替阶段达到峰值 (0.41), Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数整体呈现出增加的趋势; (3) 群落稳定性与 Pielou 均匀度指数变化趋势相似, 均呈现先增加而后趋于平稳的特征; (4) 回归分析表明群落稳定性与 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数及 Pielou 均匀度指数均呈极显著正相关关系 ( $P < 0.001$ ); (5) Mantel test 分析显示 pH、全氮 (TN) 等理化性质, C/P 化学计量比是驱动群落多样性-稳定性关系的环境因素 ( $P < 0.05$ ); (6) RDA 分析发现土壤含水率 (SWC) 和 pH 对林下草本群落多样性和稳定性有显著贡献, 贡献率分别为 34.0% ( $P < 0.01$ ) 和 27.2% ( $P < 0.05$ )。本研究验证了干旱区生态系统恢复过程中“时间-多样性”的正反馈机制, 为“生物多样性增强生态系统稳定性”的理论提供了实证支持, 同时阐明 pH 和水分协同调控是林下草本植物多样性和群落稳定性的核心机制。研究结果为沙漠生态系统植被恢复与可持续管理提供了重要的科学依据。

**关键词:** 固沙林演替; 林下草本植物; 植物多样性; 群落稳定性; 驱动因素

## Dynamics of understorey herbaceous plant diversity and community stability and its driving factors during succession of lemon strip sand fixation forests at the southern edge of the Mu Us Desert

HE Wenqiang<sup>1,2</sup>, WANG Ruixia<sup>3</sup>, TIAN Ying<sup>4</sup>, LI Yunfei<sup>1,2</sup>, WANG Bingyao<sup>1,2</sup>, GAO Yanhong<sup>1</sup>, LIU Lichao<sup>1</sup>, YANG Haotian<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**基金项目:** 宁夏回族自治区重点研发计划 (2023BEG02040, 2022BSB03072); 宁夏回族自治区农业科技自主创新资金项目 (NGSB-2021-14-04); 甘肃省自然科学基金 (23JRRA659)

**收稿日期:** 2025-03-18; **网络出版日期:** 2025-09-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanghaotian6516@163.com

3 *Ningxia Lingwu Baijitan National Nature Reserve Administration, Lingwu 750400, China*

4 *Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China*

**Abstract:** Plant diversity was ecologically important for maintaining the stability of ecosystem functions, especially in fragile ecosystems. Understanding the dynamic relationship between understory herbaceous plant diversity and stability during vegetation succession and its environmental drivers is essential for effective ecosystem management. In this study, the dynamic relationship between diversity and stability of understory herbaceous communities and its environmental regulation mechanism during the succession process of *Caragana korshinskii* sand-fixing forests at different stages of succession at the southern edge of the Mu Us Desert were systematically investigated by combining field investigation and laboratory analyses. The results showed that: with the succession (4a—44a), (1) Herbaceous communities cover and height exhibited significant increases ( $P < 0.05$ ). Species richness rose substantially, reaching 1.57 times the initial value observed in the earliest stage. Concurrently, both above-ground (AGB) and below-ground biomass (BGB) showed marked accumulation, achieving levels 3.45 times and 2.70 times greater, respectively, than those found at the onset of succession. (2) The Margalef index followed a distinct unimodal trajectory, peaking at the 28a succession stage (value: 0.41), while the Simpson index and Shannon-Wiener index displayed consistent overall increasing trends throughout the successional sequence. (3) The community stability and the Pielou index exhibited similar patterns of dynamic change, both showing an increase first and then stabilizing. Statistical analyses further elucidated key relationships: (4) Regression models established highly significant positive correlations between community stability and the Simpson index ( $P < 0.001$ ), Shannon-Wiener index ( $P < 0.001$ ), and Pielou index ( $P < 0.001$ ), which confirmed the intrinsic linkage between diversity components and stability. (5) Mantel tests identified critical environmental regulators, pinpointing soil physicochemical properties (specifically pH, total nitrogen content (TN), and the C/P stoichiometric ratio as significant drivers ( $P < 0.05$ ) shaping the diversity-stability relationship. (6) Redundancy Analysis (RDA) quantified the major environmental influences on herbaceous community structure and stability: Soil Water Content (SWC) emerged as the most influential factor, explaining a significant 34.0% ( $P < 0.01$ ) of the variation, followed closely by soil pH, which accounting for 27.2% ( $P < 0.05$ ) of the observed variance. This study verified the positive feedback mechanism of “time-diversity” in the process of ecosystem restoration in the arid zone, and provided empirical support for the theory of “biodiversity enhances ecosystem stability”. It was also clarified that the synergistic regulation of pH and moisture content was the core mechanism of herbaceous plant diversity and community stability in the understory. The results of this study provided an important scientific basis for the restoration and sustainable management of desert ecosystems.

**Key Words:** sand-fixing forest succession; understory herbaceous plants; plant diversity; community stability; driving factors

草本植物作为陆地生态系统的重要组成部分,其多样性与稳定性是维持生态系统功能和服务的关键基础<sup>[1]</sup>。草本层不仅是生态系统中物质循环与能量流动的重要载体,其多样性水平直接影响着生态系统的生产力、抗干扰能力及恢复潜力<sup>[2]</sup>。草本植物多样性和群落稳定性特征以及它们的相互关系一直是生态学研究热点<sup>[3]</sup>。经典理论认为,多样性通过功能冗余和互补效应增强群落稳定性<sup>[3]</sup>,相反,部分研究表明多样性可能降低稳定性甚至与群落稳定性间存在解耦现象<sup>[4-5]</sup>。群落多样性与稳定性的关系仍存在显著认知分歧<sup>[6]</sup>。在植被演替过程中,“时间-稳定性”的正反馈机制是一个经典的生态学理论,植物多样性和群落稳定性会随着演替时间的增加而增加<sup>[7]</sup>。林下草本层作为植被演替过程中的关键组分,其多样性与稳定性的协同变化对植被的可持续恢复具有重要指示意义。然而,在干旱沙区特殊生境下,特别是植被演替过程中,水分和养分的双重限制可能使林下草本多样性与稳定性的关系呈现非线性特征<sup>[8]</sup>,林下草本群落多样性与稳定性的关系尚不明确。随着演替的进行,林下草本植物群落是否仍遵循“时间-稳定性”的正反馈机制亟需开展

研究来验证。

固沙植被重建与演替被证实是遏制土地沙漠化、促进干旱沙区生态恢复最有效的方法<sup>[9]</sup>。固沙植被演替优先会改变植被分布格局<sup>[10]</sup>。固沙植被演替驱动群落结构从原本人工构建的单一木本植物群落逐渐被林下草本植物群落所取代,林下草本植物多样性显著增加<sup>[11]</sup>。林下草本植物通过种间竞争与资源分配突破人工林冠层遮蔽效应,形成斑块化分布格局<sup>[12-13]</sup>。其次,固沙植被演替会影响生态水文过程<sup>[14]</sup>。林下草本植物通过改善土壤结构进而改变降水入渗<sup>[15]</sup>、地表蒸发<sup>[16]</sup>及凝结水捕获<sup>[17-18]</sup>等水文过程,影响了土壤-植被系统的水量平衡。再者,林下草本层作为地表覆盖与地下生态的纽带,其物种多样性提升不仅直接增加维管束植物资源利用效率<sup>[19]</sup>,也通过根际分泌物介导的微生物互作网络驱动土壤动物与微生物多样性协同增长<sup>[20-24]</sup>,形成地上地下双向反馈的多样性维持机制。最后,林下草本层在固沙植被演替过程中对土壤水分、养分的改善具有显著影响<sup>[25]</sup>。固沙植被演替过程中形成的生物土壤结皮与植被层协同作用形成了独特的土壤水分再分配机制,表层持水能力的增强虽有利于林下草本植物的定殖<sup>[26]</sup>,却导致深层土壤水分补给受限<sup>[27-28]</sup>。这种水分格局的垂直异质性演变与枯落物累积驱动的养分富集过程进一步促进了土壤养分含量的提升<sup>[29]</sup>。目前大量研究充分论证了林下草本植物群落在固沙植被演替过程中的重要性,但尚未阐明林下草本群落多样性与稳定性的内在关联及环境调控机制,这限制了我们对干旱区生态系统恢复机理的系统性理解。

白芨滩地处毛乌素沙地南缘,是沙地向黄土高原过渡的关键生态屏障。该地区拥有不同年代建植的人工柠条固沙林,构成了一个较为完整的固沙植被演替序列,为开展固沙植被演替过程中植物群落组成和生态系统功能相关研究提供了理想场所。本文以毛乌素沙地南缘白芨滩不同演替阶段的柠条固沙林为研究对象,整合植被群落调查和土壤理化属性分析数据,拟解决以下三个核心问题:(1)柠条固沙林演替如何调控林下草本群落的多样性和稳定性特征?(2)林下草本群落多样性与稳定性的关系如何?(3)驱动草本群落多样性与稳定性关系的环境机制是什么?以期阐明沙地植被演替的“多样性-稳定性”协同机制,为干旱区生态恢复实践提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 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,地处毛乌素沙地西南边缘(37°49'—38°20'N, 106°20'—106°37'E),气候类型属于大陆性季风气候。年均降水量为 230 mm,主要集中在 7—9 月,约占全年降雨量的 60%。年均蒸发量为 2862.2 mm,年均气温为 6.5—8.8℃,年平均日照数为 2717 h,多年平均无霜期为 154 d,沙暴日数 35 d<sup>[30]</sup>。土壤类型主要为风沙土。人工固沙灌木物种主要为柠条(*Caragana korshinskii*)、细枝羊柴(*Corethroedron scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*);优势草本物种主要为沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置与植被群落调查

采用“空间代时间”的方法,于 2024 年 7 月选取 1980 年、1996 年、2009 年、2020 年建植的柠条固沙林的作为研究样地,分别代表该区柠条固沙林演替的第 4、15、28、44 年。在每个演替年限的固沙植被区设置 3 个样点,每个样点设置 3 个 10 m×10 m 的样方。所有样地设置均选择在丘底(坡度<3°),避免立地条件对实验结果的影响,同时为消除空间异质性的影响,每个灌木样方间隔不小于 100 m。在每个样方内,随机设置 6 个 1 m×1 m 的草本样方,用于林下草本植被群落的调查。采用便携式 GPS 记录样地的经纬度以及海拔高度信息。测定每个样方内各物种的高度、盖度、多度和频度等。高度采用实测法,盖度采用针刺法,多度采用计数法。植物地上部分采用收获法,根系生物量利用土钻法取样,分类清洗后于 60℃烘箱内烘干至恒重,称重获取地上和地下生物量。样地信息表见表 1。

表 1 样地基本信息表

Table 1 Basic information table of sample plots

演替年限 Succession years/a	建植时间 Establishment time	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	经纬度 Longitude and latitude		土壤类型 Soil types	维护措施 Maintenance measures	生物土壤 结皮盖度 Biological soil crust cover/%	郁闭度 Constriction/%	林下主要 草本植物 Predominant species
				经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude					
4	2020	1268	3	106.47581°	38.00609°	风沙土	围封	—	15	虫实 ( <i>C. hyssopifolium</i> )、沙蓬 ( <i>A. squarrosus</i> )
15	2009	1194	2	106.47805°	38.01929°	风沙土	围封	77	54	虫实 ( <i>C. hyssopifolium</i> )、 沙茴香 ( <i>Ferula bungeana</i> <i>Kitagawa</i> )、雾冰藜 ( <i>Grubovia</i> <i>dasyphylla</i> )
28	1995	1282	2	106.60450°	38.03461°	风沙土	围封	90	62	沙生针茅 ( <i>Stipa glareosa</i> )、沙 茴香 ( <i>F. bungeana</i> )、草木樨 ( <i>Melilotus officinalis</i> )、短花针 茅 ( <i>Stipa breviflora</i> )、虫实 ( <i>C.</i> <i>hyssopifolium</i> )、刺蓬 ( <i>Salsola</i> <i>tragus</i> )
44	1980	1345	3	106.74055°	38.07650°	风沙土	围封	93	52	虫实 ( <i>C. hyssopifolium</i> )、狗尾 草 ( <i>Setaria viridis</i> )、沙生针茅 ( <i>S. glareosa</i> )、雾冰藜 ( <i>G.</i> <i>dasyphylla</i> )、灰灰草 ( <i>Chenopodium album</i> )、沙茴 香 ( <i>F. bungeana</i> )、短花针茅 ( <i>S. breviflora</i> )

### 1.2.2 土壤样品采集与测定方法

采用五点法取表层 0—10 cm 土壤, 移除表面枯落物和根系残体等杂物后, 将 6 个草本样方中的土样充分混匀成一份样品。于室内自然风干、过 2 mm 筛, 研磨用于土壤理化性质测定。

土壤理化性质的测定参照鲍士丹的测定方法<sup>[31]</sup>。容重 (BD) 采用环刀法测定; 土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾氧化外加热法测定; 全氮 (TN) 采用半微量凯氏定氮法测定; 全磷 (TP) 采用 NaOH 碱溶-钼锑抗比色法测定; 土壤 pH 采用电位法测定。

### 1.3 数据处理与分析

植物群落多样性选用物种丰富度 (Margalef 丰富度指数)、优势度 (Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数) 和均匀度 (Pielou 均匀度指数) 来表征。物种丰富度主要反映样地内物种数目的多少; 优势度主要通过反映样地内各物种之间个体分配的均匀性来表示植物群落局域生境内的多样性; 均匀度反映样地内各物种个体数目分配的均匀程度<sup>[32]</sup>。主要计算公式参照马克平等<sup>[33]</sup>

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } E = H' / \ln S \quad (2)$$

$$\text{Simpson 多样性指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } R = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

式中,  $S$  为每个样方的物种数目,  $P_i$  为第  $i$  个物种的相对多度,  $N$  为样方中所有物种的个体数。

植物群落稳定性 (ICV)

植物群落稳定性以群落物种密度变异系数 ( $CV$ ) 的倒数 (ICV) 表示<sup>[34]</sup>:

$$\text{ICV} = \mu / \sigma \quad (5)$$

式中,  $\mu$  为样方内每个物种的平均密度,  $\sigma$  为每个物种密度的标准差, ICV 值越大, 群落稳定性越高, 也表示各

物种密度变异性较小。

使用 SPSS 22.0 中的单因素方差分析法 (One-Way ANOVA) 分析不同演替阶段林下草本群落特征、植物多样性、群落稳定性、土壤理化性质的差异 ( $P < 0.05$ ) 使用 Origin 2024 进行数据制图。使用 R.4.4.2 中的“linkET”包来完成 Mantel 检验。使用 Canoco 5.1 软件进行 RDA 分析。数据以平均值 $\pm$ 标准误的方式表示。

## 2 研究结果

### 2.1 柠条固沙林演替过程中土壤理化性质变化特征

不同演替阶段土壤理化性质差异显著(表 2,  $P < 0.05$ )。土壤含水率、pH、土壤有机碳、全氮、全磷均随着演替的进行呈现出增加的趋势,在演替 44a 时达到最大值,分别为 0.46%、8.49、1.40 (g/kg)、1.61 (g/kg)、0.45 (g/kg)。C/N 随着植被的演替呈现出先增加后减小的趋势,在演替 28a 时达到最大,为 6.53,在演替 44a 时达到最小,为 3.28。C/P 和 C/N 保持着相同的变化趋势,在演替 15a 时达到最大值,分别为 3.46、0.86,在演替 28a 时最小,分别为 0.78、0.14。土壤容重随着演替的进行呈现出波动下降的趋势,其大小表现为 4a (1.54 g/cm<sup>3</sup>) > 28a (1.53 g/cm<sup>3</sup>) > 44a (1.49 g/cm<sup>3</sup>) > 15a (1.46 g/cm<sup>3</sup>)。

表 2 不同演替阶段土壤理化性质

Table 2 Physicochemical properties of soils at different successional stages

演替时间 Succession times/a	土壤理化性质 Soil physical and chemical properties								
	土壤含水率 Soil water content/%	土壤容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	pH	土壤有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	C/N	C/P	N/P
4	0.07 $\pm$ 0.01b	1.54 $\pm$ 0.03a	7.56 $\pm$ 0.06d	0.47 $\pm$ 0.02d	0.58 $\pm$ 0.09b	0.12 $\pm$ 0.04b	5.19 $\pm$ 0.59b	1.29 $\pm$ 0.06b	0.36 $\pm$ 0.03b
15	0.11 $\pm$ 0.01b	1.46 $\pm$ 0.01b	7.93 $\pm$ 0.07c	0.79 $\pm$ 0.08c	0.65 $\pm$ 0.34b	0.17 $\pm$ 0.02b	5.20 $\pm$ 0.74ab	3.46 $\pm$ 0.80a	0.86 $\pm$ 0.27a
28	0.42 $\pm$ 0.08a	1.53 $\pm$ 0.01a	8.22 $\pm$ 0.05b	1.17 $\pm$ 0.05b	1.54 $\pm$ 0.12a	0.21 $\pm$ 0.02b	6.53 $\pm$ 0.73a	0.78 $\pm$ 0.07b	0.14 $\pm$ 0.02b
44	0.46 $\pm$ 0.05a	1.49 $\pm$ 0.01ab	8.49 $\pm$ 0.05a	1.40 $\pm$ 0.10a	1.61 $\pm$ 0.11a	0.45 $\pm$ 0.04a	3.28 $\pm$ 0.43ab	0.87 $\pm$ 0.06b	0.28 $\pm$ 0.03b

不同小写字母表示不同演替阶段土壤理化性质差异显著( $P < 0.05$ )

### 2.2 柠条固沙林演替过程中林下草本群落组成及生活型特征

柠条固沙林下共发现草本植物 11 种,分属 4 科 9 属(表 3)。固沙林演替前期,草本植物主要由一年生植物虫实和沙蓬组成。而随着演替的进行,多年生草本植物开始在林下草本群落中出现。草木樨、沙茴香、短花针茅、沙生针茅等二年生和多年生草本植物逐渐在林下草本群落中定殖。

### 2.3 柠条固沙林演替过程中林下草本群落数量特征

不同演替阶段林下草本植物群落数量特征差异显著(表 4,  $P < 0.05$ )。随着柠条固沙林演替的进行,草本群落的丰富度显著增加,演替后期(44a)群落丰富度为演替前期(4a)的 1.57 倍。草本群落的盖度在 28a 时达到最大,为 23.44%,株高在 44a 时达到最大,为 11.56 cm;群落密度随着演替的进行呈现出增加的趋势,表现为 44a (37.50 株/m<sup>2</sup>) > 28a (35.56 株/m<sup>2</sup>) > 15a (17.78 株/m<sup>2</sup>) > 4a (12.78 株/m<sup>2</sup>)。地上生物量和地下生物量整体随着演替的进行呈现出增加的态势,在 44a 时达到最大,分别为 6.97 g/m<sup>2</sup>、1.89 g/m<sup>2</sup>,是演替初期的 3.45 和 2.70 倍。

### 2.4 柠条固沙林演替过程中林下草本植物多样性和稳定性变化特征

不同演替阶段林下草本植物多样性和群落稳定性差异显著(图 1,  $P < 0.01$ )。随着固沙植被演替的进行, Margalef 丰富度指数整体呈现出先增加后减小的趋势,在 28a 时达到最大值,为 0.41;15a 时最小,为 0.15。Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数随着植被演替的进行均呈现出增加的趋势。而 Pielou 均匀度指数和群落稳定性呈现出相同的变化趋势,随着固沙植被演替的进行呈现出先增加而后趋于平稳的趋势。

表 3 不同演替阶段林下草本植物名录

Table 3 List of understorey herbaceous plants at different successional stages

演替时间 Succession times/a	物种名称 Species names	科 Family	属 Genus	生活型 Lifestyle
4	虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	苋科	虫实属	一年生
	沙蓬 <i>A. squarrosus</i>	苋科	沙蓬属	一年生
15	虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	苋科	虫实属	一年生
	沙茴香 <i>F. bungeana</i>	伞形科	阿魏属	多年生
	雾冰藜 <i>G. dasyphylla</i>	苋科	雾冰藜属	一年生
28	沙生针茅 <i>S. glareosa</i>	禾本科	针茅属	多年生
	沙茴香 <i>F. bungeana</i>	伞形科	阿魏属	多年生
	草木樨 <i>M. officinalis</i>	豆科	草木樨属	二年生
	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	禾本科	针茅属	多年生
44	虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	苋科	虫实属	一年生
	刺蓬 <i>S. tragus</i>	苋科	猪毛菜属	一年生
	虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	苋科	虫实属	一年生
	沙蓬 <i>A. squarrosus</i>	苋科	沙蓬属	一年生
	狗尾草 <i>S. viridis</i>	禾本科	狗尾草属	一年生
	沙生针茅 <i>S. glareosa</i>	禾本科	针茅属	多年生
	灰灰草 <i>C. album</i>	苋科	藜属	一年生
	沙茴香 <i>F. bungeana</i>	伞形科	阿魏属	多年生
短花针茅 <i>S. breviflora</i>	禾本科	针茅属	多年生	

表 4 不同演替阶段草本群落数量特征

Table 4 Quantitative characteristics of herbaceous communities in different successional stages

演替时间 Succession times/a	群落数量特征 Community quantitative characterization					
	地上生物量 Above-ground biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	地下生物量 Below-ground biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	盖度 Coverage/%	密度 Density/ (株/m <sup>2</sup> )	平均株高 Average height/cm	丰富度 Richness
4	2.02±0.48b	0.70±0.17b	2.56±0.44c	12.78±4.27b	8.81±1.62a	1.33±0.17b
15	6.29±1.35a	1.23±0.40ab	12.67±2.17b	17.78±5.74ab	11.51±1.25a	1.44±0.18ab
28	5.03±1.31ab	1.61±0.18a	23.44±4.69a	35.56±4.59a	9.26±1.11a	1.89±0.26ab
44	6.97±1.39a	1.89±0.34a	19.67±2.76ab	37.50±11.57a	11.56±1.92a	2.00±0.00a

不同小写字母表示不同演替阶段草本群落数量特征差异显著 ( $P < 0.05$ )

## 2.5 柠条固沙林演替过程中草本植物多样性与群落稳定性的关系

草本植物多样性与群落稳定性回归分析结果显示(图 2),群落稳定性随着 Margalef 丰富度指数的增加而递减( $P < 0.001$ ),随着 Pielou 均匀度指数( $P < 0.001$ )、Simpson 多样性指数( $P < 0.001$ )和 Shannon-Wiener 多样性指数( $P < 0.001$ )的增加而呈现出显著增加的趋势( $P < 0.001$ )。

## 2.6 柠条固沙林演替过程中林下草本植物多样性与稳定性的调控因素

Mantel test 结果表明:草本群落稳定性与土壤 pH、含水率、全氮和有机碳等土壤属性密切相关,草本植物多样性与土壤含水率、有机碳、全氮、C/P 等因素密切相关。土壤有机碳、全氮、pH 与地上生物量、地下生物量、草本群落盖度、密度等植被因素呈现出显著正相关关系;土壤含水率只与草本群落盖度和密度显著相关(图 3,  $P < 0.05$ )。

二维排序图(图 4)表明各影响因子能够较好的解释群落多样性和稳定性。草本群落特征、土壤养分含量与 Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数等表征群落多样性的指数呈正相关关系,与群落稳定性也呈正相关关系。土壤 pH 和土壤含水率是影响林下草本群落多

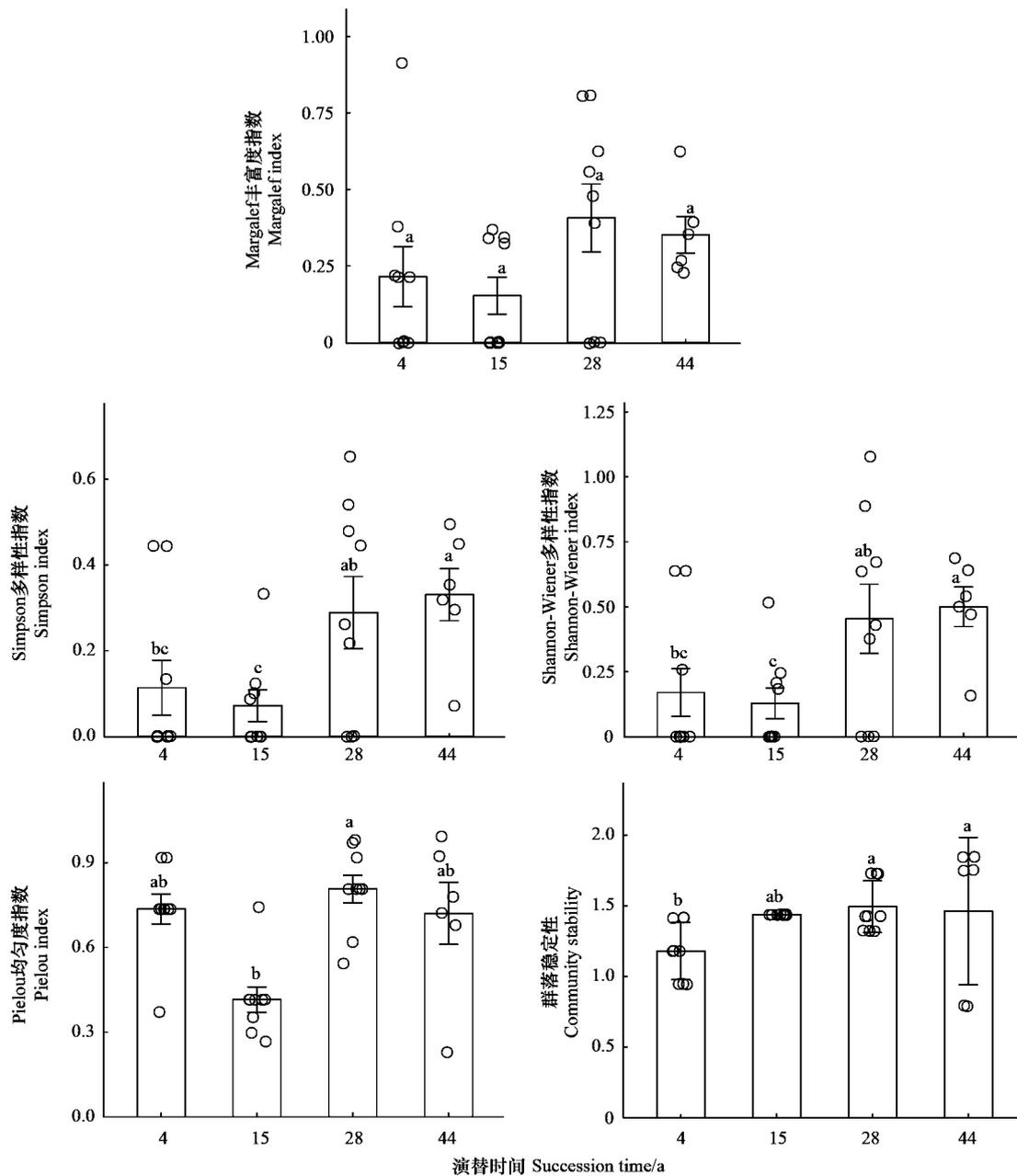


图 1 固沙植被演替过程中草本植物多样性和群落稳定性变化特征

Fig.1 Characteristics of changes in herbaceous plant diversity and community stability during sand fixation vegetation succession

不同小写字母表示不同演替阶段林下草本植物多样性和群落稳定性差异显著( $P < 0.05$ )

多样性和稳定性的主要影响因子,其贡献率分别为 34.0% ( $P < 0.01$ ) 和 27.2% ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 柠条固沙林演替对林下草本群落多样性和稳定性的影响

植被演替的研究是解决生态系统结构和功能时间动态的一种有效的方法,演替可以改变林下草本植物多样性和群落稳定性<sup>[35-36]</sup>。本研究发现,随着演替的进行,Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数以及 Shannon-Wiener 多样性指数整体呈现出增加的趋势,揭示了干旱区植被恢复中“时间-多样性”的正反馈机制。这一发现与 Li 等<sup>[7]</sup>和侯等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。这一现象可归因于演替过程中多尺度生态机制的协同作用:

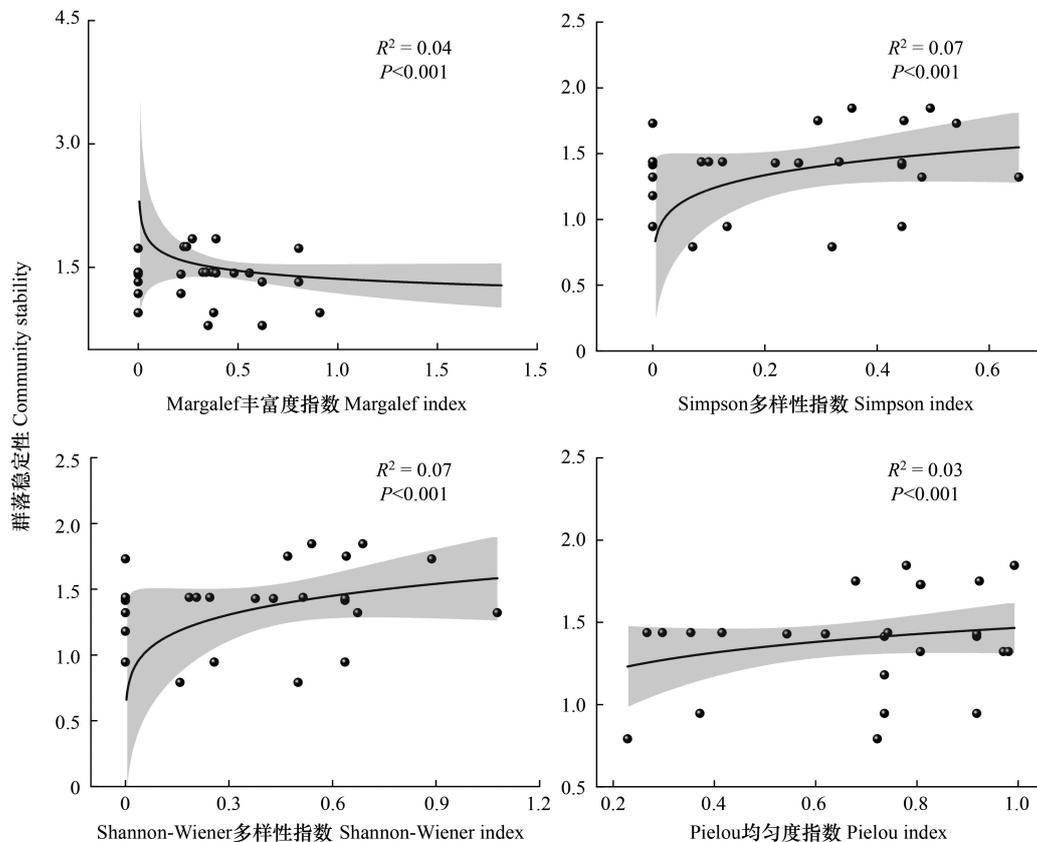


图2 草本植物多样性和群落稳定性的关系

Fig.2 Relationship between herbaceous plant diversity and community stability

图中灰色阴影部分代表 95% 置信区间

在演替早期阶段,固沙植被通过风蚀控制与表层土壤改良为草本植物的定居创造基础条件;在演替中后期阶段主要通过凋落物输入与根系分泌物(如羧酸类化合物)驱动土壤有机碳(SOC)的异质性积累,形成高低SOC交错分布的微生境斑块<sup>[38-40]</sup>。本研究结果表明,植被演替初期,林下草本植物群落主要由一年生草本植物组成,而随着演替的进行,多年生草本植物逐渐在林下定殖。随着固沙植被演替的进行,不同生活型草本植物在资源斑块间呈现显著的生态位分化,一年生草本植物在低养分斑块占据竞争优势,而多年生草本植物偏好高养分区域,这种生态位分化降低了种间竞争排斥强度,支持了 Tilman 的资源比率假说(Resource Ratio Hypothesis),即资源异质性通过限制生态位重叠促进物种共存进而提高植物的多样性和群落稳定性<sup>[41]</sup>。本研究还发现 Pielou 均匀度指数随固沙植被的演替逐步升高,不仅强化了物种分布均衡性,更通过增强生态位互补效应巩固了多样性-稳定性维持机制。此外,演替进程中灌木郁闭度的增加形成正向反馈循环:冠层覆盖扩展促进凋落物积累,经淋溶作用释放的养分持续改善土壤肥力,为林下草本群落的稳定发展提供持久驱动力,进一步增强了群落稳定性<sup>[42]</sup>。这些发现系统阐释了固沙植被演替驱动林下草本多样性和群落稳定性提升的多维机制,为理解干旱区生态系统恢复的稳定性维持提供了新的理论支撑<sup>[39]</sup>。

### 3.2 柠条固沙林演替过程中林下草本群落多样性和稳定性的关系

草本群落的多样性与稳定性之间的关系一直是生态学研究的核心问题之一。本研究通过回归模型证实草本群落 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数与群落稳定性之间存在显著正向关联(图 4)。这与 Li 等<sup>[43]</sup>在草地的长期实验结果一致,这表明林下草本植物多样性与群落稳定性的关系遵循“多样性增强稳定性”的假说<sup>[44]</sup>。这种关联可能源于多维生态机制耦合作用:高多样性群落通过优

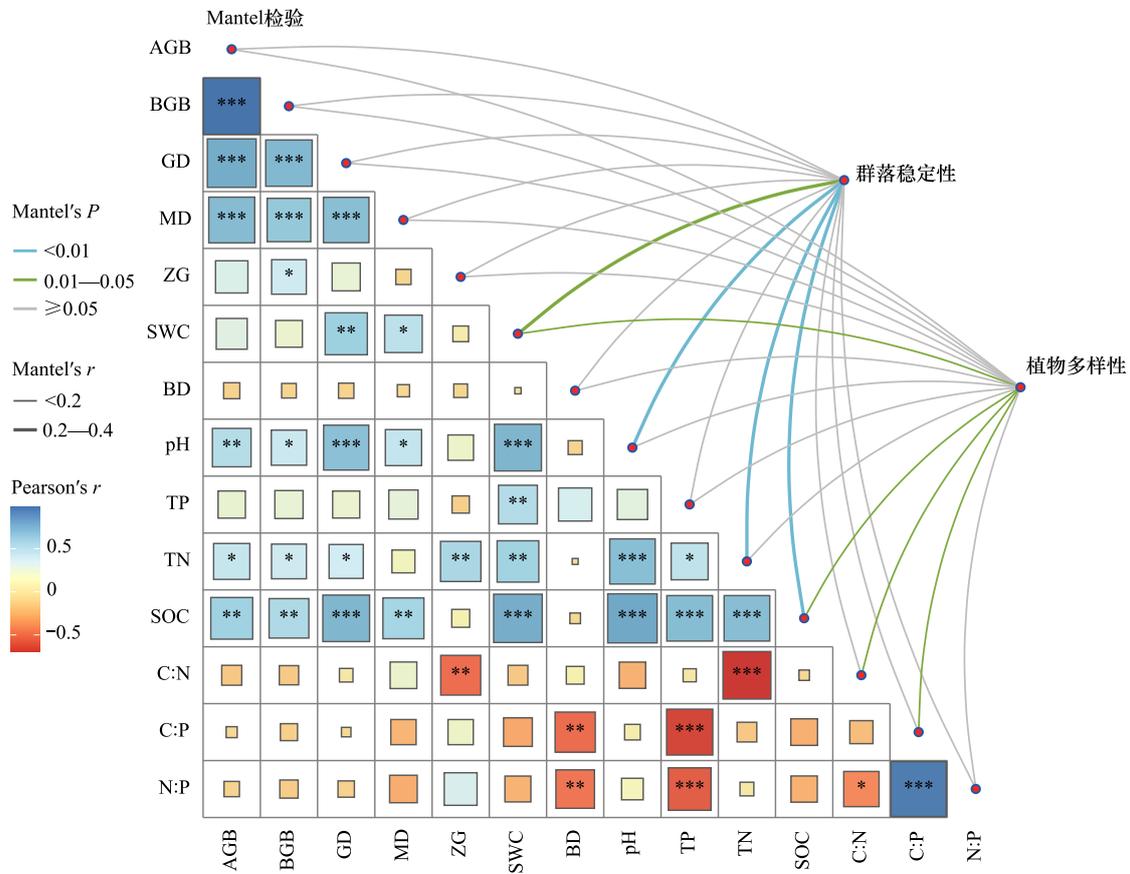


图3 草本植物多样性和群落稳定性与环境因子的 Mantel 检验

Fig.3 Mantel test for herbaceous plant diversity and community stability in relation to environmental factors

AGB:地上生物量;BGB:地下生物量;GD:盖度;MD:密度;ZG:株高;R:丰富度;SWC:土壤含水率;BD:土壤容重;TP:土壤全磷;TN:土壤全氮;SOC:土壤有机碳;C:N:碳氮比;C:P:碳磷比;N:P:氮磷比;\*、\*\*和\*\*\*分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 显著性水平下具有统计学意义

化资源利用效率与强化生态位互补效应,促进光、水分及养分的空间-时间分异利用,进而增强群落的整体稳定性<sup>[45]</sup>。但是,本次研究发现 Margalef 丰富度指数与群落稳定性呈显著的负相关关系,这主要是因为高 Margalef 值可能意味着群落中物种数目多,但每个物种的个体数较少,在这种情况下,种群较小的物种更容易因环境波动或干扰而暂时退出群落,导致群落整体稳定性下降<sup>[46]</sup>。因而单纯依靠 Margalef 丰富度指数可能不足以预测群落稳定性,而 Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数更能反映群落的抗干扰能力,衡量群落的稳定性<sup>[47]</sup>。值得注意的是,本研究发现多样性指数与群落稳定性呈显著的正效应,但是与地上和地下生物量均无显著相关关系,表明群落稳定性与多样性正效应关系的内在机制并非由生产力主导。这与 Yang 等<sup>[48]</sup>的研究结果不同,却与 Wang<sup>[3]</sup>等揭示的全球尺度规律—生物多样性增强了草本植物群落稳定性,而不是提高植物生产力形成理论呼应(即多样性主要促进生态系统功能的稳定性,而不是生态系统功能)。这一分歧可能源于不同生态系统的功能冗余缓冲机制差异。高多样性群落中,具有相似功能性状的物种可通过“生态位替补”效应,降低了种间竞争强度,从而通过优化资源利用效率而非提高单位生产力来增强稳定性,进而在环境扰动时维持群落功能完整性<sup>[49]</sup>,这种缓冲能力的空间异质性可能是导致不同研究结论的主要原因。

3.3 柠条固沙林演替过程中林下草本群落多样性和稳定性的调控因素

本研究发现,随着柠条固沙林演替的进行,Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数与土壤水分、

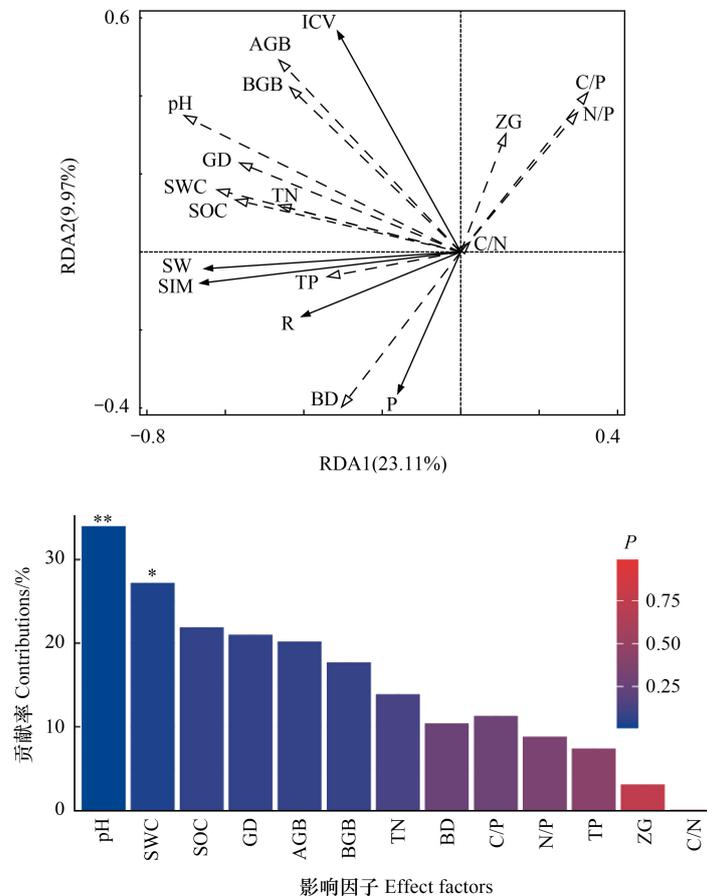


图4 草本植物多样性和群落稳定性与环境因子的 RDA 分析

Fig.4 RDA analysis of herbaceous plant diversity and community stability in relation to environmental factors

RDA: 冗余分析 Redundancy analysis; ICV: 群落稳定性; SW: Shannon-Wiener 多样性指数; SIM: Simpson 多样性指数; R: Margalef 丰富度指数; P: Pielou 均匀度指数; \*, \*\* 和 \*\*\* 分别表示在  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  和  $P < 0.001$  显著性水平下具有统计学意义

养分呈现出同步增长趋势,这一发现与早期研究揭示的土壤-植被互动模式高度契合,即二者通过动态反馈形成共生依存关系<sup>[50]</sup>,土壤养分含量对物种多样性具有决定性调控作用<sup>[51]</sup>。本次研究结果证实土壤水分和养分含量对林下草本群落多样性和稳定性均产生显著正向影响,其作用机制主要可从以下两方面解释。一方面,水分和养分的空间异质性塑造了多样化的生态位格局<sup>[52]</sup>,有利于维持较高的物种多样性,进而促进群落稳定性的提高<sup>[49]</sup>。在沙漠生态系统中,水分作为主要限制因子,水分胁迫不仅加剧了植物对养分的竞争,更通过限制物种定居能力进而影响草本群落的多样性<sup>[53-54]</sup>。同时,水分条件还会影响林下草本植物的繁殖方式和成功率,以及种子的传播和萌发。例如,在湿润环境中,一些靠水力传播种子的植物更容易扩散和建立新个体,从而增加群落的物种丰富度;而在干旱条件下,植物可能会减少有性繁殖,转而无性繁殖等方式维持种群数量,这可能会导致群落内物种组成的相对稳定,进而影响林下草本植物的多样性<sup>[55]</sup>。随着演替的进行,土壤养分以及保水能力的协同提升,为更多物种的共存创造了资源基础,缓解了竞争压力,有效促进了群落多样性的增长,进而影响到群落的稳定性<sup>[56]</sup>。另一方面,草本植物通过根系重塑土壤微环境,形成双向反馈机制<sup>[57]</sup>。根系网络通过改善了土壤结构,进而加速养分循环进程,这种物理性改造与生物化学作用的协同,显著提升了生态系统的资源利用效率,进而影响草本群落稳定性<sup>[58-59]</sup>。土壤水分和养分条件的改善反向作用于植物的功能性状,通过优化生长速率、增强抗逆性等途径影响草本群落多样性和稳定性,最终形成“资源优化-性状适应-稳定性提升”的级联效应<sup>[60]</sup>。土壤 pH 作为影响营养元素有效性和表征植物,生存适宜度

的关键指标<sup>[61]</sup>。本研究还发现土壤 pH 对多样性有显著影响,这与任学敏等<sup>[62]</sup>和胡冬等人<sup>[8]</sup>的研究结果一致,主要是因为土壤 pH 可能会影响土壤养分的有效性,进而影响植物多样性,最终影响到群落稳定性<sup>[8]</sup>。本研究是通过空间代替时间的方法,利用野外调查、采样和室内分析来探究植物多样性和群落稳定性的关系及其调控因子,未来的研究还需进行长期的定位观测结合控制实验来验证土壤水分和养分动态变化对林下草本群落多样性和稳定性的长期影响,同时量化功能冗余,探讨群落多样性与功能冗余对群落稳定性影响的差异。

#### 4 结论与展望

柠条固沙林演替在时间尺度上显著增加了草本群落多样性和稳定性。随着柠条固沙演替的进行, Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均呈现出增加的趋势,草本群落稳定性与 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数存在显著正向关联,土壤水分和 pH 对草本植物多样性和稳定性有显著的贡献。研究结果印证了干旱区植被恢复中“时间-多样性”的正反馈机制,支持了“植物多样性增强群落稳定性”的理论假说,阐明了水分和 pH 是驱动林下草本群落多样性和稳定性的主要环境因子。本研究可进一步深化对固沙植被演替过程中林下草本群落多样性与稳定性的理解,还能为提升生态工程可持续性提供科学依据。同时,本研究通过量化“时间-多样性-环境”多维互馈机制,证实草本层多样性提升可通过资源优化和土壤正反馈增强固沙群落稳定性,而稳定性维持又为多样性发展提供生态位空间。这一协同关系为干旱区植被恢复提供了“以多样性驱动稳定性,以稳定性保障固沙功能”的范式,助力实现从“沙困人退”到“沙绿民富”的转型。未来需结合遥感、基因组学等技术深化机理研究,并发展适应性管理框架以应对气候变化挑战。同时开发基于多样性指标的风蚀动态预测模型。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Yanitskiy V. The impact of herbaceous plants on biodiversity and stability of pine plantations in Western Polissia. *Plant and Soil Science*, 2024, 15 (2): 42-54.
- [ 2 ] Loreau M, Hector A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 2001, 412(6842): 72-76.
- [ 3 ] Wang Y F, Cadotte M W, Chen Y X, Fraser L H, Zhang Y H, Huang F M, Luo S, Shi N Y, Loreau M. Global evidence of positive biodiversity effects on spatial ecosystem stability in natural grasslands. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3207.
- [ 4 ] Campbell V, Murphy G, Romanuk T N. Experimental design and the outcome and interpretation of diversity-stability relations. *Oikos*, 2011, 120 (3): 399-408.
- [ 5 ] Cardinale B J, Gross K, Fritschie K, Flombaum P, Fox J W, Rixen C, van Ruijven J, Reich P B, Scherer-Lorenzen M, Wilsey B J. Biodiversity simultaneously enhances the production and stability of community biomass, but the effects are independent. *Ecology*, 2013, 94(8): 1697-1707.
- [ 6 ] 司瑞, 刘冰, 赵文智, 朱剑岑, 赵颖. 黑河下游尾间区植物群落物种多样性与稳定性格局. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 174-184.
- [ 7 ] Li W J, Zhou X, Xiang Z Q, Li J H, Wang S P, Loreau M, Jiang L. Biomass temporal stability increases at two spatial scales during secondary succession. *Journal of Ecology*, 2023, 111(7): 1575-1586.
- [ 8 ] 胡冬, 吕光辉, 王恒方, 杨启, 蔡艳. 水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应. *生态学报*, 2021, 41(17): 6738-6748.
- [ 9 ] 张志山, 韩高玲, 霍建强, 黄日辉, 薛书文. 固沙灌木柠条锦鸡儿和中间锦鸡儿木质部导水与叶片光合能力对土壤水分的响应. *植物生态学报*, 2023, 47(10): 1422-1431.
- [ 10 ] 李新荣, 张志山, 王新平, 刘立超, 黄磊. 干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 845-852.
- [ 11 ] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [ 12 ] Wang X P, Li X R, Xiao H L, Berndtsson R, Pan Y X. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert. *Hydrological Processes*, 2007, 21(1): 72-79.
- [ 13 ] Pan Y X, Wang X P, Jia R L, Chen Y W, He M Z. Spatial variability of surface soil moisture content in a re-vegetated desert area in Shapotou, Northern China. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(9): 1675-1683.
- [ 14 ] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 高艳红, 刘立超, 王新平. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 257-266.
- [ 15 ] 冯伟. 毛乌素沙地东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [ 16 ] Zhang Z S, Liu L C, Li X R, Zhang J G, He M Z, Tan H J. Evaporation properties of a revegetated area of the tengger desert, North China.

- Journal of Arid Environments, 2008, 72(6): 964-973.
- [17] 陈晓涵. 库布齐沙漠东缘不同类型固沙灌丛下地表凝结水特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2023.
- [18] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F. Dew formation characteristics in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou area, Northern China. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(3/4): 265-272.
- [19] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 257-261.
- [20] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 潘成臣. 人工固沙植被恢复对地表节肢动物群落组成及多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38(4): 1357-1365.
- [21] 杨敏, 刘任涛, 曾飞越, 吉雪茹, 方进, 赵文智. 腾格里沙漠东南缘人工固沙植被演替地面节肢动物群落多样性分布特征. *生态学报*, 2024, 44(1): 428-439.
- [22] 王少昆, 黄文达, 连杰, 罗永清, 岳祥飞, 张腊梅. 中国科学院西北生态环境资源研究院乌拉特荒漠草原研究站, 科尔沁沙地植被恢复对土壤微生物多样性的影响. 2018.
- [23] 张东旭. 固沙林恢复下枯落物-土壤连续体微生物群落的演变特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [24] 张力斌, 何明珠, 张克存, 安志山, 王金国, 惠迎新, 贾小龙. 干旱风沙区植被重建初期对土壤微生物群落结构的影响. *干旱区地理*, 2022, 45(6): 1916-1926.
- [25] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 66-74.
- [26] Li X R, Xiao H L, He M Z, Zhang J G. Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions. *Ecological Engineering*, 2006, 28(2): 149-157.
- [27] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 赵洋, 黄磊, 贾荣亮, 宋光. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究. *科学通报*, 2018, 63(23): 2320-2334.
- [28] 张定海, 李新荣, 陈永乐. 腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究. *生态学报*, 2016, 36(11): 3273-3279.
- [29] 王新源, 兰芳芳, 马仲武, 陈萍, 唐霞, 连杰, 王旭洋, 曲浩. 治沙措施通过植物群落的质量效应驱动土壤因子变化——以玛曲高寒草甸沙化区为例. *生态学报*, 2023, 43(1): 70-81.
- [30] 于双, 李小伟, 杨学霞, 王瑞霞, 杨君珑, 马龙. 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.
- [31] 吕小娜. 山西省耕地土壤养分分析——评《土壤农化分析(第三版)》. *灌溉排水学报*, 2021, 40(10): 145.
- [32] 林方美, 姜川, 曾小玲, 任燕, 金艳强, 冯德枫, 陈远洋, 刘成刚, 陈殊洁. 热带不同土地利用方式林下植被多样性和生物量分配特征及其季节动态. *生态学报*, 2024, 44(20): 9379-9390.
- [33] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 II  $\beta$  多样性的测度方法. *生物多样性*, 1995, (1): 38-43.
- [34] 张馨文, 安慧, 刘小平, 文志林, 王波, 杜忠毓. 短期氮添加对荒漠草原植物群落组成及稳定性的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2400-2409.
- [35] Lu C X, Zhao T Y, Shi X L, Cao S X. Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 1213-1222.
- [36] Tateno R, Taniguchi T, Zhang J, Shi W Y, Zhang J G, Du S, Yamanaka N. Net primary production, nitrogen cycling, biomass allocation, and resource use efficiency along a topographical soil water and nitrogen gradient in a semi-arid forest near an arid boundary. *Plant and Soil*, 2017, 420(1): 209-222.
- [37] 缙倩倩, 刘婧, 王国华, 赵峰侠. 晋西北丘陵风沙区柠条林下草本植物群落组成和种群生态位变化特征. *生态学报*, 2022, 42(22): 9069-9090.
- [38] Li X R, Wang X P, Li T, Zhang J G. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(3): 147-154.
- [39] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, Zhang H, Zhao L Y, Drake S. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1): 1-8.
- [40] Wang S K, Zhao X Y, Qu H, Zuo X A, Lian J, Tang X, Powers R. Effects of shrub litter addition on dune soil microbial community in horqin sandy land, northern China. *Arid Land Research and Management*, 2011, 25(3): 203-216.
- [41] Tilman D. The resource-ratio hypothesis of plant succession. *The American Naturalist*, 1985, 125(6): 827-852.
- [42] Pardon P, Reubens B, Reheul D, Mertens J, De Frenne P, Coussement T, Janssens P, Verheyen K. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 98-111.
- [43] Li Y, Schuldt A, Ebeling A, Eisenhauer N, Huang Y Y, Albert G, Albracht C, Amyntas A, Bonkowski M, Bruehlheide H, Bröcher M, Chesters D, Chen J, Chen Y N, Chen J T, Ciobanu M, Deng X L, Fornoff F, Gleixner G, Guo L D, Guo P F, Heintz-Buschart A, Klein A M, Lange M, Li S, Li Q, Li Y B, Luo A R, Meyer S T, von Oheimb G, Rütten G, Scholten T, Solbach M D, Staab M, Wang M Q, Zhang N L, Zhu C D, Schmid B, Ma K P, Liu X J. Plant diversity enhances ecosystem multifunctionality *via* multitrophic diversity. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8

- (11): 2037-2047.
- [44] García-Palacios P, Gross N, Gaitán J, Maestre F T. Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(33): 8400-8405.
- [45] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379(6567): 718-720.
- [46] 钱莲文, 吴承祯, 洪伟, 陈睿. 长苞铁杉林林隙内外群落多样性及稳定性. *福建林学院学报*, 2005(3): 202-205.
- [47] 唐诚, 刘彤, 刘学录, 刘超. 古尔班通古特沙漠西南缘梭梭群落多样性和稳定性研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(8): 148-153.
- [48] Yang Z L, Zhang Q, Su F L, Zhang C H, Pu Z C, Xia J Y, Wan S Q, Jiang L. Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 154-163.
- [49] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer T M, Bonin C, Bruelheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Polley H W, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, van der Putten W H, van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 2015, 526(7574): 574-577.
- [50] Tilman D. Resource competition and community structure. Princeton university press, 1982.
- [51] Li J, Zhao C, Zhu H, Li Y, Wang F. Effect of plant species on shrub fertile island at an oasis-desert ecotone in the South Junggar Basin, China. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71(4): 350-361.
- [52] Shu Y, Jiang L, Liu F, Lv G. Effects of plant diversity and abiotic factors on the multifunctionality of an arid desert ecosystem. *Plos one*, 2022, 17(6): e0266320.
- [53] Grace J B, Anderson T M, Seabloom E W, Borer E T, Adler P B, Harpole W S, Hautier Y, Hillebrand H, Lind E M, Pärtel M, Bakker D J, Buckley M Y, Crawley M J, Damschen E I, Davies K F, Fay P A, Firn J, Gruner D S, Hector A, Knops J M H, MacDougall A S, Melbourne B A, Morgan J W, Orrock J L, Smith, M. D. Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness. *Nature*, 2016, 529(7586): 390-393.
- [54] 李新荣. 中国沙区生态重建与恢复的生态水文学基础. 科学出版社, 2016.
- [55] 周红娟, 刘子赫, 刘柯言, 张初蕊, 胡旭, 韩璐, 陈立欣. 不同降雨条件下北京土石山区混生乔灌木植物的水分吸收和生态位特征. *植物生态学报*, 2024, 48(9): 1089-1103.
- [56] Cao C, Jiang S, Ying Z, Zhang F, Han X. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1467-1475.
- [57] Van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, Bezemer T M, Casper B B, Fukami T, Kardol P, Klironomos J N, Kulmatiski A, Schweitzer J A, Suding K N, Van de Voorde T F G, Wardle, D. A. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of ecology*, 2013, 101(2): 265-276.
- [58] 王娟, 张登山, 肖元明, 裴全帮, 王博, 樊博, 周国英. 长期围封后高寒草原植物根系分泌物特征与环境因子关系. *植物生态学报*, 2025, 49(4): 596-609.
- [59] 张乾, 杨凯, 周长剑, 张金鑫, 苏颖佳, 高添, 卢德亮. 植物功能性状对森林土壤有机质积累影响的研究进展. *生态学杂志*, 2024, 43(9): 2566-2573.
- [60] Stefanowicz A M, Kapusta P, Szarek-Lukaszewska G, Grodzińska K, Niklińska M, Vogt R D. Soil fertility and plant diversity enhance microbial performance in metal-polluted soils. *Science of the total environment*, 2012, 439: 211-219.
- [61] 卫玺玺, 晁鑫艳, 郑景明, 唐可欣, 万龙, 周金星. 贺兰山东、西侧典型植物群落物种多样性差异及其影响因子. *生态环境学报*, 2024, 33(4): 520-530.
- [62] 任学敏, 杨改河, 王得祥, 秦晓威, 刘振学, 赵双喜, 白宇. 环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 605-613.