

王子婷,杨磊,李广,等.黄土丘陵区坡面柠条(*Caragana korshinskii*)林地草本植物分布特征[J].中国沙漠,2021,41(2): 120–128.

## 黄土丘陵区坡面柠条(*Caragana korshinskii*) 林地草本植物分布特征

王子婷<sup>1,2</sup>, 杨磊<sup>3</sup>, 李广<sup>1</sup>, 柴春山<sup>2</sup>, 张洋东<sup>2</sup>, 刘冬皓<sup>2</sup>

(1.甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省林业科学研究院,甘肃 兰州 730020; 3.中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085)

**摘要:** 人工植被恢复会显著影响林下草本的分布及多样性,而人工植被恢复耦合坡面微地形变化对草本群落分布及其多样性响应尚缺乏系统的认识。以位于半干旱黄土丘陵区的甘肃定西龙滩小流域为研究区,系统调查和监测了不同坡向上、中和下坡位人工柠条(*Caragana korshinskii*)林地草本群落组成、生物量与柠条生长状况、凋落物量及土壤水分含量,分析草本群落的分布特征及其影响因素。结果表明:(1)不同坡向草本群落组成明显不同,阴坡人工柠条林地草本物种丰富度、优势度和多样性指数显著高于半阳坡和阳坡,而均匀度指数各坡向间差异不显著;(2)不同坡向间草本地上生物量为阴坡>半阳坡>阳坡,但差异不显著;阴坡上、中坡位草本生物量显著高于下坡位,半阳坡和阳坡各坡位间草本生物量差异不显著;(3)pRDA分析结果表明,坡向影响了坡面水热条件,对草本分布的影响最大,解释了15.2%的草本群落变异;(4)柠条种植密度和坡向与草本物种丰富度呈显著负相关;阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)和长芒草(*Stipa bungeana*)与坡向呈显著正相关,主要分布在阴坡,茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)和赖草(*Leymus secalinus*)等与坡向呈显著负相关,主要分布在阳坡。半干旱黄土丘陵区坡向通过影响水热条件从而影响了植被生长,坡面微地形调整可以在一定程度上削弱坡位对草本植物生长的影响,但坡向及人工植被种植密度决定了草本的分布格局。

**关键词:** 半干旱黄土丘陵区;坡向;坡位;柠条(*Caragana korshinskii*);草本群落

文章编号: 1000-694X(2021)02-120-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00115

中图分类号: Q948.15

文献标志码: A

## 0 引言

人工植被恢复与建设是黄土高原地区控制水土流失的重要措施<sup>[1-3]</sup>,尤其在半干旱黄土丘陵区,破碎的地形及干旱少雨的气候条件,决定了人工植被恢复中应遵循地带性规律及适地适树原则<sup>[1-2]</sup>,在种植密度上须考虑土壤水分植被承载力<sup>[4-5]</sup>,以维持人工植被生态系统的稳定性和可持续性。草本植物具有固土抗蚀、涵养水源、维持物种多样性等多种生态功能<sup>[6-7]</sup>,在半干旱黄土丘陵区植被恢复和水土保持中发挥着不可替代的作用。国内早有学者通过黄

土区生态恢复对草本群落特征的研究来判断人工林生态功能的恢复效果<sup>[8-12]</sup>。明确人工植被恢复对草本群落组成、分布的影响对维持区域植被生态系统稳定性及生态功能提升具有重要的科学意义。

柠条(*Caragana korshinskii*)作为优质生态树种在黄土高原地区被广泛种植,对区域生态恢复及环境改善发挥了积极作用<sup>[13-14]</sup>。随着柠条林木的生长,林下草本群落发生更替对维持系统稳定亦发挥重要作用,已有多个研究对柠条林下草本的群落组成及功能进行了探讨。崔静等<sup>[7]</sup>在对陕北黄土丘陵区典型小流域人工柠条林下草本植物物种多样的

收稿日期:2020-07-06; 改回日期:2020-11-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41561112,41871194);国家重点研发计划课题(2016YFC0501701);甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA070);甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-16)

作者简介:王子婷(1980—),女,河南新郑人,博士研究生,主要从事半干旱黄土区植被恢复及流域健康评价研究。E-mail: gslkyw@163.com

通信作者:李广(E-mail: lig@gsau.edu.cn)

研究中发现,随着柠条的生长,林下草本植物种类在不断更替,草本物种以30年柠条林最丰富且群落的稳定性较高。地形的变化通过引发水热组合条件的变化影响草本群落及树种的分布格局<sup>[15-16]</sup>。坡面地形变化会影响坡面草本群落的组成。周萍等<sup>[6]</sup>对黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性的研究表明,阴坡草本物种较阳坡多,且同一坡面上草本群落盖度及地上生物量随坡位的降低而增加。寇萌等<sup>[17]</sup>在对黄土丘陵区不同立地条件草本群落物种多样性与生物量研究中发现,植被盖度在不同坡向上差异显著,地上生物量在不同立地间差异不显著,枯落物在不同坡向上差异显著。因此,人工植被恢复和地形的综合作用,进一步影响了草本群落的组成特征和生态功能。然而,关于半干旱黄土丘陵区不同地形条件下人工植被恢复对林下草本群落空间分布的影响及其关键因素的明确还鲜有研究。为此,本研究以黄土高原西部甘肃定西龙滩小流域坡面人工柠条林为研究对象,探讨不同坡向及坡位人工柠条种植对坡面草本分布特征及生物量的影响,以期为该区人工植被生态系统稳定性维持和生态功能提升提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市岷口镇龙滩小流域(35°43′—35°46′N,104°27′—104°32′E),属典型半干旱黄土丘陵沟壑区,流域总面积16 km<sup>2</sup>。研究区年平均气温6.8℃,1月平均气温-7.9℃,极端最高温38.5℃,无霜期152 d,日照时数2 052 h。多年平均降水量为386 mm,降雨集中在7—9月,潜在蒸发量1 439 mm。年平均相对湿度72%,干燥度1.9。

流域内土壤以黄绵土为主,有机质含量低,土壤贫瘠且易侵蚀。天然植被以多年生草本为主,主要草本种类有长芒草(*Stipa bungeana*)、赖草(*Leymus secalinus*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等,人工种植的灌木及乔木树种有柠条(*Caragana korshinskii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等,其中人工柠条林地面积较大且分布较广。

2 研究方法

2.1 监测样点布设

在研究区一个全部种植柠条的子流域选择阴坡、半阳坡和阳坡3个坡面,分别在每个坡面自上而下依次选取上、中、下3个坡位布设监测样点(表1)。样带内柠条从坡顶至坡底沿等高线以水平阶整地的方式种植于1984年,水平阶宽度在1—1.5 m,柠条栽植于水平阶内。

2.2 数据采集

于2019年8月在各监测样点上开展草本群落调查,并测定草本群落地上生物量及枯落物量。在3个坡向的每个坡位柠条林下分别取4个50 cm×50 cm的样方,统计样方内草本物种数、高度及盖度等指标,随后将草本地上部分进行刈割并收集样方内枯落物。样品带回实验室称重后在105℃下杀青1 h后再在80℃下烘干72 h,分别获得草本地上生物量及枯落物量。在每个坡位的样方附近选取10 m×10 m的范围,测定该范围内每株柠条的灌木高度、冠幅长度和冠幅宽度。于2019年生长初期、

表1 试验样地地形特征基本信息  
Table 1 Basic description of experimental sites

样地		海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
阴坡	上坡位	2 079	25°	291°	1.14±0.05
	中坡位	2 041	33°	264°	1.09±0.10
	下坡位	2 012	22°	282°	1.15±0.05
半阳坡	上坡位	2 106	34°	332°	1.23±0.04
	中坡位	2 061	30°	323°	1.10±0.04
	下坡位	2 017	28°	342°	1.08±0.01
阳坡	上坡位	2 068	33°	0°	1.15±0.02
	中坡位	2 043	30°	4°	1.14±0.06
	下坡位	2 003	27°	0°	1.15±0.02

中期及末期在各监测样点水平阶内用土钻采集0—200 cm深土壤样品,每隔20 cm采集1个土样,利用烘干法测定土壤水分含量,对每次每层测定的土壤含水量取平均值作为该层土壤含水量,生长季内剖

面土壤水分变化见图1。利用GPS仪记录各监测样点经纬度及海拔信息,利用坡度仪和罗盘分别测定坡度和坡向。利用环刀在每个样方内取表层土壤测定土壤容重。

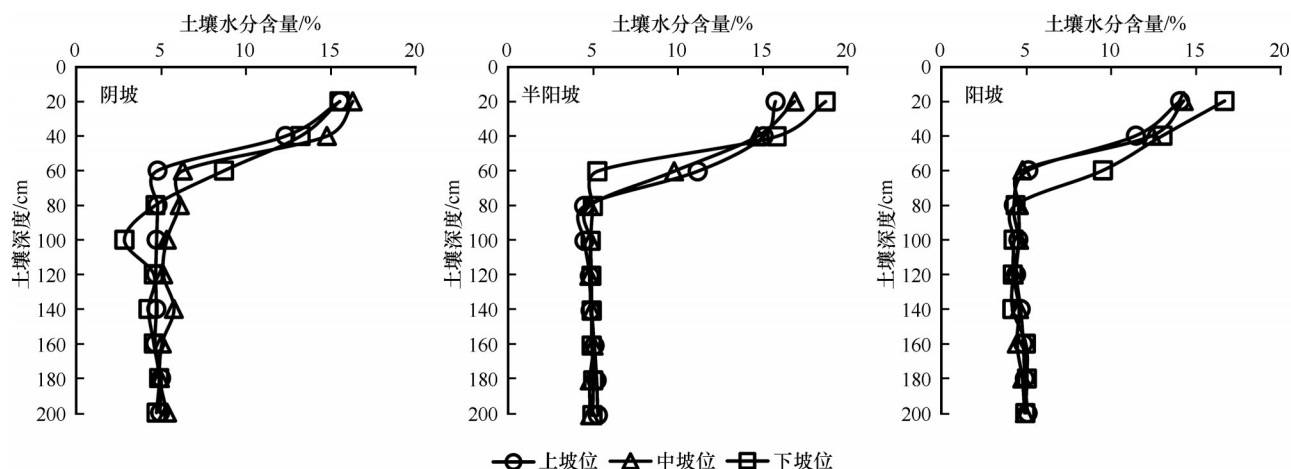


图1 3个坡向不同坡位0—200 cm剖面平均土壤水分含量

Fig.1 Vertical distributions of soil moisture content on different slope positions of three slope aspects

### 2.3 数据统计

统计各监测样点每个样方内草本植物种数,使用每种草本的相对高度和相对盖度计算其重要值(IV)<sup>[18]</sup>。利用草本重要值计算各监测样点内草本物种丰富度、Simpson优势度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )和Pielou均匀度指数(J)。

$$IV = RHI + RCO \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum p_i^2 \quad (2)$$

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$J = \left( -\sum p_i \ln p_i \right) / \ln S \quad (4)$$

式中: $RHI$ 为相对高度; $RCO$ 为相对盖度; $p_i$ 为第*i*个物种的相对重要值; $S$ 为种*i*所在样方的物种总数。

在Past4.01中,采用多元方差分析(PerMANOVA)和非线性多维标定排序(Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS)分析坡向和坡位对草本群落组成的影响及其空间分布特征,使用SIMPER分析确定坡向及坡位间草本群落组成的相似性及主要物种的贡献率。在SPSS21.0中,利用二因素方差分析坡向、坡位及二者交互对草本群落组成及地上生物量的影响,利用Pearson相关分析柠条密度、0—2 m土壤水分含量及柠条生长状况与草本生物量的关系。采用RDA和pRDA分析地形因子(坡向

和坡位)、柠条生长状况(灌木高度、冠幅宽度和冠幅长度)、土壤水分含量、凋落物量及凋落物含水量对草本群落分布的影响及贡献率,排序分析使用Canoco5.0。利用Pearson相关分析确定8个环境因子与排序轴的相关性,Spearman相关确定坡向对草本群落及主要草本物种的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 草本群落组成及数量变化

坡面人工柠条林地草本群落由15科28属32种组成,其中菊科和禾本科是主要草本类群,蔷薇科次之,它们的物种数和重要值分别占群落总数的59.4%和89.2%。禾本科的长芒草和赖草,菊科的阿尔泰狗娃花、茵陈蒿和束伞亚菊,蔷薇科的伏毛山莓草是坡面人工柠条林下主要草本种,它们的重要值占群落的比重为74.7%。人工柠条林地主要草本物种对地形变化的响应略有不同。长芒草主要分布在阴坡和阳坡;赖草在3个坡均有分布,它在阴坡和半阳坡分布在中下坡位,而在阳坡主要分布在中上坡位;阿尔泰狗娃花主要分布在半阳坡和阳坡的中下坡位;茵陈蒿主要分布在阴坡和半阳坡中上坡位;束伞亚菊主要分布在阴坡和阳坡(表2)。

表 2 3 个坡向不同坡位柠条林地草本的重要值(均值±标准误)

Table 2 Importance values of herbs at different slope positions of three slope aspects in *Caragana korshinskii* plantation (Mean±S.E.)

物种	阴坡			半阳坡			阳坡		
	上坡位	中坡位	下坡位	上坡位	中坡位	下坡位	上坡位	中坡位	下坡位
赖草( <i>Leymus secalinus</i> )	0.201±0.071	0.179±0.061	0.161±0.056	0.363±0.124	0.205±0.066	0.342±0.116			0.039±0.034
长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )	0.126±0.050	0.033±0.029	0.266±0.003	0.155±0.068	0.210±0.048	0.201±0.107	0.296±0.059	0.336±0.034	0.134±0.054
中华隐子草( <i>Cleistogenes chinensis</i> )							0.006±0.005		0.020±0.018
狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )				0.068±0.036	0.054±0.041	0.019±0.017	0.052±0.016	0.054±0.014	0.058±0.020
灰绿藜( <i>Chenopodium glaucum</i> )							0.020±0.018		0.012±0.010
大花蝇果芥( <i>Torularia humilis</i> )	0.002±0.002	0.024±0.012	0.033±0.013		0.030±0.003	0.045±0.016	0.034±0.017	0.022±0.019	0.032±0.016
二裂委陵菜( <i>Potentilla bifurca</i> )				0.041±0.016		0.021±0.018	0.053±0.027		
西山委陵菜( <i>Potentilla sischanensis</i> )	0.004±0.003	0.010±0.006	0.021±0.012	0.004±0.003	0.014±0.005		0.023±0.013		
伏毛山莓草( <i>Sibbaldia adpressa</i> )	0.041±0.020	0.057±0.020	0.028±0.020	0.011±0.006	0.059±0.010	0.052±0.021	0.054±0.029	0.080±0.029	0.098±0.032
糙叶黄耆( <i>Astragalus scaberrimus</i> )							0.013±0.011		
甘肃棘豆( <i>Oxytropis kansuensis</i> )		0.021±0.012							
天蓝苜蓿( <i>Medicago lupulina</i> )	0.069±0.047	0.003±0.003	0.018±0.015	0.010±0.009					
野亚麻( <i>Linum stelleroides</i> )			0.005±0.004			0.019±0.010			
骆驼蓬( <i>Peganum harmala</i> )	0.054±0.027	0.048±0.019		0.022±0.019	0.040±0.021		0.043±0.022		0.035±0.031
远志( <i>Polygala tenuifolia</i> )			0.031±0.018						
裂叶堇菜( <i>Viola dissecta</i> )			0.029±0.009			0.010±0.008			
早开堇菜( <i>Viola prionantha</i> )							0.003±0.003		
北方獐牙菜( <i>Swertia diluta</i> )			0.021±0.018						
鹅绒藤( <i>Cynanchum chinense</i> )	0.006±0.005								
地梢瓜( <i>Cynanchum thesioides</i> )	0.029±0.025	0.014±0.012	0.019±0.016			0.029±0.025	0.017±0.015	0.056±0.029	
田旋花( <i>Convolvulus arvensis</i> )								0.036±0.032	
蒙古苕芭( <i>Cymbaria mongolica</i> )	0.009±0.008	0.005±0.005	0.019±0.010				0.022±0.019		
角蒿( <i>Incarvillea sinensis</i> )						0.033±0.029		0.067±0.046	
阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )	0.073±0.022	0.047±0.024	0.159±0.025	0.094±0.009	0.238±0.070	0.128±0.050	0.225±0.051	0.245±0.076	0.300±0.100
铁杆蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> )	0.068±0.059	0.028±0.024		0.118±0.102	0.007±0.006	0.061±0.042			0.019±0.016
茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )	0.248±0.050	0.343±0.108	0.067±0.034	0.112±0.057	0.012±0.010				
冷蒿( <i>Artemisia frigida</i> )	0.061±0.036	0.0214±0.019	0.053±0.046		0.085±0.060			0.032±0.028	0.014±0.012
束伞亚菊( <i>Ajania parviflora</i> )	0.023±0.013	0.167±0.060			0.040±0.035	0.034±0.030	0.144±0.048	0.072±0.040	0.239±0.051
大蓟( <i>Cirsium japonicum</i> )			0.046±0.040						
抱茎风毛菊( <i>Saussurea chingiana</i> )			0.001±0.001						
苦蕒菜( <i>Ixeris polycephala</i> )			0.020±0.010		0.006±0.005				
小苦蕒( <i>Ixeridium dentatum</i> )			0.005±0.004						

3.2 草本群落结构变化

3 个坡向 9 个坡位草本群落的 NMDS 排序的胁迫值为 0.259,说明排序结果能合理反映微地形变化对草本分布的影响。从图 2 可以看出,阴坡草本群落组成与半阳坡和阳坡不同,同时不同坡位间也存

在一定差异。PERMANOVA 分析结果表明,3 个坡向草本群落组成明显不同( $F=6.05, P<0.001$ ),而坡位对草本群落组成的影响随坡向的不同而异( $F=1.70, P=0.034$ )。阴坡 3 个坡位间人工柠条林下草本群落组成存在显著差异( $F=2.41, P=0.023$ ),中坡位和下坡位草本群落组成明显不同;半阳坡和阳坡 3

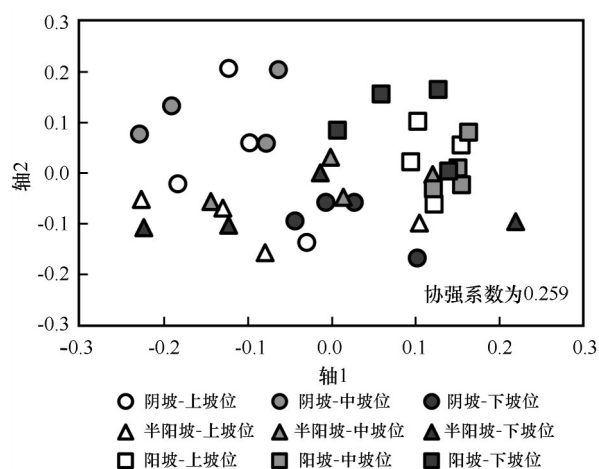


图2 坡面人工柠条林地草本群落的NMDS排序图

Fig.2 NMDS ordination diagram on herb community at different slope positions of three slope aspects in *Caragana korshinskii* plantation

个坡位间人工柠条林下草本群落组成相差较小( $F=1.00, P=0.448; F=1.14, P=0.343$ )。

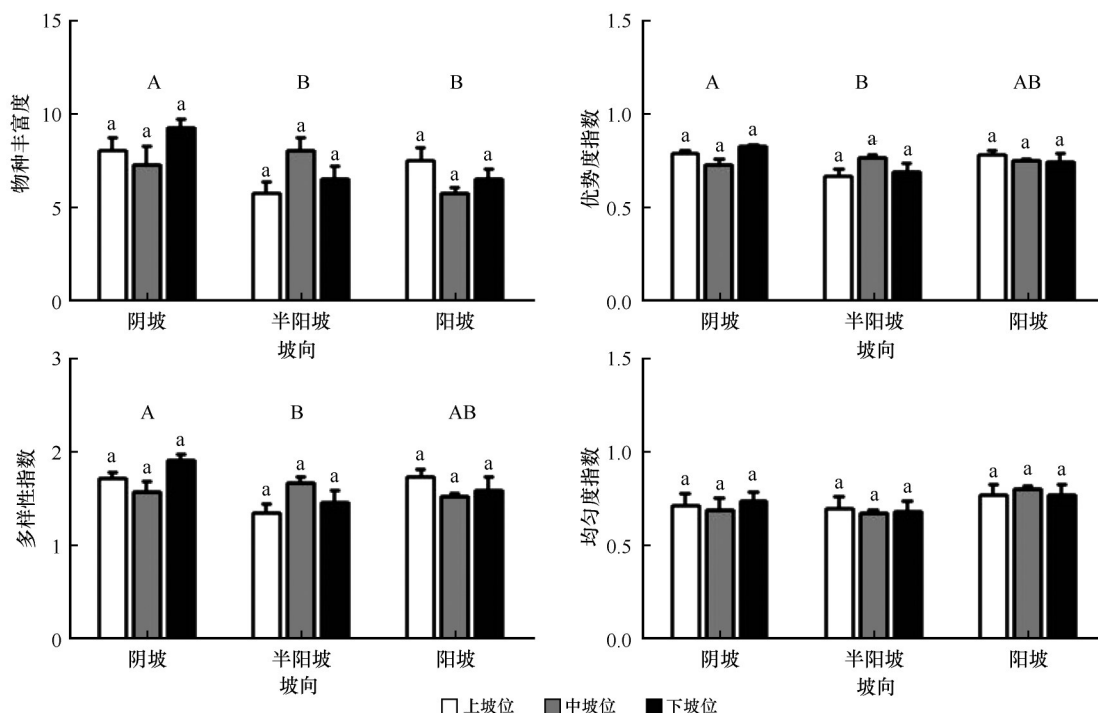
3个坡向草本群落组成的SIMPER分析结果表明,阴坡和半阳坡草本群落平均相异性为67.0%,冷蒿、赖草、茵陈蒿和长芒草等是导致2个坡面草本群落组成不同的主要草本物种,它们解释了2个坡面57.3%的草本群落差异。阴坡和阳坡草本群落平均

相异性为73.6%,冷蒿、茵陈蒿、阿尔泰狗娃花、赖草和长芒草是导致2个坡面草本群落组成不同的主要草本物种,它们解释了2个坡面61.1%的草本群落差异。半阳坡和阳坡草本群落的相异性为65.5%,赖草、阿尔泰狗娃花、长芒草和束伞亚菊是导致2个坡面草本群落组成不同的主要草本物种,它们解释了2个坡面61.2%的草本群落差异。

二因素方差分析结果表明,3个坡向草本物种丰富度、优势度和多样性指数明显不同( $P<0.05$ ),而3个坡向草本均匀度指数相差较小( $P>0.05$ ),其中阴坡草本物种丰富度显著高于半阳坡和阳坡,阴坡草本优势度和多样性指数显著高于半阳坡( $P<0.05$ )。坡位对草本群落分布的影响随着坡向变化而变,阴坡下坡位草本物种丰富度、优势度和多样性指数均高于中、上坡位,阳坡3指数变化则与阴坡相反,半阳坡中坡位3指数高于上、下坡位,但3个坡向不同坡位间各指数差异均不显著(图3)。

### 3.3 草本生物量变化

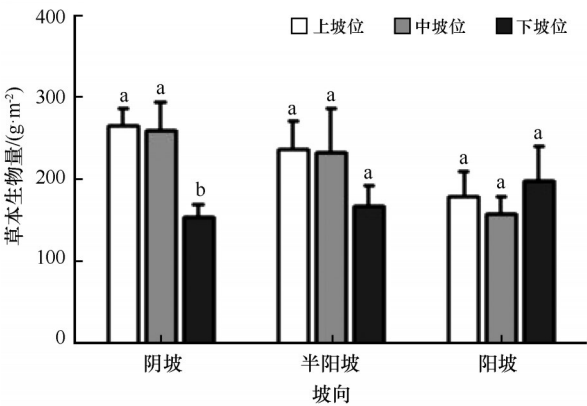
坡面人工柠条林下草本地地上生物量阴坡>半阳坡>阳坡,但3个坡向间草本生物量差异不显著(图4)。阴坡不同坡位人工柠条林下草本生物量存



大写字母表示不同坡向之间存在显著差异,  $P<0.05$ ; 小写字母表示不同坡位之间存在显著差异,  $P<0.05$

图3 3个坡向不同坡位柠条林地草本物种丰富度、优势度、多样性和均匀度指数比较

Fig.3 Species richness, Simpson, Shannon-Wiener and Pielouon index of herb community at different slope positions of three slope aspects in *Caragana korshinskii* plantation



小写字母表示不同坡位之间存在显著差异,  $P<0.05$

图 4 3 个坡向不同坡位草本生物量比较

Fig.4 Herbaceous above-ground biomass at different slope positions of three slope aspects

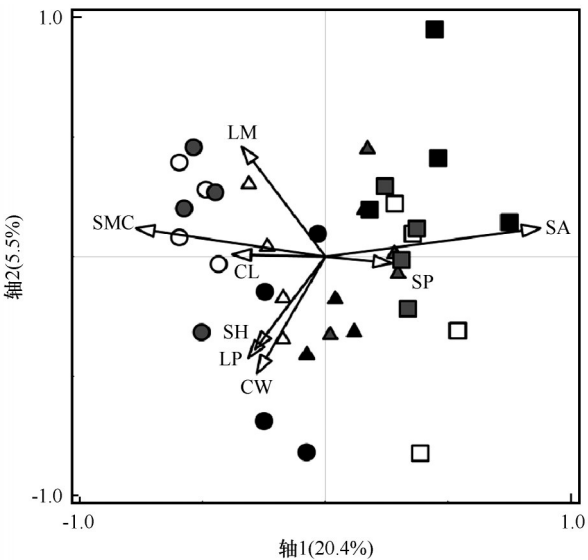
在显著差异( $P<0.05$ ),其上、中坡位草本生物量显著高于下坡位,分别是下坡位草本生物量的 1.73 倍和 1.69 倍(图 4);而半阳坡和阳坡 3 坡位间草本生物量差异不显著( $P>0.05$ ),其中半阳坡不同坡位间草本生物量变化趋势与阴坡相近,而阳坡不同坡位草本生物量变化趋势则与阴坡相反(图 4)。

3.4 草本分布的影响要素

相关分析表明,草地上生物量与柠条栽植密度呈负相关关系,与 0—40 cm 土壤水分含量及 40—200 cm 土壤水分含量呈正相关关系(表 3);灌木密度与 0—40 cm 土壤水分呈显著负相关,而与 40—200 cm 土壤水分存在正相关关系,这也表明柠条生长通过调节土壤水分影响林下草本群落的分布。同时柠条栽植密度与草本物种丰富度、优势度和均

匀度指数呈负相关,其中柠条的栽植密度与草本物种丰富度呈显著负相关( $r=-0.66, P=0.050, N=9$ )。柠条的株高、垂直冠幅、水平冠幅和凋落物量与草本生物量相关性较小。草地上生物量与长芒草呈显著负相关( $r=-0.42, P=0.010, N=36$ ),与茵陈蒿呈显著正相关( $r=0.37, P=0.027, N=36$ )。

利用 RDA 分析地形(坡向和坡位)、柠条生长状况(灌木高度、冠幅长度和冠幅宽度)、土壤水分含量、凋落物量及凋落物含水量与草本分布的关系。结果表明,第 1 轴解释了 20.4% 的草本群落变异(特征值为 0.204,  $F=6.90, P=0.001$ ),所有的排序轴解释了 33.4% 的草本群落变异(特征值为 0.334,  $F=1.70, P=0.008$ ),排序结果较好地反映了地形、柠条生长、土壤水分含量、凋落物数量及凋落物含水量对坡面草本分布影响。pRDA 分析结果表明,坡向对草本分布的影响最大(解释了 15.9% 的变异),其余因子解释了 17.5% 的坡面草本群落变异(图 5)。



SA,坡向;SP,坡位;SH,灌木高度;CL,冠幅长度;CW,冠幅宽度;LP,凋落物量;LM,凋落物含水量;SMC,土壤水分含量;○代表阴坡;△代表半阳坡;□代表阳坡;黑色代表上坡位;灰色代表中坡位;白色代表下坡位

图 5 坡面草本分布与环境因子的 RDA 排序图

Fig.5 RDA ordination figure of herbage distribution and environmental factors at hillslope

排序轴 1 与坡向呈显著正相关( $P<0.05$ ),与冠幅长度、凋落物含水量和土壤水份含量呈显著负相关( $P<0.05$ ),它将阴坡 3 个坡位、半阳坡上坡位与半阳坡中、下坡位和阳坡 3 个坡位分开。排序轴 2 与冠幅宽度呈显著负相关( $P<0.05$ ),与凋落物量含水量呈显著正相关( $P<0.05$ ),它将 3 个坡向不同坡位

表 3 草本生物量与灌木密度、0—40、40—200 cm 土壤水分含量的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation of herbaceous biomass with shrub density and soil water content

指标	草地上生物量	灌木密度	0—40 cm 土壤水分含量	40—200 cm 土壤水分含量
草地上生物量	1	-0.355 <sup>n.s.</sup>	0.197 <sup>n.s.</sup>	0.433 <sup>n.s.</sup>
灌木密度		1	-0.034 <sup>*</sup>	0.130 <sup>n.s.</sup>
0—40 cm 土壤水分含量			1	0.38 <sup>n.s.</sup>
40—200 cm 土壤水分含量				1

\*\*\*  $P<0.001$ , \*\*  $P<0.01$ , \*  $P<0.05$ , n.s.  $P>0.05$ 。

部分生境分开。由此可见,坡向影响柠条生长进而影响柠条林下草本群落组成,而坡位通过影响土壤水分含量及凋落物含水量影响草本群落组成。

柠条林下草本群落物种丰富度等4个指数与坡向的 Spearman 相关分析结果表明,草本群落均匀度指数与坡向呈显著负相关( $P<0.05$ )。长芒草和阿尔泰狗娃花等7个主要草本种与坡向的 Spearman 相关分析结果表明,阿尔泰狗娃花、长芒草和束伞亚菊与坡向呈显著正相关( $P<0.05$ ),其主要分布在阴坡;茵陈蒿和赖草与坡向呈显著负相关( $P<0.05$ ),它们主要分布在阳坡。

## 4 讨论

半干旱黄土区坡面地形变化强烈影响降水和热量的再分配,从而直接或间接影响灌木生长,并同灌木一起综合影响草本的分布格局。一般认为阴坡土壤水分条件好于半阳坡和阳坡<sup>[19-20]</sup>,植被的生长与水分条件的变化相一致<sup>[20-22]</sup>。周萍等<sup>[6]</sup>在陕西研究发现阴坡草本群落的物种有20多种,较阳坡高30%,这与本研究结果相似。3个坡向草本群落组成明显不同,阴坡草本物种丰富度、多样性和优势度指数均高于半阳坡和阳坡,草本的地上生物量变化与多样性相近。朱云云等<sup>[19]</sup>在对半湿润黄土高原不同坡向草地群落功能多样性的研究中发现,坡向通过对水分的调节影响植物的功能性状及植物群落的形成,最终导致阴坡和半阴坡物种丰富度显著高于阳坡和半阳坡,且阴坡和半阴坡之间也存在显著差异。王子婷等<sup>[21]</sup>在半干旱黄土丘陵区人工柠条林的研究中发现,阴坡柠条生长明显好于阳坡。此外,研究还发现坡向还影响人工苜蓿草地退化程度,进而影响草本群落的恢复演替<sup>[23]</sup>。由此可见,地形对天然和人工植被的分布格局均有显著影响,进而影响草本群落的组成及分布特征。此外,本研究还发现阴坡柠条生长好于半阳坡和阳坡,但密度变化则与之相反,因此低密度柠条可能为更多草本植物的生长提供适宜生境,该结果与 Jia 等<sup>[11]</sup>在陕北六道沟小流域的研究结果相似。

半干旱黄土丘陵区自然坡面上,植被和土壤水分均呈梯度变化,通常表现为下坡位土壤水分及养分条件好于中上坡位,从而导致不同坡位植被生长存在明显差异<sup>[20]</sup>。张健等<sup>[10]</sup>在对陕北黄土丘陵区人工柠条灌丛沟植被生物量空间分布的研究中发现,沟坡下部或沟底草本层植被生物量高于坡上

部。郑江坤等<sup>[24]</sup>在陕北吴起县坡面尺度上对生物多样性的研究表明,在坡位、坡向、坡形及海拔这4个地形因子中,坡位较其他因素对植物生长分布起到更为关键的作用,不同坡位草本群落生物多样性指数差异显著,其中柠条灌丛沟不同坡位间草本层物种多样性指数表现为从上坡位至下坡位逐渐增加的趋势。周萍等<sup>[6]</sup>在陕西黄土丘陵区的研究中发现,自然坡面草本均匀度指数和多样性指数在阴阳坡均随坡位的升高而减小。而本研究结果与上述研究有所不同,即3个坡向不同坡位间草本群落组成相差较小,草本物种丰富度、优势度、多样性和均匀度指数差异不显著,这与研究区水平阶整地栽植柠条从而削弱了坡位对柠条林地草本多样性的影响有关。此外,研究还发现柠条密度较低的阴坡中、上坡位草本生物量显著高于下坡位,这可能与不同草本种对水平阶整地栽植柠条的响应模式不同有关。阴坡下坡位草本物种数高于中、上坡位,主要草本种中茵陈蒿主要分布在中、上坡位,而长芒草和阿尔泰狗娃花等主要分在下坡位,茵陈蒿的比重较高导致阴坡中、上坡位草本生物量较高,同时也抑制了一些草本种在中、上坡位的分布。

坡面人工植被的密度会影响剖面土壤水分含量,进而影响草本分布及多样性。人工植被栽植密度过高会导致土壤水分匮乏<sup>[25]</sup>,这在植被生长的中后期表现尤为明显<sup>[26]</sup>。贾希洋等<sup>[27]</sup>在宁夏荒漠草原人工柠条林地的研究中发现,人工柠条林地平茬改善了林间土壤环境,适度平茬可以提高林间植被的多样性及生物量。刘燕萍等<sup>[28]</sup>研究发现隔行平茬措施下草本生物量最大,柠条林下各土层含水量与草本地上生物量密切相关,且以负相关关系为主;草本植物多样性各指数均与土壤水分含量呈负相关关系。由此可见,柠条的高密度种植抑制了其林下草本生长,这在成熟柠条林地表现更为明显。本研究发现,柠条密度与草本生物量呈负相关关系,而草本物种丰富度也与柠条密度呈显著负相关,这与樊如月等<sup>[29]</sup>在内蒙古和林格尔县12 a 柠条林地的研究结果相近。胡相等<sup>[8]</sup>在黄土丘陵区的研究中也发现,人工乔灌林下草本植物物种组成较少,物种多样性指数较低,结构参数较小,说明该地区人工林林下环境条件较差,严重影响草本植物个体的生长发育和群落结构。崔静等<sup>[7]</sup>在黄土丘陵区的研究中发现,随着柠条的生长,柠条林下草本植物种类在不断地更替,植物种类以30 a 柠条林最为

丰富, 柠条生长后期随着林地密度降低, 草本多样性又略有增加。樊如月等<sup>[29]</sup>等发现, 随着柠条林分密度的增加, 草本群落组成种类减少, 旱生植物比例增大。因此, 对林木进行选择性的疏伐管理, 有利于物种多样性的恢复<sup>[11,30]</sup>。因而, 本研究认为人工柠条林地草本群落及主要草本物种分布主要受坡向的影响, 这与坡向驱动的土壤水分及柠条密度变化有关, 而依据地形变化加强人工柠条林后期管理(如平茬和疏化管理等)可以缓解坡面土壤水分匮乏, 促进人工林地草本层恢复, 有利于维持生物多样性和群落稳定性。

## 5 结论

半干旱黄土丘陵区地形特征强烈影响了柠条生长状况, 而地形和柠条生长二者又相互作用影响草本分布及多样性。人工柠条林地草本群落主要由禾本科、菊科和蔷薇科组成, 长芒草、赖草、冷蒿、茵陈蒿、阿尔泰狗娃花、束伞亚菊和伏毛山莓草是柠条林地主要草本种。地形变化影响了坡面草本分布, 不同坡向草本群落组成明显不同, 而坡位对草本群落分布的影响较小。不同坡向间草本群落的平均相异性为 65.5%—73.6%, 长芒草、赖草、冷蒿、茵陈蒿、阿尔泰狗娃花、束伞亚菊解释了不同坡向间草本群落组成差异的 57.3%—61.2%。草地上生物量从阴坡到阳坡呈降低的趋势, 阴坡草本物种丰富度、优势度和多样性指数均显著高于阳坡, 其中阴坡草本物种丰富度还显著高于半阳坡, 而坡位对草本群落组成及生物量的影响较小。坡向是影响人工柠条林地草本分布的主要环境因子, 坡向及柠条生长状况通过土壤及凋落物水分条件影响草本群落组成。不同草本种对坡向变化的响应模式不同, 阿尔泰狗娃花和长芒草与坡向呈显著正相关, 主要分布在阴坡; 茵陈蒿和赖草等与坡向呈显著负相关, 主要分布在阳坡。

## 参考文献:

- [1] 王哈生. 黄土高原植被恢复策略回顾[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 42-45.
- [2] 张金屯. 黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 120-124.
- [3] 张文辉, 刘国彬. 黄土高原植被恢复与建设策略[J]. 中国水土保持, 2009(1): 24-27.
- [4] 郭忠升. 水资源紧缺地区土壤水分植被承载力论述[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 143-147.
- [5] Guo Z S, Shao M A. Impact of afforestation density on soil and water conservation of the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 68(5): 401-410.
- [6] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡形及坡位草本群落生物量及多样性研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 67-73.
- [7] 崔静, 黄佳健, 陈云明, 等. 黄土丘陵区人工柠条林下草本植物物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 14-20.
- [8] 胡相明, 程积民, 万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 41-45.
- [9] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403-409.
- [10] 张健, 刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 207-217.
- [11] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Richness and composition of herbaceous species in restored shrub land and grassland ecosystems in the northern Loess Plateau of China[J]. Biodiversity & Conservation, 2011, 20(14): 3435-3452.
- [12] 高阳, 程积民, 赵钰, 等. 黄土区典型人工林草本层生态恢复效应[J]. 草地学报, 2013, 21(1): 79-86.
- [13] 程积民, 杜峰, 万惠娥. 黄土高原半干旱区集流灌草立体配置与水分调控[J]. 草地学报, 2000, 8(3): 210-219.
- [14] 程积民, 万惠娥, 杜峰. 黄土高原半干旱区退化灌草植被的恢复与重建[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 50-57.
- [15] Okubo S, Kamiyama A, Kitagawa Y, et al. Plant species composition of the herbaceous layer of secondary woodlands and their verges in relation to micro-scale landform in the Tama Hills, Central Japan[J]. Landscape Research Japan Online, 2003, 66(5): 537-542.
- [16] Zhao W J, Zhang Y, Zhu Q K, et al. Effects of microtopography on spatial point pattern of forest stands on the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2015(3): 370-380.
- [17] 寇萌, 焦菊英, 杜华栋, 等. 黄土丘陵沟壑区不同立地条件草本群落物种多样性与生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 12-18.
- [18] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅱ丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [19] 朱云云, 王孝安, 王贤, 等. 坡向因子对黄土高原草地群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2015, 36(21): 6823-6833.
- [20] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形条件下草本群落特征与土壤水分及养分关系分析[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 776-782.
- [21] 王子婷, 杨磊, 蔡国军, 等. 半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 115-124.
- [22] Gong X, Brueck H, Giese K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 483-493.
- [23] 王子婷, 杨磊, 李广, 等. 半干旱黄土区苜蓿退化对坡面草本植物分布及多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3720-

- 3729.
- [24] 郑江坤,魏天兴,郑路坤,等.坡面尺度上地貌对 $\alpha$ 生物多样性的影响[J].生态环境学报,2009,8(6):2254-2259.
- [25] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014, 115(4): 123-133.
- [26] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11):3795-3803.
- [27] 贾希洋,周静静,宿婷婷,等.平茬密度对荒漠草原人工柠条林间生境的影响[J].生态学报,2020,40(12):4126-4136.
- [28] 刘燕萍,马驰,莫保儒,等.柠条人工林下草本植被特征与土壤特性相关性研究[J].草地学报,2020,28(2):468-473.
- [29] 樊如月,李青丰,贺一鸣,等.柠条林分密度对林带间草本群落的影响[J].干旱区资源与环境,2019,33(2):177-182.
- [30] Yang Z B, Jin H X, Wang G. An assessment of restoration success to forests planted for ecosystem restoration in loess plateau, Northwestern China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 164(1):357-368.

## Distribution and diversity of herbage under *Caragana korshinskii* plantation at hillslope scale in the semi-arid loess hilly region

Wang Ziting<sup>1,2</sup>, Yang Lei<sup>3</sup>, Li Guang<sup>1</sup>, Chai Chunshan<sup>2</sup>, Zhang Yangdong<sup>2</sup>, Liu Donghao<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Academy of Forestry Science, Lanzhou 730020, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Distributions and diversity of herb community were significantly influenced by the introduced shrub restoration. However, the recognition of responding mechanism by which the micro-landform modification and artificial shrub restoration influence the distribution and diversity of herbage at the hill slope scale is limited. In this study, we selected a typical artificial *Caragana korshinskii* shrub on the hill slope as a research model, and the data of composition of herbaceous community, herbaceous above-ground biomass, *C. korshinskii* growth, litter moisture content and soil moisture content were collected. The following results were obtained in this study. (1) the composition of herbaceous community was significant difference at different slope aspect. The species richness, dominance and diversity index of herbaceous community in shady slope were significant highly than in semi-sunny and sunny slope. On the contrary, there was no significant difference on the evenness index in different slope aspects. (2) Herbaceous above-ground biomass in different slope aspects was shady slope>semi-sunny slope>sunny slope, but there was not significant difference. Herbaceous above-ground biomass at upper and middle slope positions were significantly higher than at foot slope position in the shady slope aspect, and there was not significant difference between different slope positions in the semi-sunny and sunny slope aspect. (3) Slope aspect affected the hydro thermal conditions on hill slope, and then significantly influenced the diversity of herb community and explained 15.2% variation in herb community. (4) Shrub density of *C. korshinski* and slope aspect had a significant negative relationship with the species richness of herb community. *Heteropappus altaicus* and *Stipa bungeana* had a significant positive relationship with slope aspect, and they were mainly distributed at the shady slope. *Artemisia capillaris* and *Leymus secalinus* had a significant negative relationship with slope aspect, and they mainly distributed at the sunny slope. The slope aspect affected the hydro thermal conditions on hill slope, and then reflected the vegetation growth. And the effect of slope position on the growth of herbage can be weakened by the changes of micro topography. And the slope aspect and the shrub density of artificial vegetation determined the distribution pattern of the herbage.

**Key words:** semi-arid loess hilly region; slope aspect; slope position; *Caragana korshinskii*; herb community