

DOI: 10.20103/j.stxb.202210102873

张敬敏, 珠娜, 蔡育蓉, 王储, 刘嘉慧, 李乐, 罗玉红, 徐大伟, 闫玉春. 小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 灌丛对草本群落特征的影响. 生态学报, 2023, 43(21): 8830-8839.

Zhang J M, Zhu N, Cai Y R, Wang C, Liu J H, Li L, Luo Y H, Xu D W, Yan Y C. Effects of *Caragana microphylla* on herbaceous community characteristics. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8830-8839.

小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 灌丛对草本群落特征的影响

张敬敏, 珠娜, 蔡育蓉, 王储, 刘嘉慧, 李乐, 罗玉红, 徐大伟, 闫玉春*

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

摘要: 基于干旱、半干旱草原灌丛化现象的发展, 探究灌木与草本之间的关系对深刻理解灌丛化对草原植物群落特征的影响机制具有重要意义。然而, 很少有研究考虑草地类型和灌丛斑块大小对灌木和草本植物之间关系的影响。在内蒙古典型草原和荒漠草原的自由放牧草地上选择了 18 个小叶锦鸡儿灌丛化样地进行野外采样, 并调查了不同大小灌丛和周围草地的植物群落特征。运用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 来检验不同大小灌丛斑块内外的植被群落特征 (高度、密度、地上生物量、凋落物量) 和植物多样性指数 (Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、丰富度指数、群落 Sprensen 相似性系数) 的差异性。结果表明: (1) 与草地相比, 两种草原类型的灌丛产生、捕获了更多的凋落物, 灌丛的保育作用显著提高了斑块内草本植物的高度, 但灌丛占用了生存空间和资源, 从而降低了斑块内草本植物的密度和地上生物量。(2) 灌丛对多年生草本植物的地上生物量有明显的抑制作用, 但对两种草原类型的一、二年生草本植物没有显著影响 (典型草原中的小灌丛除外)。(3) 两种草原类型的灌丛对草本植物多样性的影响存在差异。典型草原灌丛内多样性指数和丰富度指数低于灌丛外, 均匀度指数无显著变化, 灌丛斑块增大对草本植物物种丰富度产生了负面影响; 在资源相对匮乏的荒漠草原区, 灌丛并没有改变草本植物多样性指数, 但降低了草本植物物种丰富度, 并且大灌丛斑块内草本植物的均匀度指数降低。(4) 灌丛与草地斑块的群落相似性随灌丛斑块增大呈指数下降趋势, 小灌丛斑块和草地斑块之间的群落相似性在两种草原类型中最高。本研究表明灌丛对草本植物既有保育作用, 又存在竞争作用, 同时这些作用受到草地类型和斑块大小的影响。这对预测和调控灌丛侵占草地植物群落的动态具有重要意义, 为草地的优化管理提供了依据。

关键词: 干旱、半干旱草原; 灌丛化; 草地类型; 斑块大小; 物种多样性; 地上生物量

Effects of *Caragana microphylla* on herbaceous community characteristics

ZHANG Jingmin, ZHU Na, CAI Yurong, WANG Chu, LIU Jiahui, LI Le, LUO Yuhong, XU Dawei, YAN Yuchun*

Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Based on the development of shrub encroachment in arid and semi-arid grasslands, exploring the relationship between shrubs and herbs has important significance to deeply understand the mechanism of effects of shrub encroachment on grassland plant community characteristics. However, relatively few studies consider the effect grassland types and shrub patch size on the relationship between shrubs and herbs. We selected 18 sites with shrub-encroached of *Caragana microphylla* for field sampling in free grazing grasslands in typical steppe and desert steppe of Inner Mongolia, and investigated the plant community characteristics of different sizes of shrubs and adjacent interspaces. One-way analysis of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071070, 32230065); 中国农业科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (G2022-01-442021)

收稿日期: 2022-10-10; **网络出版日期:** 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanyuchun@caas.cn

variance (one-way ANOVA) and Least Significant Difference (LSD) were used to test the differences in plant community characteristics (height, density, aboveground biomass, litter mass) and plant diversity indexes (Shannon-Wiener index, Pielou index, richness index, community Sprensen similarity coefficient) inside and outside shrub patches with different sizes. The results were as follows. (1) Compared with interspace, the shrubs both in two grassland types produced and captured more litter and the height of herbaceous plants in the shrub patch was significantly increased by facilitation of shrub, but shrub occupied the living space and resources, which reduced the density and aboveground biomass of herbaceous plants in the patch. (2) Shrubs had obvious inhibitory effects on the aboveground biomass of perennial herbs, but had no significant effect on annual and biennial herbs in two grassland types (except for small shrubs in typical steppe). (3) There are differences in the effects of shrubs on herbaceous plant diversity in two grassland types. The diversity index and richness index in the shrubs in typical steppe were lower than those outside the shrubs, the evenness index did not change significantly, and the expansion of shrub patch had a negative impact on the richness of herb species. In desert steppe, with relatively scarce resources, shrubs did not change the diversity index of herbs, but decreased the richness index. We also found that the evenness index of herbs decreased in the large shrub patches. (4) The similarity of community between shrub patch and interspace showed an exponential downward trend with the expansion of shrubs, the similarity of community between small shrub patch and interspace was the highest in two grassland types. This study showed that shrubs had both facilitation and competition effects on herbs, and these effects were affected by grassland type and patch size. This was important to predict and regulate the dynamics of plant community in shrub-encroached grasslands, and provided basis for the optimal management of grassland.

Key Words: arid and semi-arid grassland; shrub encroachment; grassland type; patch size; species diversity; aboveground biomass

植物之间的相互作用一直是生态学研究的重要课题。尤其是在气候变暖^[1-2]、CO₂浓度增高^[3]、氮沉降^[4]、过度放牧^[5]、火烧^[6]等因素的影响下,灌丛化越来越严重,灌丛和草本植物之间的相互作用使草原植物群落特征发生了明显的变化。早期的理论证实植物物种间广泛存在竞争作用^[7],灌丛占据了大量的生存空间,并与草本植物竞争限制资源(即水、养分和光),不利于草本植物的生长、存活和繁殖,进一步导致草本植物生物量减少、物种多样性降低^[8-9]。另一方面,部分学者发现灌丛对草本植物有促进作用(facilitation),灌丛可以形成适宜生长的微环境、聚集土壤中的水分养分、对植物提供庇护场所、丰富了土壤种子库和微生物等,从而对草本植物生长产生了积极作用^[10-12]。因此,灌丛和草本植物之间存在较为复杂的相互作用机制。

草原作为重要的畜牧业生产基地和生态屏障,具有一定的经济意义和生态价值。而灌丛对草原植被产生的影响也一直是研究领域的焦点,目前相关研究大多数基于特定的草原类型开展,但不同草原类型之间环境因素的差异对灌丛和草本植被关系的调控不容忽视^[9, 13-15]。并且研究进一步表明,灌丛对草本植物的影响不仅受环境因子的调控,还可能与灌丛斑块大小和群落组成有关^[16-17]。灌丛斑块大小的改变意味着其枝条密度、灌层结构、养分需求的变化,那么灌丛对草本植物的影响(种子库、发芽率、群落组成、生产力等)可能会因灌丛大小而异,但目前尚未形成统一结论^[18-20]。基于此,深入了解灌丛在不同草原类型、斑块大小条件下对草本植物群落特征的影响,对草原修复管理具有重要指导意义。

在内蒙古典型草原和荒漠草原区选取不同大小梯度的小叶锦鸡儿灌丛斑块为研究对象,通过对照灌丛斑块内外草本植物群落特征,探究灌丛如何影响草本植物群落,为干旱、半干旱区灌丛化草地可持续管理提供理论依据。

1 试验地概况

研究区位于中国内蒙古锡林郭勒盟和乌兰察布市典型草原区和荒漠草原区(40—46° N, 110—120° E),

属大陆性气候,冬季干旱、多风且寒冷。典型草原区平均海拔 1048.53 m,年平均气温 2.92℃,年平均降水量 304.06 mm。土壤质地主要为砂壤土和砂土,其砂粒含量约为 77.49%。调查点小叶锦鸡儿灌丛覆盖度约为 6.14%;主要优势草本植物种多为多年生禾本科植物,例如冰草(*Agropyron cristatum*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等,还有一、二年生草本植物,如灰绿藜(*Oxybasis glauca*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等;荒漠草原平均海拔 1234.60 m,年平均气温 4.90℃,年平均降水量 266.73 mm。土壤质地以疏松的沙土为主,砂粒含量约占 81.15%。调查点小叶锦鸡儿灌丛覆盖度约为 9.56%;主要多年生植物种有银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等,一、二年生植物有画眉草(*Eragrostis pilosa*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)等。

2 研究方法

2.1 灌丛选择

野外实验于 2020 年 8 月中旬进行。实验样地均为小叶锦鸡儿灌丛化草地,且均为自由放牧草场,在典型草原区设置 10 个,荒漠草原区设置 8 个,样地间隔大于 20 km(图 1)。将外形大小具有差异的小叶锦鸡儿灌丛斑块和周围草地斑块作为研究对象,再根据灌丛面积^[21]将所选灌丛斑块划分为三种梯度(小 <2 m²;中 2—4 m²;大 >4 m²),在每个样地设置 3 个 20 m×20 m 小区作为重复,每个小区选择 3 个大小不同的灌丛斑块,具体情况如表 1。

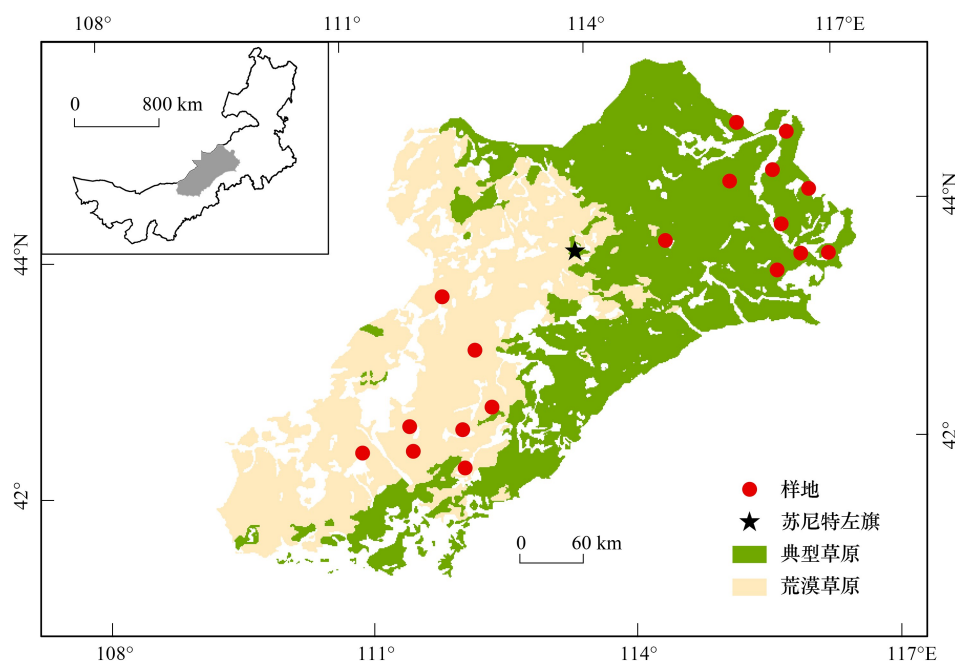


图 1 实验样地分布图

Fig.1 Distribution of experimental sites

2.2 植物群落调查

对选定的 162 个灌丛斑块和草地斑块进行成对取样,分别在灌丛中心和周围 2 m 处的草地设置 1 个 1 m×1 m 的样方。主要调查内容有植物种类组成、植被盖度、植物高度、株丛数及地上生物量。其中,植被盖度采用目视估计法测定;每种植物随机选取 3 株测量高度,3 株植物高度的平均值代表该物种高度;株丛数采用计数法测定;将样方内草本植物分物种齐地面刈割装至信封内并带回实验室在 65℃ 下烘干 72 h 至恒重,以此方法获取地上生物量。

表 1 典型草原和荒漠草原不同大小小叶锦鸡儿灌丛特征

Table 1 Shrub characteristics of *Caragana microphylla* in typical steppe and desert steppe

类型 Type	大小 Size	样本量 <i>n</i>	灌丛面积 Patch area/m ²	灌丛高度 Shrub height/cm	植被盖度 Plant coverage/%
典型草原 Typical steppe	小	30	1.30±0.06c	55.33±3.33a	67.90±2.65a
	中	30	2.72±0.11b	59.40±4.44a	68.37±2.55a
	大	30	5.56±0.23a	60.83±4.27a	70.10±2.97a
荒漠草原 Desert steppe	小	24	1.13±0.05c	38.54±2.32a	53.83±2.32a
	中	24	2.73±0.10b	59.04±7.19b	53.58±2.20a
	大	24	4.65±0.15a	61.67±7.11b	51.79±2.09a

不同小写字母代表同种草地类型下不同大小灌丛斑块之间有显著差异($P<0.05$)

2.3 数据统计分析

2.3.1 物种多样性指数

选用 Shannon-Wiener 指数(H), Pielou 指数(J)和丰富度指数(S)量化群落物种多样性特征^[22-23]。计算公式分别为:

重要值:
$$P_i = n_i / N \times 100 \tag{1}$$

Shannon-Wiener 指数:
$$H = - \sum (P_i \times \ln P_i) \tag{2}$$

Pielou 指数:
$$J = H / \ln S \tag{3}$$

丰富度指数:
$$S = R \tag{4}$$

式中, n_i 为第*i*个草本植物种的地上生物量, N 为样方内所有草本植物地上生物量之和, R 为样方内全部草本植物物种数。

2.3.2 群落相似性指数

群落 Sprensen 相似性系数(CC)^[24]则用来量化灌丛斑块和草地斑块草本植物群落的相似程度。计算公式如下:

$$CC = 2W / (a + b) \tag{5}$$

式中, W 为灌丛斑块和草地斑块的共有的植物种数, a 和 **b** 分别为两种斑块各自拥有的物种数。

2.3.3 灌丛对草本植物的影响

用相对作用强度(RII)量化灌丛对草本植物的影响^[25], RII 值接近于0表示无显著作用,正值表示促进作用,负值表示抑制作用。其公式为:

$$RII = (X_s - X_g) / (X_s + X_g) \tag{6}$$

式中, X_s 、 X_g 分别为灌丛斑块、草地斑块内草本植物的地上生物量。

2.3.4 分析方法

基于 Levene 检验样本间残差的正态性和同质性,使用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)来检验灌丛内外以及斑块大小之间的植被特征和植物多样性的差异。使用 SPSS 26 (IBM, Chicago, IL, USA)软件进行统计分析。

3 结果

3.1 不同大小灌丛斑块内外植物群落特征比较

在典型草原和荒漠草原灌丛斑块大小和草本植物群落高度、密度、地上生物量均符合指数拟合关系(图2)。随着灌丛斑块增大,除了典型草原草本植物高度略有上升趋势,其余指标在两种草原类型中均呈现轻微的下**降趋势**(图2)。与草地斑块相比,两种草原类型下的灌丛显著提高了草本植物群落的高度(荒漠草原大灌丛除外),降低了草本植物的密度($P<0.05$,图3)。在典型草原,中、大灌丛降低了草本植物地上生物量,小灌丛对草本植物地上生物量没有显著影响($P>0.05$)。而在荒漠草原,小、中和大灌丛都显著降低了草

本植物地上生物量($P<0.05$)。

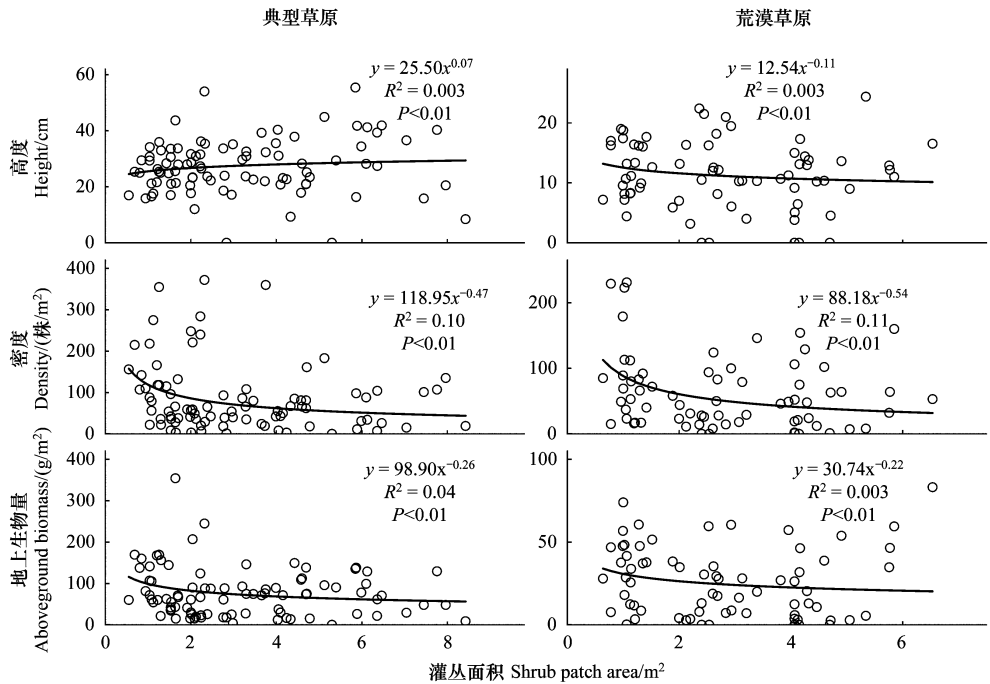


图 2 典型草原和荒漠草原灌木面积和灌木下草本植物高度、密度、地上生物量关系

Fig.2 Relationship between shrub patch area and herbaceous plant height, density, aboveground biomass in typical steppe and desert steppe

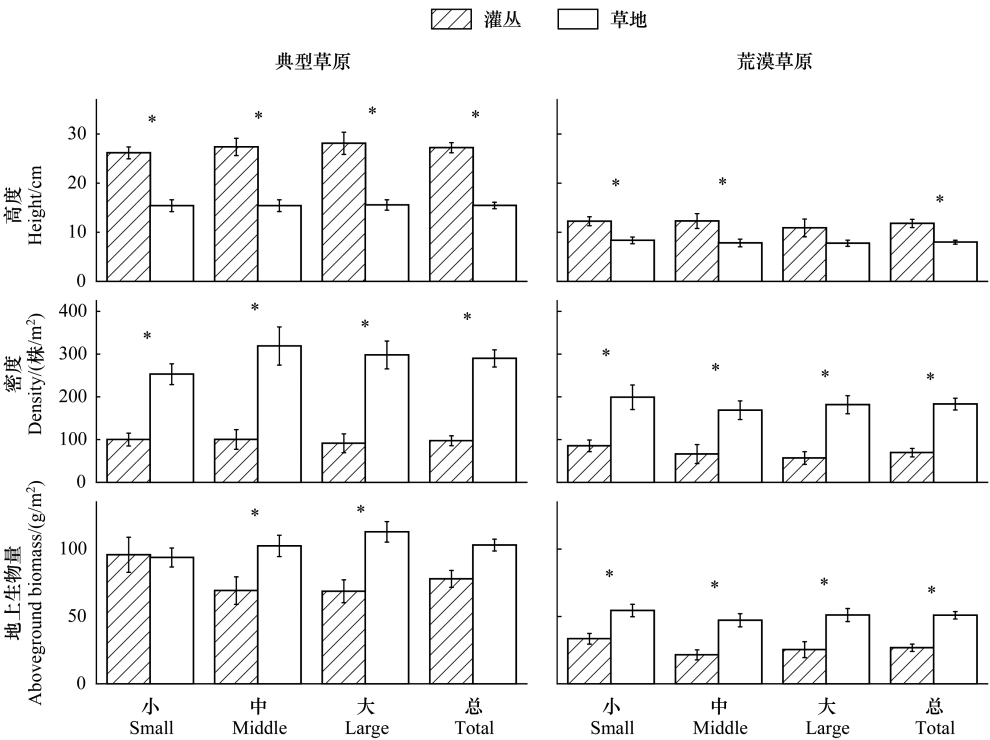


图 3 典型草原和荒漠草原不同大小灌木斑块内外的草本植物高度、密度、地上生物量

Fig.3 Herbaceous plant height, density, aboveground biomass in and out of shrub patches of different sizes in typical steppe and desert steppe

* 表示同种草地类型同种大小灌木斑块内外有显著差异($P<0.05$);不同小写字母代表同种草地类型不同大小灌木斑块或草地斑块之间有显著差异($P<0.05$)

相对作用强度(RII)值的结果表明,典型草原小灌丛对多年生禾本草、杂类草基本没有显著作用,而在中灌丛和大灌丛的影响下呈现负值;荒漠草原的灌丛对多年生草本的 RII 值均为负。两种草原的灌丛对一、二年生草本的 RII 值有正有负,作用不明显(图 4)。

由图 5 可知两种灌丛化草地的凋落物量主要集中在灌丛斑块内,但灌丛大小的作用没有体现出来($P>0.05$)。

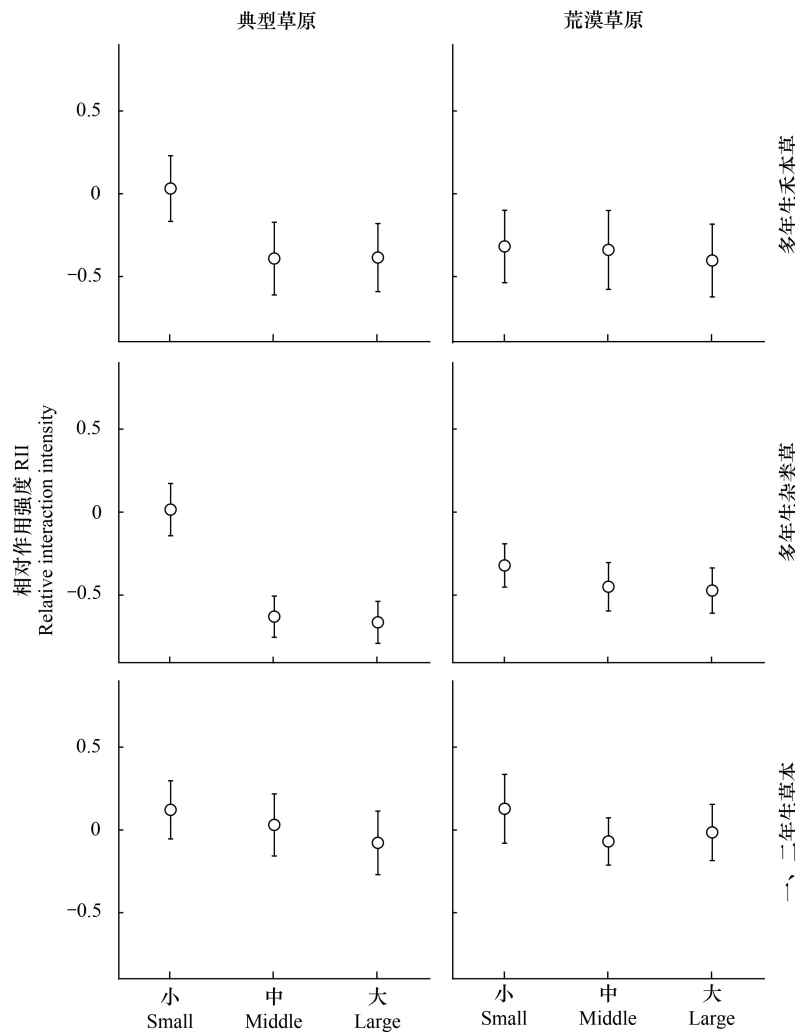


图 4 典型草原和荒漠草原灌丛对不同功能群草地上生物量的相对作用强度(RII)值

Fig.4 Relative interaction intensity (RII) values of typical steppe and desert steppe shrubs on grassland biomass of different functional groups

3.2 灌丛斑块内外物种多样性比较

由图 6 可知,在典型草原,灌丛内的丰富度指数低于灌丛外($P<0.05$),并且随着斑块增大,斑块内的物种丰富度下降($P<0.05$);灌丛并没有对草本群落的均匀度指数产生影响($P>0.05$)。

而在荒漠草原,与草地相比,灌丛下的多样性指数没有发生显著变化($P>0.05$);灌丛显著降低草本植物的物种丰富度($P<0.05$);均匀度指数的差异只体现在大灌丛斑块内外($P<0.05$),并且灌丛高于草地(图 6)。

3.3 灌丛斑块内外群落相似性比较

两种草原类型下灌丛斑块面积和内外草本植物群落相似性呈指数负相关(图 7)。其中,小灌丛斑块和草地斑块之间的相似度最高,中灌丛斑块和大灌丛斑块间的群落相似性指数差异性不显著($P>0.05$,图 8)。

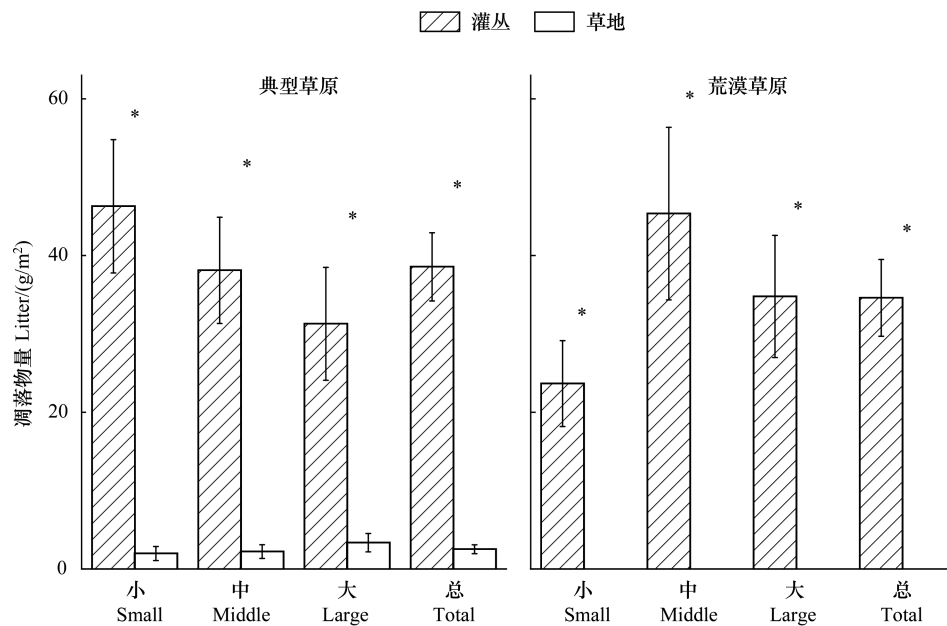


图5 典型草原和荒漠草原不同大小灌丛斑块内外的凋落物量

Fig.5 The litter inside and outside the shrub patches of different sizes in typical steppe and desert steppe

* 表示同种草地类型同种大小灌丛斑块内外有显著差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母代表同种草地类型不同大小灌丛斑块或草地斑块之间有显著差异 ($P < 0.05$)

4 讨论

本研究发现,与草地斑块相比,灌丛内的草本植物平均高度更高,这可能是因为灌丛的保育作用。一方面灌丛可以改善微环境,例如降低风速、减少温度波动、拦截大气粉尘和枯落物等^[13, 26];另一方面,小叶锦鸡儿会形成密集且布满刺的枝条,在一定程度上可以减少牲畜采食,对草本植物起到庇护作用^[27]。另外,这也可能是灌丛加剧了草本植物间光竞争的结果^[28]。随着灌丛的生长,枝叶更加繁茂,灌丛叶片的阻挡会使到达底层的光照更加有限,而灌丛下的草本植物为满足自身光需求需要通过增加高度获取足够的光资源^[29]。但在荒漠草原下,发现大灌丛斑块对草本植物高度没有显著影响,可能是因为植物对光资源的需求是建立在水肥充足的基础上^[30],荒漠草原由于土壤贫瘠、水资源匮乏,大灌丛斑块需要更多的养分和水分维持自身的生长,从而无法满足草本植物在光资源胁迫下的需求。研究结果表明灌丛下的草本植物密度和地上生物量显著低于周围草地,说明灌木和草本之间存在竞争作用。并且灌丛斑块面积增加,斑块内草本植物密度、地上生物量呈下降趋势,最直接的因素可能是灌丛枝条和根系大面积分布占用了大部分生存空间,草本植物可用空间减少,二者之间的资源竞争加剧,从而使草本植物的地上生物量减少^[31]。

典型草原灌丛显著降低了斑块内草本植物多样性,这与何俊龄等^[32]研究结果一致,但荒漠草原灌丛内外草本植物多样性变化不明显。目前关于灌丛对草本植物多样性的影响没有形成一致结论,安琪琪等^[33]在典型草原封育区的研究证明灌丛内外的多样性差异不显著,彭海英等^[31]研究表明不同利用方式下灌丛对草本植物多样性影响不同,所以灌丛对草本植物多样性影响受草原类型、管理方式等因素调控^[34]。结果表明灌丛降低草本植物丰富度,说明灌丛对草本植物的生态位构成了威胁,从而限制了部分草本植物的生长^[35]。并且在典型草原相较于小灌丛斑块,中、大灌丛冠层下的草本植物丰富度也在降低,进一步表明了灌草之间竞争加剧,对草本植物的生长产生了消极影响。草本植物均匀度的差异只体现在荒漠草原大灌丛斑块内外,其余皆不显著,这表明灌丛基本没有改变草本植物分配的均匀程度。本研究还发现,随着灌丛斑块的增大,其内外的群落相似性指数降低,结合草本植物功能群变化,认为其原因主要是灌丛和草本之间的竞争关系随着灌丛斑

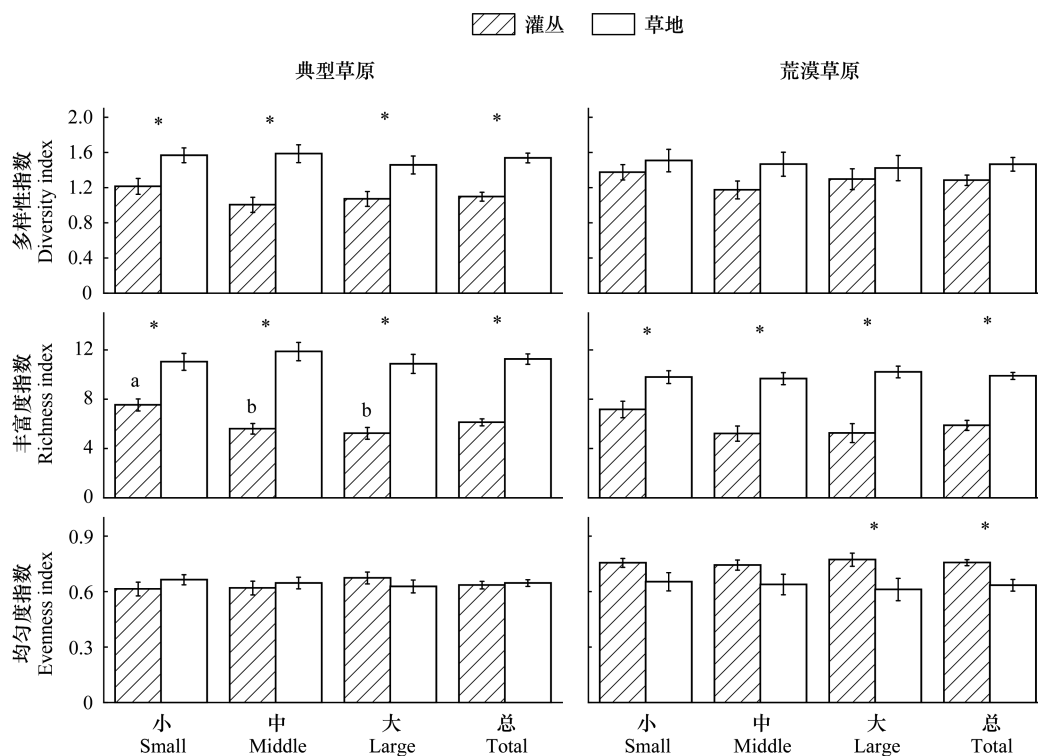


图6 典型草原和荒漠草原不同大小灌丛内外多样性指数

Fig.6 Diversity indices inside and outside the shrubs of different sizes in typical steppe and desert steppe

* 表示同种草地类型同种大小灌丛斑块内外有显著差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母代表同种草地类型不同大小灌丛斑块或草地斑块之间有显著差异 ($P < 0.05$)

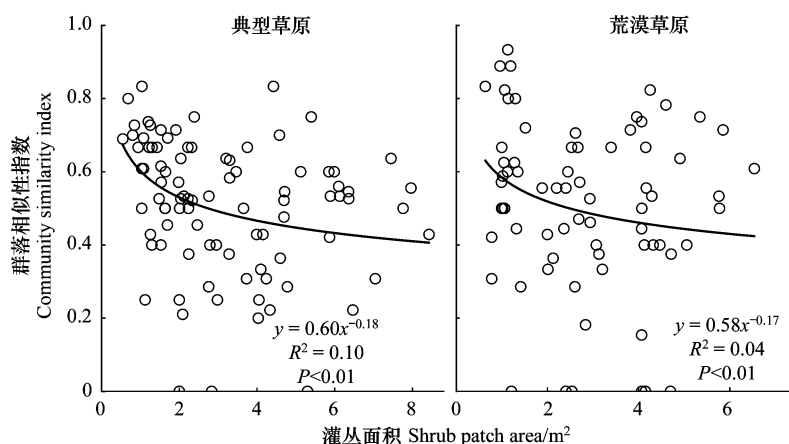


图7 典型草原和荒漠草原灌丛面积和灌丛斑块内外草本群落相似性指数关系

Fig.7 Relationship between shrub patch area and Herbaceous community similarity index inside and outside shrub patches in typical steppe and desert steppe

块增大而加剧,促使灌丛下的多年生草本植物减少^[36]。然而由于一、二年生草本具有高繁殖能力和快速生长特征^[23, 37—38],这在一定程度上弱化了灌丛对一、二年生草本的负面影响。

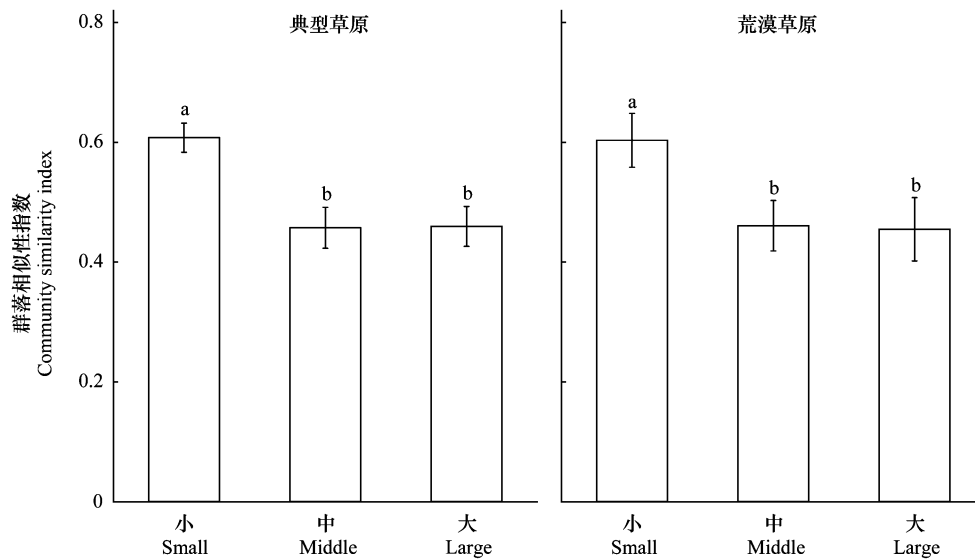


图 8 典型草原和荒漠草原灌木斑块和草地斑块草本植物群落相似性指数

Fig.8 The similarity index of herbaceous community between shrub patches and interspace in typical steppe and desert steppe

不同小写字母代表同种草地类型不同大小灌木斑块和周围草地斑块的相似性指数有显著差异($P<0.05$)

5 结论

基于典型草原和荒漠草原不同大小灌木斑块内外草本植物群落特征研究,灌木对草本植物展现了保育作用和竞争作用。灌木增加了斑块内的凋落物量和草本植物的高度,形成了利于草本植物生长的微生境;同时发现灌木也降低了草本植物的密度、生物量、物种丰富度,体现了灌木与草本的竞争关系。此外,典型草原的灌木降低了草本植物多样性,但荒漠草原的灌木基本没有改变草本植物多样性。随着灌木斑块增大,其内外群落相似性呈下降趋势。因此,评估灌木化对草原植物群落特征的影响应考虑草地类型和斑块大小因素。

参考文献 (References) :

- [1] Sanz-Elorza M, Dana E D, González A, Sobrino E. Changes in the high-mountain vegetation of the Central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming. *Annals of Botany*, 2003, 92(2) : 273-280.
- [2] Naito A T, Cairns D M. Patterns and processes of global shrub expansion. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(4) : 423-442.
- [3] Derner J D, Tischler C R, Polley H W, Johnson H B. Seedling growth of two honey mesquite varieties under CO₂ enrichment. *Rangeland Ecology & Management*, 2005, 58(3) : 292-298.
- [4] Yahdjian L, Sala O E. Size of precipitation pulses controls nitrogen transformation and losses in an arid Patagonian ecosystem. *Ecosystems*, 2010, 13(4) : 575-585.
- [5] Bahre C J, Shelton M L. Historic vegetation change, mesquite increases, and climate in southeastern Arizona. *Journal of Biogeography*, 1993, 20(5) : 489-504.
- [6] Joubert D F, Smit G N, Hoffman M T. The role of fire in preventing transitions from a grass dominated state to a bush thickened state in arid savannas. *Journal of Arid Environments*, 2012, 87: 1-7.
- [7] Callaway R. Positive interactions and interdependence in plant communities. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007
- [8] Chen L Y, Li H, Zhang P J, Zhao X, Zhou L H, Liu T Y, Hu H F, Bai Y F, Shen H H, Fang J Y. Climate and native grassland vegetation as drivers of the community structures of shrub-encroached grasslands in Inner Mongolia, China. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9) : 1627-1641.
- [9] 郭璞, 解李娜, 满良, 王金龙, 李清芳, 马成仓. 荒漠化草原锦鸡儿属灌木丛对牧草产量和植物多样性的影响. *草业科学*, 2019, 36(5) : 1215-1223.
- [10] Tewksbury J J, Lloyd J D. Positive interactions under nurse-plants: spatial scale, stress gradients and benefactor size. *Oecologia*, 2001, 127(3) : 425-434.

- [11] 唐蛟, 殷金忠, 潘飞飞, 李俊娜, 赵云飞, 吴大付. 生态恢复中灌丛保育效应研究进展. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2279-2285.
- [12] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2256-2265.
- [13] 赵哈林, 苏永中, 张华, 赵丽娅, 周瑞莲. 灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响. 中国沙漠, 2007, 27(3): 385-390.
- [14] 赵凌平, 梁方晖, 魏楠, 谭世图, 赵芙蓉, 李元晓. 短脚锦鸡儿扩张对典型草原植被与土壤的影响. 中国草地学报, 2020, 42(2): 169-174.
- [15] 王常顺, 孟凡栋, 李新娥, 姜丽丽, 汪诗平. 草地植物生产力主要影响因素研究综述. 生态学报, 2014, 34(15): 4125-4132.
- [16] Maestre F T, Valladares F, Reynolds J F. Is the change of plant-plant interactions with abiotic stress predictable? A meta-analysis of field results in arid environments. Journal of Ecology, 2005, 93(4): 748-757.
- [17] Zhang G F, Yang Q Y, Wang X F, Zhao W Z. Size-related change in *Nitraria sphaerocarpa* patches shifts the shrub-annual interaction in an arid desert, northwestern China. Acta Oecologica, 2015, 69: 121-128.
- [18] Miriti M N. Ontogenetic shift from facilitation to competition in a desert shrub. Journal of Ecology, 2006, 94(5): 973-979.
- [19] Bascompte J, Rodriguez M Á. Habitat patchiness and plant species richness. Ecology Letters, 2001, 4(5): 417-420.
- [20] Maestre F T, Cortina J. Remnant shrubs in Mediterranean semi-arid steppes: effects of shrub size, abiotic factors and species identity on understorey richness and occurrence. Acta Oecologica, 2005, 27(3): 161-169.
- [21] Zhang P J, Yang J, Zhao L Q, Bao S, Song B Y. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China. Plant and Soil, 2011, 347(1): 79-90.
- [22] 汪诗平. 不同放牧季节绵羊的食性及食物多样性与草地植物多样性间的关系. 生态学报, 2000, 20(6): 951-957.
- [23] 董世魁, 汤琳, 张相锋, 刘世梁, 刘全儒, 苏旭坤, 张勇, 武晓宇, 赵珍珍, 李钰, 沙威. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. 生态学报, 2017, 37(5): 1472-1483.
- [24] 王储, 闫玉春, 蔡育蓉, 王旭, 徐大伟, 珠娜, 张敬敏, 辛晓平, 陈金强. 呼伦贝尔草甸草原退耕后不同恢复期植物多样性变化. 中国农业资源与区划, 2022, 43(6): 197-206.
- [25] Armas C, Ordiales R, Pugnaire F. Measuring plant interactions: a new comparative index. Ecology, 2004, 85: 2682-2686.
- [26] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 魏冰. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展. 草业学报, 2015, 24(4): 201-207.
- [27] Filazzola A, Lortie C J. A systematic review and conceptual framework for the mechanistic pathways of nurse plants. Global ecology and biogeography, 2014, 23(11/12): 1335-1345.
- [28] 刘涛, 姬明飞, 邓燕等. 植物非对称性光竞争研究进展. 草业科学, 2020, 37(1): 156-167.
- [29] Brantley S T, Young D R. Leaf-area index and light attenuation in rapidly expanding shrub thickets. Ecology, 2007, 88(2): 524-530.
- [30] 邱波, 杜国祯. 高寒草甸植物群落物种多样性和生产力关系的光竞争研究. 西北植物学报, 2004, 24(9): 1646-1650.
- [31] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响. 生态学报, 2013, 33(22): 7221-7229.
- [32] 何俊龄. 金露梅对青藏高原高寒草甸植被特征和土壤性质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [33] 安琪琪, 乔文英, 李维军, 常小峰. 灌丛化对黄土高原草地植物群落结构和地上生物量的影响. 西北植物学报, 2021, 41(4): 664-671.
- [34] 魏楠, 赵凌平, 谭世图, 赵芙蓉. 草地灌丛化研究进展. 生态科学, 2019, 38(6): 208-216.
- [35] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431(7005): 181-184.
- [36] 牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 刘丽, 杜国祯, 花立民. 放牧干扰下高寒草甸物种和生活型丰富度与地上及地下生物量的关系. 生态学报, 2018, 38(8): 2791-2801.
- [37] Roscher C, Weigelt A, Proulx R, Marquard E, Schumacher J, Weisser W W, Schmid B. Identifying population- and community-level mechanisms of diversity-stability relationships in experimental grasslands. Journal of ecology, 2011, 99(6): 1460-1469.
- [38] 丁威, 王玉冰, 向官海, 迟永刚, 鲁顺保, 郑淑霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响. 植物生态学报, 2020, 44(1): 33-43.