

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2019.06.011

水磷供应对柳枝稷和达乌里胡枝子生物量、水分利用效率及种间关系的影响

刘金彪¹, 王世琪¹, 康继月², 徐炳成^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学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;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:明确水磷供应对柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* S.)生物量、水分利用效率(Water use efficiency, WUE)和种间关系的影响,可为黄土丘陵区二者混播草地建设提供依据。本研究采用盆栽试验,分析了2种水分水平(充分供水和干旱处理),3个磷处理(0, 0.05和0.1 g P₂O₅ · kg⁻¹干土)和5种组合比例[12:0(柳枝稷:达乌里胡枝子), 8:4, 6:6, 4:8和0:12]下二者的生物量、WUE和种间关系。结果表明:二者混播相对总生物量(Relative yield total, RYT)为0.91~1.34;不论施磷与否,柳枝稷竞争攻击力系数(Aggressivity, A)和达乌里胡枝子相对竞争强度(Relative competition intensity, RCI)在干旱处理下显著低于充分供水($P < 0.05$);2种水分下,施磷(0.1 g · kg⁻¹)显著降低柳枝稷A值,对达乌里胡枝子RCI无影响。干旱处理下,4:8比例(柳枝稷:达乌里胡枝子)下RYT最高且WUE较高,施磷显著提高混播总生物量和WUE,且0.05和0.1 g · kg⁻¹间均无显著差异,表明采用4:8比例并施磷0.05 g · kg⁻¹可提高生物量和WUE。

关键词:人工草地;混播;种间竞争;相对总生物量;竞争系数

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2019)06-1545-08

Effects of Water and Phosphorus Supply on Biomass Production, Water Use Efficiency and Interspecific Relationship of Switchgrass and Bushclover

LIU Jin-biao¹, WANG Shi-qi¹, KANG Ji-yue², XU Bing-cheng^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: This study was aimed to clarify the effects of water and phosphorus (P) supply on biomass production, water use efficiency (WUE) and interspecific relationship of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and bushclover (*Lespedeza davurica* S.) and to provide the basis for the artificial grassland construction of these two species in loess hilly-gully region. A pot experiment was conducted with two soil water regimes [high water (75% ± 5% field capacity, FC) and low water (35% ± 5% FC)], three P treatments (0, 0.05 and 0.1 g P₂O₅ · kg⁻¹ dry soil) and five mixture ratios [12:0 (switchgrass: bushclover), 8:4, 6:6, 4:8, 4:8 and 0:12]. Results showed that the relative yield total (RYT) values of switchgrass and bushclover mixtures were between 0.91 and 1.34. Regardless of P treatments, the aggressivity (A) values of switchgrass and the relative competition intensity (RCI) values of bushclover were significantly lower under low water regime than those under high water regime ($P < 0.05$). Under both water regimes, P supply (0.1 g · kg⁻¹) significantly decreased the A values of switchgrass ($P < 0.05$) while had no significant effect on the RCI values of bushclover. Under low water regime, the highest RYT values and a higher WUE were obtained at 4:8 mixture ratio of switchgrass to bushclover; P supply significantly increased total biomass production and WUE in their mixtures ($P < 0.05$), while no significance difference between P concentrations were detected, implying that switchgrass and bushclover can be intercropped in the region, and 4:8 mixture ratio of switchgrass to bushclover with 0.05 g P₂O₅ · kg⁻¹ dry soil supply could help to

收稿日期:2019-09-25;修回日期:2019-10-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0501703)资助

作者简介:刘金彪(1985-),男,汉族,新疆阿勒泰人,博士研究生,主要从事草地生态学研究,Email:liujin65@163.com; *通信作者 Author for correspondence, Email: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

improve total biomass production and WUE.

Key words: Artificial grassland; Intercropping; Interspecific competition; Relative yield total; Competition index

在黄土丘陵半干旱区,建立人工草地不仅可弥补天然草地供应家畜饲料产量的不足,也是恢复退化生态系统功能和改善生态环境的重要措施之一^[1-2]。然而人工草地的生态与经济效益受到土壤水分和养分条件的制约。降水量低且时空分布不均黄土丘陵半干旱区生态环境的一个重要特点,频繁的干旱不仅会限制人工草地生产力,还影响群落中植物种间关系^[1-2]。此外,由于长期的淋溶、径流和风蚀等,该区土壤有效氮、磷含量低^[3]。人工草地建立后,土壤氮的有效性随着腐殖质的积累而逐渐提高,而土壤有效磷含量增加缓慢甚至呈减少趋势,导致该区土壤有效磷含量长期处于较低水平^[4-5]。适当施磷是缓解土壤磷缺乏的主要措施,有利于提高人工草地牧草的产量与品质和促进稳定人工草地建设与可持续发展^[1,5-6]。但磷肥有效性与土壤水分条件有关,因此研究水磷供应水平及其交互作用对黄土丘陵半干旱区植物生长的影响具有重要意义^[7]。

除环境因素外,黄土丘陵区人工草地建设存在多年生禾本科草种较少以及群体配置不合理等问题,迫切需要增强对优良引进禾草的选育与合理利用方面的研究^[1,8]。柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)是原产北美的多年生 C₄ 禾草^[9],与栽培种红豆草(*Onobrychis viciaefolia* Scop.)和沙打旺(*As-tragalus adsurgens* Pall.)混播后表现出较强的竞争能力,而 2 种豆科饲草在竞争压力下表现出较弱的生长可塑性,导致 2 种豆科饲草在混播中逐年消退^[10-12];与乡土禾草白羊草(*Bothriochloa ischaemum* L.)混播后,在干旱环境中具有混播生物量优势,并能形成相对稳定的混播群体^[13]。可见,选择合适的物种是混播草地可持续发展的必要条件,然而关于柳枝稷与乡土豆科草本植物混播下的表现未见相关报道。达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* S.)是黄土丘陵区天然草地群落的主要伴生种,抗旱能力强,是具有良好水土保持能力的优良牧草^[14]。研究表明,达乌里胡枝子与沙打旺、红豆草等相比,建植成功后生物量更稳定^[12]。作为忍耐型伴生种,达乌里胡枝子在种间竞争中表现出较强的形态和生理特征的调节能力,同时具有促进生殖生长以维持稳定种群数量的特性^[14-17]。这种对种间竞争较强的适应能力使其广泛分布并长期存在于群落

中^[14,16]。本研究在盆栽条件下,选取柳枝稷和达乌里胡枝子为试验材料,通过设置不同水分和磷素供应水平,主要比较研究了二者在不同组合比例下的生物量、水分利用效率及种间关系,以期利用二者建植合理的豆禾混播草地提供生物学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

柳枝稷和达乌里胡枝子种子均于 2014 年 10 月采自陕西西安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站山地试验场(36°51'60" N, 109°19'23" E),海拔 1 068 ~ 1 309 m。柳枝稷品种为“Alamo”,种源美国。达乌里胡枝子种子采自天然草地。种子晒干后在自然状态下储藏,试验前种子发芽率均在 90% 以上。

1.2 试验设计

1.2.1 试验条件 采用盆栽试验,盆体为底部封堵的 PVC 桶,高 30 cm,内径 20 cm。土壤采自安塞退耕地的耕层土壤(0~20 cm),退耕后无施肥历史。试验前测定土壤养分含量分别为:有机质 2.60 g·kg⁻¹,速效氮 2.80 mg·kg⁻¹,速效磷 6.67 mg·kg⁻¹,全氮 0.97 g·kg⁻¹,全磷 0.61 g·kg⁻¹,土壤田间持水量(Field capacity, FC)为 20%,每桶装干土 9 kg。沿桶内壁安置一根内径为 2 cm、长 30 cm 的 PVC 管作为灌水管,为防止土壤堵塞灌水管,装桶前在桶底铺碎石子。

试验地点位于陕西杨凌的黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室室外防雨棚下(34°12' N, 108°7' E,海拔 530 m),年平均气温为 13.0℃,最冷月(1月)平均气温为-1℃,最热月(7月)平均气温为 26.7℃,年均降雨量为 650 mm。

1.2.2 试验处理 有研究表明,黄土丘陵区草地 0~60 cm 和 60~120 cm 土层的土壤含水量均介于 6.8%~7.5% 之间^[18],因此,本研究设置 75%±5% FC (充分供水, High water, HW) 和 35%±5% FC (干旱处理, Low water, LW) 2 个土壤水分水平,即实际含水量的 15%±1% 和 7%±1%。前人对针对该区草地建设进行的盆栽试验表明,施磷 0.05~0.1 g P₂O₅·kg⁻¹ 干土可提高草地的生物量 and 水分

利用效率,超出后呈下降趋势^[19-20],因此,本研究设置 P_0 (未施磷), $P_{0.05}$ ($0.05 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土) 和 $P_{0.1}$ ($0.1 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土) 3 个磷处理。采用生态替代法^[21],设置 5 个组合比例(柳枝稷:达乌里胡枝子:12:0,8:4,6:6,4:8,0:12)。2 个水分水平,3 个磷处理,5 个组合比例,共 30 个处理,6 个重复,共 180 盆。磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 含量为 15%),装桶时随土一次混入。试验于 2016 年 4 月 17 日开始,采用种子播种,穴距 4 cm,每穴约 5 粒种子,穴深 1 cm,每盆 12 穴,播种方式如图 1 所示。

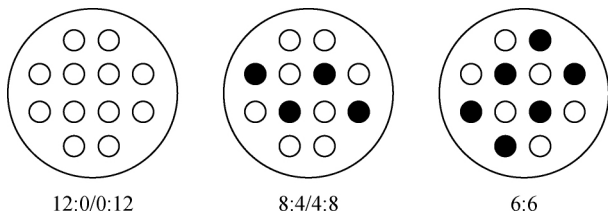


图 1 柳枝稷与达乌里胡枝子播种示意图(黑、白点分别代表 2 种植物)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental design of switchgrass and bushclover (The white and black circles represent the two species, respectively)

苗期充足供水,控水前间苗 2 次。播种 13 天后(柳枝稷出苗期)第 1 次间苗至每穴 2 株,播种 33 天后(柳枝稷三叶一心)第 2 次间苗,每穴留壮苗一株。播种 86 天后(柳枝稷拔节期)开始控水,控水前每盆覆盖 2 cm 厚珍珠岩以减少土壤水分蒸发。同时,每个水分水平分别设置 3 桶无植株对照,以核算土壤蒸发量。土壤含水量采用称重法控制,于每日 18:00 称重和记录,水从桶内灌水管加入。试验期间随时收集枯落物,及时拔除杂草。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生物量 2016 年 10 月 10—17 日统一收获,每桶分别收获柳枝稷和达乌里胡枝子地上部分,然后将桶内根系和土壤一起倒入孔径为 2 mm 尼龙网袋,用自来水缓慢洗去土壤后得到 2 种植物根系,根据颜色和形态在水中将 2 种植物根系仔细分开^[22]。地上和地下部分于 105°C 杀青 15 min 后, 80°C 烘干至恒重,得到每桶柳枝稷和达乌里胡枝子生物量。总生物量(Total biomass, TB, $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)为每桶柳枝稷和达乌里胡枝子生物量之和。

1.3.2 水分利用效率 根据日耗水量和土壤蒸发量,计算实际蒸腾耗水量。水分利用效率(Water use efficiency, WUE, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)为总生物量与蒸腾

耗水量的比值,即蒸腾效率。

1.3.3 种间关系指数 根据柳枝稷和达乌里胡枝子生物量,计算相对总生物量(Relative yield total, RYT)、竞争攻击力系数(Aggressivity, A)和相对竞争强度(Relative competition intensity, RCI)。

(1) 相对总生物量(RYT):用于评价间作体系中生物学效益的竞争系数,用下式计算^[21]:

$$\text{RYT} = Y_{ab}/Y_{aa} + Y_{ba}/Y_{bb} \quad (1)$$

式中, Y_{aa} (Y_{bb}) 表示单播下物种 a(b) 的生物量, Y_{ab} (Y_{ba}) 表示混播下物种 a(b) 的生物量。下同。

若 $\text{RYT} > 1.0$, 说明 2 个物种占据不同生态位, 存在共生关系; 若 $\text{RYT} = 1.0$, 说明 2 个物种利用相同的资源; 若 $\text{RYT} < 1.0$, 则 2 个物种存在竞争关系。

(2) 竞争攻击力系数(A):是混播体系中物种 a 和 b 的产量相对增加程度,是评价物种竞争能力的重要指标之一,采用如下公式计算^[23]:

$$A_a = Y_{ab}/(Y_{aa} \times Z_{ab}) - Y_{ba}/(Y_{bb} \times Z_{ba}) \quad (2)$$

式中, Z_{ab} (Z_{ba}) 代表混播条件下物种 a(b) 所占比例, $Z_{ab} + Z_{ba} = 1.0$ 。下同。

若 $A_a > 0$, 说明物种 a 竞争能力大于物种 b; 若 $A_a = 0$, 说明 2 个物种竞争能力相同; 若 $A_a < 0$, 说明物种 a 竞争能力小于物种 b。

(3) 相对竞争强度(RCI):指某物种受伴生种的影响程度,用下式计算^[24]:

$$\text{RCI}_{ab} = (Y_{aa} \times Z_{ab} - Y_{ab}) / (Y_{aa} \times Z_{ab}) \quad (3)$$

若 $\text{RCI}_{ab} > 0$, 说明物种 a 的种间竞争强度大于种内竞争; 若 $\text{RCI}_{ab} = 0$, 说明物种 a 的种间和种内竞争强度相等; 若 $\text{RCI}_{ab} < 0$, 说明物种 a 的种间竞争强度小于种内竞争。

1.4 数据分析

采用 Office Excel 2007 (Microsoft Corporation, Wash, USA) 整理数据,用 Sigmaplot 12.0 (Systat, USA) 绘图,用 Genstat19.1 (VSN international Ltd., UK) 统计分析。采用三因素方差分析(Three-way ANOVA)检验水分水平、磷处理和组合比例及其交互作用对生物量、水分利用效率和种间关系指数的影响,并用最小显著差异法(LSD)进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物量

水分水平、磷处理和组合比例及两两交互作用

对柳枝稷和达乌里胡枝子的总生物量有显著影响 ($P < 0.01$) (图 2)。不论供磷与否, LW 下 2 个物种总生物量均显著低于 HW ($P < 0.05$)。2 种水分水平下, 与 P_0 处理相比, 施磷提高 2 个物种的总生物量, 其中单播下柳枝稷总生物量随施磷量增加而显著增加 ($P < 0.05$), 混播下柳枝稷总生物量在 $P_{0.05}$ 和 $P_{0.1}$ 处理间无显著差异, 达乌里胡枝子总生物量

在单播和混播下均表现为 $P_{0.05}$ 和 $P_{0.1}$ 处理间无显著差异。不同水分和磷处理下, 柳枝稷对混播下整桶总生物量的贡献大于达乌里胡枝子, 除 HW 下 $P_{0.1}$ 处理的 2 个物种的总生物量折线无交点外, 其余处理下交点均出现在 4:8 比例。根据混播下 2 个物种各自总生物量与所占比例得出, 柳枝稷单株生物量随其比例的降低而增加, 达乌里胡枝子相反。

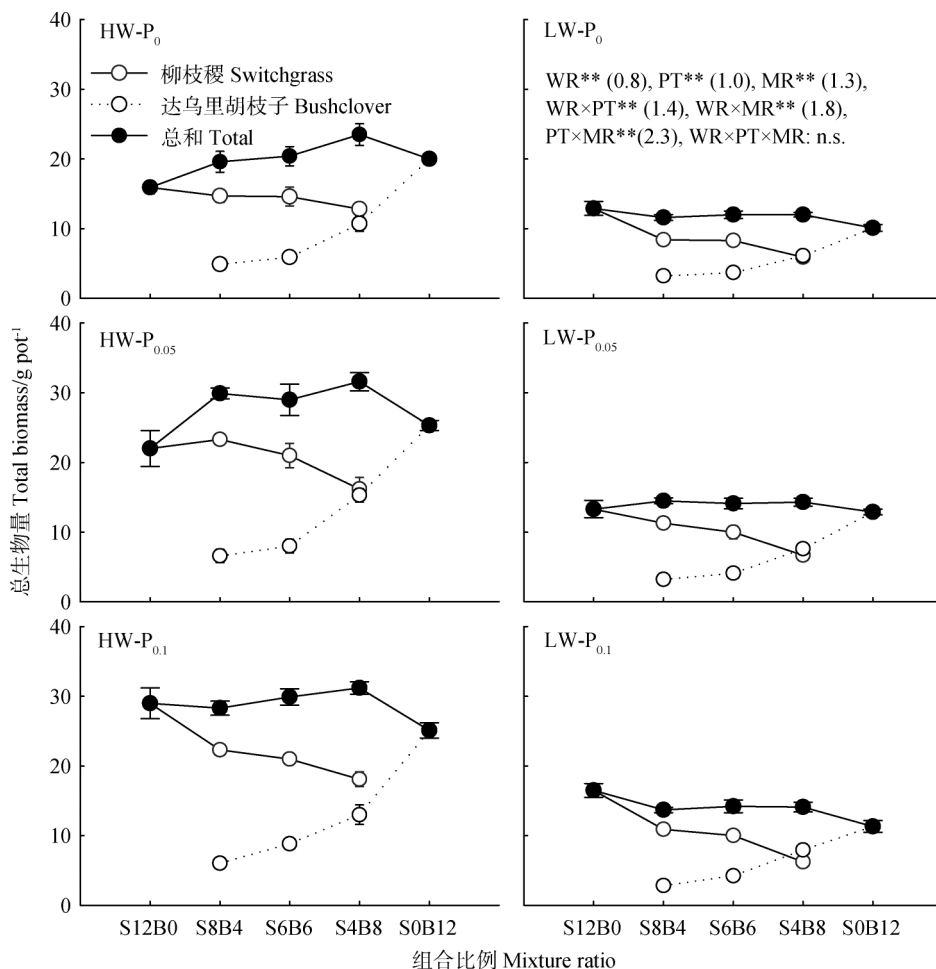


图 2 不同水分水平、磷处理和组合比例下柳枝稷与达乌里胡枝子总生物量

Fig. 2 Total biomass production of two species (S: switchgrass; B: bushclover) and their combinations in their various mixture proportions within the replacement series for each water and phosphorus treatment

注: HW: 充分供水, LW: 干旱处理, WR: 水分水平, PT: 磷处理, MR: 组合比例。* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, n. s. 表示无显著差异。括号内数字为最小显著性值(LSD)。下同

Note: HW: high water, LW: low water, WR: water regime, PT: phosphorus treatment, MR: mixture ratio. * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$, n. s. means no significant difference. Numbers in parentheses are the least significance values (LSD). The same as below

2.2 水分利用效率(WUE)

水分水平、磷处理和组合比例及其两两交互作用对 WUE 均有显著影响 ($P < 0.01$) (图 3)。HW 下, 柳枝稷单播的 WUE 随施磷量的增加而显著提高 ($P < 0.05$), 达乌里胡枝子单播以及 2 个物种混播下的 WUE 在不同磷处理间无明显变化; LW 下,

施磷显著提高各组合比例的 WUE ($P < 0.05$), 且 $P_{0.05}$ 和 $P_{0.1}$ 处理间均无显著差异。不同组合比例下, HW 下的 WUE 均值随柳枝稷比例降低而显著降低 ($P < 0.05$); LW 下柳枝稷单播的 WUE 均值显著高于其余组合比例 ($P < 0.05$), 达乌里胡枝子单播显著低于其余组合比例 ($P < 0.05$), 混播下以

4 : 8 和 8 : 4 比例的 WUE 均值显著大于 6 : 6 ($P < 0.05$), 4 : 8 和 8 : 4 之间无显著差异。

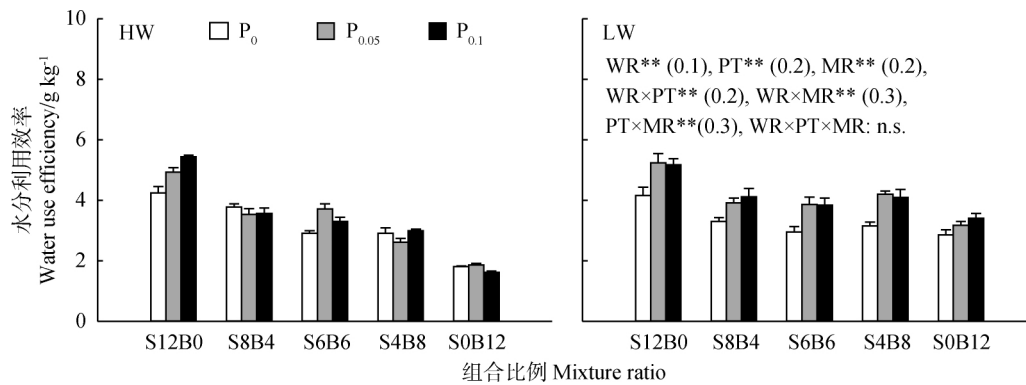


图 3 不同水分水平、磷处理和组合比例下柳枝稷与达乌里胡枝子水分利用效率

Fig. 3 Water use efficiency of two species (S: switchgrass; B: bushclover) and their combinations in their various mixture proportions within the replacement series for each water and phosphorus treatment

2.3 相对总生物量 (RYT)

水分水平、磷处理和组合比例单因素对 2 个物种混播的 RYT 有显著影响 ($P < 0.05$), 3 个因素间的交互作用对 RYT 均无显著影响 (图 4)。RYT 在 HW 下介于 1.01~1.34 之间, LW 下介于 0.91~1.11 之间, 且 HW 下的 RYT 均值显著大于 LW ($P < 0.05$)。

RYT 在 P₀, P_{0.05} 和 P_{0.1} 处理下分别介于 0.96~1.34, 1.07~1.34 和 0.91~1.14 之间, 且 RYT 均值在不同磷处理间均有显著差异 ($P < 0.05$), 在 P_{0.05} 下最高, 其次为 P₀ 处理, P_{0.1} 处理下最低。不同组合比例间的 RYT 均值在 4 : 8 比例下显著高于其余比例 ($P < 0.05$), 6 : 6 和 8 : 4 比例间无显著差异。

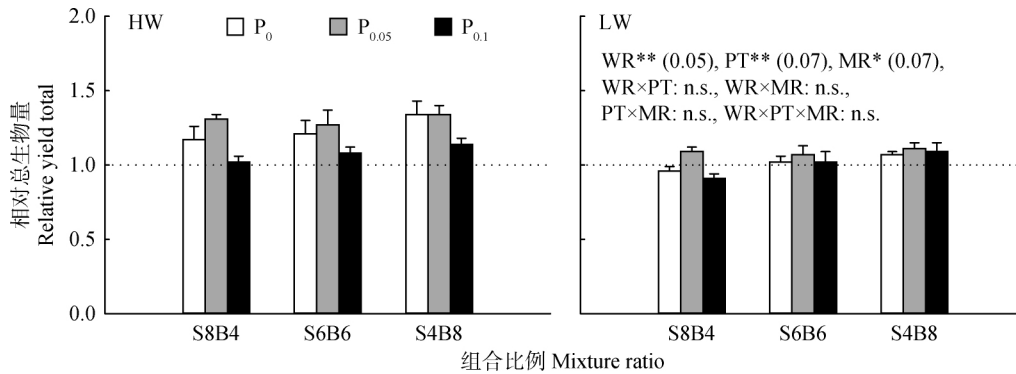


图 4 不同水分水平、磷处理和组合比例下柳枝稷和达乌里胡枝子混播下的相对总生物量

Fig. 4 Relative yield total of switchgrass (S) and bushclover (B) mixtures in their various mixture proportions within the replacement series for each water and phosphorus treatment

2.4 柳枝稷竞争攻击力系数 (A)

水分水平、磷处理和组合比例以及水分和组合比例的交互作用对柳枝稷 A 值有显著影响 ($P < 0.01$) (图 5)。柳枝稷 A 值在不同处理下均大于 0, 且 HW 下均显著大于 LW ($P < 0.05$)。不同磷处理间的柳枝稷 A

值平均在 P_{0.1} 处理下显著低于 P_{0.05} 和 P₀ 处理 ($P < 0.05$), 而 P_{0.05} 和 P₀ 处理间无显著差异。柳枝稷 A 值在 HW 下随柳枝稷占比的降低而显著提高 ($P < 0.05$); LW 下, 柳枝稷 A 值平均在 6 : 6 比例显著高于其余组合比例 ($P < 0.05$), 4 : 8 和 8 : 4 比例间无显著差异。

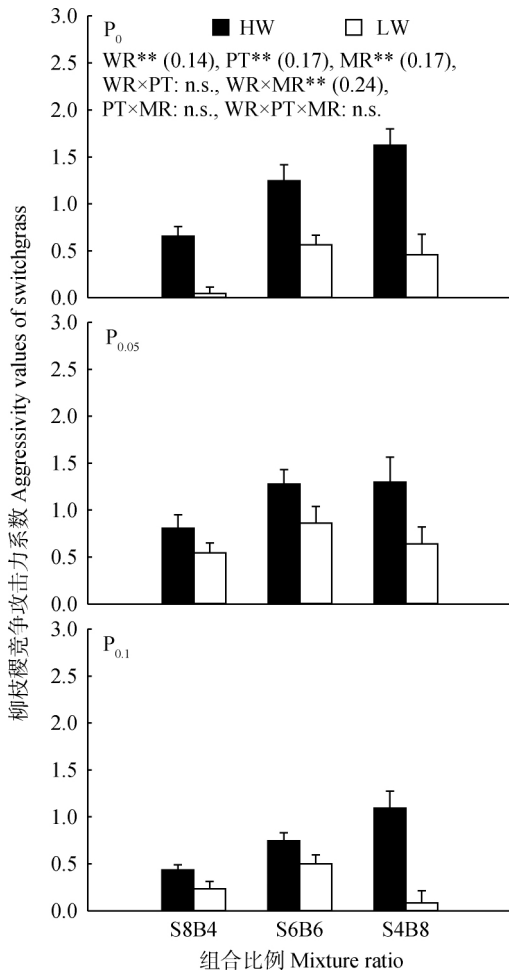


图 5 不同水分水平、磷处理和组合比例下柳枝稷竞争攻击力系数

Fig. 5 Aggressivity values of switchgrass (S) to bushclover (B) in their various mixture proportions within the replacement series for each water and phosphorus treatment

2.5 相对竞争强度(RCI)

水分水平、磷处理和组合比例以及水分和组合比例的交互作用对柳枝稷相对竞争强度 RCI_S 有显著影响 ($P < 0.01$)。 RCI_S 在 $-1.43 \sim 0.03$ 之间,且 HW 下均值显著低于 LW ($P < 0.05$) (图 6)。 RCI_S 均值在不同磷处理间均有显著差异 ($P < 0.05$),在 $P_{0.05}$ 下最低,其次为 P_0 处理, $P_{0.1}$ 处理下最高。 HW 下, RCI_S 随柳枝稷所占比例的降低而显著降低 ($P < 0.05$); LW 下, RCI_S 在 8 : 4 比例显著高于其余组合比例 ($P < 0.05$), 6 : 6 和 4 : 8 间无显著差异。

水分水平和组合比例单因素对达乌里胡枝子相对竞争强度 (RCI_B) 有显著影响 ($P < 0.05$), 磷处理及其与水分水平和组合比例的交互作用对 RCI_B 均无显著影响。 RCI_B 在 $-0.05 \sim 0.41$ 之间,且在 HW 下均值显著大于 LW ($P < 0.05$)。 RCI_B 均值在不同组合比例间均有显著差异 ($P < 0.05$),在 6 : 6 比例下最高,其次为 8 : 4 比例, 4 : 8 比例下最低。

3 讨论

生物量是衡量草地生产力和植物竞争能力最重要的标准之一^[19]。当混播物种具有相同竞争能力时,在绘制的生物量折线图中(图 2), 2 个物种生物量的交点应出现在二者均占 1/2 的比例^[19]。若实际生物量和此预期不同,则表明种内与种间竞争强度不均衡^[16,19]。本研究中, 2 个物种生物量的交点出现在 6 : 6 以右或无交点,柳枝稷单株生物量随其比例的降低而增加,达乌里胡枝子相反,说明柳枝稷种内竞争强度大于种间竞争,达乌里胡枝子则受到

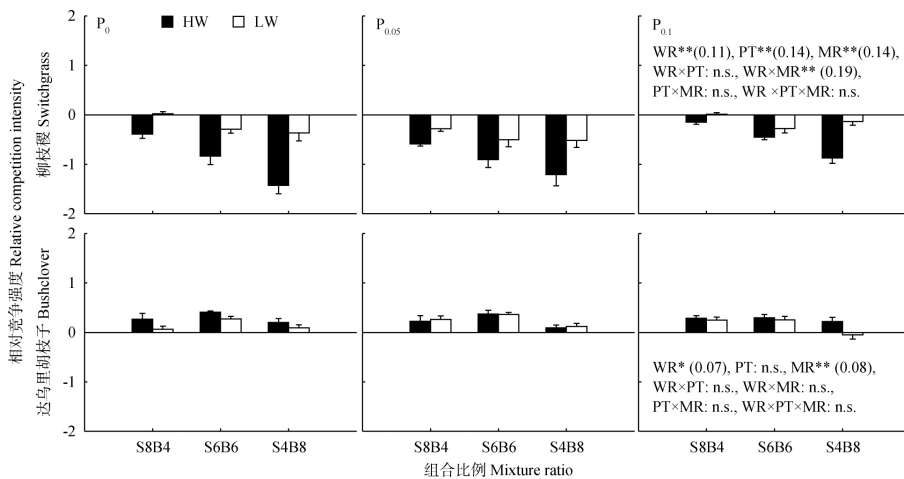


图 6 不同水分水平、磷处理和组合比例下柳枝稷和达乌里胡枝子的相对竞争强度

Fig. 6 Relative competition intensity of switchgrass (S) and bushclover (B) in their various mixture proportions within the replacement series for each water and phosphorus treatment

较强种间竞争的约束(图5)^[16,19]。当混播中某物种受到较强种间竞争约束时,增加该物种初始组合比例可使其形成种群优势,降低种间竞争压力^[16]。这有助于不同物种利用不同的环境资源,从而提高群体产量优势并形成稳定共存的局面^[16]。本研究中,在4:8组合比例(柳枝稷:达乌里胡枝子)时,柳枝稷种内竞争和达乌里胡枝子种间竞争减小,有助于提高混播群体生物量(图2,4)^[16,25]。由于多年生牧草在年际间的生长差异,混播物种的种内和种间竞争存在动态变化,初始组合比例的选择还需考虑草地的可持续发展与利用^[10,26]。研究表明,柳枝稷与其它牧草混播多年中均表现为种内竞争对其生物量的限制大于种间竞争^[10-11];达乌里胡枝子则表现出种间竞争限制其生物量形成,但其在较高组合比例下随种植年限增加可逐步从混播中受益^[15-16]。这可能使二者以4:8的组合比例(柳枝稷:达乌里胡枝子)建植多年中维持较高的生物量优势。

相对总生物量(RYT)是反映混播下资源利用率的重要指标^[21]。柳枝稷和达乌里胡枝子混播的RYT介于0.91~1.34之间(图4),若混播下RYT为1.34则说明单播下需要多利用34%的土地才能达到与此混播相同的产量,表明二者混播具有一定的互惠关系和较高的土地利用效率^[19]。豆禾混播物种对土壤磷的有效利用有助于减轻环境压力并提高产量^[25,27]。2种水分水平下, $P_{0.05}$ 处理显著提高RYT(图4),说明适当施磷($P_{0.05}$ 处理)可增强二者混播的互惠作用^[25]。 $P_{0.1}$ 处理显著降低RYT值,可能是 $P_{0.1}$ 处理的施磷量对单播柳枝稷生物量的提升作用大于混播(图2),混播下柳枝稷生物量积累对磷肥需求较少^[25]。也可能是达乌里胡枝子能通过分泌有机酸提高土壤有效磷含量^[20],表明二者混播有助于促进柳枝稷对磷素的吸收,减少磷肥施用量,为混播群体的生物量优势奠定基础^[25,27]。

除了提高生产力,提高水分利用效率(WUE)也是半干旱区农业生产重点^[19]。混播下WUE显著低于柳枝稷单播,但显著大于达乌里胡枝子单播(图3),表明在达乌里胡枝子草地群落适当配置柳枝稷可提高草地的WUE^[19]。施磷肥也是提高WUE的有效措施^[28-29]。一方面,施磷对生物量的提升作用大于蒸腾耗水量^[28],另一方面施磷可降低植物在低磷环境中为吸收磷素而蒸腾损失的水分^[29];但植物的WUE不会因磷肥的增加而无限升高^[28]。本研究中,干旱处理下施磷可显著提高各组合比例的WUE,但在 $P_{0.05}$ 和 $P_{0.1}$ 处理之间均无显著

差异(图3),表明 $P_{0.05}$ 的施磷量可在较少磷肥投入的条件下提高WUE,是更加经济的施磷量。由于多年生人工草地是黄土丘陵区畜牧业的重要饲料来源之一,生物量的收获将导致土壤磷和植株体内磷含量的逐年降低^[1,28]。因此,可定期追施适量的磷肥以维持较高的年度群体生物量和WUE。

竞争攻击力系数(A)可用来衡量混播体系中物种的竞争能力,相对竞争强度(RCI)可用来衡量种内和种间竞争强度的大小^[19,24]。不同处理下的柳枝稷A值和达乌里胡枝子RCI均大于0,且在干旱处理下均显著降低,而柳枝稷RCI在干旱处理下显著增加,表明柳枝稷在二者混播体系中占居优势地位,但在干旱处理下其竞争能力降低,达乌里胡枝子竞争能力则增加(图5,6)^[13,19]。可能因为达乌里胡枝子为乡土种,长期适应较低的土壤水分水平,在干旱环境中其竞争能力将提高^[12-13]。磷添加对豆禾混播物种竞争能力影响的研究结论不一致^[25,27]。有研究表明,施磷虽不会增加豆科植物的竞争能力,但可降低与其混播物种的竞争能力和对磷素的竞争强度,从而提高混播体系的稳定性^[6,30]。本研究中, $P_{0.1}$ 处理显著降低柳枝稷A值,显著增加柳枝稷RCI,磷处理及其与水分和组合比例的交互作用对达乌里胡枝子RCI均无显著影响(图6),说明施磷虽降低柳枝稷竞争能力,但达乌里胡枝子在不同磷处理下能维持稳定的竞争能力,这可能是达乌里胡枝子广泛分布于不同立地条件下的原因之一^[14,16,19]。

4 结论

综上,不同水分和磷供应条件下,柳枝稷和达乌里胡枝子间虽存在竞争作用,但二者混播下 $RYT > 1.0$,表明二者混播具有生物量优势。不论施磷与否,干旱处理下柳枝稷竞争能力降低,达乌里胡枝子竞争能力增加。2种水分水平下,施磷 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下柳枝稷竞争能力降低,而不同磷处理下达乌里胡枝子能持稳定竞争能力。干旱处理下,4:8组合比例(柳枝稷:达乌里胡枝子)下具有最高的RYT和较高的WUE,施磷 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土可显著提高混播下总生物量、RYT和WUE,说明在半干旱黄土丘陵区,采用4:8组合比例(柳枝稷:达乌里胡枝子)并施磷 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 有利于提高二者混播下生物量 and 水分利用效率。

参考文献

- [1] 山仑,徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨[J]. 草业学报,2009,18(2):1-2
- [2] 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(8):24-29
- [3] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China[J]. Geoderma,2013,197-198:67-78
- [4] 王凯博,时伟宇,上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(15):80-86
- [5] 王百群,姜峻,都全胜,等. 黄土丘陵区人工草地牧草营养元素累积及土壤有机碳与养分特征[J]. 水土保持研究,2010,17(6):127-132
- [6] 汝海丽,张海东,焦峰,等. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 自然资源学报,2016,31(10):1752-1763
- [7] Suriyagoda L D B, Ryan M H, Renton M, et al. Multiple adaptive responses of Australian native perennial legumes with pasture potential to grow in phosphorus-and moisture-limited environments[J]. Annals of Botany,2010,105(5):755-767
- [8] 李莲香. 四种多年生禾本科牧草引种试验[J]. 草地学报,2018,26(1):267-269
- [9] Cooney D, Kim H, Quinn L, et al. Switchgrass as a bioenergy crop in the Loess Plateau, China: Potential lignocellulosic feedstock production and environmental conservation[J]. Journal of Integrative Agriculture,2017,16(6):1211-1226
- [10] Xu B C, Li F M, Shan L. Switchgrass and milkvetch intercropping under 2:1 row-replacement in semiarid region, northwest China: Aboveground biomass and water use efficiency[J]. European Journal of Agronomy,2008,28(3):485-492
- [11] Xu B C, Shan L, Zhang S, et al. Evaluation of switchgrass and sainfoin intercropping under 2:1 row-replacement in semiarid region, northwest China[J]. African Journal of Biotechnology,2008,7(22):4056-4067
- [12] Guan X K, Zhang X H, Turner N C, et al. Two perennial legumes (*Astragalus adsurgens* Pall. and *Lespedeza davurica* S.) adapted to semiarid environments are not as productive as lucerne (*Medicago sativa* L.), but use less water[J]. Grass and Forage Science,2013,68(3):469-478
- [13] 高志娟. 水氮供应对柳枝稷和白羊草生长及种间关系的影响[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2017:71
- [14] 程杰,程积民,呼天明. 气候变化对黄土高原达乌里胡枝子种群分布格局的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(1):35-40
- [15] 王京,徐炳成,高志娟,等. 黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播的光合生理日变化研究[J]. 草地学报,2012,20(4):692-698
- [16] 王平,周道玮,张宝田. 禾-豆混播草地种间竞争与共存[J]. 生态学报,2009,29(5):2560-2567
- [17] 丁文利,舒佳礼,徐伟洲,等. 水分胁迫和组合比例对白羊草与达乌里胡枝子叶绿素荧光参数的影响[J]. 草地学报,2014,22(1):94-100
- [18] Jiao F, Wen Z M, An S S. Soil water storage capacity under chronosequence of revegetation in Yanhe watershed on the Loess Plateau, China[J]. SpringerPlus,2013,2(S1):S15
- [19] Xu B C, Xu W Z, Gao Z J, et al. Biomass production, relative competitive ability and water use efficiency of two dominant species in semiarid Loess Plateau under different water supply and fertilization treatments[J]. Ecological Research,2013,28(5):781-792
- [20] 张东梅. 磷素添加对 6 种灌木磷吸收的影响[D]. 兰州:兰州大学,2015:13-25
- [21] de Wit C T, van den Bergh J P. Competition between herbage plants[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science,1965,13(3):212-221
- [22] Wang Z, Xu W Z, Chen Z F, et al. Soil moisture availability at early growth stages strongly affected root growth of *Bothriochloa ischaemum* when mixed with *Lespedeza davurica* [J]. Frontiers in Plant Science,2018,9:1050
- [23] Ghosh P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India[J]. Field Crops Research,2004,88(2):227-237
- [24] Facelli E, Facelli J M, Smith S E, et al. Interactive effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis, intraspecific competition and resource availability on *Trifolium subterraneum* cv. Mt. Barker[J]. New Phytologist,1999,141(3):535-547
- [25] 柏文恋,张梦瑶,任家兵,等. 小麦/蚕豆间作作物生长曲线的模拟及种间互作分析[J]. 应用生态学报,2018,29(12):149-158
- [26] 苟文龙,李平,张建波,等. 多花黑麦草+箭筈豌豆混播草地上生物量和营养品质动态研究[J]. 草地学报,2019,27(2):198-206
- [27] Li L, Tang C, Rengel Z, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source[J]. Plant and Soil,2003,248:297-303
- [28] Gu Y J, Han C L, Fan J W, et al. Alfalfa forage yield, soil water and P availability in response to plastic film mulch and P fertilization in a semiarid environment [J]. Field Crops Research,2018,215:94-103
- [29] Pang J, Zhao H, Bansal R, et al. Leaf transpiration plays a role in phosphorus acquisition among a large set of chickpea genotypes[J]. Plant Cell and Environment,2018,41(9):2069-2079
- [30] Brewer J S, Cralle S P. Phosphorus addition reduces invasion of a longleaf pine savanna (Southeastern USA) by a non-indigenous grass (*Imperata cylindrica*) [J]. Plant Ecology,2003,167(2):237-245

(责任编辑 闵芝智)