

## 黄土塬区三种豆科牧草的竞争生长\*

张晓红<sup>1,2</sup> 徐炳成<sup>1</sup> 李凤民<sup>1,3\*\*</sup>

(1. 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 杨凌 712100;

2 山西师范大学城市环境学院 临汾 041004; 3. 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室 兰州 730000)

**摘要** 通过田间试验研究了沙打旺、紫花苜蓿和达乌里胡枝子 3 种豆科牧草在黄土旱塬以不同密度单播、混播时的竞争生长能力及水分利用效率。单播时苜蓿生长次年 3 个密度的生产力分别为 15 349 kg# hm<sup>-2</sup>、20 582 kg# hm<sup>-2</sup>、21 531 kg# hm<sup>-2</sup>, 沙打旺和胡枝子 3 个密度的生产力分别为 7 979 kg# hm<sup>-2</sup>、16 440 kg# hm<sup>-2</sup>、21 055 kg# hm<sup>-2</sup>和 2 412 kg# hm<sup>-2</sup>、5 270 kg# hm<sup>-2</sup>、7 102 kg# hm<sup>-2</sup>。混播草地生产力以苜蓿+胡枝子最高(平均 19 227 kg# hm<sup>-2</sup>), 沙打旺与胡枝子混播的生产力最低(平均 11 977 kg# hm<sup>-2</sup>)。和生产力较高的参混种苜蓿、沙打旺单播相比, 苜蓿与沙打旺混播及沙打旺与胡枝子混播的生产力在 3 种密度下均有不同程度的降低。苜蓿主根下扎深度 2 m, 0~60 cm 根系占总根量的 60%, 沙打旺和胡枝子根系最大下扎深度分别为 1.8 m 和 1.5 m, 0~60 cm 根系占总根量比例分别是 80%、9%。3 种牧草中苜蓿的平均水分利用效率最高, 为 25.75 kg# mm<sup>-1</sup># hm<sup>-2</sup>, 胡枝子最低为 7.71 kg# mm<sup>-1</sup># hm<sup>-2</sup>, 沙打旺居中。苜蓿群体种内个体间竞争强度高于沙打旺和胡枝子。结果表明在黄土旱塬上苜蓿的竞争生长能力和水分利用效率高于沙打旺和胡枝子; 不同牧草混播后可以提高水分利用效率, 但生产力相对降低。

**关键词** 黄土旱塬 豆科牧草 生产力 竞争能力 沙打旺 苜蓿 达乌里胡枝子

**中图分类号:** S541; Q145+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2008)03-0686-07

## Competition and growth characteristics of three legumes on highland Loess Plateau

ZHANG Xiaohong<sup>1,2</sup>, XU Bingcheng<sup>1</sup>, LI Fengmin<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory for Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

2. College of Urban and Environment Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China;

3. Key Laboratory for Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** Competition, growth characteristics and WUE of *Astragalus adsurgens* Pall (A), *Medicago sativa* L (B) and *Lespedeza davurica* Schind (C) were investigated through three seeding modes at three seeding densities on highland Loess Plateau. When seeded alone, the productivity of the three legumes are 7 979 kg# hm<sup>-2</sup>, 15 349 kg# hm<sup>-2</sup>, 2 412 kg# hm<sup>-2</sup> at low seeding density, 16 440 kg# hm<sup>-2</sup>, 20 582 kg# hm<sup>-2</sup>, 5 270 kg# hm<sup>-2</sup> at medium density and 21 055 kg# hm<sup>-2</sup>, 21 531 kg# hm<sup>-2</sup>, 7 102 kg# hm<sup>-2</sup> at high density. For mixed seeding, M. sativa and L. davurica (BC) has the highest average productivity (19 227 kg# hm<sup>-2</sup>), while A. adsurgens and L. davurica (AC) has the lowest (11 977 kg# hm<sup>-2</sup>). Compared with monoculture, dominating component M. sativa and A. adsurgens combinations both AB and AC have decreasing productivity. Main root depth of M. sativa, A. adsurgens and L. davurica are 2 m, 1.8 m and 1.5 m, with 60%, 80% and 9% root distributing in 0~60 cm soil layer, respectively. Average WUE of M. sativa is the highest, 25.75 kg# mm<sup>-1</sup># hm<sup>-2</sup>, that for L. davurica is 7.71 kg# mm<sup>-1</sup># hm<sup>-2</sup>, and that for A. adsurgens is between the two. M. sativa has the strongest competitive ability among the three legume species with the highest productivity and WUE. The study shows that mixing different legume species improves WUE, though productivity is somewhat suppressed.

**Key words** Highland Loess Plateau, Legume, Productivity, Competition, *Astragalus adsurgens* Pall, *Medicago sativa* L., *Lespedeza davurica* Schind

\*中国科学院百人计划择优支持项目 (C23013500)资助

\*\*通讯作者, E-mail: fnl@lzu.edu.cn

张晓红 (1976~), 女, 满, 博士, 主要从事农业生态研究。E-mail: zhx\_1976@163.com

收稿日期: 2006-11-29 接受日期: 2007-03-13

(Received Nov 29, 2006; accepted March 13, 2007)

苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall) 和达乌里胡枝子 (*Lespedeza daurica* Schind) 均为多年生豆科牧草, 除具有固氮特性外, 还因耐寒、耐旱、较强的防风固沙能力及较高的营养价值, 在我国黄土高原丘陵沟壑区的水土保持和畜牧业发展中颇受重视<sup>[1-5]</sup>。人工草地建设是畜牧业发展与生态环境建设的关键环节, 但近年的研究显示, 由于栽培模式单一, 许多人工草地出现稳定性差、生产力低、有效使用寿命短的现象, 不仅影响畜牧业的发展, 还引发土壤旱化、退化、土地荒漠化等环境问题<sup>[6-9]</sup>。植物竞争理论和许多研究认为, 混播植物种间通过竞争或互利影响混播群体的生产力和适应稳定性<sup>[10-12]</sup>, 混播群体的生产力和生物多样性间的关系主要受生境生产力的影响和制约<sup>[13-15]</sup>。为探讨通过混播增加物种多样性进而增加人工草地生产力和稳定性的可能性, 在典型

的黄土塬区设立了苜蓿、沙打旺和达乌里胡枝子 3 种豆科牧草以不同密度单播、混播的长期定位试验。本文在试验开始第 2 年所获资料基础上, 监测各单播、混播群体生产能力和水分消耗利用情况, 通过对 3 种牧草种内、种间竞争能力及各自生长特性的分析探讨多物种混播早期植物种间的竞争及生长特性, 以期认识群落稳定性和产量形成的生态过程及黄土高原地区人工草地的维护和发展提供依据。

## 1 材料与方法

试验在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站进行。该站位于黄土高原中南部的陕甘交界, 地处北纬 35°12' 东经 107°40' 海拔 1 200 m, 暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水 584 mm, 平均气温 9.1℃, 无霜期 171 d 地下水埋深 50~80 m 为典型旱作农业区。试验田土壤基本性质如表 1 所示。

表 1 试点土壤养分基本状况

Tab. 1 Soil nutrients of experimental site

土层 Soil layer (cm)	全 N Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全 P Total P (g kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	pH 0.01 mol CaCl <sub>2</sub> (1B1)
0~30	1.01 ± 0.04	0.73 ± 0.01	14.40 ± 0.41	5.85 ± 0.62	7.57 ± 0.07
30~60	0.70 ± 0.05	0.61 ± 0.01	9.10 ± 0.63	2.65 ± 0.25	7.63 ± 0.09
60~100	0.57 ± 0.04	0.52 ± 0.02	9.10 ± 0.47	2.12 ± 0.20	7.62 ± 0.02

供试牧草沙打旺为中国科学院水利部水土保持研究所自行辐射育种的/彭阳早熟型 0 (千粒重 1.943 g), 苜蓿为引自加拿大的/阿尔冈金 0 (千粒重 1.285 g), 二者均是黄土高原地区典型的当家牧草; 达乌里胡枝子为野生种 (千粒重 1.874 g), 是黄土高原森林草原地带的代表性群落建群种之一。

试验设单播 (A: 沙打旺; B: 苜蓿; C: 达乌里胡枝子)、混播 (AB, AC, BC, ABC) 各低、中、高 3 个密度 (7.5 万株# hm<sup>-2</sup>、22.5 万株# hm<sup>-2</sup>、67.5 万株# hm<sup>-2</sup>) 共 21 个处理, 3 次重复; 小区面积 4 m (EW) @ 2.5 m (SN), 完全随机区组排列。2004 年 5 月 27 日播种, 当年保苗为主, 冬前刈割 1 次不计产, 次年 4 月中旬返青后间苗, 混播留苗比例为 1B1 (两两混播) 和 1B1B1 (3 种混播)。整个试验过程不施用任何肥料, 适时去除杂草。

每月中旬定期用中子仪 (美国 CPN 公司 503DR) 观测 0~5 m 土层土壤水分 (0~1 m 深度每 10 cm 1 层, 1~5 m 深度每 20 cm 1 层), 同时测量株高; 分别在苜蓿营养生长旺盛的 5 月、7 月、9 月下旬取各处理 1 m<sup>2</sup> 样区, 刈割称鲜重, 烘干法测干鲜比, 计算小区地上生物量; 10 月份冬前刈割后用

直径 9 cm 钻分取 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm、100~150 cm、150~200 cm 5 个层次根系, 每小区 3 钻, 冲洗后烘干称重。所得数据采用 SAS 统计分析软件进行显著性分析, 并计算相关系数。

牧草生产力 (kg# hm<sup>-2</sup>) 为全年累积干生物量。密度效应系数 (E):

$$E = (\$2 - \$1) / \$1 \quad (1)$$

式中, \$1 = P2 - P1, \$2 = P3 - P2, P1 为低密度生产力, P2 为中密度生产力, P3 为高密度生产力。当 E > 0 时密度效应为正, 表明群体密度未达到效应密度, 群体内个体间未出现相互竞争抑制作用; E < 0 时密度效应为负, 表明群体密度已超过效应密度, 群体内个体间由于相互竞争抑制导致群体生产能力下降, 此时 |E| 值越大说明群体内个体间的竞争强度越大。

相对总生物量 (RYT)<sup>[16]</sup>:

$$RYT = Y_{ij} / Y_i + Y_j / Y_j \quad (2)$$

式中, Y<sub>ij</sub> 为混播牧草种 i 的生产力, Y<sub>i</sub> 为混播牧草种 j 的生产力, Y<sub>i</sub> / Y<sub>j</sub> 分别为单播牧草种 i、j 的生产力。RYT 值表示生长在一起的两种植物对同一环境资源的利用情况及其之间的相互关系, RYT \ 1

说明两种植物分别占有不同的生态位,能够充分地利用资源,表现为一种较好的共生关系;  $R_{YT} < 1$  表示两种植物具有一定的相互拮抗关系,对相同的资源利用产生相互的争夺限制。

相对竞争率 (CR<sub>i</sub>)<sup>[16]</sup>:

$$CR_i = (Y_{ij}/Y_{i\#}Z_{ij}) / (Y_{ji}/Y_{j\#}Z_{ji}) \quad (3)$$

式中,  $Z_{ij}$  为混播种  $i$  的比例,  $Z_{ji}$  为混播种  $j$  的混播比例。  $CR_i > 1$  表示种  $i$  的竞争力大于种  $j$ ;  $CR_i = 1$  表示种  $i$  和种  $j$  竞争力相同;  $CR_i < 1$  表示种  $i$  的竞争力小于种  $j$ 。

水分利用效率 ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 单位面积

牧草生产力 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) / 耗水量 (mm) (4)

式中, 耗水量为最后一次牧草刈割与返青期之间 0~5 m 土壤水分的差值与同期降雨量之和。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同牧草生产力及种内、种间竞争

单播情况下 3 种豆科牧草的生产力均随种类、密度的不同而异 (表 2)。苜蓿 (B) 的生产力最大 (3 个密度平均  $19\ 154 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 达乌里胡枝子最小 ( $4\ 928 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 沙打旺居中 ( $15\ 154 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。3 种豆科牧草中等密度的全年累积干生物量均显著

高于低密度 ( $P < 0.01$ ), 但与高密度差异较小, 其中苜蓿中高密度差异不显著 ( $P > 0.05$ )。苜蓿与沙打旺 (A) 混播 (AB) 后 3 个密度下生产力与单播苜蓿相比有不同程度的降低; 但与胡枝子 (C) 混播 (BC) 或 3 种混播 (ABC), 低密度时生产力显著低于单播苜蓿, 中等密度差异不显著, 高密度情况下却显著提高 ( $P < 0.01$ )。沙打旺和胡枝子混播 (AC) 生产力在 3 个密度下显著高于胡枝子单播, 但显著低于沙打旺单播 ( $P < 0.01$ )。各混播处理间比较, 沙打旺和胡枝子混播的平均生产力最小 ( $11\ 977 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 苜蓿和胡枝子混播的平均生产力最大 ( $19\ 227 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 苜蓿和沙打旺混播及 3 种牧草混播平均生产力分别为  $17\ 390 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $18\ 917 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

从 3 种牧草单播密度效应系数 (E) 来看 (表 2), 苜蓿的种内竞争强度最大, 沙打旺次之, 达乌里胡枝子最小; 苜蓿与沙打旺和胡枝子的所有混播处理 (AB, BC, ABC) 密度效应系数绝对值均小于单播苜蓿, 表明在这些混播群体中个体间的竞争强度与单播苜蓿相比有所降低; 沙打旺和胡枝子的混播密度效应系数为  $-0.1645$ , 其群体内个体竞争强度最小。

表 3 为 3 种豆科牧草混种时的各自生产力和竞

表 2 3 种豆科牧草单、混播生产力及群体竞争强度

Tab. 2 Productivity and competition intensities of three legume grasses

处理 Treatment	生产力 Productivity ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			$v_1$ (P2 - P1) ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	$v_2$ (P3 - P2) ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	密度效应系数 (E) Coefficient of density effect ( $v_2 - v_1$ ) / $v_1$
	低密度 (P1) Low density	中密度 (P2) Medium density	高密度 (P3) High density			
A	7 979d	16 440c	21 055b	8 461	4 615	- 0.454 5
B	15 349a	20 582ab	21 531b	5 231	951	- 0.818 0
C	2 412f	5 270e	7 102d	2 860	1 832	- 0.359 0
AB	12 210b	19 240b	20 720b	7 030	1 480	- 0.789 5
AC	6 060e	12 320d	17 550c	6 260	5 230	- 0.164 5
BC	10 600c	21 800a	25 280a	11 200	3 480	- 0.689 3
ABC	12 350b	19 650ab	24 750a	7 300	5 100	- 0.301 4

同列数字后不同字母代表  $P[0.01]$  水平差异显著, 下同。Different letters in the same column mean significant difference at  $P[0.01]$ . The same below.

争能力。混播时, 3 种牧草的生产能力表现出复杂性, 因混播种相对竞争能力各异, 各牧草的生产力及总生产力随密度变化的趋势均发生了变化。以沙打旺为例, 当其苜蓿混播 (AB) 时, 随着密度增加, 其生产力显著降低, 且 3 个密度下其相对竞争率均小于 1; 但其与胡枝子混播 (AC) 时情况恰恰相反, 这说明沙打旺的相对竞争能力比苜蓿小, 但比胡枝子大。从表 3 生产力和相对竞争率的计算结果可以看出, 在苜蓿的混播草地中, 无论是两两混播还是 3 种混播, 随密度升高苜蓿的相对竞争率和

生产力均增大, 这表明苜蓿的竞争能力远远大于沙打旺和胡枝子, 且密度越高, 这种竞争优势越明显。

3 种密度下沙打旺 (A) 与苜蓿 (B) 混播 (AB) 时其相对总生物量 ( $R_{YT}$ ) 均小于 1 (图 1), 但与胡枝子 (C) 混播 (ABC) 后  $R_{YT}$  均大于 1, 这表明沙打旺和苜蓿的生态位较相近, 而胡枝子与它们的生态位分离较大。从图中还可以看出, 同是生态位分离, 胡枝子与沙打旺、苜蓿分别混播时其结果却不相同, 与沙打旺 (AC) 混播时 3 种密度下  $R_{YT}$  均小于 1 与苜蓿混播 (CB) 时低密度下  $R_{YT} < 1$  中密度和

表 3 3 种豆科牧草混播时生产力及相对竞争率

Tab 3 Productivity and relative competing ability of three legume grass when seeded together

处理 Treatment	计产种类 Counted species	低密度 Low density		中密度 Medium density		高密度 High density	
		生产力 Productivity (kg hm <sup>-2</sup> )	相对竞争率 (CRi) Relative competition intensity	生产力 Productivity (kg hm <sup>-2</sup> )	相对竞争率 (CRi) Relative competition intensity	生产力 Productivity (kg hm <sup>-2</sup> )	相对竞争率 (CRi) Relative competition intensity
AB	A	1.35d	0.30	1.12d	0.08	0.55d	0.03
	B	10.86a	3.37	18.12b	12.84	20.17b	36.07
AC	A	5.58c	4.38	11.14c	3.03	16.51c	5.34
	C	0.48e	0.23	1.18d	0.33	1.04d	0.19
BC	B	9.93b	4.21	21.67a	42.60	25.24a	231.01
	C	0.37e	0.24	0.13d	0.02	0.04d	0.004

高密度的 RYT > 1。对苜蓿和沙打旺来说, 与弱的竞争对手胡枝子混播, 密度较高时混播起竞争稀释作用, 密度低时竞争较小甚至不存在, 主要效应是个体(密度)的减少对群体生产能力的影 响。苜蓿相对竞争生长能力及种内竞争强度远大于胡枝子, 与胡枝子(BC)混播低密度下由于种内种间竞争均很小, 胡枝子的竞争稀释效果不明显, 而由于个体数量减少造成苜蓿生产力降低的损失较大, 致使总的 RYT < 1; 密度增大后胡枝子的竞争稀释效应显著, 苜蓿由于种内竞争强度降低导致生产力受抑程度减小的效果强于个体数量减少造成的损失, 从而显著提高了混播的相对总生物量。沙打旺的相对竞争生长能力和种内竞争强度与胡枝子的差距较小, 因此受到的影响不如苜蓿表现强烈。

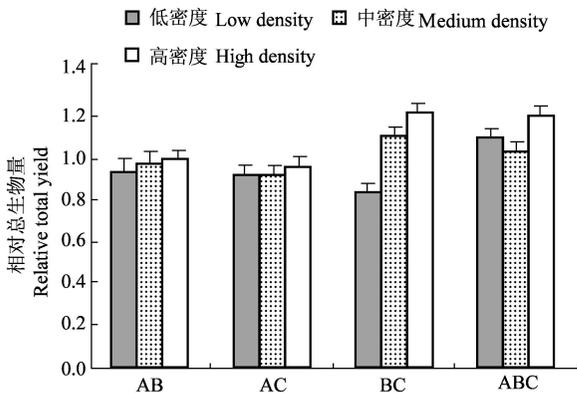


图 1 混播牧草的相对总生物量

Fig 1 Relative total yield (RYT) of three legumes when seeded together

2.2 不同牧草的地上、地下生长特性

对一个绿色群体系统来说, 生长速度快的物种在地上光能竞争中必然占据优势。本试验中 3 种豆科牧草的植株高度平均日增长量差异显著 (P < 0.01, 图 2)。苜蓿株高增长量随时间大体呈下降趋势, 于 5~6 月和 7~8 月生长相对较快; 沙打旺株高

增长量也是基本上随时间下降, 但与苜蓿相反, 其生长速度相对较快的两个月是高温少雨的 6~7 月和 8~9 月; 胡枝子出苗较晚, 生长高峰期处于雨水和温度条件都较好的 7~8 月, 其植株生长特点是匍匐贴地式, 群体最高高度只有 30 cm 左右。结果表明苜蓿的地上生长速度与沙打旺和胡枝子相比在全生育期中均占绝对优势, 群体高度平均日增长苜蓿为 1.53 cm, 沙打旺 0.55 cm, 胡枝子 0.21 cm, 苜蓿地上竞争能力远大于沙打旺和胡枝子。

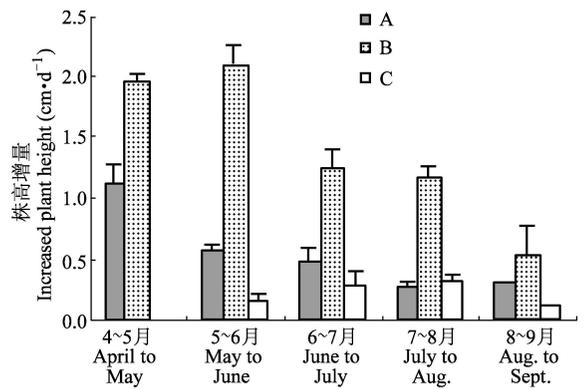


图 2 3 种豆科牧草地上部株高平均日增长量

Fig 2 Average diurnal plant height growth of the three legumes

3 种豆科牧草的地下根系分布情况如图 3 所示, 胡枝子 (C) 根系最大下扎深度只有 1.5 m, 99% 以上分布在 1 m 以内, 且主要集中在 0~60 cm 深度内 (91.3%)。沙打旺 (A) 和苜蓿 (B) 的根系较深, 苜蓿主根下扎到 2 m, 沙打旺根系最大下扎深度为 1.8 m。沙打旺上层 (0~60 cm) 根系占 0~2 m 土层根系总量的 80% 以上; 而苜蓿只占 60%, 中下层根系所占比例是沙打旺的近两倍。试验结果表明沙打旺和苜蓿在黄土旱塬上均能较好地利用深层土壤水分和养分, 而苜蓿利用深层土壤资源的能力强于沙打旺, 胡枝子主要利用 1 m 以上土壤资源。

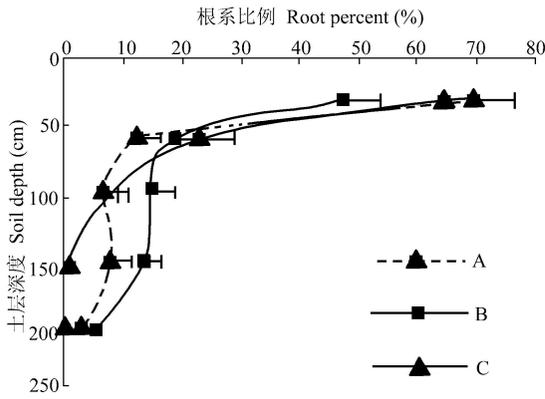


图 3 3种豆科牧草地下生物量分布比例

Fig 3 Underground biomass distribution of three legumes

### 2.3 不同牧草的耗水量和水分利用效率

低密度单播苜蓿草地全年生育期平均耗水量 682 mm, 中密度 764 mm, 高密度 774 mm; 沙打旺和胡枝子的耗水量分别为 623 mm、692 mm、703 mm 和 610 mm、640 mm、650 mm。3种密度下苜蓿耗水量均显著高于沙打旺和胡枝子(图 4)。3种牧草单播耗水量均随密度加大而显著升高 ( $P < 0.01$ ); 混播牧草耗水量除 AC(沙打旺和胡枝子)外也均随密度增加而增多。方差分析表明, 苜蓿与沙打旺、胡枝子的所有混播处理 (AB, BC, ABC)耗水量与其单播耗水量差异不显著 ( $P = 0.05$ ), 沙打旺和胡枝子混播处理 (AC)耗水量介于单播沙打旺 (A)和胡枝子 (C)耗水量之间, 差异也不显著 ( $P = 0.05$ )。

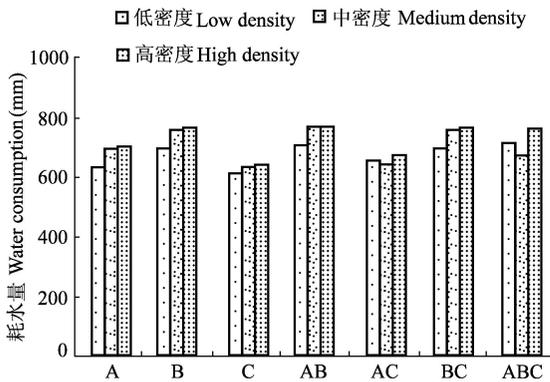


图 4 不同播种方式、不同密度下牧草耗水量

Fig 4 Water consumption of three legumes seeded under different patterns with different densities

3种牧草单播时水分利用效率均随密度增加而增大(图 5), 沙打旺和胡枝子不同密度间的水分利用效率差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 原因可能是密度提高一方面增大了地表覆盖率, 减少土面蒸发, 另一方面由于种群个体数目增加群体生产力也提高; 但

苜蓿的水分利用效率高密度处理与中等密度处理差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 主要是由于高密度时种内个体竞争加剧限制了生产力的提高。3种牧草耗水量比较表明, 苜蓿的平均水分利用效率最高 ( $25.75 \text{ kg} \# \text{ mm}^{-1} \# \text{ hm}^{-2}$ ), 胡枝子最低 ( $7.71 \text{ kg} \# \text{ mm}^{-1} \# \text{ hm}^{-2}$ ), 沙打旺居中, 但高密度沙打旺水分利用效率 ( $29.93 \text{ kg} \# \text{ mm}^{-1} \# \text{ hm}^{-2}$ )比同密度的苜蓿高 ( $27.83 \text{ kg} \# \text{ mm}^{-1} \# \text{ hm}^{-2}$ )。

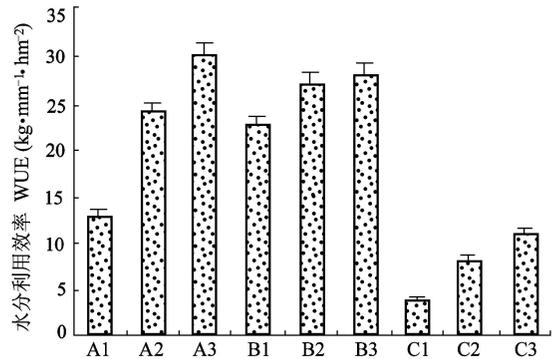


图 5 单播不同密度下牧草水分利用效率

Fig 5 WUE of three legumes when seeded alone under different densities

1, 2, 3 分别表示低、中、高密度。1, 2, 3 represent the low, medium and high density

混播草地总体水分利用效率实测值除苜蓿和沙打旺混播处理 (AB)外均显著高于混播种单播时水分利用效率的理论加和计算值(表 4), 其中沙打旺和苜蓿与胡枝子的混播处理 (AC, BC)的增加幅度随密度增大而增加, 苜蓿与胡枝子混播 3个密度下分别增加 12%、63%、71%, 沙打旺与胡枝子混播增加 10%、20%、28%; 3种牧草混播中密度时增加最多 (48%), 低密度时增加最少 (34%), 高密度增加 42%; 沙打旺和苜蓿混播水分利用效率在低密度和中密度时下降 1% ~ 2%, 高密度时下降 7%。

### 3 小结与讨论

#### 3.1 3种豆科牧草的竞争生长能力

研究结果显示, 3种豆科牧草在黄土旱塬上的竞争生长能力以苜蓿最强, 沙打旺次之, 达乌里胡枝子最差。Grime<sup>[17]</sup>的最大生长率种间竞争理论认为植物(作物)竞争力取决于物种的资源捕获潜力, 植物的形态建成和生物性状对其竞争能力有显著影响, 竞争成功的都是那些具有高的资源捕获潜力和最大营养组织生长率的物种, 本研究结果支持 Grime 的理论。苜蓿的地上生长速率显著高于沙打旺和胡枝子, 且生长周期与降雨相协调, 地下根系下扎最深, 中、下层土壤根系所占比例较大, 相对来说具有最大的资源捕获优势, 其竞争力也最大。另

表 4 不同密度混播 3 种牧草的水分利用效率

Tab. 4 WUE of three legumes seeded alone under different densities

kg # mm<sup>-1</sup> # hm<sup>-2</sup>

密度 Density	AB		AC		CB		ABC	
	实测值 Measured	计算值 Calculated	实测值 Measured	计算值 Calculated	实测值 Measured	计算值 Calculated	实测值 Measured	计算值 Calculated
	低 Low	17.35	17.65	9.25	8.38	14.82	13.22	17.51
中 Medium	24.93	25.35	19.19	16.00	28.66	17.58	29.12	19.64
高 High	26.87	28.88	26.07	20.44	33.07	19.38	32.46	22.90

外试验中发现苜蓿返青在 3 月中旬, 沙打旺和胡枝子分别在 4 月和 5 月初, 这可能也是影响它们竞争能力的一个重要因素, 已有研究表明<sup>[18]</sup>早出土的幼苗不仅有较长的生长时间, 而且还具有竞争优势。沈禹颖等<sup>[19]</sup>对 4 种牧草种间竞争力和种间关系的研究表明, 对于不同的邻居种, 目标种的竞争效应和竞争反应是不同的; Wilson<sup>[20]</sup>发现 20 种湿生植物的竞争效应不随氮素水平而变化, 但对邻居种的关系比较敏感, 而竞争反应则受环境影响较大, 对邻居种不敏感。本研究通过相对竞争率 (CR<sub>i</sub>) 和相对总生物量 (RTY) 的计算表明, 对于不同的两邻居种沙打旺和胡枝子, 目标种苜蓿对后者的竞争 (效应) 能力显著大于前者。谷安琳等<sup>[21]</sup>在内蒙古干旱和半干旱区进行的几种豆科牧草产量试验结果是沙打旺和胡枝子的生产力高于苜蓿, 与本研究结果相反, 原因可能是植物对资源的种间竞争的不对称性及其程度与环境因素有关, 特别是各因素综合作用下的环境生产力, 即所谓植物竞争具有环境相关性<sup>[22, 23]</sup>。Keddy 等<sup>[24]</sup>测定 18 种湿地草本植物对 1 种目标植物的种间竞争效应发现, 种间竞争的不对称性与土壤肥力水平有关, 从低肥力到中等和高肥力水平, 不对称程度分别增加 1.131 倍和 1.145 倍。可见在具有不同的环境资源条件下开展植物竞争生长适应能力研究是很必要的。

### 3.2 群体密度效应的影响与应用

从生态学的角度来讲, 研究作物生产应立足于种群水平<sup>[25]</sup>。牧草生产依赖的是一种群体行为, 而群体行为必然受密度的影响和制约。本研究中苜蓿受密度影响制约最明显, 从低密度到中密度生产力提高了 34.08%, 到高密度生产力只提高 6.20%, 密度增加对生产力提高的限制作用远大于沙打旺和胡枝子, 后者分别是 106.04%、71.2% 和 118.5%、75.99%。杜心田等<sup>[26]</sup>提出在同一条件下, 作物的密度效应随密度递增而递增, 这一规律是以个体为对象得出来的, 本试验结果除了证明在群体水平上这一规律同样适用外, 同时也发现其针对个体反应研究作物密度效应的局限性, 即: 在效应密度以下时, 个体的密度效应理论上为零, 因此无法反映效

应密度以下的密度效果; 但群体密度效应则是随整个密度系列变化的, 在由正到负的整个区间内所反映的范围和意义要比前者宽的多, 故本研究根据不同密度群体生物量计算得到的密度效应系数 (E) 能更好地说明作物群体生产的密度效应。本研究结果中, 苜蓿、沙打旺和胡枝子的种内密度效应系数 (E) 分别为 -0.818 Q - 0.454 5 和 -0.359 Q 表明在同样的密度范围内, 苜蓿群体的密度效应较沙打旺和胡枝子都高, 高密度的单播苜蓿群体已接近最大密度, 个体间的强烈竞争严重地抑制了群体生产力的提高, 而高密度沙打旺群体内个体间的竞争还未达到很严重的程度, 胡枝子的密度效应更小, 在高密度基础上再翻番还可以提高群体生产力。这就要求在黄土塬区实际生产中, 要提高牧草作物群体生产力, 从群体密度效应出发, 单播草地苜蓿播种密度以中等为宜, 而沙打旺和胡枝子应适当提高播种密度。

### 3.3 混播草地生产力和水分利用效率

作物生产力和水分利用效率是旱地农业的重要指标, 如何提高作物生产力和水分利用效率一直是旱地农业研究的重点问题<sup>[27]</sup>。赵新海等<sup>[28]</sup>较系统地介绍了近年对混播草地的研究进展, 许多研究表明混播草地较单播草地无论是出苗长势、产草量还是抗逆性及营养物质含量等都占据明显优势<sup>[29]</sup>。李隆等<sup>[30]</sup>的小麦/大豆间作试验表明, 间作相对于单作两种作物的收获指数均有显著提高。本研究中苜蓿和胡枝子混播及 3 种牧草混播时, 总生产力低密度下不及苜蓿单播, 中密度和高密度情况下却均大于高生产力的单播苜蓿, 而总的水分利用效率在 3 个密度下均比单播水分利用效率理论加和计算值高, 密度效应系数绝对值减小, 表明竞争生长特性差异较大的物种进行混播时, 可以降低混播群体内个体间的竞争压力, 优化混播群体的资源利用方式, 提高混播群体的稳定性、生产能力和效率。但苜蓿与沙打旺混播时其总的生产力和水分利用效率都不如单播, 说明并非在任何情况下所有混播草地都会比单播草地占优势。混播草地的生产力和资源利用能力受到参加混播的牧草种类、密度以

及混播比例等多因素的综合影响,因此在黄土旱塬草业生产中,有必要对其他不同种属的牧草搭配以及不同的搭配比例进行进一步的研究和应用,根据混播牧草竞争生长特性将两种或多种牧草以适当的密度和比例搭配混播,不仅能够提高草地生产力,更重要的是有利于提高总的水分利用效率,有利于旱作种草业的可持续发展。

致谢 诚挚感谢试验共同完成人王会梅的合作;感谢长武实验站站长刘文兆老师以及站上工作人员的支持和帮助;感谢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所提供的良好科研环境条件。

### 参考文献

- [1] 李凤民. 宁夏盐池苜蓿人工草地上生物量季节动态研究 [J]. 生态学杂志, 1992, 11(6): 55- 57
- [2] 梁一民, 李代琼, 从心海. 吴旗沙打旺草地土壤水分及生产力特征的研究 [J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 113- 118
- [3] 聂庆华, 宋桂琴. 黄土高原沟壑区人工草地生产力研究))) 以长武王东沟试验区苜蓿地为例 [J]. 水土保持通报, 1993, 13(5): 22- 27
- [4] 吴学栋, 董俊, 乔小林. 陇中半干旱丘陵区沙打旺土壤水分动态特征及净初级生产力研究 [J]. 水土保持通报, 1998, 10(9): 119- 123
- [5] 徐柱, 马玉宝, 李林杭, 等. 三种胡枝子属野生植物适应性的初步评价 [J]. 内蒙古草业, 2005, 17(2): 23- 26
- [6] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435- 438
- [7] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应 [J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404- 411
- [8] 李裕元, 邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2321- 2327
- [9] 杨汝荣. 我国西部草地退化原因及可持续发展分析 [J]. 草业科学, 2002, 19(1): 23- 27
- [10] Callaway R. M. Positive interactions among plants [J]. Bot Rev, 1995, 61: 306- 349
- [11] Rajaniemi T. K., Victoria J. Root competition can cause a decline in diversity with increased productivity [J]. Journal of Ecology 2003, 91: 407- 416
- [12] Zamfir M., Goldberg D E. The effect of initial density on interactions between bryophytes at individual and community levels [J]. Journal of Ecology 2000, 88: 243- 255
- [13] Gough L., Osenberg C. W., Gross K. L., et al. Fertilization effects on species density and primary productivity in several herbaceous plant communities [J]. Oikos, 2000, 89: 428- 439
- [14] Pugnaire F. I., Armas C., Valladares F. Soil as a mediator in plant interactions in a semiarid community [J]. Journal of Vegetation Science 2004, 15: 85- 92
- [15] Rajaniemi T. K. Explaining productivity-diversity relationships in plants [J]. Oikos 2003, 101: 449- 457
- [16] 马春晖, 韩建国, 张玲. 高寒牧区一年生牧草种间竞争的动态研究 [J]. 草业科学, 2001, 18(1): 22- 24
- [17] Grime J. P. Plant Strategies and Vegetation Processes [M]. London: Wiley, 1979
- [18] Ross M. A., Harper J. L. Occupation of biological space during seedling establishment [J]. Ecology 1972, 60: 77- 88
- [19] 沈禹颖, 李昀, 陆妮. 4种牧草种间竞争力和种间关系的研究 [J]. 草业学报, 2002, 11(3): 8- 13
- [20] Wilson S. D., Tilman D. Competitive response of eight old plant species in four environments [J]. Ecology 1995, 76(4): 1169- 1180
- [21] 谷安琳, Larry Holworth, 云锦凤, 等. 几种豆科牧草旱作条件下的牧草产量分析 [J]. 中国草地, 1998, (5): 26- 30
- [22] Dapaah H. K., Vyn T. J. Nitrogen fertilization and cover crop effects on soil structural stability and corn performance [J]. Communication in Soil Science and Plant Analysis 1998, 29: 2557- 2569
- [23] Paul K., Connie G., Lauchlan H. F. Effects of low and high nutrients on the competitive hierarchy of 26 shoreline plants [J]. Ecology 2000, 88: 413- 423
- [24] Keddy P. A., Shipley B. Competitive hierarchies in herbaceous plant communities [J]. Oikos 1997, 80: 253- 256
- [25] 赵松岭, 李凤民, 张大勇, 等. 作物生产是一个种群过程 [J]. 生态学报, 1997, 17(1): 100- 104
- [26] 杜心田, 王同朝. 作物密度效应递增律及其意义 [J]. 河南科学, 2003, 21(6): 733- 737
- [27] 西北农业大学. 旱农学 [M]. 北京: 农业出版社, 1991
- [28] 赵新海, 朱占林, 张永亮, 等. 混播草地之研究进展 [J]. 中国农业科学导报, 2005, 21(11): 38- 42
- [29] 多立安, 赵树兰. 几种豆禾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
- [30] 李隆, 杨思存, 孙建好. 小麦-大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 197- 200