

# 刈割扰动下半干旱区豆科牧草种间关系的反应

左胜鹏<sup>1,2</sup>, 王会梅<sup>1</sup>, 马永清<sup>2\*</sup>, 李凤民<sup>2</sup>, 山仑<sup>2</sup>

(1. 安徽师范大学环境科学学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所  
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以苜蓿和沙打旺根据生物替代设计组成的简单混播种群为对象,通过调查2种牧草在刈割扰动下的生长反应,比较了单混播处理条件下3种播种密度刈割处理的种间关系和补偿性反应特点,探讨了种群稳定与演替的可能机制。结果表明苜蓿和沙打旺在刈割条件下,土壤水分利用竞争空间上移20 cm,并且水分利用呈增加趋势,土壤平均水分为15%。刈割诱导低密度混播处理和高密度苜蓿单播处理土壤水分最高,分别达15.6%和15.8%。单播下,刈割可诱导中高密度单播沙打旺处理产量分别增加33%和29%,而混播方式下,刈割均导致沙打旺和苜蓿株高、分枝数和地上部生物量小于对照。在刈割干扰下,相比对照,苜蓿与沙打旺两者仍然为资源共享关系,但互利共生程度下降了21%,而混播种群中苜蓿对沙打旺的相对竞争力增加了17%。不论单播还是混播,刈割均可引发2种牧草显著的补偿机制。同时发现刈割干扰可激发更强的自疏作用。2种牧草的生长指标呈下降趋势可能是干旱、刈割和种间竞争或化感协同胁迫作用的结果,但共存与补偿机制有利于减缓这种负面效应。沙打旺和苜蓿的更新补偿时间上的异质性,实现资源利用生态位的分离,从而调控着2种牧草组成的种群稳定性,这对理解生物多样性维持机制具有重要的参考意义。

**关键词:**种间关系;刈割扰动;豆科牧草;自疏作用;补偿异质性;生物多样性

**中图分类号:**S541;Q948.12<sup>+</sup>2.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2009)05-0150-10

\* 牧草刈割是当前草地持续生产和草地合理利用中一种较为常见的收获方式,刈割是对植物地上部产生直接的损伤,从而诱导植被进行生态生理适应生长,可调控生态位和种间关系<sup>[1]</sup>。不同的刈割频率(刈割间期),方式(平口和斜口)、强度(留茬高度)以及与放牧、摘顶等人工干扰结合,将对牧草的群体结构、生理生态、品质、干物质分配、生物量和产量以及草地生态系统等产生不同程度的影响<sup>[2~5]</sup>。目前,国内外就刈割对牧草生长的影响多限于单个品系的利用研究,而对牧草混播的研究较少。刈割时期、刈割频率和留茬高度也是影响草地生态系统利用和持久性的关键因素,不同刈割时期和刈割频率会影响草地生态系统产草量和种间竞争力<sup>[6]</sup>。20世纪90年代初,Clements提出了生物群落结构以竞争等级组织的观点,天然群落中竞争限制了植物物种在一定资源梯度上的分布,植物种间竞争力可随生长阶段的变化其竞争等级有所变化<sup>[7]</sup>。而de Wit<sup>[8]</sup>提出的以替代试验研究方法分析2种植物之间的竞争关系被许多植物生态学家应用。在该方法中,2个种以不同的比例混合种植,而总密度保持不变,一般用相对总生物量表示结果。相对总生物量是测定混播的2种植物间竞争力的重要指标,该值表明了2种植物间的相互关系以及对同一环境资源的利用情况<sup>[9]</sup>。但在人工刈割干扰状态下,混播群落生理生态特性发生适应性变化,种间关系和资源利用也相应变得更加复杂。沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和苜蓿(*Medicago sativa*)是适合西北内陆干旱区种植的重要优良牧草,对于它们的混播草地在刈割状态下的竞争能力和生长反应国内外未见报道。本试验采用de Wit替代系列试验的简化形式,测试了它们在总密度固定、混播密度变化的生物替代中,于刈割干扰下的生长反应和种间竞争力,试图从人工干扰、生态选择与生活史进化等角度研究植物在干旱和竞争胁迫下,植物抗逆的生物学基础及群落维持机制,为适合在自然条件严酷的西北部地区建立稳定的人工草地及其持续合理利用提供重要理论依据。

\* 收稿日期:2008-09-02;改回日期:2009-12-08

基金项目:中国科学院“百人计划”择优支持项目(C24016200),国家自然科学基金(30870403),安徽高等学校省级自然科学基金项目(KJ2008B192),安徽师范大学校青年基金(2008xqn75)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金(10501-242)资助。

作者简介:左胜鹏(1979-),男,江西宜春人,讲师,博士。E-mail: zuoshengpeng@163.com

\* 通讯作者。E-mail: mayongqing@ms.iswc.ac.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地自然条件

大田试验设在中国科学院水利部水土保持研究所武生态试验站,其中长武试区位于黄土高原渭北旱塬陕西长武县西 12 km 的陕甘交界处(35°14' N, 107°41' E),是黄土高原综合治理的典型示范区,行政上隶属于长武县洪家乡王东、丈六 2 个行政村,总面积 813 km<sup>2</sup>,地势北高南低,地貌分为北部塬面和南部沟壑两大单元,分别占土地总面积的 35%和 65%。试区海拔约 1 220 m,气候为暖温带半湿润大陆性气候,年均温 9.1℃,年均降水 584.1 mm,无霜期 171 d 左右,地下水埋深平均为 60 m,年均日照时数 2 226.5 h,年总辐射量 4 835.75 J/cm<sup>2</sup>,塬面≥0℃年活动积温 3 688℃,≥10℃年活动积温 3 029℃。试区土壤为中壤质黑垆土,全剖面土壤质地疏松,孔隙率占 50%左右,是较好的旱作土壤。该区经过长期的农业开发,自然植被已被破坏,土地利用现状主要是农田、森林、果园和镶嵌的小块草地以及居住用地,主要农作物是小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)等。塬坡、梁坡、沟坡乔、灌、草盖度均在 70%以上,无灌溉条件,属于典型的旱作农业区<sup>[10]</sup>。

### 1.2 测试品种

本试验采用 2 种豆科牧草,其描述见表 1。

### 1.3 试验设计

采用总密度固定而物种密度变化的生物替代试验简化设计。沙打旺和苜蓿分别设计 3 个密度:30,120 和 480 粒/m<sup>2</sup>,单播和混播 2 种方式,后者包括三者混播,其中混播均为等比例,同时设计一对照,各处理均重复 3 次,形成 9 个处理,共计 27 个小区(处理),具体设计见表 2。2005 年 5 月播种,2006 年 4 月返青,同时进行裂区设计,1/2 小区为对照(不刈割),1/2 小区为刈割,分别在 5 和 7 月各刈割 1 次,留茬高度为 5 cm,8 月中旬调查相关植株生理指标。

### 1.4 测定方法和数据处理

小区试验在长武站王东区进行,每小区为 2.5 m×4.0 m,各小区进行完全随机排列,土壤为中轻壤,播前时每 m<sup>2</sup> 施加 0.6 kg 农家肥作底肥。2006 年 8 月 16—24 日对 2 种豆科牧草分别调查牧草株高、分枝数、最大分枝长和总分枝长,地上生物量。

根据相对总生物量公式改进为相对资源关系(RYT, relative yield total):

$$RYT = Y_{av}/Y_{aa} + Y_{va}/Y_{vv}$$

表 1 试验测试材料

Table 1 Tested materials

种名 Species	科属 Kinds	产地 Origins	发芽率 Germination rate (%)	种子净度 Purity rate (%)	千粒重 Thousand seeds weight (g)	进化型 Ecotypes
沙打旺 A	黄芪属 <i>Astragalus</i>	陕西安塞 Ansai, Shaanxi	95.2	97.5	1.285	半野生半人工种 Semi-wild and -breeding species
苜蓿 C	苜蓿属 <i>Medicago</i>	甘肃肇东 Zhaodong, Gausu	98.5	97.6	1.943	人工种 Breeding species

A: *A. adsurgens*; C: *M. sativa*; 下同 The same below.

表 2 大田小区试验设计

Table 2 Random design of field plots

密度 Sowing density (粒 Seed/m <sup>2</sup> )	沙打旺 A	苜蓿 C	沙打旺/苜蓿 A/C(1/2 : 1/2)
D1	30/T1	30/T2	15/15/T3
D2	120/T4	120/T5	60/60/T6
D3	480/T7	480/T8	240/240/T9

T: 处理 Treatment.

式中,  $Y_{av}$  为混播中物种 A 的测定值,  $Y_{va}$  为混播中物种 V 的测定值,  $Y_{aa}$  为单播中物种 A 的测定值,  $Y_{vv}$  为单播中物种 V 的测定值。RYT 值可以表明 2 种植物间的相互关系及对同一环境资源的利用情况。RYT > 1 时, 植物种占有不同的生态位, 利用不同的资源, 表现出一些共生关系; RYT = 1 时, 植物种间利用共同的资源; RYT < 1 表示植物间的相互拮抗关系<sup>[8]</sup>。

植物间竞争力的大小用竞争率表示, 即:

$$CR_{a/v} = (Y_{av}/Y_{aa} \cdot Z_{av}) / (Y_{va}/Y_{vv} \cdot Z_{va})$$

式中,  $Y_{av}$ 、 $Y_{va}$ 、 $Y_{aa}$ 、 $Y_{vv}$  表示意思同上,  $Z_{av}$  为混播中物种 A 的比例,  $Z_{va}$  为混播中物种 V 的比例。当  $CR_{a/v} > 1$  时, 表示 A 的竞争力 > V, 当  $CR_{a/v} = 1$  时, 表示 A 和 V 竞争力相同; 当  $CR_{a/v} < 1$  时, 表示 A 的竞争力 < V, RYT、 $CR_{a/v}$  计算生物量都是用以上测定值<sup>[9]</sup>。

豆科牧草的补偿效应, 用刈割与相应对照的 T/C 作为衡量指标, 得出补偿指数 R, 其中  $R = T/C$ 。式中, C 是对照值, T 是处理值。当  $R > 1$  时, 表示超补偿效应; 当  $0 < R < 1$  时, 表示补偿效应<sup>[8,9]</sup>。数据分析通过 Excel 2000 和 SASv8 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 刈割对 2 种豆科牧草土壤水分的影响

2 种豆科牧草在不刈割条件下(图 1A), 土壤水分资源利用显著差异主要发生在 0~300 cm 土层, 平均土壤水分为 12% 左右, 单播和混播出现明显的空间分异现象。在单播中, 苜蓿水分利用大于沙打旺; 随播种密度增大, 沙打旺水分利用下降, 而苜蓿土壤水分利用则增大; 相对单播处理, 混播将导致 2 种牧草水分利用率增加, 随混播密度增大, 土壤水分利用下降。在处理 3、6 和 8 中, 对应中低密度混播处理和高密度苜蓿单播, 观察发现根系土壤水分在 12%~16% 波动, 空间变异表现为 0~50 cm 土层水分增加, 50~300 cm 土层为水分稳定期, 300~500 cm 土层为土壤水分缓慢增加; 而处理 1、2 和 5, 对应中密度的沙打旺单播和中低密度苜蓿单播处理, 土壤水分随土层深度总体为增加趋势; 但处理 4、7 和 9, 对应中高密度的沙打旺单播和高密度混播处理, 则表现为 0~100 cm 土层土壤水分利用不稳定, 总体为波动下降, 100~250 cm 土层为土壤稳定区, 250 cm 以下土壤水分逐渐恢复, 表现为持续上升。

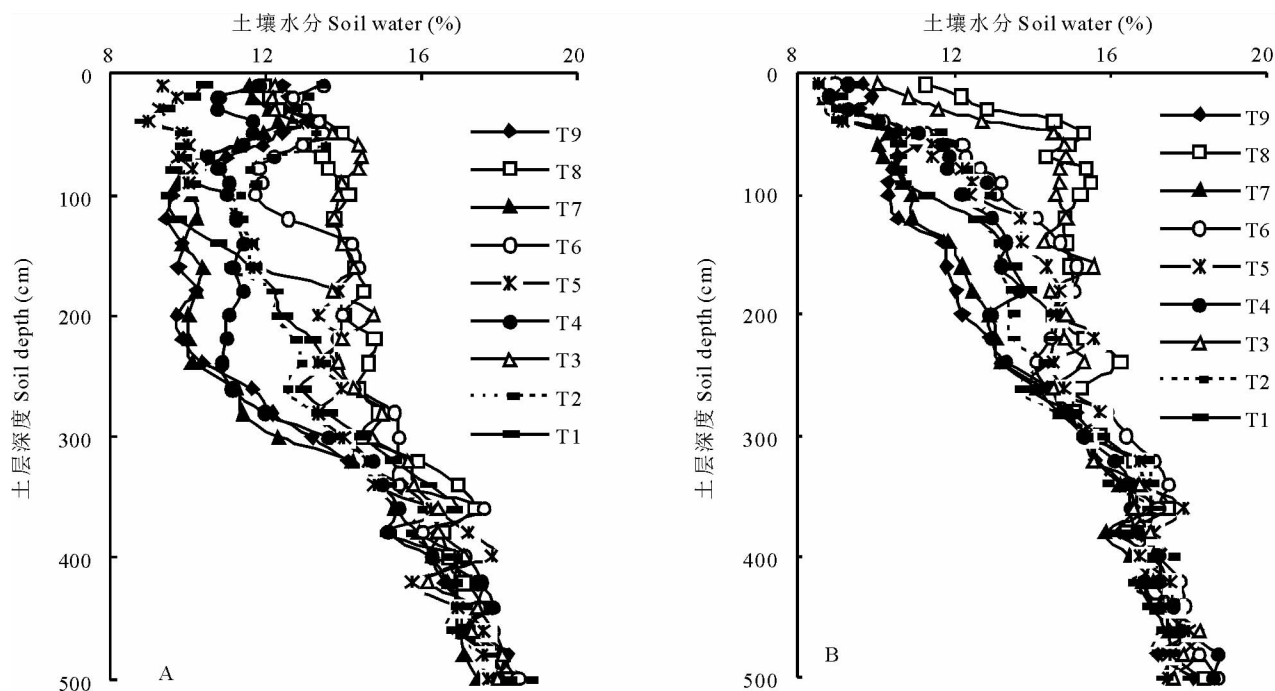


图 1 刈割干扰下 2 种豆科牧草土壤水分的空间变异

Fig. 1 Spatial variation of soil water use of both leguminous forages under cutting interference

A: 不刈割处理 No cutting treatment; B: 刈割处理 Cutting treatment

2 种豆科牧草在刈割条件下(图 1B),各处理土壤水分变化规律与对照差异显著,水分利用竞争空间变小 20 cm,各处理导致总体水分利用增加,土壤平均水分为 15%左右。刈割导致明显的 3 种土壤水分利用情形,处理 3 和 8 为高水分利用型,处理 7 和 9 为低水分利用型,而处理 1,2,4,5 和 6 为中等水分利用型。刈割状态下,单播处理,与对照相同,苜蓿水分利用大于沙打旺;随单播密度增大,刈割导致沙打旺水分利用下降,但苜蓿土壤水分上升。相对单播,混播处理下,土壤水分增加,但随混播密度增大水分利用下降。低密度混播(T3)和高密度苜蓿单播(T8)刈割导致水分明显大于其他处理,0~80 cm 土层水分急剧增加,而 80~280 cm 土层水分基本稳定;高密度下的沙打旺处理(T7)和混播处理(T9)在刈割干扰下水分明显降低,但随土层深度的增加土壤水分也呈现出增加的趋势;其他 5 种处理,土壤水分利用差异不显著,总体随土层深度的增加水分利用增加。0~80 cm 土层为土壤水分突增区,80 cm 以下为土壤水分缓慢增加区。

## 2.2 刈割对豆科牧草株高、分枝和产量的影响

单播方式下,刈割导致各密度沙打旺株高和分枝数显著低于对照,鲜草量则在低密度下明显小于对照,而中高密度下,刈割可诱导牧草产量分别增加 33%和 29%;刈割频度和强度一致下,随播种密度的增加,沙打旺株高和分枝数逐渐下降,而地上生物量逐渐增加;同时发现,刈割后,苜蓿植株的株高、分枝数和地上部生物量均小于对照;与沙打旺相似,随密度增大,刈割导致苜蓿生长指数均降低(表 3)。

表 3 不同播种方式和密度处理下刈割对 2 种豆科牧草生长的影响

Table 3 Effects of cutting treatment on tested forages growth under different sowing types in various densities

播种方式 Types	牧草 Forages	密度 SD	刈割 Cutting treatment				对照 The control			
			株高 PH (cm)	分枝数 BP	鲜重 FW (g/m <sup>2</sup> )	干重 DW (g/m <sup>2</sup> )	株高 PH (cm)	分枝数 BP	鲜重 FW (g/m <sup>2</sup> )	干重 DW (g/m <sup>2</sup> )
单播 MO	沙打旺 A	D1	8.87	20.00	235.00	45.64	10.67	25.67	306.45	81.15
		D2	8.67	18.67	427.67	90.87	10.97	21.00	322.95	77.66
		D3	7.97	13.33	606.67	100.66	20.33	15.67	471.86	111.17
	苜蓿 C	D1	51.63	48.33	1 108.00	236.19	46.00	86.33	1 028.30	174.33
		D2	54.33	40.33	1 323.67	249.59	66.70	40.33	1 575.53	274.98
		D3	50.93	22.33	1 361.67	250.78	61.83	53.67	2 229.67	371.62
混播 MI	沙打旺 A	D1	7.77	16.33	79.99	14.17	13.44	19.00	81.81	20.67
		D2	18.43	10.33	55.04	9.18	15.03	15.67	199.83	34.89
		D3	14.97	3.00	20.53	3.54	15.83	11.00	35.07	4.79
	苜蓿 C	D1	47.20	80.00	872.33	174.04	45.79	71.00	1 142.07	155.34
		D2	49.97	45.00	1 186.00	209.81	60.93	59.33	4 848.36	1 037.97
		D3	44.77	17.67	1 060.00	195.39	52.10	26.67	1 740.43	415.88

MO: Monoculture; MI: Mixture; SD: Sowing density; PH: Plant height; BP: Branches per plant; FW: Fresh weight; DW: Dry weight; 下同 The same below.

而混播方式下,刈割导致沙打旺和苜蓿株高、分枝数和地上部生物量均小于对照;对沙打旺来说,刈割处理可导致混播比单播的株高更大,但分枝数和生产力降低;而对苜蓿来说,刈割处理可以增加混播苜蓿的分枝数,但降低了株高和牧草产量。在混播中,刈割可导致密度的负面效应增大,即随密度增大 2 种牧草的株高、分枝数和产量表现出下降的趋势(表 3)。

不论单播还是混播处理,在不刈割状态,苜蓿的株高、分枝数和产量均高于沙打旺,在刈割干扰诱导下,苜蓿的株高、分枝数和产量也均显著高于沙打旺,只是生长差异相比对照有所降低(表 3)。

## 2.3 刈割对 2 种豆科牧草竞争效应和补偿效应的影响

在不刈割处理下(对照),不论株高、分枝数和生产力指标,生长反应均显示苜蓿和沙打旺为互利共生关系,资

源上有共享倾向,平均资源关系指数接近 2;而苜蓿对沙打旺的竞争力,除株高外,分枝数和产草量均表明苜蓿比沙打旺的竞争力大,苜蓿相对沙打旺的竞争力平均为 5 倍多(表 4)。

在刈割干扰下,相比对照,苜蓿与沙打旺两者仍然为资源共享关系,互利共生程度下降了 21%,但苜蓿的竞争力明显大于沙打旺,相对竞争力增加 17%。

单播方式下,刈割导致沙打旺的补偿效应与密度有关,在中密度下发生超补偿效应,而低密度和高密度下补偿效应一般较低(表 5);而苜蓿在低密度下才表现为超补偿效应,随密度增大,补偿效应逐渐减弱;而混播方式

表 4 混播处理下刈割对 2 种豆科牧草种间效应的影响

Table 4 Effects of cutting treatment on both forages relationship in the mixture

生长指标 Growth indicators	密度 SD	刈割 Cutting treatment		对照 Control	
		种间关系 Interspecific relationship	苜蓿对沙打旺竞争力 Relative competition	种间关系 Interspecific relationship	苜蓿对沙打旺竞争力 Relative competition
株高 PH	D1	1.79	1.04	2.26	0.79
	D2	3.05	0.43	2.28	0.67
	D3	2.76	0.47	1.62	1.08
分枝数 BP	D1	2.53	1.89	1.56	1.11
	D2	1.63	2.16	2.22	1.97
	D3	1.02	3.52	1.20	0.71
鲜重 FW	D1	1.13	2.31	1.38	4.16
	D2	1.02	6.96	3.70	4.97
	D3	0.81	23.00	0.85	10.50
干重 DW	D1	1.05	2.37	1.15	3.50
	D2	0.94	8.32	4.22	8.40
	D3	0.81	22.17	1.16	25.97
平均 Mean		1.55	6.22	1.97	5.32

表 5 单混播处理下刈割对不同密度 2 种豆科牧草补偿效应的影响

Table 5 Effects of cutting interference on both forages compensation in the monoculture and the mixture

播种方式 Sowing types	补偿效应 Compensation	密度 SD	株高 PH	分枝数 BP	鲜重 FW	干重 DW	平均 Mean*	综合平均 Integrative mean#
单播 MO	沙打旺 A	D1	0.83	0.73	0.77	0.56	0.72	0.88
		D2	0.79	0.95	1.32	1.17	1.06	
		D3	0.39	0.85	1.29	0.91	0.86	
	苜蓿 C	D1	1.12	0.56	1.08	1.35	1.03	0.85
		D2	0.81	1.00	0.84	0.91	0.89	
		D3	0.82	0.42	0.61	0.67	0.63	
混播 MI	沙打旺 A	D1	0.58	0.86	0.98	0.69	0.78	0.68
		D2	1.23	0.66	0.28	0.26	0.61	
		D3	0.95	0.27	0.59	0.74	0.64	
	苜蓿 C	D1	1.03	1.13	0.76	1.12	1.01	0.72
		D2	0.82	0.76	0.24	0.20	0.51	
		D3	0.86	0.66	0.61	0.47	0.65	

注: \* 表示不同播种密度下的平均补偿效应; # 表示所有播种密度下牧草的总体补偿效应。

Note: \* indicated the mean compensatory effects in some sowing density of tested forage. # displayed the comprehensive compensatory effects based on all densities treatment of tested forage.

下,刈割导致沙打旺和苜蓿的补偿效应与混播密度有关,从低密度到高密度,沙打旺的补偿效应为 0.61~0.78,苜蓿植株为 0.51~1.01,表明了等密度混播下苜蓿的补偿效应强于沙打旺。单播下,刈割导致苜蓿比沙打旺更低的补偿效应,其中降低了 3.4%;混播下,刈割可诱导苜蓿比沙打旺更高的补偿效应,其中增加了 5.9%。

2.4 刈割干扰下 2 种豆科牧草生长相关性

不论对照还是刈割,2 种牧草的分枝生长与密度为显著负相关(表 6);牧草产量与密度为正相关,而株高与密度在正常生长下为密度正相关,但在刈割处理下为密度负相关。刈割处理下豆科牧草生长与密度关系更加显著。

刈割处理下 2 种豆科牧草的资源关系和竞争效应与密度有显著相关性(表 7)。不论对照还是刈割,2 种牧草的种间关系与密度呈负相关性,而种间竞争力与密度为正相关。从生长指标看,不刈割状态下,与密度关系只是部分呈显著相关性,但刈割干扰后,所测试指标均显示出与密度显著相关性。

刈割干扰下,单播处理,2 种牧草除分枝数补偿效应外,株高和生产力指数反应的补偿效应均与密度显著相关,其中苜蓿生长补偿在刈割干扰下与密度为显著负相关,而沙打旺生长补偿效应与密度的关系依赖不同的生长指标(表 8)。而混播处理下,2 种牧草在刈割干扰下的生长补偿效应与密度显著相关;与单播相似的是,苜蓿补偿效应在刈割下与密度负相关,而沙打旺则表现为不同生长指标对应的补偿效应显示出不同的密度相关属性。

表 6 刈割干扰下 2 种豆科牧草株高、分枝数和产量与密度的关系( $Y=aX+b$ )

Table 6 Relationship between sowing density and plant height, branches per plant and aerial biomass of both forages under cutting treatment

处理 Treatments	播种方式 Sowing types	牧草 Forages	株高 PH			分枝数 BP			鲜重 FW			干重 DW		
			a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>
刈割 Cutting	单播 MO	沙打旺 A	-0.45	9.40	0.91*	-2.67	22.67	0.57	185.84	51.44	0.99*	27.51	24.04	0.88*
		苜蓿 C	-0.35	52.99	0.04	-13.00	63.00	0.95*	126.84	1010.80	0.86*	7.29	230.93	0.81*
刈割 Cutting	混播 MI	沙打旺 A	3.60	6.52	0.44	-6.67	23.22	0.99*	-29.73	111.31	0.99*	-5.32	19.59	0.99*
		苜蓿 C	-1.22	49.70	0.22	-31.17	109.89	0.99*	93.84	851.77	0.35	10.68	171.73	0.35
对照 Control	单播 MO	沙打旺 A	4.83	4.33	0.77*	-5.00	30.78	0.99*	82.71	201.68	0.82*	15.01	59.97	0.66*
		苜蓿 C	7.92	42.34	0.53	-16.33	92.77	0.48	600.68	409.80	0.99*	98.65	76.35	0.99*
对照 Control	混播 MI	沙打旺 A	1.19	12.37	0.96*	-4.00	23.22	0.99*	-23.37	152.31	0.08	-7.94	35.99	0.28
		苜蓿 C	3.16	46.63	0.17	-22.17	96.66	0.93*	299.18	1978.60	0.02	130.27	275.86	0.08

注: \* 表示  $P < 0.05$  最小显著性差异。下同。

Note: \* mean the least significant difference (LSD) at  $P < 0.05$ . The same below.

表 7 刈割干扰下 2 种豆科牧草竞争效应与密度的关系( $Y=aX+b$ )

Table 7 Relationship between sowing density and interspecific competition of both forages under cutting interference

生长指标 Growth indicators	刈割 Cutting treatment						对照 Control					
	种间关系			苜蓿对沙打旺竞争力			种间关系			苜蓿对沙打旺竞争力		
	Interspecific relationship			Relative competition			Interspecific relationship			Relative competition		
	a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>
株高 PH	0.49	1.57	0.54	-0.29	1.22	0.70*	-0.32	2.69	0.73*	0.15	0.56	0.47
分枝数 BP	-0.76	3.24	0.99*	0.82	0.89	0.87*	-0.18	2.02	0.42	-0.20	1.66	0.50
鲜重 FW	-0.16	1.31	0.97*	10.35	-9.93	0.91*	-0.27	2.51	0.43	3.17	0.20	0.84*
干重 DW	-0.12	1.17	0.99*	9.90	-8.85	0.95*	0.01	2.17	0.51	11.24	-9.85	0.90*

表 8 刈割干扰下 2 种豆科牧草补偿效应与密度的关系( $Y=aX+b$ )

Table 8 Relationship between sowing density and compensatory effect of both forages under cutting treatment

播种方式 Sowing types	牧草 Forages	株高 PH			分枝数 BP			鲜重 FW			干重 DW		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
单播 MO	沙打旺 A	-0.22	1.11	0.82*	0.06	0.72	0.30	0.26	0.61	0.71*	0.18	0.53	0.83*
	苜蓿 C	-0.15	1.22	0.73*	-0.07	0.80	0.05	-0.24	1.31	1.00*	-0.34	1.66	0.97*
混播 MI	沙打旺 A	0.19	0.55	0.72*	-0.30	1.19	0.97*	-0.20	1.01	0.91*	0.03	0.51	0.82*
	苜蓿 C	-0.09	1.07	0.88*	-0.24	1.32	0.90*	-0.08	0.69	0.98*	-0.33	1.25	0.87*

### 3 讨论

#### 3.1 混播豆科牧草土壤水分资源利用对刈割的响应

根系是植物利用养分和水分、转化和储藏营养物的重要器官,也是植物与土壤的重要介质与界面,根系对水分和营养的功能与叶片吸收碳的功能相似。由于植物是一个整体协调的生命生态系统,牧草地上部刈割势必对地下部根系生长及其活力造成影响,从而影响植株的资源利用情况<sup>[11]</sup>。本研究发现刈割可导致混播处理下苜蓿和沙打旺土壤水分利用空间上移 20 cm,水分竞争加剧,水分利用增加了 25%左右,可能是牧草刈割提高根区土壤养分吸收、改善了土壤酶活性和土壤微生物数量,以至于改善了水分利用状况<sup>[12]</sup>。苜蓿和沙打旺是西部植被生态建设和退耕还草的重要草种,但部分从国外进口或其他地区引进的品种不适应西部地区干旱的气候条件,因此提高其水分资源利用,进行品种就地适应,提高牧草对干旱胁迫响应,也是立地引种的先决条件<sup>[13]</sup>。郭正刚<sup>[14]</sup>报道刈割处理可提高紫花苜蓿地上部分生物量、改变根系分布和提高土壤含水量。刈割抑制紫花苜蓿主根的纵向生长,而促进横向生长,并使紫花苜蓿侧根发生总数减少和垂直分布的总体格局向表层集中,侧根分布在土壤表层的比例也增加,同时在土壤中的垂直分布变浅。2 种牧草刈割处理后,土壤含水量表现为自地表向下依次递增的变化趋势,而且与密度效应紧密相关。

牧草水分利用的改变可能影响到其在群落中的地位,其中重要原因可能是土壤水分的提高将增强物种的竞争力和化感潜势。李荣平和闫巧玲<sup>[15]</sup>研究了放牧与刈割 2 种不同草地利用方式对科尔沁草甸植被演替产生不同效应,在放牧干扰下,优势度最大的前 5 个种为虎尾草(*Chloris virgata*)、蒲公英(*Taraxacum officinale*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、野韭菜(*Allium japonicum*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*),而在秋季刈割干扰下,优势度最大的前 5 个种为大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、野古草(*Arundinella anomala*)、洽草(*Koeleria cristata*)和芦苇(*Phragmites communis*)禾本科植物,显然在放牧干扰下,一年生植物在群落中占据重要地位,但在割草干扰下,多年生植物在群落中占据绝对优势。2 种豆科牧草在刈割下,对低密度混播和高密度苜蓿单播水分利用有更强的诱导效果。这说明了刈割在一定程度上有选择性和与其他因素的协同性,对混播人工草地的群落稳定性和草地生产力有显著的调控作用<sup>[16]</sup>。邱正强等<sup>[17]</sup>报道通过不同刈割留茬高度,可以调节混播人工草地群落结构及生产力。随着留茬高度的降低,人工草地混播群落中不同草种的优势性将改变。垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和中华羊茅(*Festuca sinensis*)成为减少种,早熟禾(*Poa annua*)则为增加种,西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)成为侵入种,人工草地优良牧草垂穗披碱草和中华羊茅在群落生物量中所占的比例呈下降趋势。本研究中还发现,刈割可导致苜蓿株高有显著补偿效应,尽管相比对照株高有所下降,但用枝条高度或者长度来表示竞争在一定程度上能够说明竞争问题,可能高度与枝条长度能够反应对光能的利用情况,因为最高温度与太阳辐射等气候学指标和 2 种牧草生长速率有显著相关性<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 2 种豆科牧草对刈割的生长反应

基于组织转化理论,人工草地刈割处理对植被叶片和植株的再生动态、植被特征、草地生产力及羊草(*Leymus chinensis*)不同器官中可溶性碳水化合物和氮素含量变化有显著影响,适当刈割可以加快牧草的组织转化速

率,提高牧草的营养价值<sup>[19,20]</sup>。本研究发现单播方式下刈割虽然导致各密度沙打旺和苜蓿株高和分枝数显著低于对照,但可诱导沙打旺提高牧草产量。与刘文高<sup>[21]</sup>研究刈割对柱花草(*Stylosanthes gracilis*)自身生长影响基本一致。不同刈割强度对植株高度有直接的影响,但刈割的植株高度 2 个月后才能逐步恢复到不刈割植株的高度,轻刈割的柱花草再生速度要快于不刈割处理,其新梢再生速度和生物量要显著高于重刈割处理。可能的机制是重刈割后叶绿素总量变化不明显,但是叶绿素 a 和叶绿素 b 的相对含量变化明显,刈割处理的叶绿素 a 含量要高于不刈割处理的叶绿素 a 含量,而且重刈割后的植物根系生长受到较大的影响,总根长和总根体积均大幅下降,因此适度刈割可提高牧草地上部植株的再生能力<sup>[22]</sup>,本研究已经刈割 2 次,并且留茬 5 cm,属于重度刈割,因此刈割可能导致苜蓿株高、分枝数和牧草产量显著低于对照。而混播方式下,不同于单播处理,由于苜蓿和沙打旺可能存在一定的竞争和化感潜力,因此在干旱、刈割和种间关系协同胁迫下,刈割可导致更大的负面效应,即刈割导致 2 种牧草的株高、分枝数和产量均呈下降趋势,这种负面效应可以通过降低播种密度得到缓解,主要原因可能是低密度种群中植物具有较多的分蘖是植物在刈割后表现出较高补偿能力的一个重要生物学原因<sup>[23]</sup>。王海洋等<sup>[24]</sup>发现甘南亚高山草甸常见牧草垂穗披碱草在后期重度处理(拔节期刈割,留茬 2 cm)可显著降低植物的地上部分生物量及生殖部分干重(穗重)。赵海新<sup>[25]</sup>对草原 3 号杂花苜蓿+无芒雀麦(*Bromus magnus*)混播草地进行了生理生态特性的研究,发现低频刈割有利于增加翌年苜蓿产量及禾豆总产量,而高频刈割对当年混播群落翌年生长具有抑制作用。本研究在试验调查前已经进行了 2 次刈割,并且每月 1 次,理论上属于高频刈割,因此对混播草地影响更大。李明和郭孝<sup>[26]</sup>发现高羊茅(*F. arundinacea*)虽能够很好地适应半干旱的气候和土壤条件,在一定程度上具有较强的耐刈割能力,然而,过度和频繁的刈割会导致牧草生产水平的严重下降,不利于饲草的可持续利用。

### 3.3 刈割对混播豆科牧草种间关系的调控

在生态系统中,植物群落往往由混生种群所组成,但通过一定的人工管理措施如施肥和刈割等可有效调节植物群落的种间关系<sup>[27,28]</sup>。本研究发现在苜蓿与沙打旺组成的简单群落中,在刈割干扰下,苜蓿与沙打旺两者仍然为资源共享关系,也就是互利共生共存关系,但也存在种间苜蓿的竞争力明显大于沙打旺的现象。种间竞争是排他性的,那么可能是刈割引发的某种机制使竞争排斥原理失效或使物种能共存,并维持群落的稳定性<sup>[29]</sup>。长期以来,人们认为物种生态位的分离以避免资源竞争可以解释共存。本研究得出的刈割可诱导 2 种牧草的补偿效应,而且密度越小,自疏作用更小,这种补偿机制就更强。大多数植被类型,尤其是常遭受周期性的干扰,可能导致成体的死亡,并为更新创造机会<sup>[30]</sup>,这种死亡是与密度无关的。据此分析,沙打旺在刈割干扰下,生长受到一定抑制,从而导致混播下刈割可诱导苜蓿比沙打旺更高的补偿效应,因此 2 个物种之间“相遇”频度增大,种间相互作用的重要性和强度变得更加复杂。王文等<sup>[31]</sup>研究了多年生黑麦草(*Lolium perenne*)和白三叶(*Trifolium repens*)混播草地中发现持续刈割干扰利于黑麦草和白三叶种群生长的正效应发挥,但低频刈割相比对照(不刈割)将导致种间竞争增强,而且随刈割频率的降低和刈割日期的推后,黑麦草和白三叶的种间竞争渐趋明显。研究发现沙打旺的更新补偿更慢,而苜蓿更新补偿更快,通过这类时间上的异质性,实现资源利用生态位的分离,从而可解释既存在资源共享关系,又有更强的种间竞争作用。当然,混播群落中 2 种牧草的化感(allelopathy)促进作用也是一种促进物种互利共生的重要机制<sup>[32,33]</sup>。生物多样性保护是全球生态学和城市化的一个中心议题,这对探讨种间关系和生物多样性维持有着积极的意义。

### 参考文献:

- [1] Morris W F, Bronstein J L, Wilson W G. Three-way coexistence in obligate mutualist-exploiter interactions: The potential role of competition[J]. *The American Naturalist*, 2003, 161(6): 860-875.
- [2] 张明忠,朱红业,冯光恒,等. 刈割频度对王草再生性能及营养价值的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(9): 222-224.



- [3] 常会宁,夏景新,李志坚. 刈割对羊茅黑麦草叶片净生长和净牧草积累的影响[J]. 草地学报, 1996, 4(1): 1-6.
- [4] 孙显涛,陈晓阳,贾黎明,等. 不同刈割频度下二色胡枝子根系及地上生物量的研究[J]. 草业科学, 2005, 22(5):25-28.
- [5] 包国章,陆光华,郭继勋,等. 放牧、刈割及摘顶对亚热带人工草地牧草种群的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8):1327-1331.
- [6] 张永亮,胡自治,赵海新,等. 刈割对混播当年产草量及再生速率的影响[J]. 草地学报, 2004, 12(4):308-312.
- [7] Shipley B A. Null model for competitive hierarchies in competition matrices[J]. Ecology, 1993, 74: 1693-1699.
- [8] de Wit C T. On Competition[M]. Wageningen, The Netherlands: Versl Landbouwk Onderz Ned, 1960. 1-82.
- [9] Harper J L. Population Biology of Plants[M]. London: Academy Press, 1977.
- [10] 郝明德. 黄土高原沟壑区小流域综合治理模式——以长武王东沟小流域为例[J]. 水土保持通报, 1996, 16(1): 68-72.
- [11] Hooper D U, Solan M, Symstad A, *et al.* Species diversity, functional diversity, and ecosystem functioning[J]. Biodiversity and Ecosystem Functioning: Synthesis and Perspectives, 2003, 25:195-208.
- [12] 章家恩,刘文高,陈景青,等. 刈割对牧草地下部根区土壤养分及土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(3): 387-391.
- [13] 曲涛,南志标. 作物和牧草对于干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 126-135.
- [14] 郭正刚. 紫花苜蓿品种适应性评价及对硅素、灌溉和刈割次数的响应[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士学位论文, 2004. 1-125.
- [15] 李荣平,闫巧玲. 放牧与刈割对科尔沁草甸植被演替的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 180-184.
- [16] Jonathan W S. Introduction to plant population ecology[M]. Published in the United States of American, 1982, 147-155.
- [17] 邱正强,马玉寿,施建军,等. 刈割对“黑土滩”人工草地植被的影响[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2006, 24(4): 16-17.
- [18] 何峰,李向林,白静仁,等. 环境因子和刈割方式对两种冷季型牧草冬季生长速率的影响[J]. 中国草地, 2005, 27(5): 38-41.
- [19] 刘军萍. 刈割条件下羊草(*Leymus chinensis*)组织转化研究[D]. 长春:东北师范大学硕士学位论文, 2004. 1-41.
- [20] 耿文诚,铁云华,邵学芬,等. 刈割对白三叶种子田植被高度生长的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 146-149.
- [21] 刘文高. 不同刈割强度对柱花草自身生长及其土壤微生态的影响[D]. 广州:华南农业大学硕士学位论文, 2003. 1-51.
- [22] 章家恩,刘文高,陈景青,等. 不同刈割强度对牧草地上部和地下部生长性状的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1740-1744.
- [23] Tilman D. Competition and biodiversity in spatially structured habitats[J]. Ecology, 1994, 75: 2-16.
- [24] 王海洋,杜国祯,任金吉. 种群密度与施肥对垂穗披碱草刈割后补偿作用的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 477-483.
- [25] 赵海新. 刈割对苜蓿与无芒雀麦混播群落生理生态特性的影响研究[D]. 通辽:内蒙古民族大学硕士学位论文, 2006. 1-45.
- [26] 李明,郭孝. 高羊茅在不同刈割组合下生产能力的研究[J]. 草业科学, 2005, 22(12): 37-39.
- [27] Sale P F. Maintenance of high diversity in coral reef fish communities[J]. American Naturalist, 1977, 111: 337-359.
- [28] 赵林,李保平,孟玲. 施肥和刈割对紫茎泽兰和黑麦草苗期竞争的研究[J]. 草业学报, 2008, 17(3): 151-155.
- [29] Taylor D R, Aarssen L W. On the density dependence of replacement series competition experiment[J]. Journal of Ecology, 1989, 77: 975-988.
- [30] 雷抒情,王海洋,杜国祯,等. 刈割后两种不同体型植物的补偿式样对比研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5): 740-746.
- [31] 王文,苗建勋,常生华,等. 刈割对混播草地种群生长与产量关系及种间竞争特性的影响[J]. 草业科学, 2003, 20(9): 20-22.
- [32] 多立安,赵树兰. 几种豆科牧草混播初期生长互作效应的研究[J]. 草业学报, 2001, 10(2): 72-77.
- [33] Rice E L. Allelopathy (2nd ed.)[M]. New York: Academic Press, 1984.

**Response to cutting treatment of interspecific relationships of leguminous forages in semiarid regions**ZUO Sheng-peng<sup>1,2</sup>, WANG Hui-mei<sup>1</sup>, MA Yong-qing<sup>2</sup>, LI Feng-ming<sup>2</sup>, SHAN Lun<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The growth response of simple and artificial communities of *Astragalus adsurgens* and *Medicago sativa* to cutting treatments based on a biological replacement method was investigated. A relative study of interspecific relationships and compensative effects of both leguminous forages was done at three sowing densities for monoculture and mixtures and compared with cutting grass. The possible mechanisms for communities maintaining stable and successive status is discussed. Compared with the control, the cutting treatment led to a competitively spatial increase of about 20 cm in soil water utilization by *A. adsurgens* and *M. sativa*. This inducible effect increased soil moisture absorption by about 15%. In particular, the cutting treatment significantly enhanced water use of mixtures by 15.6% in low density sowings and by 33% for monocultures of *M. sativa* in high density sowings. In addition, cutting treatment induced an aerial biomass increase of 29% in *A. adsurgens* monoculture in the middle and high density sowings. However, plant height, branch numbers per plant, and aboveground biomass declined under the cutting treatment compared with the control. *A. adsurgens* and *M. sativa* showed weak resources-sharing with a decline of nearly 21% if artificially regulated by cutting and the relative competition of *M. sativa* to *A. adsurgens* was increased by 17%. Whether in monoculture or in a mixture, cutting would increase the compensatory effect of both forages. It was also found that cutting caused drastic density-limiting effects. The low productivity from additional cutting resulted from the synergistic effect of pressures such as arid circumstances, interspecific competition and allelopathic potential, which can be alleviated by coexistence and compensation. In the present study, the growth response and interspecific relationship resulting from cutting can indicate some potent mechanisms for maintaining the biodiversity of communities and the sustainable development of the forage industry.

**Key words:** interspecific relationship; cutting interference; leguminous forages; density-dependent mortality; compensation heterogeneity; biodiversity maintenance