

不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种多样性

南国卫^{1,2}, 王静慧^{1,2}, 秦淑莹^{1,2}, 韩磊^{1,2}, 何馨雨^{1,2}

(1. 延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2. 延安大学 陕西省区域生物资源保育与利用工程技术研究中心, 陕西 延安 716000)

摘要: 【目的】研究黄土高原丘陵沟壑区不同恢复年限刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林林下草本植物的物种组成及多样性指数, 探讨不同恢复年限刺槐林林下草本物种多样性的变化特征及其主要影响因素, 以为区域植被恢复提供参考。

【方法】采用空间替代时间的方法, 以陕西省子长市不同恢复年限 (7、12、22、45 a) 的刺槐林为研究对象, 通过样地调查法对不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种组成进行调查, 采用冗余分析 (RDA) 对草本层物种多样性指数的主要影响因素进行分析。

【结果】①不同恢复年限刺槐的草本植物共有 55 种, 分属 18 科, 优势种主要为菊科 Asteraceae、禾本科 Graminae 和豆科 Leguminosae 植物, 整体表现为多数优势种属于少数科, 而少数弱势种属于多数科的特征。北艾 *Artemisia vulgaris*、青蒿 *A. caruifolia*、铁杆蒿 *A. gmelinii* 等蒿类植物具有较高的重要值。②刺槐林林下草本植物的地上生物量随年限的增加而增加, 恢复年限显著增加了刺槐林林下草本层的地上生产力 ($P < 0.05$)。③土壤铵态氮、土壤有机碳、土壤水分和土壤全磷是林下草本层物种多样性 Margalef 指数、Simpson 指数以及地上生物量的主要影响因素。而土壤全氮、土壤全磷、土壤铵态氮、土壤粉粒则是影响 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数的主要因素。【结论】刺槐林林下草本层在不同恢复年限表现出不同的物种多样性特征。蒿类植物在各个恢复年限均表现出极强的适应能力。物种多样性指数和生物量均受到土壤水分和养分的重要影响。因此, 在黄土高原地区未来的造林实践中要注重土壤水分和养分的平衡, 增强人工林生态系统发展的稳定性和可持续性。图 2 表 2 参 31

关键词: 不同恢复年限; 林下草本层; 物种多样性; 地上生物量; 影响因素

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2024)05-0978-08

Diversity characteristics of herbaceous species under *Robinia pseudoacacia* forest in different years

NAN Guowei^{1,2}, WANG Jinghui^{1,2}, QIN Shuying^{1,2}, HAN Lei^{1,2}, HE Xinyu^{1,2}

(1. College of Life Science, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Engineering and Technological Research Center for Conservation and Utilization of Regional Biological Resources, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] This study, with an investigation into the species composition and diversity index of herbaceous layer under *Robinia pseudoacacia* forests in the hilly gully region of the Loess Plateau, is aimed to explore the characteristics and main influencing factors of its diversity index, in order to provide reference for the practice of regional vegetation restoration. [Method] With the *R. pseudoacacia* forests in different years (7, 12, 22 and 45 years) in Zichang City selected as study subjects, the species composition of the herbaceous layer in the understorey of *R. pseudoacacia* forests of different years were investigated employing the “space instead of time” method and the plot survey method before an analysis was conducted of the main factors

收稿日期: 2024-01-18; 修回日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (42201130); 延安大学博士科研启动项目 (YDBK2019-57); 陕西省大学生创新创业训练项目 (S202310719092)

作者简介: 南国卫 (ORCID: 0000-0001-8364-5442), 讲师, 从事植被恢复及土壤水碳效应等研究。E-mail: nanguowei@yau.edu.cn

influencing the diversity index using redundancy analysis (RDA). [Result] (1) There were 55 species of herbaceous species in *R. pseudoacacia* forests of different years, belonging to 18 families, and their dominant species were mainly Asteraceae, Gramineae and Leguminosae, with the overall performance showing that the dominant species belong to a few families, while the subordinate species belong to most families; the *Artemisia vulgaris*, *A. caruifolia* and *A. gmelinii* have higher importance values; (2) The aboveground biomass of understory herbaceous in *R. pseudoacacia* forests increased with years, and planting years increased significantly the aboveground productivity of the herbaceous layer ($P < 0.05$). (3) Ammonium nitrogen, soil organic carbon, soil moisture and total phosphorus were the main factors influencing the Margalef and Simpson index of species diversity as well as aboveground biomass of the understory herbaceous layer whereas total nitrogen, total phosphorus, ammonium nitrogen, and soil silt were the main factors affecting Shannon-Wiener and Pielou index. [Conclusion] The herbaceous layer of *R. pseudoacacia* forests in the study area showed different species diversity at different years. *Artemisia* plants showed great adaptive ability at different years, and species diversity indicators and biomass are significantly affected by soil moisture and nutrients. Therefore, it is important to focus on the balance of soil moisture and nutrients in future afforestation practices in the Loess Plateau region to enhance the stability and sustainability of plantation ecosystem development. [Ch, 2 fig. 2 tab. 31 ref.]

Key words: different years; understory herbaceous layer; species diversity; aboveground biomass; influencing factors

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分，无论是天然林还是人工林生态系统都具有丰富的生物多样性^[1-2]。一直以来，由于受到全球气候变化和人类活动的双重影响，森林生态系统的生物多样性持续下降，尤其人工林生态系统的生物多样性对其两者的响应更加敏感，部分生态功能随之退化^[3-4]。近年来，大量人工林的出现使得黄土高原地区的植被变化尤为剧烈^[5]。由于刺槐 *Robinia pseudoacacia* 具有抗旱耐瘠、生长迅速等特点，被选为主要的造林树种之一，因此在该地区被大面积种植^[6]。目前，针对人工林生态系统功能及其生物多样性的研究还处在蓬勃发展时期^[7-10]。前人针对刺槐林的相关研究集中在林上冠层和亚冠层，对地上生物量、物种多样性及其影响下的土壤水分、土壤固碳等^[11-13] 特征的研究也较多，但缺乏对刺槐林林下草本层物种多样性、养分循环和水土保持等^[14-16] 方面的研究。林下草本层作为森林生态系统的重要组成部分，其丰富的生物多样性不仅有助于维持生态系统的稳定性，还能优化生态系统功能，缓解气候变化，改善局部小气候^[17]。此外，林下草本层也有助于土壤品质和肥力的提高，促进土壤养分循环^[18]。虽然林下草本层的生态位相对较小，其生长、发育和丰富程度也易受外界环境的影响，但它在生态恢复、土壤固碳和保持水土等方面仍然发挥着不可替代的作用^[19-20]。林下草本层的物种多样性受诸多环境因素的影响，且这些因素内部关系复杂。一些学者对不同植被类型、不同密度等林下草本层物种多样性及其影响因子进行了研究^[21-23]，而对黄土高原地区不同恢复年限林下草本层物种多样性及其影响因素等研究相对缺乏。在此背景下，明确黄土高原地区广泛分布的刺槐林林下草本层物种多样性在不同生长阶段的变化特征及其主要影响因素意义重大。因此，本研究以陕西省子长市南部不同恢复年限的刺槐林为研究对象，分析各阶段刺槐林林下草本层物种多样性特征及其主要影响因素，以期为正确评价该地区人工造林生态效应以及可持续植被恢复管理实践提供依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

陕西省子长市 (36°59'30"~37°30'00"N, 109°11'58"~110°01'22"E) 属暖温带半干旱大陆性季风气候，地势西北高东南低，海拔为 930.0~1 562.0 m，是典型的黄土丘陵沟壑区，年均气温为 8.2 ℃，年均降水量为 450.0 mm。当地土壤以黄绵土为主，土壤结构较差，易受冬、春季风力侵蚀和夏、秋季水力侵蚀。

该地区是退耕还林的核心区域,主要引进树种有刺槐、侧柏 *Platyclusus orientalis*、沙棘 *Hippophae rhamnoides*、柠条 *Caragana korshinskii*、油松 *Pinus tabulaeformis* 等。刺槐是该区分布最广的造林树种。

1.2 试验设计与测定方法

样地选择、野外调查和土壤样品采集均于2022年8月在子长市南部进行。选择靠城区4个恢复年限(7、12、22、45 a)的人工刺槐林为研究对象,该地造林之前均为退耕农地(主要种植谷子 *Setaria italica*、糜子 *Panicum miliaceum* 和土豆 *Solanum tuberosum* 等农作物)。不同恢复年限的每块样地面积为20 m×20 m,3个重复,同时采用对角线法在每块样地中选取5个1 m×1 m的小样方,观察样方中草本层植物的分布情况,记录每块样地的生长年限、种植密度,对样方中的草本层进行调查并记录物种名称、盖度、数量和频度等信息。记录完成之后,将每块样方中的草本层植物齐根剪下,装进信封,带回实验室烘干称量,记录每块样地草本生物量。在每个样方内用100 cm³的环刀(测定土壤容重)和铝盒分别取0~20 cm土层的土样,3个重复。除去根系和杂物,将铝盒中土样混合均匀后分为2份,一部分用于测定土壤水分(烘干法),另一部分用于测定土壤相关指标^[24]。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定,全氮采用半微量凯氏法测定,全磷采用HClO₄-H₂SO₄消煮法测定,硝态氮采用紫外分光光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,速效磷采用碳酸氢钠法测定,土壤粒度采用激光粒度仪法测定。

1.3 物种多样性分析

通过Margalef指数、Simpson指数、Shannon-Wiener指数、Pielou指数以及重要值分析不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种多样性。多样性指数及重要值的具体计算公式参考文献[15, 21]。

1.4 数据处理

采用SPSS 23.0进行数据处理,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对比不同恢复年限刺槐林林下草本层物种多样性之间的差异,并通过最小显著极差法(LSD)进行多重比较,显著性水平为0.05;采用Canoco 5.0进行冗余分析(RDA),研究草本层物种多样性指标、地上生物量与环境因子之间的相互关系。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种组成

不同恢复年限刺槐林林下草本植物共有55种,分属18科,物种相对较为丰富(表1)。主要为菊科Compositae (25.8%)、禾本科Gramineae (18.4%)以及豆科Leguminosae (9.2%)植物,其他如莎草科Cyperaceae、蔷薇科Rosaceae、葡萄科Vitaceae、堇菜科Violaceae、车前科Plantaginaceae、唇形科Lamiaceae、旋花科Convolvulaceae、远志科Polygalaceae、紫草科Boraginaceae、萝藦科Asclepiadaceae等均为单属单种。

不同恢复年限刺槐林林下草本层物种组成有较大差异。其中恢复年限为7 a的刺槐林共有23个草本物种,以青蒿 *Artemisia caruifolia* 和北艾 *A. vulgaris* 为优势物种,伴生物种主要有茵陈蒿 *A. capillaris* 和冰草 *Agropyron cristatum*; 恢复年限为12 a的刺槐林共有14个草本物种,以铁杆蒿 *Artemisia gmelinii* 和青蒿为优势物种,伴生物种主要有北艾和大披针薹草 *Carex lanceolata*; 恢复年限为22 a的刺槐林共有24个草本物种,以北艾和羊茅 *Festuca ovina* 为优势物种,伴生物种主要有铁杆蒿和硬质早熟禾 *Poa sphondylodes*; 恢复年限为45 a的刺槐林共有29个草本物种,以北艾和羊茅为优势物种,伴生物种主要有黄花蒿 *A. annua* 和茵陈蒿。

2.2 不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种多样性

如表2所示:不同恢复年限刺槐林林下草本层物种多样性存在差异。除恢复年限为22和45 a刺槐林林下草本层的Margalef指数差异不显著外($P>0.05$),其他恢复年限的Margalef指数则随着恢复年限的增加而逐步增加;不同恢复年限刺槐林林下草本层的Simpson指数与Margalef指数表现出相似的变化趋势。除恢复年限为22和45 a刺槐林林下草本层之间的Simpson指数差异不显著外($P>0.05$),其他恢复年限的Simpson指数则随着恢复年限的增加而增加;不同恢复年限刺槐林草本层的Shannon-Wiener指数整体上随着恢复年限的增加而增加,但恢复年限为12和22 a之间的Shannon-Wiener指数差异不显著($P>0.05$);刺槐林林下草本层的Pielou指数在恢复年限为7、12 a有所增加,在12 a之后呈相对稳定的趋势。

表 1 不同恢复年限刺槐林林下草本层主要物种的重要值

Table 1 Importance values of dominant species in the understory herb layer of *R. pseudoacacia* forests in different years

物种	所属科	不同恢复年限物种重要值				物种	所属科	不同恢复年限物种重要值			
		7 a	12 a	22 a	45 a			7 a	12 a	22 a	45 a
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	菊科	3.41		6.41	8.14	地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	萝藦科	-	0.60	3.60	1.94
青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i>	菊科	20.51	17.79	1.20	2.84	西山委陵菜 <i>Potentilla sischanensis</i>	蔷薇科	-	0.87	-	-
北艾 <i>Artemisia vulgaris</i>	菊科	24.19	15.19	25.97	47.60	小叶地锦 <i>Euphorbia heyneana</i>	葡萄科	-	-	2.34	2.40
紫苏 <i>Perilla frutescens</i>	唇形科	0.93	-	-	-	大果琉璃草 <i>Cynoglossum divaricatum</i>	紫草科	-	-	1.27	-
苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>	菊科	2.69	1.87	1.20	1.80	黄花委陵菜 <i>Potentilla chrysantha</i>	蔷薇科	-	-	0.60	-
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科	1.77	-	-	-	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科	-	-	4.80	-
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	菊科	0.60	-	-	9.88	地丁草 <i>Corydalis bungeana</i>	堇菜科	-	-	2.20	1.27
狗娃花 <i>Heteropappus hispidus</i>	菊科	3.27	-	2.47	1.27	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科	-	-	2.73	-
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>	禾本科	3.27	2.68	7.08	2.34	刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	菊科	-	-	0.67	-
野菊 <i>Dendranthema indicum</i>	菊科	1.33	1.00	-	2.08	杠柳 <i>Periploca sepium</i>	夹竹桃科	-	-	2.13	-
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	菊科	1.13	22.12	8.94	1.80	小花鬼针草 <i>Bidens parviflora</i>	菊科	-	-	0.53	-
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	禾本科	8.61	-	-	1.87	阿尔泰堇菜 <i>Volai altaica</i>	堇菜科	-	-	0.53	-
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	菊科	0.73	-	-	0.67	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	蔷薇科	-	-	-	0.53
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	豆科	0.60	-	-	-	鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>	禾本科	-	-	0.67	-
腺毛阴行草 <i>Siphonostegia laeta</i>	列当科	2.00	-	-	1.20	菊叶香薷 <i>Chenopodium foetidum</i>	苋科	-	-	-	1.87
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科	1.34	-	2.13	2.68	堇菜 <i>Viola verecunda</i>	堇菜科	-	-	-	5.67
箭叶旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	旋花科	2.87	5.48	-	0.67	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科	-	-	-	2.54
小蒜 <i>Allium macrostemon</i>	百合科	0.53	-	-	0.60	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	禾本科	-	-	-	0.94
野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	豆科	1.80	-	-	-	羊胡子草 <i>Carex rigescens</i>	莎草科	-	-	-	0.40
苣荬菜 <i>Sonchus wightianus</i>	菊科	0.60	-	-	-	戟叶火绒草 <i>Leontopodium dedekensii</i>	菊科	-	-	-	1.40
黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	豆科	0.33	-	2.60	-	远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	远志科	-	-	-	-
草木犀 <i>Melilotus officinalis</i>	豆科	1.40	-	-	-	细叶薹草 <i>Carex duriusata</i>	莎草科	-	-	-	-
车前草 <i>Plantago depressa</i>	车前科	0.47	-	-	5.21	异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i>	忍冬科	-	-	-	-
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	禾本科	-	13.21	25.51	13.57	甘青针茅 <i>Stipa przewalskyi</i>	禾本科	-	-	-	-
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	禾本科	-	0.67	0.53	-	针茅 <i>Stipa capillata</i>	禾本科	-	-	-	-
兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	豆科	-	0.67	3.60	1.27	地椒 <i>Thymus quinquecostatus</i>	唇形科	-	-	-	-
大披针薹草 <i>Carex lanceolata</i>	莎草科	-	13.70	-	-	百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	唇形科	-	-	-	-
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	苋科	-	0.53	-	1.60						

说明：-代表没有出现。菊科 Compositae；唇形科 Lamiaceae；禾本科 Gramineae；豆科 Leguminosae；列当科 Orobanchaceae；旋花科 Convolvulaceae；百合科 Liliaceae；车前科 Plantaginaceae；莎草科 Cyperaceae；苋科 Amaranthaceae；萝藦科 Asclepiadaceae；蔷薇科 Rosaceae；葡萄科 Vitaceae；紫草科 Boraginaceae；堇菜科 Violaceae；夹竹桃科 Apocynaceae；远志科 Polygalaceae；忍冬科 Caprifoliaceae。

表 2 不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种多样性指数

Table 2 Species diversity index in the understory herb layer of *R. pseudoacacia* forests in different years

恢复年限/a	Margalef指数	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou指数
7	0.44±0.09 c	2.15±0.53 c	0.16±0.07 c	0.07±0.03 b
12	1.40±0.09 b	6.79±0.33 b	0.53±0.04 b	0.26±0.02 a
22	2.12±0.12 a	11.20±0.59 a	0.59±0.02 b	0.24±0.01 a
45	2.27±0.13 a	12.54±0.44 a	0.79±0.07 a	0.30±0.02 a

说明：数据为平均值±标准差；同列数据后不同字母表示同一指标不同恢复年限间差异显著(P<0.05)。

2.3 不同恢复年限刺槐林林下草本层的地上生物量特征

从图 1 可以看出：刺槐林林下草本层的地上生物量随着恢复年限的增加而逐步增加。除恢复年限为 22 与 45 a 之间的草本生物量没有显著性差异外，其余恢复年限之间均有显著性差异 (P<0.05)。刺槐林的地上生物量从恢复年限 7 a (119.33 g·m⁻²) 到 12 a (204.00 g·m⁻²)、22 a (266.33 g·m⁻²)、45 a (307.33 g·m⁻²)，

分别增加了 1.71、2.23 和 2.58 倍。这表明地上生物量随着刺槐林恢复年限的增加持续增加。

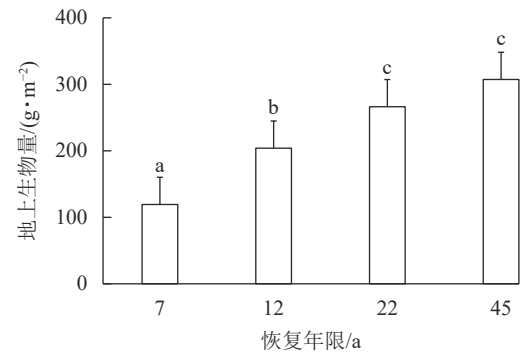
2.4 土壤对林下草本物种多样性和地上生物量的影响

选取 10 个土壤因子作为环境变量，草本物种多样性 4 个指标和地上生物量作为响应变量进行冗余分析。由图 2 可看出：10 个环境变量能综合解释 96.23% 的林下草本物种多样性及生物量变化格局。第 1 轴解释率为 65.18%，第 2 轴解释率为 19.17%。Margalef 指数、Simpson 指数、地上生物量与土壤铵态氮、土壤有机碳、土壤水分呈正相关，与土壤全磷为负相关，说明它们是影响这 2 个指标的影响因素。Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数与土壤全氮、土壤铵态氮、土壤粉粒为正相关，与土壤水分、土壤有机碳和土壤全磷为负相关，说明它们是影响这 2 个指标的影响因素。刺槐林林下草本层物种多样性指数与地上生物量整体呈正相关关系。

3 讨论

在全球变暖背景下，林下草本层的多样性特征对整个森林生态系统的多样性和稳定性具有重要指示意义。研究黄土高原地区单一树种人工林林下草本层物种多样性，对恢复区域人工林生态系统的结构和功能，维持区域人工林生态系统的稳定性和可持续性意义重大^[2,7]。植物多样性指数的大小反映了不同群落之间物种丰富度和物种相对丰度的差异。多样性指数越大，说明该群落内物种的丰富度和相对丰度分布较为均衡，反之亦然^[9,19]。植物多样性主要是由群落内部物种间的关系和外部环境条件决定的，植物多样性差异在一定程度上也能够反映外部环境条件的变化^[2,9]。本研究发现：刺槐林林下优势种主要为菊科、禾本科和豆科，整体物种组成也显示出多数优势种属于少数科，而少数弱势种属于多数科的特征，这与相关的研究结果^[15-16]基本一致，符合西北地区植物区系特征^[25]。然而，与子长市北部研究结果^[15]不同的是，相对湿润的南部区域拥有更多的林下草本物种类型，且在恢复年限为 45 a 刺槐林下仍然发现较多的物种类型。主要是因为南部相对湿润，虽然刺槐林消耗了大量深层土壤水分，但表层土壤会随其生长演替表现出更好的土壤水分涵养能力。因此，恢复年限为 45 a 的刺槐林下发现较多的草本种类数量主要是湿润的土壤表面萌生了更多的弱势植物所致^[10]。而优势种仍然是具有极强适应能力的蒿属 *Artemisia* 植物，比如北艾、铁杆蒿、青蒿等。前 2 种蒿属均为多年生植物，在刺槐林的次生演替阶段大都能发现其踪迹，主要是因为随着演替的进行，1 年生植物逐渐失去优势成为伴生种，而具有营养枝的多年生植物占比增加，逐渐演变为优势种。表明这些物种在长期的气候变化过程中很好地适应了本地区的水热气等条件，并建立优势^[25-26]。因此，建议在黄土高原地区应加强对蒿属等优势种展开生态功能等方面的研究，从蒿属植物的基础研究入手，深入开发和应用这些物种在该地区的潜在生态价值，为黄土高原地区生态建设提供参考。

生物多样性和生产力之间的关系在不同生态系统下的表现截然不同^[27]。有研究认为：生物多样性与生产力呈正相关，而另一些研究却恰好相反，甚至得出不相关的结论^[27-28]。本研究表明：生物多样性和生产力呈正相关，这与王敏等^[29]的研究结果较为一致，但与南国卫等^[15]在子长市北部的研究结果不一



不同字母表示不同恢复年限间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同恢复年限刺槐林地上草本生物量

Figure 1 Above-ground herbaceous biomass of *R. pseudoacacia* forest at different plantation years

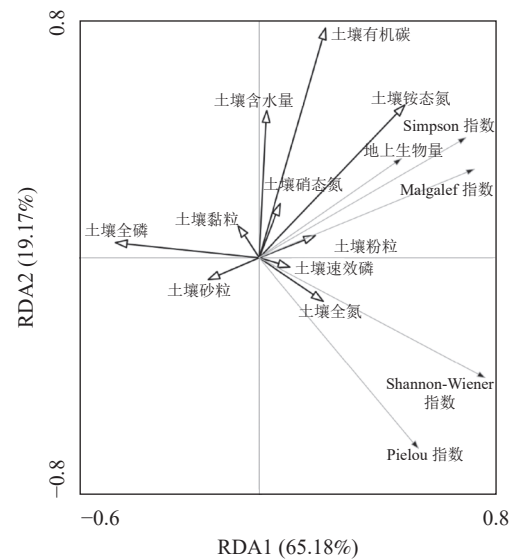


图 2 土壤与多样性指数和地上生物量的关系

Figure 2 Relationship between soil and diversity index and aboveground biomass

致。主要是因为林下草本层物种多样性与生物量的关系在不同生态系统或者相同生态系统下的不同演替阶段是不断变化的, 这主要取决于林下环境(光照、温度、土壤水分、养分等)的变化情况^[2,4]。本研究区域不同恢复阶段刺槐林林下拥有不同的环境。另外, 由于刺槐的高耗水性, 使得林下草本层的物种多样性和生物量关系的变化更加复杂^[10-12]。研究表明: 土壤铵态氮、土壤有机碳、土壤水分、土壤全磷是林下草本物种 Margalef 指数、Simpson 指数以及地上生物量的主要影响因素。而土壤全氮、土壤全磷、土壤铵态氮、土壤粉粒则是影响 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数的主要因素。这与前人的研究结果较为类似^[15,30]。在黄土高原地区的植被恢复过程中, 林下草本层的物种多样性和生物量主要受到土壤水分和养分供应的影响。土壤水分既是原始驱动力, 也是限制因子。而土壤养分则必须通过根系吸水的过程来满足植物的正常生长, 尤其在黄土高原地区容易受到磷的限制^[31], 故两者相辅相成, 缺一不可。因此, 在黄土高原地区未来的造林实践中要关注土壤水分和养分平衡, 选择低耗水和高固碳的植物种类是实现区域人工林生态系统可持续发展的必经之路。

4 结论

不同恢复年限刺槐林林下草本层的优势种主要为菊科、禾本科和豆科植物, 表现为多数优势种属于少数科, 而少数弱势种属于多数科的特征。蒿属植物表现出较强的适应能力。刺槐恢复年限的增加显著增加了林下草本层的地上生产力。土壤铵态氮、土壤有机碳、土壤水分、土壤全磷是林下草本物种 Margalef 指数、Simpson 指数以及地上生物量的主要影响因素。而土壤全氮、土壤全磷、土壤铵态氮、土壤粉粒则是影响 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数的主要因素。

5 参考文献

- [1] FU Bojie, WANG Shuai, LIU Yu, *et al.* Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, **45**: 223 – 243.
- [2] LIU Dan, WANG Tao, PEÑUELAS J, *et al.* Drought resistance enhanced by tree species diversity in global forests [J]. *Nature Geoscience*, 2022, **15**(10): 800 – 804.
- [3] 邓宏兼, 李卫忠, 曹铸, 等. 基于不同取样尺度的油松针阔混交林物种多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(1): 67 – 75.
DENG Hongjian, LI Weizhong, CAO Zhu, *et al.* Species diversity based on sample size in a *Pinus tabulaeformis* mixed forest [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2015, **32**(1): 67 – 75.
- [4] 吕康婷, 张二山, 李思颖, 等. 黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(6): 1257 – 1266.
LÜ Kangting, ZHANG Ershan, LI Siying, *et al.* The impact of the spatial structure of *Pinus hwangshanensis* plantation on undergrowth plant diversity [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(6): 1257 – 1266.
- [5] 傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J]. 科学通报, 2022, **67**(32): 3768 – 3779.
FU Bojie. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(32): 3768 – 3779.
- [6] NAN Guowei, WANG Ning, JIAO Lei, *et al.* A new exploration for accurately quantifying the effect of afforestation on soil moisture: a case study of artificial *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau (China) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **433**: 459 – 466.
- [7] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(17): 6786 – 6799.
LI Miaoyu, SHANGGUAN Zhouping, DENG Lei. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(17): 6786 – 6799.
- [8] 汲玉河, 周广胜, 李宗善. 气候变化驱动下黄土高原刺槐林气候适宜性和脆弱性[J]. 生态学报, 2023, **43**(8): 3348 – 3358.
JI Yuhe, ZHOU Guangsheng, LI Zongshan. Climate suitability and vulnerability of *Robinia pseudoacacia* forest driven by climate change on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(8): 3348 – 3358.

- [9] SUN Wanlong, LIU Xuehua. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J/OL]. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(1): 4[2024-01-05]. doi: 10.1186/s40663-019-0210-2.
- [10] WANG Jing, ZHAO Wenwu, ZHANG Xiao, *et al.* Effects of reforestation on plant species diversity on the Loess Plateau of China: a case study in Danangou catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 979 – 989.
- [11] 韦景树, 李宗善, 冯晓琦, 等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2433 – 2444.
WEI Jingshu, LI Zongshan, FENG Xiaoyu, *et al.* Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau of China: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2433 – 2444.
- [12] LIANG Haibin, XUE Yayong, LI Zongshan, *et al.* Soil moisture decline following the plantation of *Robinia pseudoacacia* forests: evidence from the Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 412: 62 – 69.
- [13] LI Binbin, LI Panpan, ZHANG Wantao, *et al.* Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau [J/OL]. *Geoderma*, 2021, 399: 115122[2024-01-05]. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115122.
- [14] 陈笑, 李远航, 左亚凡, 等. 林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(8): 1396 – 1407.
CHEN Xiao, LI Yuanhang, ZUO Yafan, *et al.* Effects of stand characteristics and soil nutrient characteristics on herbaceous diversity [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(8): 1396 – 1407.
- [15] 南国卫, 韩磊, 何馨雨, 等. 刺槐林草本层物种多样性的动态变化特征[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(5): 491 – 497.
NAN Guowei, HAN Lei, HE Xinyu, *et al.* Dynamic changes of species diversity in herb layer of the *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(5): 491 – 497.
- [16] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 等. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 305 – 314.
WANG Yirui, WANG Yanhui, DUAN Wenbiao, *et al.* Effects of canopy density on understory plant diversity in *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 305 – 314.
- [17] GUO Qian, WEN Zhongming, ZHENG Cheng, *et al.* Effects of *Robinia pseudoacacia* on the undergrowth of herbaceous plants and soil properties in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2021, 14(5): 896 – 910.
- [18] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 527 – 537.
ZHANG Xibiao, SHANGGUAN Zhouping. The bio-cycle patterns of nutrient elements and stand biomass in forest communities in Hilly Loess Regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 527 – 537.
- [19] TIAN Kai, CHAI Pengtao, WANG Yunqiang, *et al.* Species diversity pattern and its drivers of the understory herbaceous plants in a Chinese subtropical forest [J/OL]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 10: 1113742[2024-01-05]. doi: 10.3389/fevo.2022.1113742.
- [20] YANG Haijiao, GAO Jinfang, PAN Chao, *et al.* Species composition and influencing factors of understory woody species in *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau [J]. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34(6): 1693 – 1706.
- [21] 杨丽霞, 任广鑫, 韩新辉, 等. 黄土高原退耕区不同林龄刺槐林下草本植物的多样性[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(7): 172 – 178.
YANG Lixia, REN Guangxin, HAN Xinhui, *et al.* Diversity of understory herbaceous species under the *Robinia pseudoacacia* with different ages of the region of returning farmland to forest in the Loess Plateau [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(7): 172 – 178.
- [22] 郑昌龙, 王健铭, 李景文. 北京松山国家级自然保护区不同林龄胡桃楸林下植物多样性[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(5): 825 – 832.
ZHENG Changlong, WANG Jianming, LI Jingwen. Diversity of undergrowth plants of *Juglans mandshurica* at different ages in Songshan National Nature Reserve [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(5): 825 – 832.
- [23] SUN Cheng, LI Long, DONG Xiaoyu, *et al.* Variations and factors characterizing ecological niches of understory herbaceous species in plantation forests [J/OL]. *Sustainability*, 2022, 14(17): 10719[2024-01-05]. doi: 10.3390/su141710719.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Rukun. *The Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology

- Press, 2000.
- [25] 张文辉, 李登武, 刘国彬, 等. 黄土高原地区种子植物区系特征[J]. *植物研究*, 2002, **22**(3): 373 – 379.
ZHANG Wenhui, LI Dengwu, LIU Guobin, *et al.* The characteristics of the seed flora in the Loess Plateau region [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2002, **22**(3): 373 – 379.
- [26] 巫翠华. 刺槐人工林群落林下植物多样性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WU Cuihua. *Undergrowth Plant Diversity of Robinia pseudoacacia Plantation Community* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [27] 王丽红, 辛颖, 邹梦玲, 等. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中植物多样性与生物量分配格局[J]. *北京林业大学学报*, 2015, **37**(12): 41 – 47.
WANG Lihong, XIN Ying, ZOU Mengling, *et al.* Plants diversity and biomass distribution of vegetation restoration in burned area of Great Xing'an Mountains [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, **37**(12): 41 – 47.
- [28] MA Zilong, CHEN Han Y H. Effects of species diversity on fine root productivity increase with stand development and associated mechanisms in a boreal forest [J]. *Journal of Ecology*, 2017, **105**(1): 237 – 245.
- [29] 王敏, 周润惠, 余飞燕, 等. 不同林龄桉树人工林林下物种多样性和生物量的动态变化[J]. *植物研究*, 2021, **41**(4): 496 – 505.
WANG Min, ZHOU Runhui, YU Feiyan, *et al.* Dynamic changes of undergrowth species diversity and biomass of *Eucalyptus robusta* plantations at different ages [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2021, **41**(4): 496 – 505.
- [30] 拓行行, 李玉华, 俞翰林, 等. 宁南山区华北落叶松林下草本层群落特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(10): 2449 – 2458.
TUO Hanghang, LI Yuhua, YU Hanlin, *et al.* Community characteristics and influencing factors of herbaceous layer under *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* forests in the south mountainous area of Ningxia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(10): 2449 – 2458.
- [31] 贾培龙, 安韶山, 李程程, 等. 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(1): 315 – 321.
JIA Peilong, AN Shaoshan, LI Chengcheng, *et al.* Dynamics of soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics under different longitudes in the east-west forest belt of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(1): 315 – 321.