

DOI: 10.5846/stxb202104281121

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.

Gou Q Q, Liu J, Wang G H, Zhao F X. Changes of herbaceous plant composition and niche characteristics in different-aged artificial *Caragana korshinskii* forest in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9069-9090.

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

缙倩倩^{1,2}, 刘婧¹, 王国华^{1,2,3,*}, 赵峰侠¹

1 山西师范大学, 地理科学学院, 太原 030000

2 中国科学院西北资源与环境研究院, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730010

3 中国科学院西北资源与环境研究院, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730010

摘要: 晋西北丘陵风沙区生态环境脆弱, 是我国风沙活动危害最为严重的地区之一。为探究晋西北丘陵风沙区人工柠条林林下草本植物群落组成和种群生态位变化规律, 以不同种植年限 (撂荒地 CK、6、12、18、40、50 a) 人工柠条林林下天然草本植物群落作为研究对象, 对其群落组成、重要值及种群生态位变化特征进行分析。研究表明: (1) 不同年限柠条林下天然草本植物组成共记录到 22 科 41 属 52 种, 其中, 种植前期 (0—6 a) 林下草本植物以一年生草本植物为优势类群, 伴有少数多年生草本植物 (3 种); 种植中期 (12—18 a) 林下草本植物主要由多年生草本植物 (12 种) 为主, 伴生有一年生草本植物 (6 种) 及天然灌木 (2 种) 组成; 在种植后期 (40—50 a), 林下草本植物依然以多年生草本植物 (12 种) 为主。(2) 在不同年限柠条林下, 草本植物生态位宽度和生态位重叠发生明显变化, 种植前期 (0—12 a) 的优势类群为一年生先锋物种 (米蒿和野燕麦), 其生态位宽度最宽 (9.46、9.34), 且与其他物种的生态位重叠程度最大 (0.3、0.29); 而种植中后期 (18—50 a) 优势类群变为多年生草本植物, 优势种披碱草与其他物种的生态位重叠程度最大 (0.42), 说明其为林下植物群落主要的优势种和泛化种。(3) 柠条林种植后期 (50 a), 多数草本植物主要集中分布在生态位重叠系数 DCA 排序图的中心位置, 说明在种植后期草本植物对相同环境的资源竞争激烈, 林下草本植物群落处于演替过渡阶段。综上, 人工种植柠条林相较于天然恢复 (CK), 更有利于增加草本植物群落的多样性, 但林下植物群落对资源的竞争更为激烈。这些研究结果对于干旱半干旱地区风沙区植被恢复和生态重建具有重要的参考价值, 对人工林生态恢复具有重要意义。

关键词: 晋西北丘陵风沙区; 柠条; 群落组成; 林下草本群落; 重要值; 生态位特征

Changes of herbaceous plant composition and niche characteristics in different-aged artificial *Caragana korshinskii* forest in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province, China

GOU Qianqian^{1,2}, LIU Jing¹, WANG Guohua^{1,2,3,*}, ZHAO Fengxia¹

1 College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China

2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Laboratory of Heihe River Eco-Hydrology and Basin Science, Linze Inland River Basin Research Station, Lanzhou 730010, China

3 Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730010, China

Abstract: The ecological environment of sand-blown hilly area in northwest Shanxi is fragile and it is one of the most serious areas in China. This study investigated the community composition and niche change of herbaceous plants in artificial

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41807518); 国家自然科学基金面上项目 (42171033); 山西省高等学校科技创新项目 (2019L0457, 2019L0463)

收稿日期: 2021-04-28; 网络出版日期: 2022-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gimi123@126.com

Caragana korshinskii forest in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province. The natural herb community under artificial *Caragana korshinskii* forest with different planting years (CK, 6, 12, 18, 40, 50 a) was taken as the research object, and its community composition, important value and population niche change characteristics were analyzed. The results showed that: (1) A total of 52 species, 41 genera and 22 families were recorded in the composition of the natural herbaceous plants in the understory of *Caragana korshinskii* forest with different ages. In the early plantation period (0—6 a), the annual herbaceous plants were the dominant group, accompanied by a few perennial herbaceous plants (3 species). In the middle period (12—18 a), the understory herbaceous plants were mainly composed of perennial herbaceous plants (12 species), accompanied by annual herbaceous plants (6 species) and natural shrubs (2 species). In the later period (40—50 a), the understory vegetation was still dominated by perennial herbaceous plants (12 species). (2) Under *Caragana korshinskii* forest, the niche width and niche overlap of herbages changed significantly. The dominant species in the early planting period (0—12 a) were the pioneer species (*Artemisia dalai-lamae* and *Avena fatua*), which had the widest niche width (9.46 and 9.34), and the largest niche overlap with other species (0.3 and 0.29). In the middle and late planting period (18—50 a), the dominant species changed into perennial herbaceous plants, and the niche overlap between *Elymus dahuricus* and other species was the largest (0.42), indicating that *Elymus dahuricus* was the dominant and generalized species in the understory plant community. (3) In the late planting period (50 a), most herbaceous plants mainly distributed in the center of the system clustering sequence diagram of niche overlap coefficient, indicating that herbaceous plants competed fiercely for resources in the same environment in the late planting period, and the understory herbaceous plant community was in the transition stage of succession. In conclusion, artificial planting of *Caragana korshinskii* forest is more effective to increase the diversity of herbaceous plant community than natural restoration (CK), but the competition of understory plant community for resources is more intense. These results have important reference value for vegetation restoration and ecological reconstruction in arid and semi-arid sandstorm areas, and have important significance for ecological restoration of artificial forest.

Key Words: Sandy-hilly region of northwest Shanxi; *Caragana korshinskii*; community composition; understory herbaceous community; important value; niche characteristics

中国风沙地区主要分布在东经 75°—125°和北纬 35°—50°之间,该区域内降水稀少,风沙强烈,植被稀疏,是国家人工植被建设和构建固沙生态屏障的关键区域^[1]。“三北”防护林建设、黄土高原退耕还林措施和京津冀风沙源治理工程等生态工程,有效遏制了这些地区荒漠化的发展,促进了局地生境恢复^[2-3]。在人工固沙植被系统中,林下天然草本植被作为生态恢复系统中的重要组成部分,对固沙林林下物种多样性的恢复、生态系统稳定和生产力维持等方面发挥着重要的作用^[4]。但目前关于人工固沙植被体系的研究主要集中在种植建群种(例如,梭梭、油蒿、柠条)的生理生态^[5]、个体生长^[6]以及种群变化特征^[7-8],而针对人工固沙林林下草本群落生物多样性、群落结构及植物生态位宽度、生态位重叠与竞争关系等研究还相对较少。

物种多样性是衡量一个群落或生态系统物种数量、分布和稳定性等方面的关键指标,主要包括有丰富度、均匀度、优势度等^[9]。开展对人工固沙植物群落多样性、生态位及动态演替等研究,有利于更好地揭示人工固沙林物种组成与群落结构,评估人工固沙林生态功能以及判断人工林生态功能恢复状况。生态位(Niche)反映一个种群在一定时间空间上所占据的位置,可以表达一个群落中特定种群与其相关种群之间的功能关系与作用^[10]。经典的生态位理论认为,物种环境资源利用上存在差异,即物种间的生态位分化,这是物种共存的基本机制之一^[11-12]。生态位宽度和生态位重叠作为反映植物生态位的关键指标^[13],被广泛应用在人工固沙植被体系物种的种间关系、群落系统、物种多样性及种群演替等方面的研究中^[14],例如,王伟伟等在青藏高原寒地区,发现不同人工林下草本群落的生态幅物种不同,针阔叶混交林更有利于林下草本群落的生长和发育^[15];在温带草原地区,聂莹莹等人发现围栏封育增加了群落植物整体生态位重叠值和种间竞争,对物种多

样性也有一定的促进作用^[16];张继义等在科尔沁沙地,发现植物恢复演替过程中每一群落类型优势种的作用明显,具有最大的生态位宽度^[17]。但目前对于长时间序列(50 a 以上),人工林下草本植物群落构成和种群生态位特征的研究还非常有限,开展长时间序列人工固沙植被林下草本群落的生态位特征研究,有助于了解植物对资源的利用状况,对于干旱半干旱风沙区生态修复研究具有重要意义。

晋西北丘陵风沙区水土流失严重,生态环境脆弱,荒漠化现象十分严重,是北方地区沙尘暴侵袭京津的中、西两条主线的必经之地,也是环京津地区建立防风固沙生态屏障的重点区域^[18-20]。该区域是农牧交错带,由于人类的过度放牧,造成荒漠化严重,为了有效控制水土流失与荒漠化现象,该地区开展了一系列植被恢复生态建设工程,主要以种植柠条(*Caragana korshinskii*)为主的人工林建设^[21]。目前对该地区人工柠条林的研究主要集中在柠条树种的生理生态^[22]、柠条林地土壤特性^[23-25]等方面。但目前针对该地区长时间序列的人工柠条林下植物群落演替,林下草本植物的组成以及不同植物种群生态位特征的研究还相对缺乏。因此,本研究基于生态位理论,以不同种植年限人工柠条林下草本植物群落为研究对象,分析人工柠条林下草本植物的物种组成和种群生态位特征,揭示人工柠条林下天然草本植物种群对资源的利用程度和对环境的适应能力,为评价人工柠条林地的生态系统稳定性等提供参考。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省忻州市五寨县胡会乡石咀头村(38°57'43"—38°58'52" N, 111°46'16"—111°47'20" E, 海拔 1397—1533 m),气候属于温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏秋雨量集中,冬季寒冷干燥,该地区昼夜温差大,年平均气温 4.9℃左右,1 月最冷(-13.3℃),7 月最热(20.1℃),无霜期 120 d 左右,有效积温 24.52℃,研究区年平均降雨量约为 478.5 mm,6—8 月份降水占全年降水量的 70%以上。地形为黄土丘陵和低山丘陵相互交错,风的吹蚀堆积作用较强,以黄土堆积过程为主。栗褐土和黄绵土是本研究区分布最广的地带性土壤,土壤肥力较低。研究区属于半干旱干草原亚带和半湿润森林草原亚带^[26],草本植物多以旱生植物为主,乔木灌木多以人工种植林为主,其中乔木主要有旱柳(*Salix matsudana*)、青杨(*Populus cathayana*)和油松(*Pinus tabulaeformis*),灌木主要有人工柠条林,自然恢复的草本植物主要有草本植物米蒿(*Artemisia dalailamae*)、野燕麦(*Avena fatua*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)等,天然灌木主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。

1.2 样地设置与测定指标

本文采用空间替代时间的方法,为避免地形、坡度和坡向等的对环境因子的影响,采样点均选取相似的海拔、坡位、坡向等立地条件相近的地方。于 2019 年 6—9 月在晋西北丘陵风沙区选取群落发育较为完整且未平茬的 5 个(6 a、12 a、18 a、40 a 和 50 a)不同种植年限典型柠条林为调查样点(表 1),以邻近未经人为干扰、未进行人工林种植的天然草地作为对照(CK)。在每个年限种植地选取 3 个样点,每个样点间距大于 200 m,在每个样点分别设置 3 个 20 m×20 m 柠条样方,每个样方间距约 25 m。在测量人工柠条的株高、地径及生物量。

同时,每个柠条林样方内再设置 5 个 1 m×1 m 的草本样方。调查记录各样地内草本层物种的种类、高度、盖度、频度和密度,其中高度为植物的自然高度;盖度采用目测法测定;频度通过实测样方内某种草本植物出现次数,计算其出现的百分率;密度为实际测量值;将每个样方内不同种类的植物齐地面刈割后,分别装入信封带回实验室,在 105℃烘箱内杀青半小时后将温度调至 65℃烘干称重,计算出生物量。0—20cm 土壤含水量利用德国产 STEPS 土壤五参数分析仪(型号 COMBI 5000)的 SMT 100 传感器探头对土壤剖面的土壤水分进行测量。

1.3 评定指标与计算方法

本文物种多样性指数选用丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielou 均匀度指数(J_{sw})行多样性计算;而文中生态位宽度是物种多样性对环境资源利用的方法,采用 Levins 生态位宽度(B_i)表

示;生态位重叠值(NO)反映了不同物种同时利用相同资源的状况,本文采用 Pianka 生态位重叠表示,具体计算公式见表 2。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sample plots

植被类型 Vegetation types	海拔 Altitude/m	地形 Terrain	坡向 Aspect	坡度 Slope degree/(°)	株高 Plant height/cm	地径 Ground diameter/cm	冠幅 Crown/m ²	生物量 Biomass/ (kg/m ²)	郁闭度 Crown density
6 a 柠条	1392	低缓坡地	南	8	114.00±17.18a	1.03±0.48a	1.54±0.54a	0.60±0.12a	0.06
	1390				111.00±6.78a	0.98±0.48a	1.38±0.08a	0.34±0.07a	0.06
	1389				97.17±5.04a	1.17±0.67a	0.97±0.17a	0.38±0.32a	0.04
12 a 柠条	1446	低缓坡地	南	4	138.57±7.99abc	1.53±0.15a	1.66±0.22a	1.35±0.11ab	0.73
	1433.27				133.15±5.85ab	1.62±0.2a	2.29±0.27ab	1.94±0.80abc	0.76
	1423.5				127.65±6.30ab	1.53±0.13a	2.21±0.37ab	0.92±0.12a	0.61
18 a 柠条	1453.67	低缓坡地	东南	5	221.50±13.12cde	1.91±0.09abc	5.31±0.8abc	5.02±1.36abcde	1.06
	1444				183.92±12.11cde	1.83±0.19a	4.34±0.37abc	2.32±0.39abc	1.08
	1411.4				188.42±14.42cde	2.01±0.22abc	3.76±0.66abc	4.37±0.87abcd	1.07
40 a 柠条	1447	低缓坡地	南	4	221.04±8.15e	2.15±0.28cde	4.88±1.02	7.00±0.91bedef	0.92
	1392				172.00±6.87bede	2.11±0.06abc	5.04±0.71abc	6.83±0.01bedef	1.16
	1396				164.22±4.74 bcd	2.01±0.1abc	4.43±0.49abc	4.69±1.25abcd	1.23
50 a 柠条	1447.67	低缓坡地	西南	5	198.17±5.42de	2.7±0.29de	8.76±0.69cd	10.37±6.05def	0.97
	1429.67				199.32±3.81de	2.51±0.36bede	7.19±0.49bed	7.70±1.81edef	0.69
	1455.5				200.38±6.65de	2.87±0.25e	7.55±0.53cd	7.43±0.56cdef	1.05
撂荒地 CK	1394	平地	-	2	-	-	-	-	-
	1387								
	1392								

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上具有显著差异

1.4 数据处理

所有数据在 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件中进行统计和计算,利用 one-way ANOVA 和 Duncan 法进行方差分析和显著性检验 ($\alpha = 0.05$),利用 Origin 2017 软件作图,不同种植年限柠条林下各物种生态位重叠指数的植物种系统聚类排序图采用 Canoco 4.5 软件绘制。

2 结果

2.1 不同种植年限人工柠条林下草本植物群落特征

2.1.1 种类组成和数量特征

在 0—50 年人工柠条林下共出现植物 52 种,分属于 22 科,41 属。总体来看,植物群落主要以菊科所占比例最高,其次是禾本科、豆科、唇形科等,4 科植物在不同种植年限人工柠条林下的数量占比之和分别为 72.22% (6 a)、69.81% (12 a)、73.53% (18 a)、64.95% (40 a) 和 55.78% (50 a)。从植被群落所属单科数量变化分析,6 a 柠条林下豆科>禾本科>菊科>唇形科>其他单科;12 a 柠条林下草本群落变化为菊科>豆科>禾本科>唇形科>其他单科;18 a 柠条林下豆科>菊科>禾本科>唇形科>其他单科;而 40 a 和 50 a 柠条林下草本群落变化为菊科>豆科>禾本科>唇形科>其他单科。随着柠条林种植年限的增加,草本植物所在科属数显著增加,尤其在柠条种植后期(40—50 a),林下草本植物的科属数显著高于种植前期(0—6 a),增长了 1.88 倍(图 1)。

表 2 评定指标与计算方法

Table 2 Evaluation index and calculation method

指标 Indicators	公式 Formula	式中 In the formula
郁闭度计算 Crown density	郁闭度 = 林冠覆盖面积/地表面积	—
重要值计算 Important value	$IV = (RC + RA + RH + RF) / 4$	RC = 某物种的盖度/全部种的盖度之和×100% RA = 某物种的密度/全部种的密度之和×100% RH = 某物种植株高度/全部种植株高度之和×100% RF = 某物种的频度/全部物种的频度之和×100%
丰富度指数(R) Richness index	$R = S$	S 为所在样方内的物种数;
Shannon-Wiener 多样性指数(H) Shannon-Wiener index	$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$	P_i 为第 i 种的个体数 n_i 占调查物种个体总数 n 的比例, 即 $P_i = n_i/n; i = 1, 2, 3, \dots, s, s$ 为物种数。
Pielou 指数(J_{sw}) Pielou index	$J_{sw} = H/\ln S$	—
Levins 生态位宽度(Bi) ^[27] Levins niche width	$B_i = 1 / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2$	$P_{ij} = n_{ij}/N_i, P_{ij}$ 为物种 i 在第 j 个资源状态下的个体数占该物种所有个体数的比例; n_{ij} 为种群 i 利用资源状态 j 的数量, 本研究以物种 i 在第 j 样方的重要值表示; N_i 为物种 i 的总数量; r 为样方数。
生态位总宽度 Total niche width	$B = \sqrt{\sum_{i=1}^r B_i^2}$	B_i 为物种第 i 个样地在样地中的生态位宽度, r 为样地数量。
Pianka 生态位重叠 ^[28] Pianka's ecological niches overlap	$NO = \sum_{j=1}^r (n_{ij} \times n_{kj}) / \sqrt{\sum_{j=1}^r n_{ij}^2 \times \sum_{j=1}^r n_{kj}^2}$	NO 为生态位重叠值, n_{ij} 和 n_{kj} 为物种 i 和物种 k 在资源 j 上的 IV, 该方程的值域为 [0, 1]。

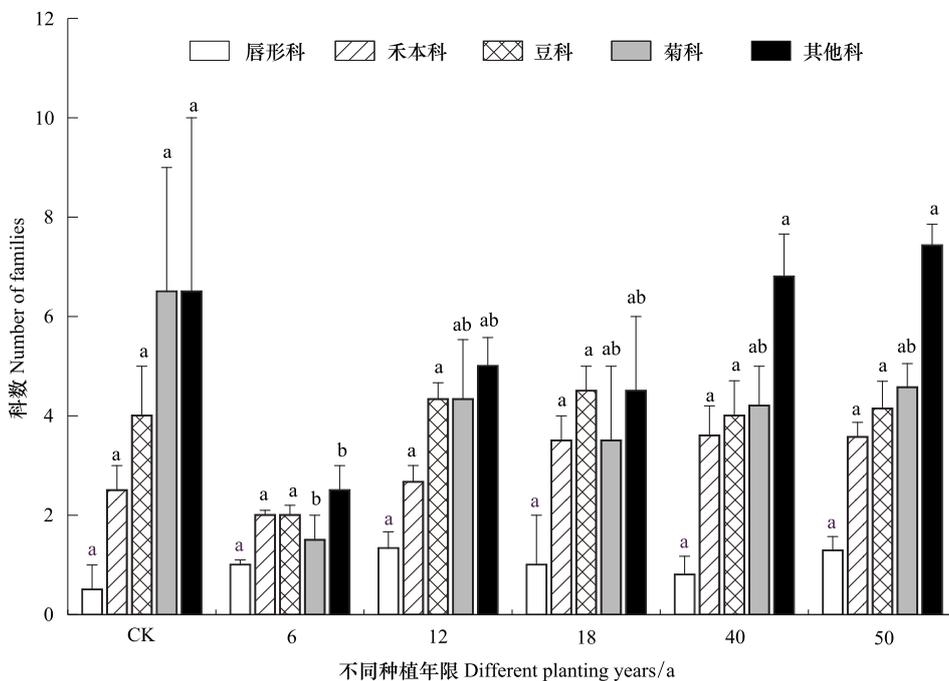


图 1 不同种植年限柠条林下草本植物所属科属数量

Fig.1 The number of species in each family under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

在不同种植年限人工柠条林下草本植物差异显著,随着柠条林种植年限的增加,植物的物种数显著增加,其中种植后期(40—50 a)比种植前期(6—18 a)草本植物增加了 2.38 倍。半灌木没有显著差异,物种数量维持在 1—3 种(表 3)。而植物群落的生物量、盖度及高度随着种植年限的增加呈显著增加的趋势。在不同种植年限柠条林下,6 a 柠条林下植物群落最低,平均值仅为 39.54 g/m²,50 a 柠条林下草本植物群落平均生物量最高(93.80 g/m²);6 a 柠条林下植物群落盖度最低,平均值为 24.29%,50 a 柠条林下草本植物群落平均盖度最高为 31.5%;不同种植年限柠条林下草本植物群落密度差异不显著,密度大小依次为 40 a(7.61 株/m²)>50 a(7.28 株/m²)>18 a(6.34 株/m²)>12 a(6.28 株/m²)>6 a(6.25 株/m²);12 a 柠条林下草本植物群落株高最低,平均值仅为 42.98 cm,50 a 柠条林下草本植物群落平均高度为 57.46 cm(表 3)。

表 3 不同年限人工柠条林植物特征变化

Table 3 Plant characteristics of *Caragana korshinskii* forest of different ages

年限/a Ages	植物类型 Plant growth		植物数量特征 Plant quantitative characteristics			
	草本 Herb/株	灌木 Shrubs/株	生物量 Biomass/(g/m ²)	盖度 Coverage/%	密度 Density/(株/m ²)	高度 Height/cm
CK	16.50±6.5ab	2.00±0.11a	131.84±29.19a	36.86±4.61a	6.17±0.97a	40.24±0.07b
6	8.00±0.10b	1.00±0.10a	39.54±4.38c	24.29±0.69b	6.25±0.75a	42.98±3.07b
12	14.67±1.21ab	1.67±0.33a	44.97±2.68c	25.99±2.15b	6.28±0.51a	42.11±0.85b
18	15.00±3.00ab	1.50±0.50a	62.30±16.83ab	29.46±4.092ab	6.33±0.73a	46.06±0.86ab
40	17.60±1.50a	1.20±0.37a	54.36±4.11c	30.00±1.87ab	7.61±0.49a	48.33±1.8408ab
50	19.00±0.79a	1.43±0.20a	54.36±4.11b	31.50±1.50ab	7.28±0.30a	57.46±2.37a

不同种植年限柠条林林下草本植物在林下植物中占有绝对优势,物种数占总植物物种数的 91.98%,草本植物按照功能类群可以分为一年生植物、一年生至多年生和多年生植物。其中一年生植物,在不同种植年限柠条林下没有显著差异,物种数量维持在 4—6 种;而一年生至多年生草本植物的在不同种植年限柠条林下也不存在显著差异,维持在 1—3 种;而多年生植物,6 a 柠条林下为 3 种,12 a 柠条林下平均为 8.33 种,18 a 柠条林下为 9 种,显著低于 40 a(10.4 种)和 50 a(11.43 种)柠条林。从种植柠条年限变化来看,随着柠条林种植年限的增加,草本物种数也显著增加,种植中后期(18—50 a)比种植前期(6—12 a),一年生草本植物增加了 1.71 种,多年生草本增加了 8.43 种(图 2)。

2.1.2 植物群落多样性分析

不同种植年限人工柠条林下,草本植物物种多样性指数(丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数)随着种植年限的增加基本呈显著增加趋势(图 3)。植物丰富度变化范围为 9.00—20.29,其中 50 a 柠条林下草本植物群落平均丰富度是 6 a 柠条林的 2.25 倍;Shannon-Wiener 多样性指数在不同种植年限柠条林下变化范围为 0.48—0.97,50 a 柠条林下草本植物 Shannon-Wiener 多样性指数最大,高于 6 a 柠条林 1.94 倍;Pielou 均匀度指数变化范围为 0.20—0.46,但是均匀度指数在不同种植年限差异不显著。

2.2 不同种植年限柠条林下植物群落不同物种重要值

从不同种植年限人工柠条林下草本植物群落不同物种重要值的总和来看(表 4),排名前 5 的物种分别依

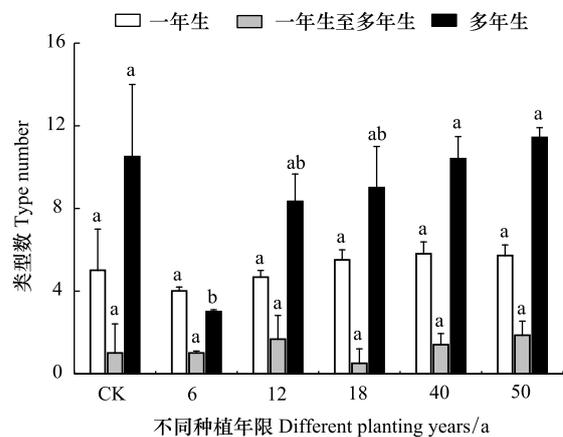


图 2 不同种植年限柠条林下植物功能类群

Fig. 2 The annual, annual/perennial, perennial plants under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

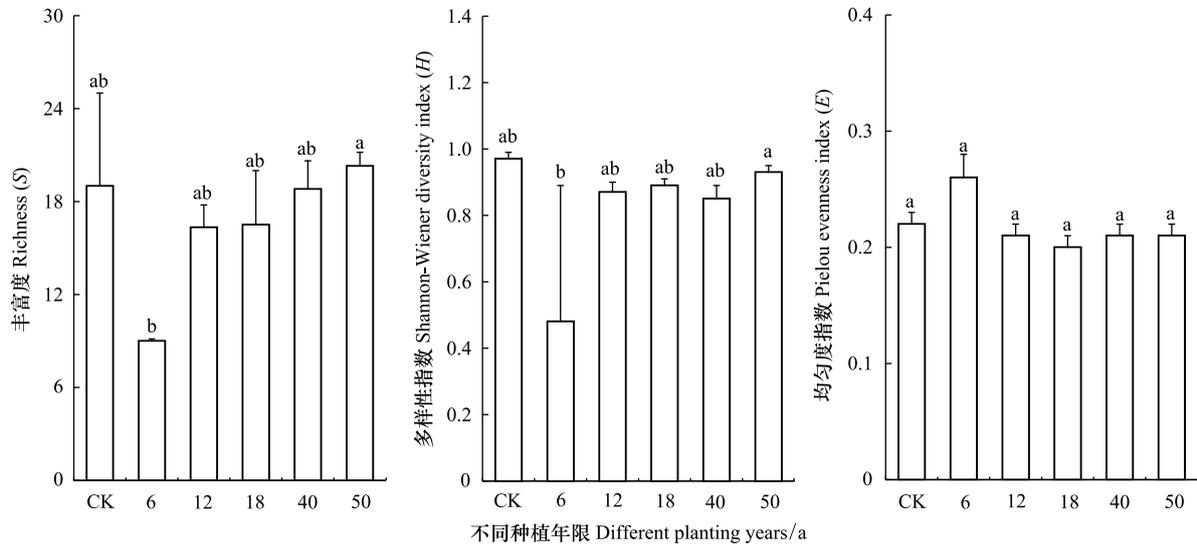


图3 不同种植年限柠条林下植物群落多样性指数

Fig.3 Diversity index of vegetation under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

次为野燕麦(43.58%)、披碱草(42.93%)、米蒿(41.31%)、狗尾草(35.25%)和胡枝子(33.84%),其中披碱草(多年生草本)、野燕麦和米蒿(一年生草本)在林下草本层中占据绝对的优势。在不同种植年限,CK(撂荒地)重要值最大的是多年生草本植物披碱草(10.88%);6—12 a 柠条林下重要值最大的是是一年生草本植物,其中6 a 柠条林下优势种为野燕麦(12.19%),12 a 柠条林下米蒿(9.65%);18—50 a 柠条林下重要值最大的是多年生草本植物披碱草,披碱草重要值随人工林种植年限增加而逐渐增加(表4)。

2.3 不同种植年限柠条林下植物种群生态位宽度变化特征

不同种植年限柠条林下草本植物种群生态位总宽度最大的分别为:米蒿(9.46)>野燕麦(9.34)>披碱草(8.77)>地梢瓜(8.66)>胡枝子(8.59)>猪毛菜(8.12)>披针叶苔草(8.03)(表5)。在不同种植年限,CK(撂荒地)生态位宽度最大的依次为猪毛菜(一年生草本)、披碱草(多年生草本)、黄耆(多年生草本)和胡枝子(半灌木);6 a 柠条林下生态位宽度最大是米蒿(一年生草本)和胡枝子(半灌木);12 a 柠条林下最大的为狗尾草(一年生草本);18—40 a 柠条林下最大的是米蒿(一年生草本);而50 a 柠条林下生态位宽度最大变为多年生草本植物披碱草(表5)。

从不同种植柠条林下草本植物群落中各物种生态位宽度和重要值相关关系来看(图4),在不同年限各物种重要值与生态位宽度均呈显著正相关关系,从总体来看,各物种生态位总宽度和重要值呈极显著正相关关系($P<0.01$),解释变量 $R^2=0.77$ 。

2.4 不同种植年限柠条林下植物种群生态位重叠值及其排序

不同种植年限柠条林下生态重叠存在显著变化,其中CK(撂荒地)平均生态位重叠系数最高的是多年生草本植物披碱草(0.41);种植前期(6—12 a)生态位重叠系数最大的是是一年生草本植物,其中6 a 柠条林下最大的是野燕麦(0.30),12 a 柠条林下为米蒿(0.29);柠条林种植中后期(18—50 a)生态位重叠系数最大的是多年生草本植物披碱草,生态位重叠系数分别为0.35、0.32和0.42(表6)(具体数据可见附表1—6)。

从不同种植年限柠条林下各物种生态位重叠系数物种系统聚类排序图来看(图5),CK(撂荒地)草本植物在排序图中分布较均匀,野燕麦(S6)、山苦荬(S23)、老鹳草(S42)、白莲蒿(S49)和胡枝子(S50)分布在靠近中心的位置;而50 a 柠条人工林下草本植物很多更加靠近中心位置,多种不同类型植物在中心聚集,其中米蒿(S1)、狗尾草(S7)、猪毛蒿(S17)、紫花地丁(S35)和地梢瓜(S37)在中心位置竞争激烈。

表 4 不同种植年限柠条林下各物种及其重要值
Table 4 The important values of all plant species vegetation under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

物种名 Species	科属 Families and genera	生活型 Plant life form	重要值 Important value/%							总和 Total (6—50 a)
			CK	6 a	12 a	18 a	40 a	50 a		
米蒿 <i>Artemisia dalai-lanae</i>	菊科蒿属	A	10.17	9.59	9.65	8.62	6.10	7.37	41.31	
青蒿 <i>Artemisia carifolia</i>	菊科蒿属	A	4.77	—	—	—	—	—	—	
泥胡菜 <i>Hemistepia lyrata</i>	菊科泥胡菜属	A	—	—	—	—	—	1.61	1.61	
无心菜 <i>Arenaria serpyllifolia</i>	菊科无心菜属	A	3.14	—	—	—	4.92	—	4.92	
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	菊科苍耳属	A	3.28	—	—	—	—	—	—	
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	禾本科燕麦属	A	6.04	12.19	6.56	8.42	7.66	8.74	43.58	
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科狗尾草属	A	3.69	11.67	6.70	5.32	7.12	4.43	35.25	
早熟禾 <i>Poa annua</i>	禾本科早熟禾属	A	—	—	—	2.58	—	1.65	4.23	
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	禾本科虎尾草属	A	—	—	—	—	2.64	—	2.64	
益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	唇形科益母草属	A	—	—	2.96	1.83	3.47	2.10	10.36	
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	藜科猪毛菜属	A	3.72	8.15	4.17	4.24	4.41	3.82	24.79	
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	藜科藜属	A	—	—	—	—	1.33	—	1.33	
车前 <i>Plantago asiatica</i>	车前科车前属	A	—	—	—	1.24	1.40	2.59	5.23	
青梢 <i>Celosia argentea</i>	苋科青梢属	A	—	—	1.89	—	—	—	1.89	
鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>	菊科鹤虱属	PA	—	—	4.02	—	—	1.18	5.20	
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	紫葳科角蒿属	PA	2.56	8.59	1.97	—	—	2.78	13.35	
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科蒿属	PA	—	—	—	—	4.56	1.90	6.46	
披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	禾本科披碱草属	P	10.88	—	6.55	11.24	10.83	14.31	42.93	
狼尾草 <i>Pennisetum dolopecuroides</i>	禾本科狼尾草属	P	—	—	—	—	2.09	2.61	4.71	
艾 <i>Artemisia argyi</i>	菊科蒿属	P	—	—	—	—	—	4.13	4.13	
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	菊科蒿属	P	—	—	3.45	—	3.02	—	6.47	
白苞蒿 <i>Artemisia lactiflora</i>	菊科蒿属	P	—	—	—	—	—	2.23	2.23	
山苦荬 <i>Iteis chinensis</i>	菊科苦荬菜属	P	4.26	—	3.15	3.86	4.48	1.23	12.73	
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	菊科苦苣菜属	P	—	—	4.99	—	—	1.81	6.81	
苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i>	菊科苦苣菜属	P	3.89	6.50	3.45	5.67	4.84	1.76	22.22	
小红菊 <i>Dendranthema chananii</i>	菊科菊属	P	—	—	—	—	2.98	—	2.98	
蓝刺头 <i>Echinops sphaerocephalus</i>	菊科蓝刺头属	P	—	—	—	5.90	—	—	5.90	
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科蒲公英属	P	2.45	—	4.11	—	—	—	4.11	
黄耆 <i>Astragalus membranaceus</i>	豆科黄芪属	P	2.77	—	4.07	4.67	2.64	3.07	14.45	
地角儿苗 <i>Oxytropis bicolor</i>	豆科棘豆属	P	2.43	5.85	2.93	2.82	1.95	1.72	15.27	

续表

物种名 Species	科属 Families and genera	生活型 Plant life form	重要值 Important value/%							总和 Total (6—50 a)
			CK	6 a	12 a	18 a	40 a	50 a		
小花米口袋 <i>Guelldenstaedtia verna</i>	豆科米口袋属	P	—	—	—	—	—	0.83	0.83	1.66
野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	豆科野豌豆属	P	—	—	—	—	—	—	2.09	2.09
黄芩 <i>Scutellaria baicalensis</i>	唇形科黄芩属	P	1.87	9.88	3.61	3.50	3.39	3.39	2.70	23.07
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	唇形科百里香属	P	—	—	1.77	—	4.45	4.45	3.95	10.17
紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	堇菜科堇菜属	P	—	—	—	1.08	1.49	1.49	2.54	5.11
堇菜 <i>Viola verecunda</i>	堇菜科堇菜属	P	—	—	—	—	—	—	0.91	0.91
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	萝藦科鹅绒藤属	P	2.53	4.78	2.43	3.07	2.43	2.43	5.12	17.83
披针叶苔草 <i>Carex lanceifolia</i>	莎草科苔草属	P	1.90	8.54	4.80	5.36	2.34	2.34	4.90	25.93
打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>	旋花科打碗花属	P	3.04	—	1.87	1.17	1.96	1.96	3.94	8.94
百蕊草 <i>Thesium chinense</i>	檀香科百蕊草属	P	1.52	—	2.30	3.17	1.87	1.87	2.04	9.38
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	蔷薇科委陵菜属	P	—	—	—	—	2.98	2.98	2.45	5.44
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	牻牛儿苗科老鹳草属	P	2.62	—	—	—	—	—	1.31	1.31
唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>	毛茛科唐松草属	P	—	—	—	—	—	—	1.53	1.53
蒺藜 <i>Tribulus terrester</i>	蒺藜科蒺藜属	P	—	—	—	—	1.37	1.37	—	1.37
天门冬 <i>Asparagus cochinchinensis</i>	百合科天门冬属	P	—	—	3.91	—	—	—	—	3.91
半边莲 <i>Lobelia chinensis</i>	桔梗科半边莲属	P	6.49	—	—	—	—	—	—	—
木贼 <i>Equisetum hyemale</i>	木贼科木贼属	P	1.79	—	—	—	—	—	—	—
西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	蓼科蓼属	P	1.06	—	—	—	—	—	—	—
白莲蒿 <i>Artemisia sacronum</i>	菊科蒿属	S	7.86	—	4.24	4.82	3.59	3.59	2.67	15.32
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	豆科胡枝子属	S	5.55	11.25	4.68	5.61	5.01	5.01	7.29	33.84
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	菊科蒿属	S	—	—	—	—	—	—	2.71	2.71

A:一年生草本 Annual;PA:一年至多年生草本 Annual-perennial;P:多年生草本 Perennial;S:灌木或半灌木 Semi-shrub;—”表示未出现此物种 Represents that there is no this species

表 5 不同种植年限村条林下各物种生态位宽度
Table 5 The niche breadth of all plant species under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

物种名 Species	科属 Families and genera	生活型 Plant life form	CK	生态位宽 Niche breadth					生态位总宽度 Total niche breadth(6—50 a)
				6 a	12 a	18 a	40 a	50 a	
米蒿 <i>Artemisia dalai-lanae</i>	菊科蒿属	A	1.99	2.00	2.97	2.00	4.95	6.89	9.42
青蒿 <i>Artemisia carifolia</i>	菊科蒿属	A	1.00	—	—	—	—	—	—
泥胡菜 <i>Hemistepia lyrata</i>	菊科泥胡菜属	A	—	—	—	—	—	1.00	1.00
无心菜 <i>Arenaria serpyllifolia</i>	菊科无心菜属	A	1.00	—	—	—	1.00	—	1.00
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	菊科苍耳属	A	1.00	—	—	—	—	—	—
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	禾本科燕麦属	A	1.63	1.98	2.93	1.95	4.86	6.88	9.34
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科狗尾草属	A	1.00	1.99	2.99	1.96	4.76	4.19	7.55
早熟禾 <i>Poa annua</i>	禾本科早熟禾属	A	—	—	—	1.00	—	2.93	3.09
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	禾本科虎尾草属	A	—	—	—	—	1.00	—	1.00
益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	唇形科益母草属	A	—	—	1.00	1.00	1.00	4.27	4.50
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	藜科猪毛菜属	A	2.00	1.86	2.49	1.96	4.87	5.36	8.12
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	藜科藜属	A	—	—	—	—	1.00	—	1.00
车前 <i>Plantago asiatica</i>	车前科车前属	A	—	—	—	1.00	3.62	2.54	4.53
青梢 <i>Celosia argentea</i>	苋科青梢属	A	—	—	1.00	—	—	—	1.00
鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>	菊科鹤虱属	PA	—	—	1.00	—	—	2.00	2.24
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	紫葳科角蒿属	PA	1.00	1.00	—	—	—	1.00	1.73
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科蒿属	PA	—	—	—	—	1.78	1.74	2.48
披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	禾本科披碱草属	P	2.00	—	2.00	1.91	4.62	6.93	8.77
狼尾草 <i>Pennisetum dolopecuroides</i>	禾本科狼尾草属	P	—	—	—	—	1.00	2.99	3.16
艾 <i>Artemisia argyi</i>	菊科蒿属	P	—	—	—	—	—	2.98	2.98
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	菊科蒿属	P	—	—	1.00	—	1.00	—	1.41
白苞蒿 <i>Artemisia lactiflora</i>	菊科蒿属	P	—	—	—	—	—	1.00	1.00
山苦荬 <i>Ikeris chinensis</i>	菊科苦荬菜属	P	1.57	—	1.95	1.85	4.61	2.95	6.10
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	菊科苦苣菜属	P	—	—	1.99	—	—	1.00	2.44
苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i>	菊科苦苣菜属	P	1.86	1.00	1.00	1.00	3.84	3.73	5.54
小红菊 <i>Dendranthema chananii</i>	菊科菊属	P	—	—	—	—	1.00	—	1.00
蓝刺头 <i>Echinops sphaerocephalus</i>	菊科蓝刺头属	P	—	—	—	1.00	—	—	1.00
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科蒲公英属	P	1.00	—	—	—	—	—	1.00
黄耆 <i>Astragalus membranaceus</i>	豆科黄耆属	P	2.00	—	1.94	1.89	2.94	4.64	6.12
地角儿苗 <i>Oxytropis bicolor</i>	豆科棘豆属	P	1.73	1.93	1.72	1.87	3.98	3.88	6.41

续表

物种名 Species	科属 Families and genera	生活型 Plant life form	生态位宽 Niche breadth						生态位总宽度 Total niche breadth(6—50 a)
			CK	6 a	12 a	18 a	40 a	50 a	
小花米口袋 <i>Guelldenstaedtia verna</i>	豆科米口袋属	P	—	—	—	—	1.00	2.00	2.24
野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	豆科野豌豆属	P	—	—	—	—	—	1.99	1.99
黄芩 <i>Scutellaria baicalensis</i>	唇形科黄芩属	P	1.00	1.97	1.00	1.00	1.00	1.99	3.29
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	唇形科百里香属	P	—	—	1.00	—	1.76	1.89	2.94
紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	堇菜科堇菜属	P	—	—	—	1.00	2.63	3.00	4.11
堇菜 <i>Viola verecunda</i>	堇菜科堇菜属	P	—	—	—	—	1.00	—	1.00
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	萝藦科鹅绒藤属	P	2.00	1.00	2.78	2.00	4.32	3.87	6.81
披针叶苔草 <i>Carex lanceifolia</i>	莎草科苔草属	P	1.00	1.00	2.63	1.00	4.46	6.79	8.66
打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>	旋花科打碗花属	P	1.48	—	1.00	1.00	3.99	6.82	8.03
百蕊草 <i>Thesium chinense</i>	檀香科百蕊草属	P	1.00	—	1.40	1.00	2.69	6.56	7.29
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	蔷薇科委陵菜属	P	—	—	—	—	1.00	4.92	5.02
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	牻牛儿苗科老鹳草属	P	1.00	—	—	—	—	1.99	1.99
唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>	毛茛科唐松草属	P	—	—	—	—	—	1.00	1.00
葶藶 <i>Tribulus terrester</i>	蒺藜科蒺藜属	P	—	—	—	—	1.00	—	1.00
天门冬 <i>Asparagus cochinchinensis</i>	百合科天门冬属	P	—	—	1.00	—	—	—	1.00
半边莲 <i>Lobelia chinensis</i>	桔梗科半边莲属	P	1.00	—	—	—	—	—	—
木贼 <i>Equisetum hyemale</i>	木贼科木贼属	P	1.00	—	—	—	—	—	—
西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	蓼科蓼属	P	1.00	—	—	—	—	—	—
白莲蒿 <i>Artemisia sacronum</i>	菊科蒿属	S	1.98	—	1.95	1.00	1.99	1.96	3.55
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	豆科胡枝子属	S	2.00	2.00	2.88	1.94	3.91	6.51	8.59
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	菊科蒿属	S	—	—	—	—	—	1.00	1.00

A:一年生草本 Annual;PA:一年至多年生草本 Perennial;P:多年生草本 Perennial;S:灌木或半灌木 Semi-shrub;“—”表示未出现此物种 Represents that there is no this species

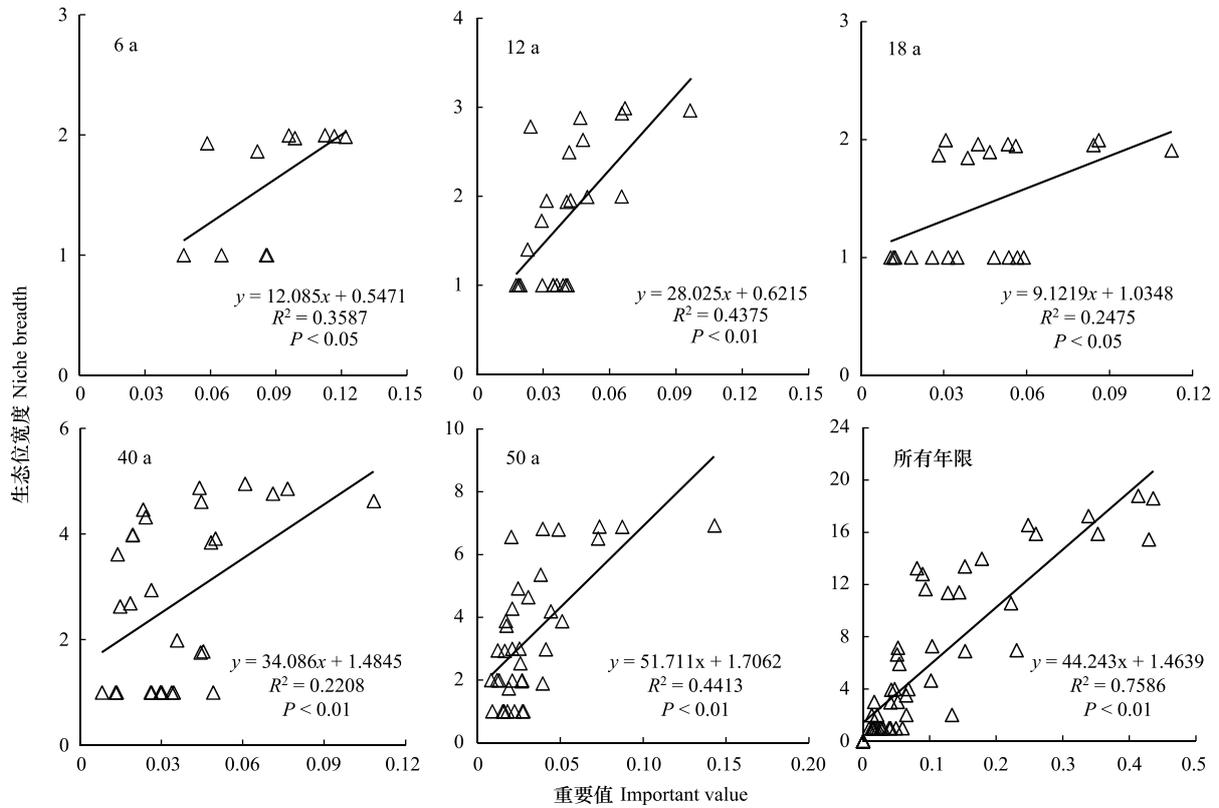


图 4 不同林龄柠条林物种生态位宽度与重要值相关关系

Fig.4 Correlation between niche width and importance values under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

表 6 不同种植年限柠条林下主要优势种平均生态位重叠

Table 6 Average niche overlap of dominant species under *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

优势种 Dominant species	群落 Community	生态位重叠系数 Niche overlap coefficient					
		CK	6 a	12 a	18 a	40 a	50 a
米蒿 <i>Artemisia dalai-lamae</i>	A	0.31	0.25	0.29	0.27	0.22	0.24
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	A	0.21	0.30	0.27	0.33	0.29	0.28
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	A	0.17	0.21	0.18	0.20	0.21	0.16
披针叶苔草 <i>Carex lancifolia</i>	P	0.08	0.22	0.23	0.19	0.11	0.16
披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	P	0.41	-	0.20	0.35	0.32	0.42
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	P	0.13	0.13	0.12	0.16	0.13	0.17
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	S	0.21	0.28	0.16	0.20	0.21	0.23

3 讨论

3.1 不同种植年限人工柠条林下植物群落的组成

物种多样性是反映植物群落物种组成、林分结构、动态演替以及群落稳定评价等方面的重要指标^[29-30]。本研究发现,植物多为菊科、禾本科、豆科和唇形科 4 大科植物,合计 31 种,占全部种数的 59.62%,说明 4 大科植物对丘陵风沙区的植被恢复与重建起到关键作用,这与郝文芳等^[31]在黄土丘陵区植被恢复物种多样性研究的结果相近。本研究还发现随着柠条林种植年限的增加,林下草本群落优势类群和优势种发生显著变化,种植前期(0—6 a)林下草本植物以一年生先锋物种(米蒿和野燕麦)为优势类群,伴生植物为多年生草本黄芩;而在种植中期(12—18 a),多年生草本植物优势明显,尤其是多年生草本植物披碱草,生物量、高度和密

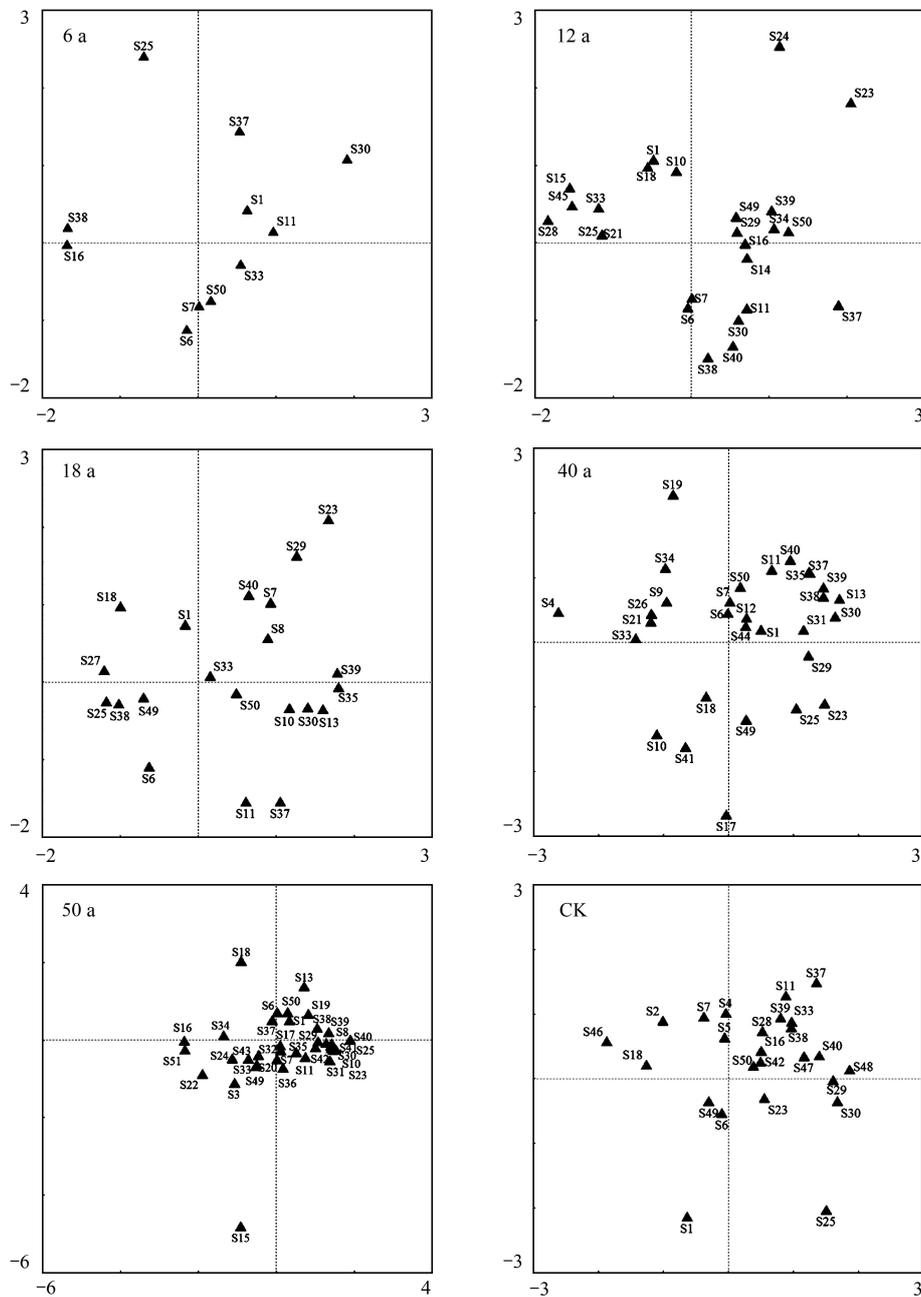


图5 生态位重叠系数的植物种系统聚类

Fig.5 Dendrogram of system clustering using niche overlap indices

S1:米蒿 *Artemisia dalai-lamae*; S2:青蒿 *Artemisia caruifolia*; S3:泥胡菜 *Hemistepta lyrata*; S4:无心菜 *Arenaria serpyllifolia*; S5:苍耳 *Xanthium sibiricum*; S6:野燕麦 *Avena fatua*; S7:狗尾草 *Setaria viridis*; S8:早熟禾 *Poa annua*; S9:虎尾草 *Chloris virgata*; S10:益母草 *Leonurus artemisia*; S11:猪毛菜 *Salsola collina*; S12:灰绿藜 *Chenopodium glaucum*; S13:车前 *Plantago asiatica*; S14:青葙 *Celosia argentea*; S15:鹤虱 *Lappula myosotis*; S16:角蒿 *Incarvillea sinensis*; S17:猪毛蒿 *Artemisia scoparia*; S18:披碱草 *Elymus dahuricus*; S19:狼尾草 *Pennisetum alopecuroides*; S20:艾 *Artemisia argyi*; S21:茵陈蒿 *Artemisia capillaris*; S22:白苞蒿 *Artemisia lactiflora*; S23:山苦荬 *Ixeris chinensis*; S24:苦苣菜 *Sonchus oleraceus*; S25:苣荬菜 *Sonchus arvensis*; S26:小红菊 *Dendranthema chanelii*; S27:蓝刺头 *Echinops sphaerocephalus*; S28:蒲公英 *Taraxacum mongolicum*; S29:黄耆 *Astragalus membranaceus*; S30:地角儿苗 *Oxytropis bicolor*; S31:少花米口袋 *Gueldestaedia verna*; S32:野豌豆 *Vicia sepium*; S33:黄芩 *Scutellaria baicalensis*; S34:百里香 *Thymus mongolicus*; S35:紫花地丁 *Viola philippica*; S36:堇菜 *Viola verecunda*; S37:地梢瓜 *Cynanchum thesioides*; S38:披针叶苔草 *Carex lancifolia*; S39:打碗花 *Calystegia hederacea*; S40:百蕊草 *Thesium chinense*; S41:委陵菜 *Potentilla chinensis*; S42:老鹳草 *Geranium wilfordii*; S43:唐松草 *Thalictrum aquilegifolium*; S44:蒺藜 *Tribulus terrester*; S45:天门冬 *Asparagus cochinchinensis*; S46:半边莲 *Lobelia chinensis*; S47:木贼 *Equisetum hyemale*; S48:西伯利亚蓼 *Polygonum sibiricum*; S49:白莲蒿 *Artemisia sacrorum*; S50:胡枝子 *Lespedeza bicolor*; S51:铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*

度都达到最大,重要值最高,且伴生植物为一年生草本植物米蒿;在种植后期(40—50 a)多年生草本植物在植物种群中的优势地位更加稳定,伴生植物多为天然灌木胡枝子和白莲蒿。这些结果表明种植柠条林从种植前期到中后期,群落组成多样性显著增加,林下草本层结构更趋于稳定,生态功能进一步增强。尤其在 50 a 柠条林下,多年生草本群落物种多样性和生物量达到最大,比自然恢复状态高出 1.22 倍,其中 50 a 柠条林下,一年生草本植物是自然恢复的 1.14 倍,多年生草本植物是 1.09 倍,这表明种植人工林有利于天然植被的恢复,生态恢复力稳定性高。

本研究结果表明,不同种植年限柠条林下草本植物丰富度指数(R)及 Shannon-Wiener 多样性指数(H)随柠条林生长年限的增加整体呈现显著增加的趋势,而 Pielou 均匀度指数(Jsw)变化趋势则与之相反,这与张晶晶^[32]等的研究结果相似。柠条林种植前期,盖度与密度较小,光照充足,为草本植物提供了适宜的生存空间,该阶段柠条林下草本应具有较高的物种多样性^[33—35],但是本研究结果与之相反,在人工柠条林种植前期(0—6 a),物种多样性反而比较小,构成林下草本植物多以一年生草本植物为主;柠条林种植中期(12—18 a),林下草本群落物种多样性显著增加,优势种群的优势度升高;柠条林种植后期(40—50 a)适应环境的新的物种开始出现,优势种群的优势度相对下降,但是物种数增加,植物的生长类型也趋向多样化。随着柠条林种植年限的增加,天然植物群落的生态效应趋于稳定,预计最终发展成为人工柠条林和稀树草原地区混合区域,更有利于改善农牧交错带脆弱的生态环境。

3.2 不同种植年限人工柠条林下植物不同种群生态位及生态位重叠特征

生态位宽度是一个物种所利用的各种资源之总和,是物种对环境资源利用及环境适应能力状况的反映^[36],物种生态位宽度越大,代表对环境的适应能力越强^[37],在有限的空间里更具有竞争力^[38]。本研究发现,柠条林随着种植年限的增加,个体冠幅不断增加(表 1),但同时柠条密度出现“自疏”现象,因此人工柠条林的郁闭度变化不显著,整体呈不明显增加趋势。在 6—40 a 人工柠条林下一年生草本植物(米蒿和野燕麦)生态位宽度值最大,而在 50 a 柠条林下耐旱多年生草本植物披碱草生态位宽度最大,占据大部分可利用的资源。同时我们发现,米蒿、狗尾草、野燕麦和披碱草等植物种群的生态位宽度较大且对资源的利用程度较高,在资源竞争中具有较强的竞争力,这些优势种作为人工柠条林植物群落的泛化种出现。而莩菜、少花米口袋、老鹳草和蒺藜等物种是生态位宽度较小的特化种,其在样方中出现的频率较低,说明这些植物对资源的竞争能力较弱,生态位宽度与优势度水平均处于较低的水平。不同物种的生态位宽度的此消彼长反映了整体群落演替的规律^[38],有助于更好地理解人工林下草本植物多样性的演替与发展方向。同时,本研究还发现林下植物物种的重要值与生态位宽度呈显著正相关,这表明人工林下植物占有更多的生态位,在演替后期林下草本植物群落可能在生态环境中发挥更为重要的作用^[36]。

生态位重叠一定程度上可以反映植物物种对环境资源的利用情况和与其他物种的竞争关系^[39—40],生态重叠系数越大,物种间存在的竞争关系越激烈,群落对环境资源的利用也更加充分^[41—42]。本研究发现,柠条林种植前期(6—12 a),野燕麦和米蒿种群(一年生草本)与其他植物种群的生态位重叠系数最高;柠条林种植中后期(18—50 a)多年生草本植物披碱草与其他植物种群的生态位重叠系数显著增加,最终达到最大。同时,本研究发现随着种植年限增加,林下植物物种多样性增加,林下一年生草本植物和多年生草本植物生态位宽度与生态位重叠系数也都出现明显的增加趋势,这说明林下的土壤资源水分或养分资源出现短缺,不同植物类群或种群出现明显的竞争,耐旱耐盐的植物也在不断增加,植物群落仍然处于过渡阶段。由于 0—20 cm 土壤含水量随着林龄的增加不断下降(图 6),浅根系草本植物需要不断扩展生态位适应土壤水分短缺带来的影

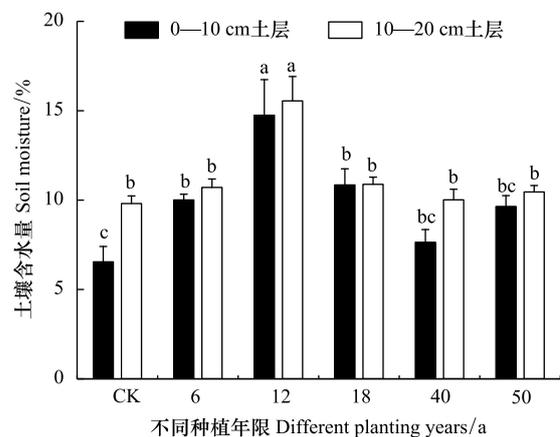


图 6 不同种植年限柠条林下土壤含水量变化

Fig.6 Changes of water content of *Caragana korshinskii* forest of different plantation ages

响,同时不同植物之间生态位出现重叠。而林下一些草本物种较小的生态位宽度却有较大的生态位重叠值,如角蒿、蓝刺头和黄芩等,这可能是由于生态位宽度较大的物种与其他物种的生态学特性和功能不同,对资源的利用方式存在差异^[43]。

4 结论

本研究发发现晋西北丘陵风沙区人工柠条林,在种植前期(0—12 a)林下植物群落主要以一年生先锋物种为优势种群,其中米蒿和野燕麦作为研究区生态位宽度及生态位重叠系数较高的植物种群,其在环境适应性及资源竞争中占据优势地位,但是群落组成和生态结构不稳定,仍处于人工林演替前期植物定居阶段;在柠条林种植中后期(18—50 a)草本植物多样性进一步增加,植物群落优势度最大变为多年生草本植物,其中披碱草的生态位宽度和重要值最高,成为林下优势种,同时,由于物种多样性增加和浅层土壤水分下降,一年生和多年生草本植物生态位宽度及生态位重叠系数进一步增加,竞争激烈,但依然以多年生草本植物为优势类群,50a 人工林林下植物群落处于演替的过渡阶段。

参考文献(References):

- [1] Wang G Y, Innes J L, Lei J F, Dai S Y, Wu S W. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556-1557.
- [2] Wang X P, Li X R, Zhang J G, Zhang Z S, Berndtsson R. Measurement of rainfall interception by xerophytic shrubs in re-vegetated sand dunes. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 897-910.
- [3] 李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. *科学通报*, 2013, 58(S1): 397-410.
- [4] 王世雷, 贺康宁, 刘可喧, 曹广月. 青海高寒区不同人工林下植被的多样性及生态位研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(11): 67-72.
- [5] 王新友. 石羊河流域人工固沙植被的固碳过程、速率和效益研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [6] 郑颖, 赵文智, 张格非. 基于 $V_{sub>Hegy}$ 竞争指数的绿洲边缘人工固沙植被梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的种群竞争. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 1127-1134.
- [7] 冯丽, 张景光, 张志山, 郭群, 李新荣. 腾格里沙漠人工固沙植被中油蒿的生长及生物量分配动态. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1132-1139.
- [8] 李进. 人工樟子松-差不嘎蒿植被及其固沙作用. *生态学杂志*, 1992, 11(3): 17-21, 27.
- [9] 周伶, 上官铁梁, 郭东罡, 高洪文, 王赞. 晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应. *生态学报*, 2012, 32(1): 111-122.
- [10] 薛建辉. 森林生态学. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [11] 覃林. 统计生态学. 北京: 中国林业出版社, 2009: 85.
- [12] Chesson P. Mechanisms of maintenance of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31: 343-366.
- [13] 李明, 蒋德明, 押田敏雄, 周全来, 骆永明. 科尔沁沙地人工固沙群落草本植物种群生态位特征. *草业科学*, 2009, 26(8): 10-16.
- [14] Leibold M A. The niche concept revisited: mechanistic models and community context. *Ecology*, 1995, 76(5): 1371-1382.
- [15] 程小琴, 韩海荣, 魏阿沙, 张延华, 伊力塔, 陈圆. 山西省庞泉沟自然保护区森林群落主要物种生态位特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(S2): 283-287.
- [16] 王伟伟, 杨海龙, 贺康宁, 王瑞斌, 王辉, 王晓. 青海高寒区不同人工林配置下草本群落生态位研究. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 156-160, 165.
- [17] 聂莹莹, 徐丽君, 辛晓平, 陈宝瑞, 张保辉. 围栏封育对温性草甸草原植物群落构成及生态位特征的影响. *草业学报*, 2020, 29(11): 11-22.
- [18] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 科尔沁沙地植物群落恢复演替系列种群生态位动态特征. *生态学报*, 2003, 23(12): 2741-2746.
- [19] 柳媛普, 张强, 赵建华, 王胜. 气温升高对黄土高原半干旱区陆面特征影响的数值模拟. *干旱区研究*, 2015, 32(6): 1097-1102.
- [20] 张军红, 吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展. *中国水土保持*, 2012(2): 40-43, 68.
- [21] 严俊霞, 冯璇, 薛占金, 李洪建. 山西省城市化与生态环境综合水平协调度分析. *山西大学学报: 自然科学版*, 2013, 36(2): 313-318.
- [22] 王国华, 宋冰, 席璐璐, 侯倩倩. 晋西北丘陵风沙区不同林龄人工柠条生长与繁殖动态特征. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2079-2088.
- [23] 梁海斌, 史建伟, 李宗善, 牛俊杰. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 87-93.
- [24] 白日军, 杨治平, 张强, 张训忠. 晋西北不同年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮矿化和硝化作用. *生态学报*, 2016, 36(24): 8008-8014.

- [25] 崔静, 陈云明, 黄佳健, 王琼芳, 姚志杰, 张飞. 黄土丘陵半干旱区人工柠条林土壤固碳特征及其影响因素. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1197-1203.
- [26] 马义娟, 苏志珠. 晋西北地区环境特征与土地荒漠化类型研究. 水土保持研究, 2002, 9(3): 124-126.
- [27] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版, 2004.
- [28] Levins R. Evolution in Changing Environments. Princeton: Princeton University Press, 1968.
- [29] Gao T, Hedblom M, Emilsson T, Nielsen A B. The role of forest stand structure as biodiversity indicator. Forest Ecology and Management, 2014, 330: 82-93.
- [30] 王继丰, 韩大勇, 王建波, 付晓玲, 朱道光, 刘赢男, 曹宏杰, 黄庆阳, 谢立红, 钟海秀, 隋心, 倪红伟. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化. 生态学报, 2017, 37(10): 3515-3524.
- [31] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 梁宗锁. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系. 草地学报, 2012, 20(4): 609-615.
- [32] 张晶晶, 王蕾, 许冬梅. 荒漠草原自然恢复中植物群落组成及物种多样性. 草业科学, 2011, 28(6): 1091-1094.
- [33] 程瑞梅, 肖文发, 李建文. 长江三峡库区草丛群落多样性的研究. 山地学报, 2005, 23(4): 4502-4506.
- [34] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 侯喜禄, 周生路. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [35] 崔静, 黄佳健, 陈云明, 曹扬, 王琳琳. 黄土丘陵区人工柠条林下草本植物物种多样性研究. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 14-20.
- [36] 王辉, 谢永生, 程积民, 摄晓燕. 基于生态位理论的典型草原铁杆蒿种群化感作用. 应用生态学报, 2012, 23(3): 673-678.
- [37] 刘巍, 曹伟. 长白山云冷杉群落主要种群生态位特征. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1766-1774.
- [38] Boulangeat I, Lavergne S, van Es J, Garraud L, Thuiller W. Niche breadth, rarity and ecological characteristics within a regional flora spanning large environmental gradients. Journal of Biogeography, 2012, 39(1): 204-214.
- [39] Alofs K M, Fowler N L. Loss of native herbaceous species due to woody plant encroachment facilitates the establishment of an invasive grass. Ecology, 2013, 94(3): 751-760.
- [40] Kraft N J B, Comita L S, Chase J M, Sanders N J, Swenson N G, Crist T O, Stegen J C, Vellend M, Boyle B, Anderson M J, Cornell H V, Davies K F, Freestone A L, Inouye B D, Harrison S P, Myers J A. Disentangling the drivers of β diversity along latitudinal and elevational gradients. Science, 2011, 333(6050): 1755-1758.
- [41] 林勇, 艾训儒, 姚兰, 黄伟, 陈斯. 木林子自然保护区不同群落类型主要优势种群的生态位研究. 自然资源学报, 2017, 32(2): 223-234.
- [42] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [43] Silva I A, Batalha M A. Plant functional types in Brazilian savannas: the niche partitioning between herbaceous and woody species. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2011, 13(3): 201-206.

附件 1

附表 1 6 a 柠条林下草本种群生态位重叠系数

序号 Number	S1	S6	S7	S11	S16	S25	S30	S33	S37	S38
S1	1.0000	0.0117	0.0112	0.0079	0.0079	0.0059	0.0056	0.0094	0.0048	0.0086
S6		1.0000	0.0143	0.0102	0.0096	0.0072	0.0070	0.0119	0.0063	0.0113
S7			1.0000	0.0097	0.0094	0.0071	0.0067	0.0114	0.0059	0.0106
S11				1.0000	0.0051	0.0039	0.0045	0.0078	0.0049	0.0088
S16					1.0000	0.0056	0.0060	0.0095	—	—
S25						1.0000	0.0045	0.0056	—	—
S30							1.0000	0.0059	0.0023	0.0040
S33								1.0000	0.0041	0.0074
S37									1.0000	0.0478
S38										1.0000

S1:米蒿 *Artemisia dalai-lamae*; S2:青蒿 *Artemisia caruifolia*; S3:泥胡菜 *Hemistepta lyrata*; S4:无心菜 *Arenaria serpyllifolia*; S5:苍耳 *Xanthium sibiricum*; S6:野燕麦 *Avena fatua*; S7:狗尾草 *Setaria viridis*; S8:早熟禾 *Poa annua*; S9:虎尾草 *Chloris virgata*; S10:益母草 *Leonurus artemisia*; S11:猪毛菜 *Salsola collina*; S12:灰绿藜 *Chenopodium glaucum*; S13:车前 *Plantago asiatica*; S14:青稻 *Celosia argentea*; S15:鹤虱 *Lappula myosotis*; S16:角蒿 *Incamillea sinensis*; S17:猪毛蒿 *Artemisia scoparia*; S18:披碱草 *Elymus dahuricus*; S19:狼尾草 *Pennisetum alopecuroides*; S20:艾 *Artemisia argyi*; S21:茵陈蒿 *Artemisia capillaris*; S22:白苞蒿 *Artemisia lactiflora*; S23:山苦荬 *Ixeris chinensis*; S24:苦苣菜 *Sonchus oleraceus*; S25:豨莶菜 *Sonchus oleraceus*; S26:小红菊 *Dendranthema chianetii*; S27:蓝刺头 *Echinops sphaerocephalus*; S28:蒲公英 *Taraxacum mongolicum*; S29:黄耆 *Astragalus membranaceus*; S30:地角儿苗 *Oxytropis bicolor*; S31:少花米口袋 *Gueldenstaedtia verna*; S32:野豌豆 *Vicia sepium*; S33:黄芩 *Scutellaria baicalensis*; S34:百里香 *Thymus mongolicus*; S35:紫花地丁 *Viola philippica*; S36:葶菜 *Viola verecunda*; S37:地梢瓜 *Cynanchum thesioides*; S38:披针叶苔草 *Carex lanceifolia*; S39:打碗花 *Calystegia hederacea*; S40:百蕊草 *Thesium chinense*; S41:委陵菜 *Potentilla chinensis*; S42:老鹳草 *Geranium wilfordii*; S43:唐松草 *Thalictrum aquilegifolium*; S44:蒺藜 *Tribulus terrester*; S45:天门冬 *Asparagus cochinchinensis*; S46:半边莲 *Lobelia chinensis*; S47:木贼 *Equisetum hyemale*; S48:西伯利亚蓼 *Polygonum sibiricum*; S49:白蓬蒿 *Artemisia sacrorum*; S50:胡枝子 *Lespedeza bicolor*; S51:铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*。—是样方内未同时出现的植物且没有生态位重叠

附表 2 12 a 柠条林下草本种群生态位重叠系数
Schedule 2 Niche overlap indices under *Caragana korshinskii* forest of 12 a

序号 Number	S1	S6	S7	S10	S11	S14	S15	S16	S18	S21	S23	S24	S25	S28	S29	S30	S33	S34	S37	S38	S39	S40	S45	S49
S1	1.0000	0.0086	0.0086	0.0026	0.0055	0.0021	0.0037	0.0018	0.0047	0.0039	0.0018	0.0029	0.0039	0.0046	0.0038	0.0039	0.0040	0.0020	0.0035	0.0075	0.0017	0.0031	0.0044	0.0042
S6		1.0000	0.0079	0.0032	0.0056	0.0015	0.0031	0.0015	0.0060	0.0028	0.0018	0.0023	0.0028	0.0033	0.0038	0.0041	0.0029	0.0014	0.0034	0.0063	0.0014	0.0036	0.0032	0.0033
S7			1.0000	0.0027	0.0054	0.0015	0.0037	0.0018	0.0060	0.0028	0.0016	0.0025	0.0028	0.0033	0.0039	0.0036	0.0029	0.0014	0.0034	0.0066	0.0017	0.0021	0.0032	0.0037
S10				1.0000	0.0028	—	—	—	0.0010	—	0.0006	—	—	—	0.0020	0.0017	—	—	0.0015	0.0011	—	0.0010	—	—
S11					1.0000	0.0006	0.0372	0.0010	0.0047	0.0011	0.0013	0.0012	0.0011	0.0013	0.0029	0.0031	0.0011	0.0006	0.0025	0.0037	0.0010	0.0031	0.0012	0.0018
S14						1.0000	—	—	—	0.0007	0.0003	0.0006	0.0007	0.0008	—	0.0005	0.0005	0.0003	0.0004	0.0019	—	—	0.0007	0.0007
S15							1.0000	0.0008	0.0020	—	—	0.0011	—	—	0.0020	—	—	—	0.0016	0.0035	0.0007	0.0005	—	0.0020
S16								1.0000	0.0010	—	—	0.0005	—	—	0.0010	—	—	—	0.0008	0.0017	0.0004	0.0002	—	0.0010
S18									1.0000	—	0.0013	0.0018	—	—	0.0027	0.0035	—	—	0.0028	0.0041	0.0009	0.0013	—	0.0033
S21										1.0000	0.0005	0.0011	0.0012	0.0014	—	0.0008	0.0008	0.0006	0.0008	0.0035	—	—	0.0013	0.0012
S23											1.0000	0.0005	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0006	0.0003	0.0007	0.0029	—	0.0013	0.0006	0.0006
S24												1.0000	0.0011	0.0013	0.0013	0.0007	0.0011	0.0005	0.0009	0.0027	0.0005	0.0003	0.0012	0.0012
S25													1.0000	0.0014	—	0.0008	0.0008	0.0006	0.0008	0.0035	—	—	0.0013	0.0012
S28														1.0000	—	0.0010	0.0010	0.0007	0.0010	0.0042	—	—	0.0016	0.0015
S29															1.0000	0.0020	—	—	0.0018	0.0028	0.0009	0.0013	—	0.0024
S30																1.0000	0.0009	0.0004	0.0017	0.0023	—	0.0033	0.0010	0.0010
S33																	1.0000	0.0004	0.0009	0.0037	—	—	0.0010	0.0013
S34																		1.0000	0.0004	0.0018	—	—	0.0007	0.0006
S37																			1.0000	0.0025	0.0007	0.0016	0.0009	0.0014
S38																				1.0000	0.0016	0.0016	0.0040	0.0039
S39																					1.0000	0.0002	—	0.0009
S40																						1.0000	—	0.0006
S45																							1.0000	0.0014
S49																								1.0000

附表 3 18 a 柠条林下草本种群生态位重叠系数
Schedule 3 Niche overlap indices under *Caragana korshinskii* forest of 18 a

序号 Number	S1	S6	S7	S8	S10	S11	S13	S18	S23	S25	S27	S29	S30	S33	S35	S37	S38	S39	S40	S49	S50
S1	1.0000	0.0107	0.0043	0.0024	0.0016	0.0057	0.0011	0.0112	0.0019	0.0049	0.0051	0.0033	0.0031	0.0030	0.0009	0.0046	0.0046	0.0010	0.0030	0.0041	0.0061
S6		1.0000	0.0057	0.0035	0.0018	0.0074	0.0012	0.0148	0.0007	0.0057	0.0059	0.0045	0.0042	0.0035	0.0011	0.0057	0.0053	0.0012	0.0043	0.0048	0.0065
S7			1.0000	0.0014	0.0007	0.0030	0.0005	0.0059	0.0010	0.0023	0.0024	0.0018	0.0017	0.0014	0.0004	0.0024	0.0022	0.0005	0.0017	0.0020	0.0032
S8				1.0000	—	0.0014	—	0.0035	0.0007	—	—	0.0012	0.0011	—	—	0.0014	—	—	0.0008	—	0.0020
S10					1.0000	0.0013	0.0002	0.0020	0.0003	0.0010	0.0011	0.0005	0.0005	0.0006	0.0002	0.0009	0.0010	0.0002	—	0.0009	0.0010
S11						1.0000	0.0009	0.0066	0.0013	0.0041	0.0043	0.0023	0.0021	0.0026	0.0008	0.0032	0.0039	0.0009	0.0017	0.0035	0.0042
S13							1.0000	0.0014	0.0002	0.0007	0.0007	0.0003	0.0003	0.0004	0.0001	0.0006	0.0007	0.0001	—	0.0006	0.0007
S18								1.0000	0.0026	0.0063	0.0066	0.0046	0.0043	0.0039	0.0012	0.0063	0.0060	0.0013	0.0043	0.0054	0.0061
S23									1.0000	0.0008	0.0009	0.0008	0.0012	0.0005	0.0002	0.0011	0.0008	0.0002	0.0021	0.0007	0.0015
S25										1.0000	0.0033	0.0016	0.0014	0.0020	0.0006	0.0028	0.0030	0.0007	—	0.0027	0.0031
S27											1.0000	0.0016	0.0015	0.0021	0.0006	0.0029	0.0032	0.0007	—	0.0028	0.0033
S29												1.0000	0.0013	0.0010	0.0003	0.0019	0.0015	0.0003	0.0014	0.0013	0.0025
S30													1.0000	0.0009	0.0003	0.0018	0.0028	0.0003	0.0014	0.0012	0.0007
S33														1.0000	0.0004	0.0017	0.0019	0.0004	—	0.0017	0.0019
S35															1.0000	0.0005	0.0026	0.0006	0.0017	0.0023	0.0034
S37																1.0000	0.0006	0.0001	—	0.0005	0.0006
S38																	1.0000	0.0006	—	0.0026	0.0030
S39																		1.0000	—	0.0006	0.0007
S40																			1.0000	—	0.0025
S49																				1.0000	0.0027
S50																					1.0000

附表 4 40 a 柠条林林下草本种群生态位重叠系数
Schedule 4 Niche overlap indices under *Caragana korshinskii* forest of 40 a

序号 Number	S1	S4	S6	S7	S9	S10	S11	S12	S13	S17	S18	S19	S21	S23	S25	S26	S29	S30	S31	S33	S34	S35	S37	S38	S39	S40	S41	S44	S49	S50	
S1	1.0000	0.0031	0.0062	0.0060	0.0016	0.0022	0.0044	0.0008	0.0014	0.0020	0.0095	0.0016	0.0019	0.0019	0.0022	0.0019	0.0013	0.0017	0.0006	0.0024	0.0043	0.0017	0.0025	0.0022	0.0020	0.0017	0.0019	0.0008	0.0015	0.0042	
S4		1.0000	0.0054	0.0039	—	—	0.0030	—	0.0009	—	0.0034	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0003	0.0030	0.0021	0.0030	0.0020	—	—	0.0013	0.0024	
S6			1.0000	0.0083	0.0019	0.0039	0.0062	0.0010	0.0018	0.0021	0.0101	0.0019	0.0022	0.0027	0.0027	0.0033	0.0020	0.0025	0.0008	0.0031	0.0047	0.0021	0.0036	0.0030	0.0030	0.0025	0.0033	0.0010	0.0022	0.0053	
S7				1.0000	0.0020	0.0038	0.0059	0.0010	0.0017	0.0028	0.0098	0.0020	0.0023	0.0026	0.0027	0.0023	0.0016	0.0023	0.0005	0.0022	0.0056	0.0019	0.0035	0.0029	0.0027	0.0020	0.0033	0.0010	0.0019	0.0052	
S9					1.0000	—	0.0013	0.0006	0.0003	0.0005	0.0031	0.0013	0.0015	0.0005	0.0009	—	0.0005	—	—	—	—	0.0003	0.0009	0.0013	0.0005	0.0005	0.0006	—	0.0015	0.0006	0.0019
S10						1.0000	0.0028	—	—	—	0.0055	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0015	0.0010	0.0009	—	—	—	—	—	
S11							1.0000	0.0006	0.0013	0.0016	0.0072	0.0013	0.0015	0.0019	0.0019	0.0018	0.0013	0.0017	0.0006	0.0024	0.0038	0.0016	0.0024	0.0021	0.0020	0.0016	0.0024	0.0015	0.0013	0.0038	
S12								1.0000	0.0001	0.0002	0.0016	0.0003	0.0004	0.0003	0.0004	—	0.0002	—	—	—	—	0.0002	0.0005	0.0007	0.0003	0.0003	—	0.0002	0.0003	0.0010	
S13									1.0000	0.0005	0.0018	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0006	0.0004	0.0006	0.0002	0.0009	0.0014	0.0005	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	—	0.0001	0.0004	0.0012	
S17										1.0000	0.0026	0.0005	0.0005	0.0006	0.0010	—	0.0017	—	—	—	0.0028	0.0006	0.0010	0.0009	0.0006	0.0004	—	0.0002	0.0004	0.0018	
S18											1.0000	0.0031	0.0036	0.0032	0.0030	0.0020	0.0021	0.0026	0.0009	0.0038	0.0052	0.0024	0.0040	0.0035	0.0030	0.0029	0.0047	0.0016	0.0022	0.0060	
S19												1.0000	0.0008	0.0005	0.0009	—	0.0005	—	—	—	—	0.0003	0.0009	0.0013	0.0005	0.0006	—	0.0004	0.0006	0.0019	
S21													1.0000	0.0006	0.0010	—	0.0005	—	—	—	—	0.0004	0.0011	0.0015	0.0006	0.0007	—	0.0004	0.0007	0.0022	
S23														1.0000	0.0008	0.0007	0.0005	0.0008	0.0002	0.0009	0.0014	0.0006	0.0011	0.0009	0.0008	0.0006	0.0013	0.0003	0.0005	0.0015	
S25															1.0000	0.0007	0.0006	0.0007	0.0002	0.0010	0.0021	0.0008	0.0011	0.0011	0.0009	0.0006	—	0.0005	0.0007	0.0020	
S26																1.0000	0.0008	0.0008	—	—	—	0.0002	0.0018	0.0013	0.0018	0.0012	—	—	0.0008	0.0015	
S29																	1.0000	0.0006	0.0002	0.0007	0.0008	0.0005	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	—	0.0002	0.0004	0.0013	
S30																		1.0000	0.0002	0.0009	0.0013	0.0007	0.0010	0.0007	0.0008	0.0008	0.0007	—	0.0008	0.0014	
S31																			1.0000	0.0003	0.0003	0.0004	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	—	—	—	0.0005	
S33																				1.0000	0.0012	0.0017	0.0005	0.0006	0.0002	0.0006	—	—	—	0.0019	
S34																					1.0000	0.0019	0.0017	0.0013	0.0013	0.0007	—	—	—	0.0036	
S35																						1.0000	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	—	0.0002	0.0002	0.0015	
S37																							1.0000	0.0010	0.0013	0.0011	0.0013	0.0005	0.0012	0.0022	
S38																								1.0000	0.0011	0.0010	0.0009	0.0007	0.0011	0.0021	
S39																									1.0000	0.0011	0.0008	0.0003	0.0010	0.0018	
S40																									1.0000	—	0.0003	0.0005	0.0016		
S41																									1.0000	—	—	—	—		
S44																										1.0000	0.0003	0.0010	0.0010		
S49																											1.0000	0.0015	0.0015		
S50																												1.0000	1.0000		

附表 6 撾荒地草本种群生态位重叠系数

Schedule 6 Niche overlap indices under *Caragana korshinskii* forest of CK

序号 Number	S1	S2	S4	S5	S6	S7	S11	S16	S18	S23	S25	S28	S29	S30	S33	S37	S38	S39	S40	S42	S46	S47	S48	S49	S50
S1	1.0000	0.0046	0.0030	0.0032	0.0058	0.0036	0.0052	0.0025	0.0143	0.0040	0.0027	0.0024	0.0030	0.0026	0.0018	0.0040	0.0018	0.0046	0.0015	0.0025	0.0063	0.0017	0.0010	0.0093	0.0062
S2		1.0000	0.0015	0.0016	0.0041	0.0018	0.0023	0.0012	0.0064	0.0029	0.0016	0.0012	0.0014	0.0007	0.0009	0.0019	0.0009	0.0009	0.0007	0.0012	0.0031	0.0009	0.0005	0.0039	0.0037
S4			1.0000	0.0010	0.0027	0.0012	0.0015	0.0008	0.0042	0.0019	0.0011	0.0008	0.0009	0.0005	0.0006	0.0012	0.0006	0.0006	0.0005	0.0008	0.0020	0.0006	0.0003	0.0026	0.0024
S5				1.0000	0.0028	0.0012	0.0016	0.0008	0.0044	0.0020	0.0011	0.0008	0.0010	0.0005	0.0006	0.0013	0.0006	0.0006	0.0005	0.0009	0.0021	0.0006	0.0003	0.0027	0.0026
S6					1.0000	0.0032	0.0029	0.0022	0.0080	0.0028	0.0018	0.0021	0.0017	0.0012	0.0016	0.0023	0.0016	0.0018	0.0013	0.0023	0.0056	0.0015	0.0009	0.0051	0.0041
S7						1.0000	0.0018	0.0009	0.0049	0.0023	0.0013	0.0009	0.0011	0.0006	0.0007	0.0014	0.0007	0.0007	0.0006	0.0010	0.0024	0.0007	0.0004	0.0030	0.0029
S11							1.0000	0.0013	0.0071	0.0020	0.0013	0.0012	0.0015	0.0013	0.0009	0.0020	0.0009	0.0023	0.0007	0.0013	0.0032	0.0009	0.0005	0.0046	0.0037
S16								1.0000	0.0034	0.0016	0.0009	0.0006	0.0008	0.0004	0.0005	0.0010	0.0005	0.0005	0.0004	0.0007	0.0017	0.0005	0.0003	0.0021	0.0020
S18									1.0000	0.0055	0.0037	0.0033	0.0041	0.0036	0.0025	0.0054	0.0025	0.0126	0.0020	0.0035	0.0087	0.0024	0.0014	0.0096	0.0085
S23										1.0000	0.0012	0.0015	0.0012	0.0008	0.0011	0.0016	0.0012	0.0012	0.0009	0.0016	0.0023	0.0011	0.0007	0.0035	0.0028
S25											1.0000	0.0008	0.0098	0.0006	0.0006	0.0010	0.0006	0.0010	0.0005	0.0009	0.0022	0.0006	0.0004	0.0023	0.0018
S28												1.0000	0.0007	0.0004	0.0005	0.0010	0.0005	0.0004	0.0004	0.0006	0.0016	0.0004	0.0003	0.0020	0.0019
S29													1.0000	0.0007	0.0006	0.0011	0.0006	0.0012	0.0005	0.0008	0.0020	0.0005	0.0003	0.0026	0.0018
S30														1.0000	0.0003	0.0010	0.0003	0.0013	0.0002	0.0004	0.0010	0.0003	0.0002	0.0024	0.0014
S33															1.0000	0.0007	0.0004	0.0003	0.0003	0.0005	0.0012	0.0003	0.0002	0.0015	0.0015
S37																1.0000	0.0007	0.0017	0.0006	0.0010	0.0025	0.0007	0.0004	0.0035	0.0024
S38																	1.0000	0.0003	0.0003	0.0005	0.0012	0.0003	0.0002	0.0016	0.0015
S39																		1.0000	0.0003	0.0005	0.0012	0.0003	0.0002	0.0036	0.0023
S40																			1.0000	0.0004	0.0010	0.0003	0.0002	0.0012	0.0012
S42																				1.0000	0.0017	0.0005	0.0003	0.0022	0.0020
S46																					1.0000	0.0012	0.0007	0.0053	0.0050
S47																						1.0000	0.0002	0.0015	0.0014
S48																							1.0000	0.0009	0.0008
S49																								1.0000	0.0055
S50																									1.0000