

DOI: 10.5846/stxb202107131883

王星, 宋珂辰, 许冬梅, 李永康, 撒春宁. 荒漠草原人工柠条林对冠下草本植物群落的保育作用. 生态学报, 2022, 42(18): 7372-7380.

Wang X, Song K C, Xu D M, Li Y K, Sa C N. Nurse effects of artificial forest of *Caragana intermedia* on herbaceous plant communities under its canopies in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7372-7380.

## 荒漠草原人工柠条林对冠下草本植物群落的保育作用

王 星<sup>1</sup>, 宋珂辰<sup>1</sup>, 许冬梅<sup>1,2,\*</sup>, 李永康<sup>1</sup>, 撒春宁<sup>1</sup>

1 宁夏大学农学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培养基地, 银川 750021

**摘要:**以宁夏盐池县荒漠草原人工柠条(*Caragana intermedia*)林为研究对象,分别选取柠条林冠下东侧(SE),冠下西侧(SW)及带间(Gap)为研究样地,从群落水平探讨柠条对冠下草本植物群落结构、物种多样性及功能群分布的影响。结果表明:(1)在3种微生境中均鉴定出12种植物,SW以蒙古冰草为优势种,SE以蒙古冰草和中亚白草为优势种,Gap则以蒙古冰草和牛枝子为优势种。(2)与Gap相比,SW和SE植物群落的平均高度分别增加了41.06%和81.75%,地上生物量分别增加了40.88%和38.73%。SW和SE中,禾本科植物地上生物量分别占地上总生物量的67.10%和58.40%,显著高于Gap( $P<0.05$ )。(3)柠条冠层效应使得草本植物的物种丰富度指数增加,但Shannon-Winner指数、Simpson指数和Pielou指数显著差异( $P>0.05$ ),变化范围分别为1.620—1.756、0.701—0.730和0.775—0.878。(4)冗余分析表明:土壤温度、空气相对湿度及土壤有机碳是影响草本植物物种多样性及生物量的主要因子,解释量分别为42.70%、11.70%和8.80%。研究表明,柠条对冠下草本植物群落尤其是禾本科植物具有一定的保育作用,该效应的产生主要是由于柠条冠下微气候及土壤环境因子的改善为草本植物的生长发育提供了有利条件。柠条对草本植物的保育作用对荒漠草原生态环境的保护与恢复具有重要意义。

**关键词:**人工柠条林;草本植物群落结构;物种多样性;环境因子;保育作用

## Nurse effects of artificial forest of *Caragana intermedia* on herbaceous plant communities under its canopies in desert steppe

WANG Xing<sup>1</sup>, SONG Kechen<sup>1</sup>, XU Dongmei<sup>1,2,\*</sup>, LI Yongkang<sup>1</sup>, SA Chunming<sup>1</sup>

1 Agricultural School of Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 State Key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwest China of Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** The nurse effects are critical for maintaining biodiversity and ecosystem functions in arid and semiarid areas. However, whether promoting or competing interactions dominate in regions with high biotic and abiotic stress remains unclear. In order to investigate the effects of artificial *Caragana intermedia* forest on the community structure, species diversity and functional group distribution of herbaceous plant communities under its canopy in desert steppe in Yanchi County, Ningxia, the eastern side under the canopies (SE), western side under the canopies (SW) and the gaps (Gap) were selected as the research plots. The vegetation characteristics, microclimate and soil factors were studied. The results showed that: (1) 12 plant species were identified in each of the 3 microhabitats. The dominant species in SW, SE and Gap were *Agropyron mongolicum*, *A. mongolicum* and *Pennisetum centrasiaticum*, *A. mongolicum* and *Lespedeza potaninii*, respectively, and the important values varied from 19.35 to 43.07. (2) Compared with Gap, the average height of plant communities for SW and SE increased by 41.06% and 81.75%, and the aboveground biomass increased by 40.88% and 38.73%, respectively. There were no significant differences in vegetation coverage among SW, SE and Gap ( $P>0.05$ ). The

**基金项目:**国家自然科学基金项目(32060405);宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)

**收稿日期:**2021-07-13; **采用日期:**2022-06-17

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

aboveground biomass of the gramineous plants occupied 67.10% and 58.40% of the total aboveground biomass and the important values of the gramineous plants were 62.17 and 66.79 in SW and SE respectively, which were significantly higher than that in Gap ( $P < 0.05$ ). (3) The canopy effects of *C. intermedia* increased the richness index of herbaceous plants, the species richness index of SW was 8.8, which was significantly higher than that of Gap ( $P < 0.05$ ). There were no significant effects of *C. intermedia* on Shannon-Winner index, Simpson index and Pielou index of herbaceous plant communities, which ranged from 1.620 to 1.756, 0.701 to 0.730 and 0.775 to 0.878 ( $P > 0.05$ ). (4) Redundancy analysis showed that soil temperature, relative air humidity and soil organic carbon were the main factors affecting herbaceous plant species diversities and biomass, and their explaining rates were 42.70%, 11.70% and 8.80% respectively. Based on the results of this study, the *C. intermedia* had a certain conservation effect on herbaceous plant communities under its canopies, especially Gramineae. This effect was mainly caused by the improvement of the microclimates such as relative air humidity, soil temperature and soil organic carbon under the canopies of *C. intermedia*, which provides favorable conditions for the growth and development of herbaceous plant. The nurse effect of *C. intermedia* on herbaceous plant is of great significance to the protection and restoration of the desert steppe ecological environment.

**Key Words:** artificial forests of *Caragana intermedia*; herbaceous plant community structure; species diversity; environmental factors; nurse effects

植物之间的相互作用是植物群落组成、多样性以及演替的关键驱动力,主要包括竞争、中性和促进作用<sup>[1]</sup>。近年来,植物之间的促进作用对种群和群落演替的影响已受到广泛关注,并被纳入许多生态模型<sup>[2]</sup>。促进作用通过直接或间接的影响机制使受益植物的适应性或生产力提高,并且通常假设在严酷环境中植物之间产生促进作用的可能性更大<sup>[3]</sup>。植物之间的促进作用支持半干旱地区植物的保育,促进作用可能也是严酷环境条件下生态系统功能和生物多样性维持的关键机制<sup>[4]</sup>。

与周围生境相比,一些植物能够缓解恶劣环境条件,保护其临近植物免受生物或非生物胁迫,为幼苗定居提供安全的场所,使易受胁迫危害的物种得以建立和生长,这种植物与植物之间的正向作用被称为“保育作用”,能够促进其他物种生长和发育的植物通常被称为“保育植物”<sup>[5-6]</sup>,被保护植物可从保育植物创建的“冠层效应”和“土壤效应”中受益<sup>[7]</sup>。“冠层效应”主要包括微气候的改善以及草本植物免受动物的采食,而“土壤效应”包括土壤物理、化学和生物学特性的改变<sup>[8-9]</sup>。冠层效应和土壤效应对植物的促进作用因物种而异,并不同程度地影响冠下植物的多样性<sup>[10]</sup>。灌木通过改善土壤养分等环境因子促进不同物种生长,增加冠下植物群落的物种多样性<sup>[3,11]</sup>;同时,灌木林冠的遮荫作用可以滤除喜光物种,并减少林下光照资源,使得冠下植物对光资源的竞争作用增强,进而降低了冠下植物群落的物种多样性<sup>[12-13]</sup>。以往的研究表明,保育作用改变了全球变化对森林<sup>[14]</sup>、草地<sup>[15]</sup>、高山<sup>[16]</sup>以及沙漠<sup>[12]</sup>生态系统植物群落的影响。但保育作用会在海拔高度变化、草食动物压力及水资源短缺等极端环境下崩溃,使植物之间相互作用的方式和结果很难预测<sup>[17]</sup>。

地处宁夏中北部的荒漠草原,生境干旱严酷,植物种类贫乏,植被盖度较低,生态环境脆弱敏感<sup>[18]</sup>。由于全球气候变化,加之人类活动的过度干扰,导致荒漠草原生产力降低,草地退化、沙化严重<sup>[19]</sup>。柠条又称中间锦鸡儿,属豆科锦鸡儿属植物。其冠层结构紧密,在盐池县荒漠草原区建植面积已达 60 万  $\text{hm}^2$ ,具有很强的防风固沙能力,对该地区生物多样性的维持及生态系统功能的稳定具有重要影响<sup>[20]</sup>。近年来对宁夏荒漠草原人工柠条林的研究主要集中在灌丛蒸散<sup>[21]</sup>、草本植物群落特征<sup>[20,22]</sup>、土壤特性<sup>[23-26]</sup>、土壤呼吸<sup>[27]</sup>、优势植物种子萌发<sup>[28]</sup>及平茬对荒漠草原植被、土壤的影响<sup>[29-31]</sup>等方面,而柠条灌丛对草本植物是否存在保育作用的相关研究鲜有报道。本研究以宁夏盐池县荒漠草原的人工柠条林为对象,分别选取冠下两侧和带间作为样地,研究草本植物群落结构、物种多样性和功能群特征,从群落水平验证柠条灌丛对林下草本植物是否具有保育作用;同时,结合环境因子调查,分析柠条灌丛对林下草本植物产生保育作用的原因。旨在为该地区人工柠条林建植后草本植物群落的构建及多样性的维持机制提供理论依据,对荒漠草原生态环境的保护与恢复具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县花马池镇四墩子村(107°16′—107°17′E, 37°43′—137°46′N), 地处毛乌素沙地南缘, 海拔 1450 m, 属于半干旱大陆性季风气候, 年平均气温 8.1°C, 1 月和 7 月平均气温分别为 -8.9°C 和 22.5°C, 年均无霜期 128 d。年均降水量约 280 mm, 且主要集中在 6—9 月份, 年平均蒸发量 2179.8 mm, 是年均降水量的 6—7 倍。土壤类型主要为灰钙土、淡灰钙土<sup>[25]</sup>。植被组成以蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、中亚白草 (*Pennisetum centrasiaticum*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*)、赖草 (*Leymus secalinus*) 和草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*) 等为主。研究区 2020 年及 2001—2019 年多年平均降水量和气温见图 1。

### 1.2 试验设计及野外调查、取样

以南北走向的人工柠条林为研究样地, 该人工柠条林建植于 1981 年, 为双行带状种植, 行距 1 m, 带间距 8 m, 柠条平均高度为 1.56 m, 冠幅为 2.24 m<sup>2</sup>。分别在柠条带的冠下东侧(SE)、西侧(SW)靠近柠条基茎处和带间中心位置(Gap)设置 1 m×1 m 的样方, 每个处理 6 个样方, 同一处理相邻样方之间间隔 8 m 以上, 共计 18 个样方。

于 2020 年 7—8 月植物生长最旺盛时期进行植被调查, 调查柠条林冠下和带间草本植物群落的物种组成、各物种的高度、盖度、密度和生物量<sup>[32]</sup>。同时, 监测空气及土壤温度、湿度等环境因子。去除地表覆盖物后, 挖掘土壤剖面, 采用多点混合法按 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 分层采集土壤样品, 同一土层混合后带回实验室, 用于土壤理化指标的测定; 同时, 采集原状土用于土壤团聚体的测定。荒漠草原人工柠条林不同微生境环境因子见表 1 和表 2。

表 1 荒漠草原人工柠条林冠下与带间土壤理化性状的变化(平均值±标准差)

Table 1 Changes of Soil physical and chemical properties under the canopies and gaps of artificial forest of *C. intermedia* in Desert Steppe (Mean±SD)

微生境 Microsite	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	土壤水稳性 大团聚体 Soil wet aggregates/%	土壤有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	土壤全氮 Soil total nitrogen/ (g/kg)	土壤全磷 Soil total phosphorus/ (g/kg)	土壤速效钾 Soil available potassium/ (mg/kg)
冠下西侧 Shrub west	16.98±2.95a	1.45±0.21a	7.36±0.76ab	0.36±0.03ab	0.30±0.02a	105.79±7.65a
冠下东侧 Shrub east	19.80±2.34a	1.46±0.02a	8.32±0.58a	0.43±0.02a	0.31±0.01a	90.72±4.66b
带间 Gap	11.75±1.64b	1.45±0.02a	6.02±0.33b	0.31±0.03b	0.28±0.01a	87.25±2.83b

不同小写字母表示不同微生境差异显著 ( $P < 0.05$ )

表 2 荒漠草原人工柠条林冠下与带间微气候的变化(平均值±标准差)

Table 2 Changes of microclimate under the canopies and gaps of artificial forest of *C. intermedia* in Desert Steppe (Mean±SD)

微生境 Microsite	空气相对湿度 Relative humidity/%	空气温度 Air temperature/°C	土壤湿度 Soil moisture/%	土壤温度 Soil temperature/°C
冠下西侧 Shrub west	40.73±1.06a	33.18±0.26a	7.76±0.58a	18.57±0.24b
冠下东侧 Shrub east	34.51±0.74ab	33.32±0.25a	7.94±0.33a	18.51±0.24b
带间 Gap	32.50±0.62b	33.54±0.17a	9.11±1.27a	19.76±0.22a

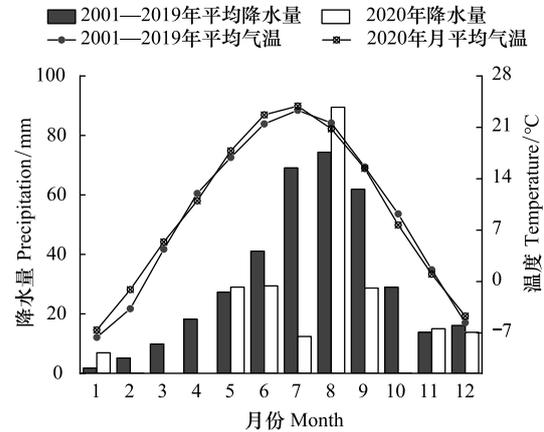


图 1 研究区 2020 年及 2001—2019 年多年平均降水量和气温

Fig.1 Precipitation and temperature in 2020 and average annual values from 2001 to 2019 in the study area

### 1.3 微气候的测定

采用 EL-USB-2 防水温湿度记录仪测定空气温度 (AT) 和相对湿度 (RH), 时域反射仪测定土壤湿度 (SM), 采用探针数字温度计测定 20 cm 处土壤温度 (ST)。

### 1.4 土壤指标的测定

土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定<sup>[33]</sup>; 土壤容重 (BD) 采用环刀法测定; 土壤有机碳 (SOC) 含量采用重铬酸钾法测定; 土壤全氮 (STN) 含量采用 BUCHI Labortechnik AG K-360 全自动凯氏定氮仪测定; 土壤全磷 (STP) 含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾 (SAK) 含量采用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定<sup>[34]</sup>。

### 1.5 数据计算与分析

草本植物群落物种重要值和多样性指数的计算<sup>[32]</sup>:

(1) 重要值

重要值 = (相对盖度 + 相对生物量 + 相对高度) / 3 × 100

(2) 物种多样性指数的计算

物种多样性指数计算方法较多, 大体可分为 3 类, 即丰富度指数、多样性指数和均匀度指数, 本文选用以下较为常用的几个计算公式:

Patrick 物种丰富度指数  $R = S$

Shannon-Wiener 多样性指数  $H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$

Simpson 指数  $D = 1 - \sum_{i=1}^s (p_i)^2$

Pielou 均匀度指数  $J_{sw} = \frac{H}{\ln S}$

式中,  $p_i$  为样方中第  $i$  物种的重要值,  $S$  为样方内草本植物物种的数目。

采用 Excel 2010 进行数据的基础处理, Origin 2018 制图; 采用 SPSS 23.0 统计软件进行方差分析和 Pearson 相关分析, Duncan 法进行多重比较; 采用 Canoco 5.0 进行 RDA 排序。

## 2 结果与分析

### 2.1 荒漠草原人工柠条林冠下与带间草本植物群落物种组成及其重要值

表 3 显示了荒漠草原人工柠条林冠下与带间草本植物群落物种组成及其重要值。可以看出, 在 SW、SE 和 Gap 3 种微生境中均鉴定出 12 种植物。其中, SW 优势种为蒙古冰草, 其重要值为 43.07, 伴生有较多的中亚白草和二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*), 重要值分别为 13.44 和 13.61; SE 植被组成以蒙古冰草和中亚白草为主, 重要值分别为 35.62 和 29.25, 伴生有一定量的牛枝子、二裂委陵菜等; Gap 以蒙古冰草和牛枝子为优势种, 其重要值分别为 27.14 和 19.35, 伴生有一定量的阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、二裂委陵菜和远志 (*Polygala tenuifolia*) 等。

### 2.2 荒漠草原人工柠条林对草本植物群落数量特征的影响

如图 2, SW 和 SE 微生境中草本植物的盖度分别为 45.50% 和 42.67%, 与 CK 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。SW 和 SE 微生境中草本植物的高度分别为 11.75 cm 和 15.14 cm, 地上生物量分别为 78.36 g/m<sup>2</sup> 和 77.16 g/m<sup>2</sup>, 均显著高于 CK 的 8.26 cm 和 55.56 g/m<sup>2</sup> ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 荒漠草原人工柠条林对草本植物功能群地上生物量及重要值占比的影响

如图 3, SW 和 SE 以禾本科植物地上生物量占比最高, 分别占地上总生物量的 58.41% 和 67.11%, 显著高于 Gap 的 28.03% ( $P < 0.05$ ); 豆科植物地上生物量占地上总生物量的比例以 Gap 最高, 显著高于 SW 和 SE 的 6.67% 和 14.11%; 杂类草地上生物量占地上总生物量的比例表现为 SW > Gap > SE, 但 3 种微生境之间差异不显

著 ( $P>0.05$ )。SW 和 SE 均以禾本科植物重要值比值最高,豆科植物最低,Gap 则以杂类草重要值比值最高;SW 和 SE 中禾本科植物的重要值比值分别为 62.17%和 66.79%,显著高于 Gap 的 35.77% ( $P>0.05$ );Gap 中豆科植物和杂类草重要值比值分别为 26.57%和 44.43%,显著高于 SW 和 SE ( $P>0.05$ )。

表 3 荒漠草原人工柠条林冠下与带间草本植物群落物种组成及其重要值

Table 3 Species composition and important values of herbaceous plant community under the canopies and gaps of artificial forests of *C. intermedia* in desert steppe

种名 Species	科名 Family	重要值 Important value		
		冠下西侧(SW) Shrub west	冠下东侧(SE) Shrub east	带间 Gap
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	禾本科	43.07	35.62	27.14
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	禾本科	2.65	—	—
中亚白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	禾本科	13.44	29.25	—
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科	1.68	1.42	—
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	禾本科	4.57	3.58	8.63
牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	豆科	5.59	11.45	19.35
草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	豆科	—	1.58	—
狭叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	豆科	1.00	—	—
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	菊科	4.53	8.83	13.43
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科	2.58	1.88	4.28
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科	—	—	1.44
叉枝鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i>	菊科	—	—	1.73
蒙古韭 <i>Allium mongolicum</i>	百合科	4.56	—	6.12
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	远志科	7.33	6.43	11.00
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科	13.61	9.78	11.92
匍根骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	蒺藜科	—	1.57	1.82
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	大戟科	—	1.00	3.08

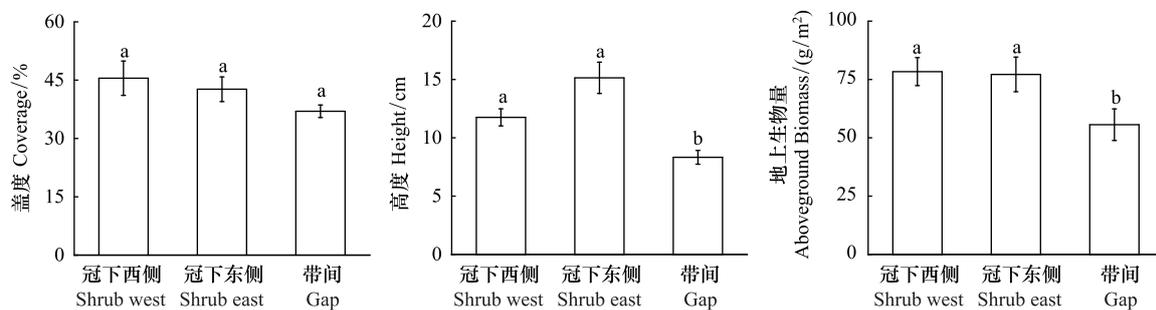


图 2 荒漠草原人工柠条林冠下与带间植物群落的数量特征

Fig. 2 Quantitative characteristics of plant communities under the canopies and gaps of artificial forests of *C. intermedia* in desert steppe

SW:冠下西侧 Shrub west;SE:冠下东侧 Shrub east; Gap:带间;同系列不同小写字母表示不同微生境差异显著 ( $P<0.05$ )

#### 2.4 荒漠草原人工柠条林对草本植物物种多样性的影响

荒漠草原人工柠条林冠下与带间草本植物物种多样性的变化见表 4。SW、SE 和 Gap 3 种微生境中草本植物的物种丰富度指数以 SW 最高,为 8.8,显著高于 Gap 的 6.8 ( $P<0.05$ )。SW、SE 和 Gap 3 种微生境之间的 Shannon-Winner 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数差异均不显著 ( $P>0.05$ ),变化范围分别为 1.620—1.756、0.701—0.730 和 0.775—0.878。

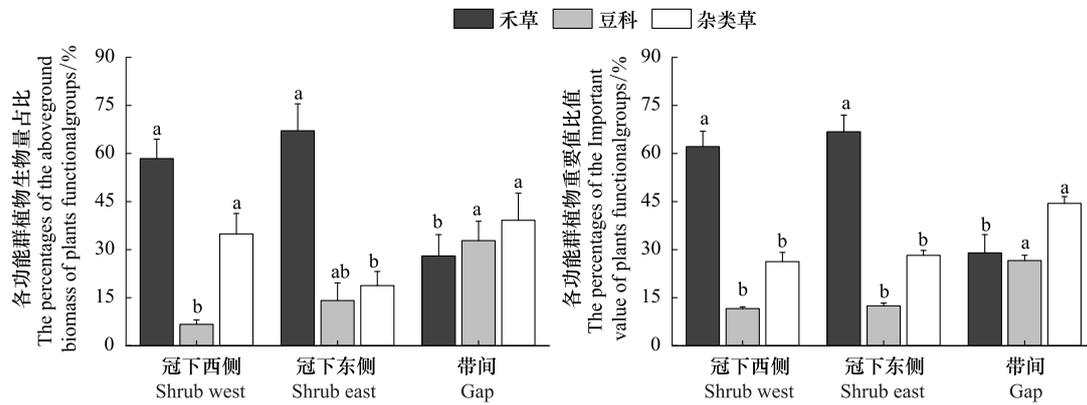


图 3 荒漠草原人工柠条林冠下与带间各功能群植物的地上生物量及重要值占比

Fig.3 Percentages of each functional group of aboveground biomass and important value under the canopies and gaps of artificial forests of *C. intermedia* in desert steppe

表 4 荒漠草原人工柠条林冠下与带间植物群落的物种多样性(平均值±标准差)

Table 4 Species diversities of plant communities under the canopies and gaps of artificial forests of *C. intermedia* in desert steppe

物种多样性指数 Species diversity index	冠下西侧 (SW) Shrub west	冠下东侧 (SE) Shrub east	带间 Gap
丰富度指数 Richness index	8.800±0.66a	7.200±0.52ab	6.800±0.33b
Shannon-Winner 指数 Shannon-Winner index	1.756±0.076a	1.682±0.056a	1.620±0.098a
Simpson 指数 Simpson index	0.730±0.024a	0.718±0.036a	0.701±0.061a
Pielou 指数 Pielou index	0.878±0.043a	0.821±0.029a	0.775±0.023a

2.5 荒漠草原人工柠条林植被与环境因子的关系

由图 4 及表 5 可知,RDA1 轴主要反映土壤有机碳和土壤温度的变化,随着土壤有机碳含量的增加和土壤温度的降低,植物物种丰富度指数、Shannon-Winner 指数和地上生物量增加;RDA2 轴主要反映空气湿度的变化,随着空气湿度的增加,物种丰富度指数、Shannon-Winner 指数、Simpson 指数、Pielou 指数和植物地上生物量均增加;土壤温度、空气相对湿度和土壤有机碳是显著影响草本植物物种多样性和群落生产力的因子,解释量分别为 42.70% ,11.70%和 8.80% ,贡献率分别达 51.60% ,14.20%和 10.60% ( $P<0.05$ )。

表 5 冗余分析排序及蒙特卡洛置换检验结果

Table 5 Results by redundancy analysis (RDA) ordination with the first two axes and Monte Carlo permutation test

环境因子 Environmental Factors	解释量 Explains/%	贡献率 Contribution/%	F	P
土壤温度 Soil temperature	42.700	51.600	11.900	0.002 **
土壤水分 Soil moisture	6.600	8.000	3.300	0.052
空气温度 Air temperature	3.400	4.200	1.400	0.254
相对湿度 Relative humidity	11.700	14.200	3.900	0.014 *
土壤水稳性大团聚体 Soil wet aggregates	4.000	4.900	1.800	0.162
土壤有机碳 Soil organic carbon	8.800	10.600	3.600	0.022 *
土壤全氮 Soil total nitrogen	1.000	1.200	0.500	0.648
土壤速效钾 Soil available potassium	4.500	5.400	1.800	0.242
特征参数 Characteristic parameter	RDA1	RDA2	RDA3	RDA4
特征值 Eigenvalues	0.632	0.173	0.016	0.004
累计解释变异 Explained variation	63.210	78.440	82.140	82.540
多样性-环境因子相关系数 Correlation	0.957	0.833	0.584	0.713

\*\* 表示相关极显著 ( $P<0.01$ ), \* 表示相关显著 ( $P<0.05$ )

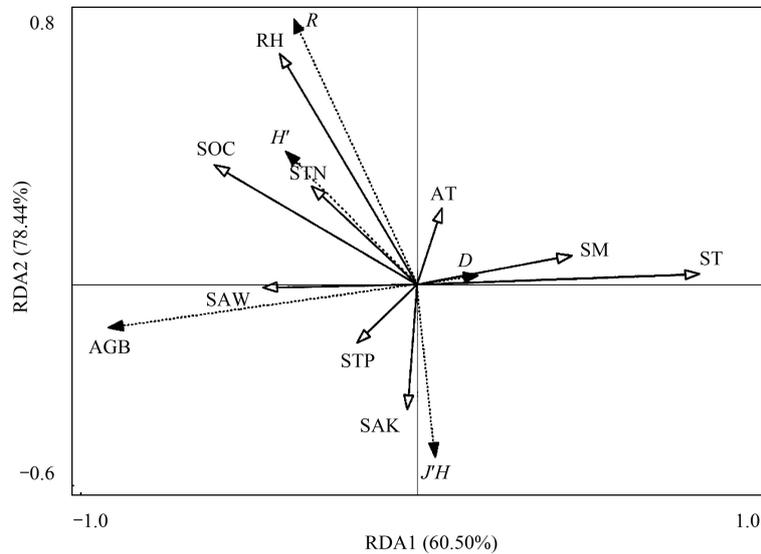


图4 荒漠草原人工柠条林植被与环境因子冗余分析排序图

Fig.4 Redundancy analysis biplot of vegetation and environmental factors of artificial forests of *C. intermedia* in desert steppe

R: 草本植物物种丰富度指数 Richness index of herbaceous plants; H: 草本植物 Shannon-Winner 多样性指数 Shannon-Winner diversity index of herbaceous plants; D: 草本植物 Simpson 指数 Simpson index of herbaceous plants;  $J_{sm}$ : 草本植物 Pielou 指数 Pielou index of herbaceous plants; AGB: 草本植物地上生物量 Aboveground biomass of herbaceous plants; ST: 土壤温度 Soil temperature; SM: 土壤湿度 Soil moisture; AT: 空气温度 Air temperature; RH: 相对湿度 Relative humidity; SAW: 土壤水稳性大团聚体 Soil wet aggregates; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; STN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; STP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; SAK: 土壤速效钾 Soil available potassium; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

### 3 讨论

#### 3.1 人工柠条林对冠下草本植物的保育作用

种植柠条可增加荒漠草原区植物种类,促进地表植被恢复,其生态效应优于天然草地自然演替形成的群落<sup>[20,35]</sup>。胁迫梯度假说预测,在恶劣环境中,植物之间的促进作用应该比竞争作用更强<sup>[36]</sup>。本研究中人工柠条林冠下(SW 和 SE)草本植物群落的高度、生物量及物种丰富度均显著高于带间,表明柠条对冠下草本植物的生长产生了保育作用,与该假说的预测结果相同。首先,柠条灌丛改善了冠下微气候和土壤结构,使得冠下局部资源增加并出现“肥岛”效应。其中,SW 和 SE 0—40cm 土层土壤水稳性大团聚体含量约是 Gap 的 1.4 倍和 1.7 倍,碳、氮、磷含量分别达 Gap 的 1.2—1.4 倍,土壤环境的改善为冠下草本植物的生长发育提供了更多资源获取的机会及适宜的生态位,为草本植物的繁殖和生长创造了更为有利的条件<sup>[37]</sup>,从而改善草本植物群落结构并提高生产力。其次,灌木斑块可以通过减少非生物胁迫促进下层草本植物的生长<sup>[38]</sup>,土壤理化性状改善的同时柠条灌丛可以缓冲土壤温度,拦截空气水分和植物种子<sup>[3]</sup>,为种子的萌发和幼苗生长提供庇护作用,进而提高草本植物生物量。

本研究中冠下草本植物群落的物种多样性与带间比较并没有显著增加。这可能是由于柠条灌丛虽然为冠下草本植物的萌发生长等创造了较好的条件,但其微生境的改善并不足以使荒漠草原原有物种发生替代,只是在数量特征上出现消长;此外,由于上层植物的遮阴作用,使冠下一些光竞争能力处于弱勢的豆科和杂类草物种受到抑制<sup>[39]</sup>,因而其物种多样性较柠条带间并未有明显变化。Madrigal-Gonzalez 等的研究也得出了相同结果,该研究认为保育灌丛对一年生植物产生了负面影响从而降低了其物种多样性<sup>[3]</sup>。

禾本科植物的丰富度、生物量占比和重要值比值显著高于带间,表明柠条对禾本科植物存在明显的促进作用。由于蒙古冰草、中亚白草等禾本科植物多为直立型,往往处于草本植物群落的上层,受环境胁迫的影响较强,而良好的灌木层可以缓冲生境破碎和气候逆境的影响,为冠下禾本科植物的生长发育提供较为适宜的

环境,其更新和存活能力增强,因此对灌木的促进作用响应更为明显<sup>[40]</sup>。田丽等<sup>[41]</sup>对毛乌素沙地东南缘优势灌丛对植物群落保育作用的研究中也表明,柠条能显著提高灌丛下层草本植物尤其是禾本科功能群的群落生产力。不同功能群植物对灌丛保育作用的响应程度不同,当保育植物与受益植物均为豆科时,保育效果并不理想<sup>[11]</sup>。这可能是由于保育植物与受益植物同属豆科植物,两者在生态位以及土壤资源的利用等方面存在竞争关系。

研究区 2000—2019 年年均降雨量为 306 mm,2020 年降雨量仅为 190 mm,与历年降雨量相比明显降低,表明即使在降雨量较低,极端干旱的条件下,柠条对草本植物的保育作用仍然存在。

### 3.2 草本植物群落变化的环境因子分析

植物间的相互作用主要是由微环境胁迫和资源利用所介导,灌木创造的微生境可以改变植物间的竞争性作用从而影响植物群落结构<sup>[42]</sup>。“肥岛”效应被认为是恶劣生境中构建植物群落和土壤微生物群落的关键机制,土壤环境的改变会引起局部资源的再分配以及植物生态位的分异,导致保育植物冠下和外部不同物种的生长,并可能增加物种丰富度及群落多样性<sup>[7,43]</sup>。Lu 等<sup>[38]</sup>的研究表明,土壤温度、水分和容重对六道沟黑沙蒿冠下草本植物的丰富度有显著影响。Liu 等<sup>[44]</sup>基于土壤含水量、土壤温度、pH 值、电导率、土壤有机碳和全氮的分析表明,土壤温度是显著影响 Shannon-Winner 指数的因子,土壤有机碳和全氮是显著影响物种丰富度的因子。Bai 等<sup>[45]</sup>基于氮沉降和降水增加试验,发现土壤全氮、可溶性无机氮、速效磷含量是影响宁夏荒漠草原油蒿冠下草本植物地上生物量的主要因子。Parajuli 等<sup>[46]</sup>基于土壤 pH 值、枯落物厚度、土壤有机碳、灌木高度的研究认为,雨季影响物种丰富度的主要因子是枯落物厚度和土壤 pH 值,旱季则是枯落物厚度和土壤有机碳。可见,保育植物通过改善冠下小气候和土壤环境,形成适合植物生存的微生境,使冠下植物物种多样性和生物量增加<sup>[44]</sup>。本研究基于空气温湿度、土壤温湿度、土壤结构及土壤养分等环境因子的冗余分析表明,随着土壤有机碳含量、空气相对湿度的增加及土壤温度的降低,植物物种丰富度指数、Shannon-Winner 指数和地上生物量增加,土壤有机碳、土壤温度和相对湿度是影响草本植物群落物种多样性和生产力的主要因子,解释量达 63.20%,验证了柠条冠层主导下的环境因子对植物多样性的驱动作用。

## 4 结论

柠条对荒漠草原冠下草本植物群落尤其是禾本科植物具有明显的保育作用,可明显提高草本植物的高度、地上生物量及物种丰富度。即使在极端干旱的条件下,促进作用仍然存在。

土壤温度、空气相对湿度及土壤有机碳是柠条对冠下草本植物群落物种多样性及地上生物量影响的主要驱动因子。

综上,柠条可通过改善林下生境条件对草本植物群落产生保育作用,增加草本植物群落的物种丰富度和地上生物量。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Ren H, Yang L, Liu N. Nurse plant theory and its application in ecological restoration in lower subtropics of China. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(2): 137-142.
- [ 2 ] Baldeomar M, Atala C, Molina-Montenegro M A. Top-down and bottom-up effects deployed by a nurse shrub allow facilitating an Endemic Mediterranean Orchid. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 466.
- [ 3 ] Madrigal-González J, Kelt D A, Meserve P L, Squeo F A, Gutiérrez J R. Shrub-ephemeral plants interactions in semiarid north-central Chile: Is the nurse plant syndrome manifested at the community level? *Journal of Arid Environments*, 2016, 126: 47-53.
- [ 4 ] Burke D J, Weintraub M N, Hewins C R, Kalisz S. Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 795-803.
- [ 5 ] Gonzalez S L, Ghermandi L. Dwarf shrub facilitates seedling recruitment and plant diversity in semiarid grasslands. *Plos One*, 2019, 14(2): e0212058.
- [ 6 ] 任海, 杨龙, 刘楠. 保育植物理论及其在南亚热带生态恢复中的应用. *自然科学进展*, 2007, 17(11): 1461-1466.
- [ 7 ] Badano E I, Cavieres L A, Molina-Montenegro M A, Quiroz C L. Slope aspect influences plant association patterns in the Mediterranean matorral of central Chile. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(1): 93-108.
- [ 8 ] Hunter M D, Price P W. Playing chutes and ladders: heterogeneity and the relative roles of bottom-up and top-down forces in natural communities.

- Ecology, 1992, 73(3): 724-732.
- [ 9 ] Gómez-Aparicio L, Gómez J M, Zamora R, Boettinger J L. Canopy vs. soil effects of shrubs facilitating tree seedlings in Mediterranean montane ecosystems. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16(2): 191-198.
- [ 10 ] Mihoč M A K, Giménez-Benavides L, Pescador D S, Sánchez A M, Cavieres L A, Escudero A. Soil under nurse plants is always better than outside: a survey on soil amelioration by a complete guild of nurse plants across a long environmental gradient. *Plant and Soil*, 2016, 408(1/2): 31-41.
- [ 11 ] Gómez-Aparicio L, Zamora R, Castro J, Hódar J A. Facilitation of tree saplings by nurse plants: microhabitat amelioration or protection against herbivores? *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(2): 161-172.
- [ 12 ] Iyengar S B, Bagchi S, Barua D, Mishra C, Sankaran M. A dominant dwarf shrub increases diversity of herbaceous plant communities in a Trans-Himalayan rangeland. *Plant Ecology*, 2017, 218(7): 843-854.
- [ 13 ] Liang E Y, Wang Y F, Piao S L, Lu X M, Camarero J J, Zhu H F, Ellison A M, Ciais P, Peñuelas J. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. *PNAS*, 2016, 113(16): 4380-4385.
- [ 14 ] Suttle K B, Thomsen M A, Power M E. Species interactions reverse grassland responses to changing climate. *Science*, 2007, 315(5812): 640-642.
- [ 15 ] Alexander J M, Diez J M, Levine J M. Novel competitors shape species' responses to climate change. *Nature*, 2015, 525(7570): 515-518.
- [ 16 ] Maestre F T, Bowker M A, Puche M D, Belén Hinojosa M, Martínez I, García-Palacios P, Castillo A P, Soliveres S, Luzuriaga A L, Sánchez A M, Carreira J A, Gallardo A, Escudero A. Shrub encroachment can reverse desertification in semi-arid Mediterranean grasslands. *Ecology Letters*, 2009, 12(9): 930-941.
- [ 17 ] Li P, Krüsi B, Li S, Cai X, Yu F. Facilitation associated with three contrasting shrub species in heavily grazed pastures on the eastern Tibetan Plateau. *Community Ecology*, 2011, 12(1): 1-8.
- [ 18 ] 荣浩, 何京丽, 张欣, 张林, 杨红艳. 荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 295-300.
- [ 19 ] 王乐, 杜灵通, 丹杨, 宫菲, 郑琪琪, 马龙龙, 孟晨. 不同气候变化情景下荒漠草原生态系统碳动态模拟. *生态学报*, 2020, 40(2): 657-666.
- [ 20 ] 刘任涛, 柴永青, 徐坤, 杨明秀, 朱凡. 荒漠草原区柠条固沙人工林地地表草本植被季节变化特征. *生态学报*, 2014, 34(2): 500-508.
- [ 21 ] 马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 王乐, 乔成龙, 吴宏玥. 基于茎流-蒸渗仪法的荒漠草原带人工灌丛群落蒸散特征. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 807-818.
- [ 22 ] 赵伟, 杨明秀, 陈林, 王磊, 宋乃平, 杨新国. 荒漠草原人工柠条林草本层植被的结构与动态. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(6): 723-731.
- [ 23 ] 曹媛, 杨新国, 陈林, 王兴, 宋乃平, 王磊. 柠条引入对沙化草地土壤颗粒组分的影响. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1437-1446.
- [ 24 ] 杨阳, 刘秉儒, 宋乃平, 杨新国. 人工柠条灌丛密度对荒漠草原土壤养分空间分布的影响. *草业学报*, 2014, 23(5): 107-115.
- [ 25 ] 赵亚楠, 于露, 周玉蓉, 王红梅, 马千虎, 陆琪. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响. *生态学报*, 2020, 40(4): 1305-1315.
- [ 26 ] 郭天斗, 于露, 孙忠超, 马彦平, 赵亚楠, 梁丹妮, 李志丽, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程中土壤胞外酶活性响应. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2541-2548.
- [ 27 ] 郭天斗, 赵亚楠, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤呼吸响应特征. *草业科学*, 2019, 36(12): 3052-3064.
- [ 28 ] 于露, 郭天斗, 孙忠超, 马彦平, 李志丽, 赵亚楠, 王红梅. 荒漠草原向灌丛地转变过程中两种优势植物种子萌发及阈值特征. *生态学报*, 2021, 41(10): 4160-4169.
- [ 29 ] 贾希洋, 周静静, 宿婷婷, 周瑶, 陈佳宝, 马红彬, 马静利, 王晓芳. 平茬密度对荒漠草原人工柠条林间生境的影响. *生态学报*, 2020, 40(12): 4126-4136.
- [ 30 ] 于瑞鑫, 王磊, 杨新国, 陈林, 蒋齐, 王兴, 陈娟. 平茬柠条的土壤水分动态及生理特征. *生态学报*, 2019, 39(19): 7249-7257.
- [ 31 ] 卞莹莹, 陈林, 王健明, 柳博文, 王家锐. 平茬对荒漠草原区人工柠条林地土壤理化性质的影响. *草地学报*, 2018, 26(6): 1347-1353.
- [ 32 ] 张金屯. *数量生态学(第三版)*. 北京: 科学出版社, 2018.
- [ 33 ] 孙权. *农业资源与环境质量分析方法*. 银川: 宁夏人民出版社, 2004.
- [ 34 ] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 35 ] 李淑君, 李国旗, 王磊, 徐坤, 陈林. 荒漠草原区不同林龄柠条林物种多样性研究. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(6): 82-87.
- [ 36 ] Bertness M D, Callaway R. Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994, 9(5): 191-193.
- [ 37 ] Peláez M, Dirzo R, Fernandes G W, Perea R. Nurse plant size and biotic stress determine quantity and quality of plant facilitation in oak savannas. *Forest Ecology and Management*, 2019, 437: 435-442.
- [ 38 ] Lu R, Zheng J Y, Jia C, Liu Y, Huang Z, He H H, Han F P, Wu G L. Nurse effects of patch-canopy microhabitats promote herbs community establishment in sandy land. *Ecological Engineering*, 2018, 118: 126-133.
- [ 39 ] 王婷, 杨思维, 花蕊, 楚彬, 叶国辉, 牛钰杰, 唐庄生, 花立民. 高寒草原植物功能群组成对退化程度的响应. *生态学报*, 2020, 40(7): 2225-2233.
- [ 40 ] Bai Y X, Zhang Y Q, Michalet R, She W W, Jia X, Qin S G. Responses of different herb life-history groups to a dominant shrub species along a dune stabilization gradient. *Basic and Applied Ecology*, 2019, 38: 1-12.
- [ 41 ] 田丽, 王孝安, 李晓炜. 毛乌素沙地东南缘植被恢复中优势灌木的保育作用分析. *干旱区研究*, 2016, 33(6): 1202-1208.
- [ 42 ] Montesinos-Navarro A, Storer I, Perez-Barrales R. Benefits for nurse and facilitated plants emerge when interactions are considered along the entire life-span. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2019, 41: 125483.
- [ 43 ] Gross K. Positive interactions among competitors can produce species-rich communities. *Ecology Letters*, 2008, 11(9): 929-936.
- [ 44 ] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y, Drake S. Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(5): 316-321.
- [ 45 ] Bai Y X, She W W, Zhang Y Q, Qiao Y G, Fu J, Qin S G. N enrichment, increased precipitation, and the effect of shrubs collectively shape the plant community in a desert ecosystem in northern China. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 135379.
- [ 46 ] Parajuli R, O'Connell Brien M J, Timilsina B, Pugnaire F I, Schöb C, Ghimire S K. Facilitation by a dwarf shrub enhances plant diversity of human-valued species at high elevations in the Himalayas of Nepal. *Basic and Applied Ecology*, 2021, 54: 23-36.