

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.008

引用格式:方菊梅, 窦梓懿, 李桂真, 等. 豆禾混播牧草的种间竞争对土壤磷吸收效率的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(5):1641–1653

FANG Ju-mei, DOU Zi-yi, LI Gui-zhen, et al. Effects of Inter-species Competition in Legume-Grass Mixtures on Soil Phosphorus Uptake Efficiency[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1641–1653

豆禾混播牧草的种间竞争对土壤磷吸收效率的影响

方菊梅^{1,2#}, 窦梓懿^{1,2#}, 李桂真^{1,2}, 郑伟^{1,2*}, 王玲玲^{1,2}, 王钰杰^{1,2}

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆维吾尔自治区草地资源与生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为评估混播方式对豆禾牧草磷利用效率及种间竞争的影响,通过盆栽实验设置同行(T)与异行(Y)两种混播处理,探究小黑麦-毛苕子(*Triticale-Vicia villosa* Roth)、小黑麦-箭筈豌豆(*Triticale Vicia sativa* L.)系统中磷利用效率、种间竞争格局与超产效应的关系。结果表明:(1)产量及超产效应呈小黑麦-毛苕子同行混播高于异行混播,小黑麦-箭筈豌豆则相反。(2)两混播系统异行混播相对产量(Relative yield, RY)均高于同行混播;侵占率(Encroachment rate, A)、竞争率(Competition rate, CR)、相对拥挤率(Relative crowding rate, K)均显示小黑麦为竞争优势种。(3)磷利用效率表现为:小黑麦-毛苕子中,小黑麦异行混播高于同行混播,毛苕子则相反;小黑麦-箭筈豌豆中,二者均为异行混播高于同行混播。阈值关系分析表明,异行混播下高竞争率与高磷利用效率协同诱导超产效应。综上,昭苏冷凉地区建植一年生牧草时,推荐小黑麦-箭筈豌豆异行混播模式。

关键词:豆禾混播;种间竞争;磷素利用效率;超产效应

中图分类号:S54;S153.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1641-13

Effects of Inter-species Competition in Legume-Grass Mixtures on Soil Phosphorus Uptake Efficiency

FANG Ju-mei^{1,2#}, DOU Zi-yi^{1,2#}, LI Gui-zhen^{1,2}, ZHENG Wei^{1,2*}, WANG Ling-ling^{1,2}, WANG Yu-jie^{1,2}

(1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To evaluate the effects of intercropping arrangements on phosphorus use efficiency and interspecific competition in legume-grass mixtures, same-row intercropping (T) and alternate-row intercropping (Y) was conducted by the pot experiment. The study investigated the relationships among phosphorus use efficiency (PUE), interspecific competition, and the overyielding effect in triticale-hairy vetch and triticale-common vetch systems. The results showed that for the triticale-hairy vetch mixture, yield and overyielding were higher in the same-row arrangement, whereas the triticale-common vetch mixture was the opposite. The relative yield (RY) was higher in the alternate-row arrangement for both systems. Metrics including encroachment rate (A), competition rate (CR), and relative crowding rate (K) indicated that triticale was the competitively dominant species. Phosphorus use efficiency varied in the triticale-hairy vetch system, and it was higher for triticale under alternate-row but higher for hairy vetch under same-row intercropping; in the triticale-common vetch system, both species showed higher PUE in the alternate-row arrangement. Threshold analysis revealed that highly competitive ability coupled with high PUE synergistically induced the overyielding effect under the alternate-row arrangement. In conclusion, for establishing annual forages in the cool region of Zhaosu, the alternate-row intercropping of triticale and common vetch is recommended.

收稿日期:2025-10-13;修回日期:2025-11-25

基金项目:自治区重点研发厅(地)联动(项目编号:2022B03030-3)资助

作者简介:方菊梅(1996-),女,汉族,甘肃兰州人,硕士,主要从事草原学研究, E-mail: 1472485973@qq.com;窦梓懿(1998-),女,汉族,新疆昌吉人,博士,主要从事饲草学研究, E-mail: 3517669621@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zw065@126.com

Key words: Legume-grass intercropping; Interspecific competition; Phosphorus use efficiency; Overyielding effect

豆禾混播不仅可以提高草地生产力水平,而且还是培肥草地土壤的一种经济有效的种植方式^[1]。前人已经从豆禾混播系统的植物形态^[2]、土壤养分资源利用^[3]以及根系分布层位^[4]等方面证明该体系竞争与协同并存。有研究表明,土壤中磷的有效性^[5]与牧草生长发育密切相关。此外,通过混播、间作、套作(即异行混播)、连作和轮作等耕作方式,可以充分发挥不同作物高效利用磷的生物学潜力,进而提高土壤磷的利用效率^[6]。Li等^[7]的田间试验表明,与单作相比,蚕豆/玉米(*Vicia faba* L./*Zea mays* L.)间作系统能显著提高作物对磷的吸收量及作物产量。在此过程中,虽然豆禾混播系统表现出资源互补的优势,但在该系统中仍然存在竞争问题,主要表现在养分、水分等资源的争夺,从而导致混播系统的养分利用效率和生产力水平下降^[8]。由于禾本科(Gramineae)与豆科(Fabaceae)牧草物候期不同,二者在生态位上存在差异,对光、热、水、肥等资源的需求在时空维度上形成互补性错位。竞争力强的物种通过快速扩张冠层抢占光热资源,并形成密集根系网络垄断土壤养分,从而排斥和抑制伴生物种生长^[9],最终可能导致牧草总产量及磷吸收量的下降。

种间竞争强度主要取决于物种的生态适应性特征,如生态习性、生活型和生态幅等关键因素^[10]。根据Grime的植物对策理论(Lant strategies)^[11],植被的生长状况主要受竞争(如温度、肥力、水分、光照等限制因子)的影响。竞争强度通过资源分配、生存筛选和养分策略调整驱动物种进化与群落构建。竞争的影响并非孤立存在,而是与环境胁迫以及其他种间相互作用(如互利共生)共同塑造植物群落。种群密度通过调控植物的形态可塑性(Morphological Plasticity)与资源分配策略,改变种间竞争强度。由于竞争本身基于对有限资源的争夺,因此混播系统中种间竞争的强度与动态深受密度制约^[12]。在同行混播条件下,豆科与禾本科牧草种间密度大,生态位重叠程度高;而在异行混播条件下,二者种间密度减小,生态位分离更明显,这种差异导致种间竞争关系发生改变。Ren^[13]通过玉米-大豆(*Zea mays* L.-*Glycine max*)间作实验发现,随着大豆密度增加,玉米的竞争比率从1.68升至2.08,而大豆的竞争比率从0.63降至0.49,表明密度直接

影响种间竞争力平衡。黄玺等^[14]通过替代系列试验设计(Replacement series design)研究紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)与醉马草(*Achnatherum inebrians*)混播系统的种间竞争动态,发现种间密度调控对竞争格局与生态系统稳定性具有决定性作用。因此,混播方式与密度共同决定了植物对土壤养分的吸收与利用策略,进而影响草地生态群落的稳定与发展。与单播系统相比,混播系统通常具有更高的物种丰富度,这有助于提升资源利用效率,从而维持系统的高生产力与稳定性。混播系统较单播系统产量更高的现象称为超产效应^[15]。于辉等^[16]认为群落空间结构的变化(同行/异行混播)可调整混播豆禾牧草的种间竞争强度,会较大程度影响群落的生产力和稳定性。目前,豆禾混播的研究多集中于不同混播比例下的种间竞争以及对氮资源利用的影响。然而,关于不同混播方式如何通过调节种间竞争,进而影响草地生产力、磷资源利用效率,并与超产效益产生关联,目前尚不清楚。因此,本研究以三种一年生豆禾牧草为材料,通过设置异行与同行两种混播方式,探究种间竞争关系的变化对磷素利用效率及超产效应的影响,阐明不同混播方式影响牧草产量的内在机制,以期为昭苏地区混播草地的优化建植提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州昭苏县的77团农业发展中心的试验地(80.90°~81.94°E, 42.89°~43.01°N),地处海拔1800 m的盆地地区,属温带大陆性半干旱气候,具有冬季漫长、夏季短暂的气候特征。研究区年平均降水量535.24 mm,年均温4.28℃,年最高气温31.45℃,最低温-25.65℃,积雪期达158 d,积雪厚度20~60 cm,无霜期85~100 d。土壤类型为黑钙土,土壤有机质含量12.63%~13.89%,全氮6.28 g·kg⁻¹、全磷1.13 g·kg⁻¹、全钾11.98 g·kg⁻¹、速效氮2.4643 mg·kg⁻¹、速效磷1.366 mg·kg⁻²、速效钾2.6741 mg·kg⁻¹,pH值在8.0~8.5之间。实验区域为当地农田,农田内种植紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、小黑麦(*Triticale*)等,形成以人工种草农田为主的植

被景观;实验区盆栽试验所建植的一年生豆禾混播群落(箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)||小黑麦(*Tritical*)、毛苕子(*Vicia villosa* Roth)||小黑麦(*Tritical*)为研究核心,其与周边农田种草的植被类型同属人工草本群落,且区域内自然杂草以狗尾草(*Setaria viridis*)、马齿苋(*Portulaca oleracea*)等一年生草本为主,零星分布于农田边缘。

1.2 试验设计

本研究于2023年选择适宜当地生长的一年生豆科牧草箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.),毛苕子(*Vicia villosa* Roth)和禾本科牧草小黑麦(*Tritical*)为实验材料,在自然环境条件下开展盆栽试验。设置3种播种模式,分别为同行混播(T)、异行混播(Y)、单播。试验共8个处理,重复3次,共计24盆栽,盆栽长×宽×高:70 cm×45 cm×35 cm,根据播量在盆

栽中种植两行牧草分别进行同行混播与异行混播,牧草行间距为15 cm,(图1)。试验采用随机区组设计,豆禾混播比例为1:1,小区播量^[17]如表1所示。均沿花盆中心位置开展播种,距花盆两侧边缘位置留有足够空间,播种深度为3 cm,播种行距均为15 cm。所有花盆选取平坦开阔、无遮阳位置,间距50 cm同向整齐摆放,定期进行除杂、花盆摆放方向调整等相关工作,使牧草生长环境保持一致。

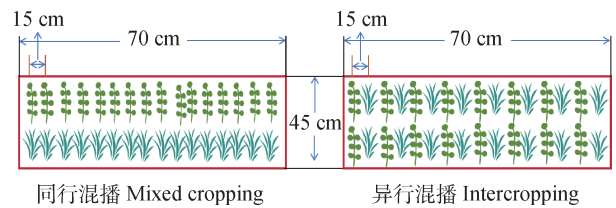


图1 豆禾混播实验盆栽示意图

Fig. 1 The pot experiment for legume-grass intercropping

表1 豆禾混播草地混播方式和播量

Table 1 Planting arrangement and seeding rates of the legume-grass mixture

处理 Treatment	混播方式 Mixed pattern	行距 Rows pacing/cm	混播比例 Mixed sowing ratio	播量 Sowing quantity/(kg·hm ⁻²)	
				禾本科 Grass	豆科 Legume
T	同行混播 Mixed cropping	25	1:1	90	60
Y	异行混播 Intercropping			90	60
CK _小	—	—	—	180	—
CK _箭	—			—	120
CK _毛	—			—	120

1.3 测定项目与方法

(1)牧草产量:于牧草盛花期将每个花盆地上部分全部分种齐地面刈割,在65℃下恒温烘干,称量。

(2)超产(OV)为混播群落生产力与该群落组分单播生产力的差值。

$$OV = B_{\text{ploy}} - B_{\text{mno}} \quad (1)$$

式中, B_{ploy} 为混播群落产量, B_{mno} 为混播群落组分中的平均单产 $OV > 0$,表明存在超产。

(3)超产效应1(OV_1)为混播群落生产力超过该群落组分种中生产力最高产物种的单产。

$$OV_1 = (B_{\text{ploy}} - B_{\text{imno-max}}) / B_{\text{imno-max}} \quad (2)$$

式中, $B_{\text{imno-max}}$ 为混播群落组分种中最高产物种的单产; $OV_1 > 0$,表明存在超产效应。

(4)超产效应2(OV_2)为混播群落生产力超过该群落内各组分种的平均单产。

$$OV_2 = (B_{\text{ploy-mno}}) / B_{\text{mno-mean}} \quad (3)$$

式中, $B_{\text{mno-mean}}$ 为混播群落中各组分种的平均单产; $OV_2 > 0$,表明存在超产效应。 OV_2 解释了混播

群落生产力与混播组分单播生产力之间的关系,而 OV_1 强调了混播物种成分的差异与超产效应之间的联系^[18]。

(5)地上竞争格局的测定:侵占率(A)、相对拥挤率(K)、相对产量(RY)、竞争率(CR)来测度地上竞争格局和竞争结果。

$$A_g = Y_{gl} / Y_{gg} \times Z_g - Y_{lg} / Y_{ll} \times Z_l;$$

$$A_l = Y_{lg} / Y_{ll} \times Z_l - Y_{gl} / Y_{gg} \times Z_g; \quad (4)$$

$$K = K_g \times K_l, K_g = Y_{gl} \times Z_g / (Y_{gg} - Y_{gl});$$

$$K_l = Y_{gl} \times Z_l / (Y_{ll} - Y_{lg}) \times Z_l; \quad (5)$$

$$CR_g = (Y_{gl} / Y_{gg}) / (Y_{lg} / Y_{ll}) \times (Z_l / Z_g);$$

$$CR_l = (Y_{lg} / Y_{ll}) / (Y_{gl} / Y_{gg}) \times (Z_g / Z_l); \quad (6)$$

式中: Y_{gl} ,禾草与豆科牧草混播时禾草的草产量; Y_{gg} ,禾草单播时的草产量; Y_{lg} ,混播中豆科牧草的草产量; Y_{ll} ,豆科牧草单播时的草产量, Z_g 和 Z_l 分别是两种牧草混播时各自所占的比例^[19-20]。

(6)相对产量(RY):与牧草产量共同反映混播系统的竞争效果和竞争结局以作为参考^[20]。

$$RY_g = Y_{gl} / p Y_g; RY_l = Y_{ll} / q Y_l \quad (7)$$

式中: p 为禾草在间作中所占比例, q 为豆科牧草在间作中所占比例。 $RY_g=1$, 认为禾草的种内竞争与种间竞争相似; $RY_g<1$ 认为种间竞争大于种内竞争, $RY_g>1$ 则认为禾草的种内竞争大于其种间竞争^[21]。

(7) 相对产量总和 (RYT): 混播系统中每种作物的产量与相同条件下单作产量的比值。再将所有比值相加。

$$RYT = Y_{lg}/Y_{ll} + Y_{gl}/Y_{gg} \quad (8)$$

式中: Y_{lg} , 禾草与豆科牧草混播时豆科牧草的草产量; Y_{ll} , 豆科牧草单播时的草产量; Y_{gl} , 禾草与豆科牧草混播时禾草的草产量; Y_{gg} , 禾草单播时的草产量。当 $RYT>1$ 时, 混播系统的种间干扰强度低于种内干扰, 豆科牧草与禾本科牧草间呈现出一定程度的共生关系; 当 $RYT=1$ 时, 混播草地中豆科牧草与禾本科牧草主要利用相同类型的资源, 二者间以“资源替代”关系为主, 既无明显共生增益, 也无激烈竞争损耗, 系统总生产力与两种牧草单播产量总和基本持平; $RYT<1$ 时, 说明混播草地豆科牧草和禾本科牧草对资源竞争激烈, 二者之间存在拮抗。

(8) 牧草磷含量以及磷速利用效率

植株磷浓度测定: 于牧草结实期将整盆牧草全部齐地面刈割收获, 按组分分别称取牧草鲜重, 及时置于 65℃ 烘箱烘干。采用 $H_2SO_4H-H_2O_2$ 消煮-钒钼黄比色法测定植株磷浓度^[22], 计算植株含磷量和植株磷利用效率^[23]。

$$P\% = C\%M, P_c\% = C_1\%M_1 + C_2\%M_2; \quad (9)$$

$$PUE = M/P\%, PUEC = \frac{M_1 + M_2/C_1\% \times M_1 + C_2\% \times M_2}{M} \quad (10)$$

式中: $P\%$ 为分种植株含磷量; $C\%$ 为植株含磷量, $P_c\%$ 为群体含磷量, $C_1\%$ 为种 1 的植株含磷量, $C_2\%$ 为种 2 的植株含磷量; M 为干物质质量, M_1 为种 1 的干物质质量, M_2 为种 2 的干物质质量; PUE 为各组分磷利用效率, $PUEc$ 为群体磷利用效率。

(9) 根际有效磷含量、根际全磷富集率、根际有效磷富集率

根际有效磷含量用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定^[24]。根际富集率 (Enrichment ratio, E) 计算如下:

$$E = (\text{根际含量} - \text{非根际含量}) \times 100\% \quad (11)$$

1.4 数据分析

采用 Excel 2010, SPSS 27.0 进行数据统计分析, 利用 GraphPad prism 10 和 Origin Pro 2025 10 制图。采用双因素方差分析 q 检验 (Student-Newman-Keuls, SNK) 和最小差异显著法 (Least-significant difference, LSD) 对不同混播方式下的牧草产量、磷利用效率、竞争格局进行显著性检验 ($P<0.05$), 然后采用 Origin Pro 2025 10 中“Correlation Plot”对种间竞争格局和超产现象以及磷利用效率和超产现象进行相关分析。

1.4.1 阈值分析方法与验证 为识别生态关系中可能存在的临界点, 本研究采用 R 语言 segmented 包 (版本 1.6-0) 进行分段线性回归分析^[25]。该方法通过最大似然估计原理, 在普通线性模型的基础上引入断点, 将数据划分为多个线性区间, 其基本模型为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 (X - \varphi)_+.$$

其中, φ 为需要估计的阈值 (断点), $(X - \varphi)_+$ 在 $X < \varphi$ 时取 0, 在 $X \geq \varphi$ 时取 $X - \varphi$, 通过 Davies 检验对断点两侧斜率差异进行显著性评估 ($\alpha = 0.05$); 比较分段模型与简单线性模型的 AIC 值, 当 $\Delta AIC > 2$ 时, 认为分段模型具有更好的拟合效果, 计算阈值估计值的 95% 置信区间, 确保阈值估计的精确度; 线性假设验证通过广义加性模型 (GAM) 探索变量间关系, 确保在特定区间内线性近似合理, 对关键变量进行 Shapiro-Wilk 正态性检验, 对分段回归模型的残差进行独立性和方差齐性检验。

2 结果与分析

2.1 不同混播方式下牧草产量、磷吸收量, 以及超产效应的变化

小黑麦与毛苕子同行混播的牧草产量较异行混播提升 2.1%~21.9%。小黑麦与箭筈豌豆异行混播较同行混播提升 0.4%~7.0%。上述两种混播系统内同行与异行混播产量差异均不显著, 但所有混播处理的产量均显著高于单播箭筈豌豆 ($P<0.05$)。小黑麦与毛苕子异行混播地下生物量较同行混播提升 76.0%~81.1%, 两者差异显著 ($P<0.05$), 且该组合异行混播地下生物量显著高于单播小黑麦 ($P<0.05$); 小黑麦与箭筈豌豆异行混播地下生物量较同行混播提升 9.8%~15.0%, 两者差异不显著, 但同样显著高于单播箭筈豌豆 ($P<0.05$)。两种混播系统的 RYT 均大于 1 表示种间竞

争强度小于种内竞争强度,豆科牧草与禾本科牧草间呈现出一定的共生关系;同行混播小黑麦与毛苕子的 RYT 大于异行混播,且两者之间差异不显著;同行混播小黑麦与箭筈豌豆的 RYT 小于异行混播,两者差异显著($P<0.05$);小黑麦与毛苕子同行混播的超产现象较异行混播提升 7.0%,小黑麦与箭筈豌豆异行混播的超产现象较同行混播提升了 0.3%,且两者之间差异不显著;小黑麦与毛苕子同

行混播的超产效应 1 较异行混播提升 54.0%,小黑麦与箭筈豌豆异行混播的超产效应 1 较同行混播提升 24.0%,差异不显著;小黑麦与毛苕子同行混播的超产效应 2 较异行混播提升 8.0%,小黑麦与箭筈豌豆异行混播的超产效应 2 较同行混播升高 0.1%,差异不显著(表 2)。以上结果显示,小黑麦与豆科牧草(毛苕子/箭筈豌豆)在牧草产量、RYT 以及超产效应指标上,同行与异行混播处理间的差异均不显著。

表 2 不同混播方式下豆禾混播草地牧草产量和超产效应

Table 2 Forage yield and overyielding effect of the legume-grass mixtures under different planting arrangements

处理 Treatment	牧草产量 Forage yield/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	牧草地下生物量 Forage root biomass/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	相对产量总和 Relative yield total RYT	超产 Over yield/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	超产效应 1 Transgressive overyielding effect 1 (OV_1)	超产效应 2 Transgressive overyielding effect 2 (OV_2)
Y _(小 毛)	126.70±26.01 ^{abc}	0.99±0.30 ^a	1.13±0.27 ^b	11.62±26.90 ^a	0.37±0.05 ^a	0.10±0.23 ^a
T _(小 毛)	142.43±13.58 ^a	0.22±0.09 ^d	1.24±0.14 ^b	27.35±14.09 ^a	0.81±0.11 ^a	0.24±0.12 ^a
Y _(小 箭)	141.77±15.96 ^a	0.87±0.05 ^{ab}	1.75±0.13 ^a	32.63±17.39 ^a	0.52±0.39 ^a	0.36±0.13 ^a
T _(小 箭)	137.7±20.71 ^{ab}	0.86±0.16 ^{ab}	1.30±0.17 ^b	28.57±21.31 ^a	0.47±0.22 ^a	0.32±0.17 ^a
D _小	110.17±7.49 ^{bc}	0.64±0.16 ^{bc}	—	—	—	—
D _箭	98.27±4.10 ^c	0.42±0.03 ^{cd}	—	—	—	—
D _毛	120.00±4.58 ^{abc}	0.35±0.09 ^d	—	—	—	—

注:Y_(小||毛)表示小黑麦和毛苕子异行混播;T_(小||毛)表示小黑麦与毛苕子同行混播;Y_(小||箭)表示小黑麦与箭筈豌豆异行混播;T_(小||箭)表示小黑麦与箭筈豌豆同行混播;D_小表示单播小黑麦;D_箭表示单播箭筈豌豆;D_毛表示单播毛苕子

Note: Y(oat||foxtail) denotes oat and foxtail millet inter-row mixed planting; T(oat||foxtail) denotes oat and foxtail millet in-row mixed planting; Y(oat||arrow) denotes oat and arrowhead pea inter-row mixed planting; T(r||a) denotes triticale and arrowhead peas co-row mixed cropping; D(r) denotes pure triticale cropping; D(a) denotes pure arrowhead pea cropping; D(m) denotes pure foxtail millet cropping

2.2 不同混播方式下豆禾牧草地种间竞争格局

竞争格局通过相对产量、侵占率、相对拥挤率和竞争率共同体现。在小黑麦与毛苕子混播系统中,小黑麦异行混播的相对产量高于同行混播,毛苕子则呈现相反趋势,但二者差异未达统计学显著水平;异行混播条件下,小黑麦的相对产量显著高于毛苕子($P<0.05$);在小黑麦与箭筈豌豆混播系统中,小黑麦异行混播的相对产量高于同行混播,箭筈豌豆趋势相反;且异行混播小黑麦的相对产量显著高于异行混播箭筈豌豆($P<0.05$)。两个混播系统中,供试牧草的相对产量均小于 1($\text{RY}<1$),表明种间竞争强度大于种内竞争,系统内存在显著的资源竞争现象(图 1A)。在小黑麦与毛苕子混播系统中,小黑麦异行混播的竞争率高于同行混播,毛苕子则呈现相反趋势。且异行混播小黑麦的竞争率显著高于异行混播毛苕子的竞争率($P<0.05$)。在小黑麦与箭筈豌豆混播系统中,两种牧草异行混播的竞争率均高于同行混播,且小黑麦的竞争率高于箭筈豌豆。小黑麦与箭筈豌豆异行混播的竞争率均大于 1,表明小黑麦在混播组合中具有更强的竞争优势(图 1B)。两种混播系统中相对拥挤率表现出不同现象,在小

黑麦与毛苕子混播中,同行混播的相对拥挤率高于异行混播;而小黑麦与箭筈豌豆混播时则呈现相反趋势,且所有处理间差异均未达统计学显著水平(图 1C)。在小黑麦与毛苕子的混播系统中,小黑麦异行混播的侵占率高于同行混播,毛苕子则相反,且异行混播小黑麦的侵占率显著高于毛苕子($P<0.05$);小黑麦与箭筈豌豆混播系统的侵占率变化与之完全一致(图 1D)。上述行间配置差异未引起显著变化。

2.3 不同混播方式下牧草磷利用效率比较

在小黑麦与毛苕子混播系统中,小黑麦的磷利用效率表现为异行混播>同行混播,而毛苕子的磷利用效率则呈同行混播>异行混播的趋势,在小黑麦与箭筈豌豆混播系统中,小黑麦的磷利用效率为异行混播>同行混播,且异行混播处理显著高于单播($P<0.05$),箭筈豌豆的磷利用效率变化趋势与小黑麦一致(图 2A, 2B)。植株磷含量在小黑麦与毛苕子混播系统中,各处理植株磷含量表现为异行混播>同行混播;在小黑麦与箭筈豌豆混播系统中,小黑麦的植株磷含量呈同行混播>异行混播的趋势,且处理间差异显著($P<0.05$),箭筈豌豆的植

株磷含量变化趋势与小黑麦相同(图2C, 2D)。根际土壤有效磷在小黑麦与毛苕子混播系统中, 根际有效磷含量表现为异行混播>同行混播; 在小黑麦与箭筈豌豆混播系统中, 小黑麦根际有效磷含量为同行混播>异行混播, 且差异显著($P<0.05$), 箭筈豌豆根际有效磷含量变化趋势与小黑麦一致, 但处理间差异未达显著水平(图2E, 2F) 小黑麦与毛苕子混播系统中, 各处理有效磷富集率表现为异行混

播>同行混播; 在小黑麦与箭筈豌豆混播系统中, 小黑麦有效磷富集率为同行混播>异行混播, 箭筈豌豆则呈同行混播>异行混播的趋势(图2G, 2K)。土壤全磷富集率在两个混播系统中表现出一致规律, 均为异行混播>同行混播, 且处理间差异不显著(图2M)。综上所述, 行距配置改变了混播系统中磷素的利用与周转途径, 但其多数影响未达到统计显著水平。

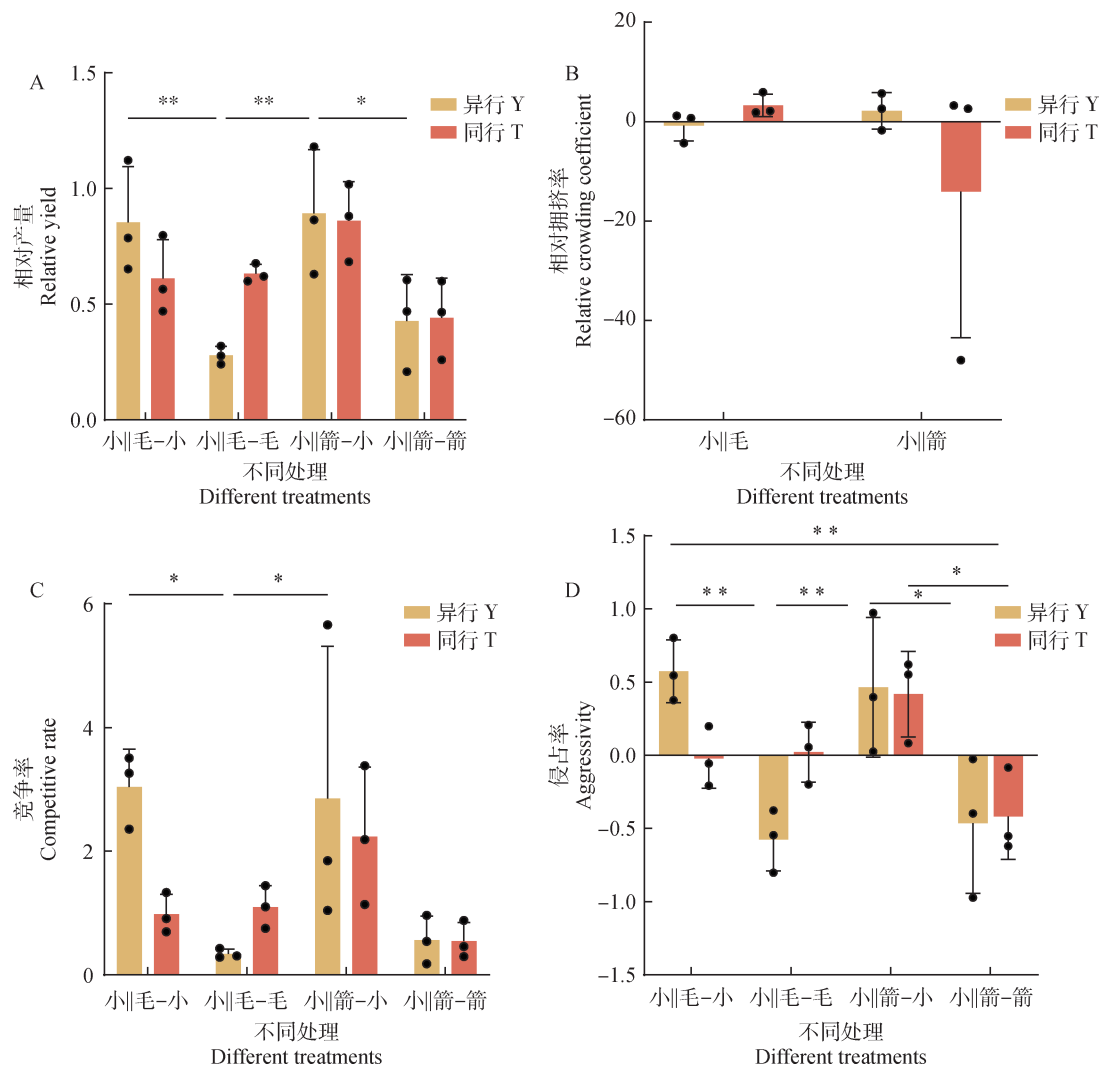


图2 不同混播方式对牧草竞争格局的影响

Fig. 2 Effects of different planting arrangements on competition dynamics of forages

注: A表示同行混播与异行混播下小黑麦与毛苕子和小黑麦与箭筈豌豆的相对产量差异, 小||毛-小表示小黑麦与毛苕子混播系统中的小黑麦; 小||毛-毛表示小黑麦与毛苕子混播系统中的毛苕子; 小||箭-小表示小黑麦与箭筈豌豆混播系统中的小黑麦; 小||箭-箭表示小黑麦与箭筈豌豆混播系统中的箭筈豌豆; B表示竞争率差异, C表示相对拥挤率差异; D表示侵占率差异。用不同符号标注显著性水平: 通常*表示($P<0.05$), **表示($P<0.01$), ***表示($P<0.001$)

Note: A denotes the relative yield difference between triticale and hairy vetch, and between triticale and arrowhead pea, under same-row and different-row interplanting systems. Triticale||Hairy-Triticale indicates triticale in the triticale-hairy vetch interplanting system; Triticale||Hairy-Hairy indicates hairy vetch in the triticale-hairy vetch interplanting system. L||P-L denotes the rye yield in the rye-peas mixed cropping system; L||P-P denotes the peas yield in the rye-peas mixed cropping system; B denotes differences in competitive rate; C denotes differences in relative crowding rate; D denotes differences in invasion rate. Significance levels are indicated by different symbols: *denotes ($P<0.05$), **denotes ($P<0.01$), ***denotes ($P<0.001$)

2.4 混播草地种间竞争格局与磷利用效率对超产的响应机理

磷的固定与转移直接调控着混播系统的种间资源分配,通过磷利用效率对种间竞争格局以及磷利用效率对超产效应的相关性分析发现,同行混播超产效应1与磷利用效率PUE呈极显著正相关($P < 0.01$);土壤全磷富集率E与磷利用效率PUE呈显著正相关($P < 0.05$)(图3A);异行混播的超产效应1与土壤全磷富集率E呈显著正相关($P < 0.05$)(图3B);同行混播相对产量总和RYT与牧草产量FY呈极显著正相关($P < 0.01$)(图3C);异行混播超产OV与牧草产量FY呈极显著正相关($P < 0.01$)(图3D);异行混播的相对产量总和RYT与磷利用效率PUE呈显著正相关($P < 0.05$)(图3F)。磷利用效率和土壤全磷富集对混播系统的种间资源分配、超产效应及牧草产量具有重要调控作用,且同行与异行混播的相关关系存在差异。磷利用效率、种间竞争、超产效应的阈值关系显示同行混播下相对产量总和RYT < 1.147 时:种间竞争强度抑制磷利用效率PUE,磷利用效率PUE随种间竞争强度的减小而减小;当RYT > 1.147 时:种间竞争强度促进磷利用效率PUE的吸收,磷利用效率PUE随着种间竞争强度的增加而缓慢增加(图4A);异行混播下相对产量总和RYT < 1.442 时:磷利用效率PUE种间竞争强度的增加缓慢增加;当RYT > 1.442 时:磷利用效率PUE随着种间竞争强度的增加而陡然上升(图4B);磷利用效率与超产效应的阈值关系显示同行混播下磷利用效率PUE < 3.63 时:超产效应1随着磷利用效率PUE的增加而下降;当磷利用效率PUE > 3.63 时:超产效应1随着磷利用效率PUE的增加而上升(图4C);异行混播下磷利用效率PUE < 4.228 时:超产效应1随着磷利用效率PUE的增加而下降;当磷利用效率PUE > 4.228 时:磷利用效率PUE随着超产效应1的增加而上升(图4D)。

3 讨论

3.1 豆禾混播草地种间竞争对生产性能的影响

豆禾混播草地不仅可以改善草地生态系统氮素营养平衡、促进草地动物蛋白质的形成,还可以提高草地产量和质量^[26]。但是禾草与豆科牧草之间存在着养分、水分、光照和空间等资源方面的竞

争。一般认为,两种植物需求越相似,其竞争就越激烈^[27],适宜的物种搭配和混播方式^[28]可以避免这种竞争局面。在本研究中,通过对3种牧草不同的搭配以及两种不同的建植方式发现小黑麦与毛苕子的牧草产量、超产现象呈现同行高于异行(表1)。可能是由于毛苕子通过根瘤菌固氮,提高了土壤养分,同时同行混播使两种牧草根系高度重叠,养分供应更高效^[7],有利于充分利用土壤中的资源,这与关正翾等^[29]的研究结果一致。而在小黑麦与箭筈豌豆的混播体系中牧草产量表现为异行大于同行(表1),这一现象可能是因为异行混播中两种作物拥有充足的根系生长空间,减少了根系间的竞争,使箭筈豌豆能够有效地获取土壤养分,从而提高总体产量^[4]。白音仓^[30]通过对紫花苜蓿和老芒麦混播草地的研究发现间行处理的干草产量明显高于同行混播处理,这与本研究结果一致。

在植物竞争中根系的深度和广度会直接影响植物土壤资源的吸收和利用,本研究中小黑麦在两种混播系统中表现为竞争优势(图2)且异行混播下,小黑麦的侵占率与竞争率均高于同行混播,可能是因为同行混播下豆禾牧草根系高度重叠,导致在养分和水分的吸收利用方面的竞争更为激烈,从而限制了小黑麦根系的拓展和资源的利用。在异行混播中,由于植物之间的空间分布更加分散,根系的重叠程度降低,这种情况有效缓解了竞争压力^[26]。本研究中,两种混播体系的产量指标与竞争指标均未因行间配置的不同产生显著性差异。这一结果可能源于豆科与禾本科牧草的种间互补效应,豆科植物(毛苕子、箭筈豌豆)的固氮能力使其对行间配置变化引发的资源竞争的敏感度低于禾本科牧草^[31];同时,豆科固氮供氮与禾本科养分高效吸收的协同作用,构成了混播系统生产力提升的核心驱动力^[31]。当种间共生关系充分发挥(所有混播处理的RYT均大于1)时,其强大的生物学效应可弱化不同播种方式带来的处理差异^[32]。此外,植物在株高、根系分布等性状上的表型可塑性,也可能缓冲了行间变化对相对产量总和、侵占率、相对拥挤率及竞争率的影响,最终使不同行间下的表现趋于稳定,未形成统计学上的显著差异^[31]。

3.2 豆禾混播牧草种间竞争格局和磷资源利用效率对超产效应的响应

豆禾混播系统中,豆科作物可通过根际酸化作

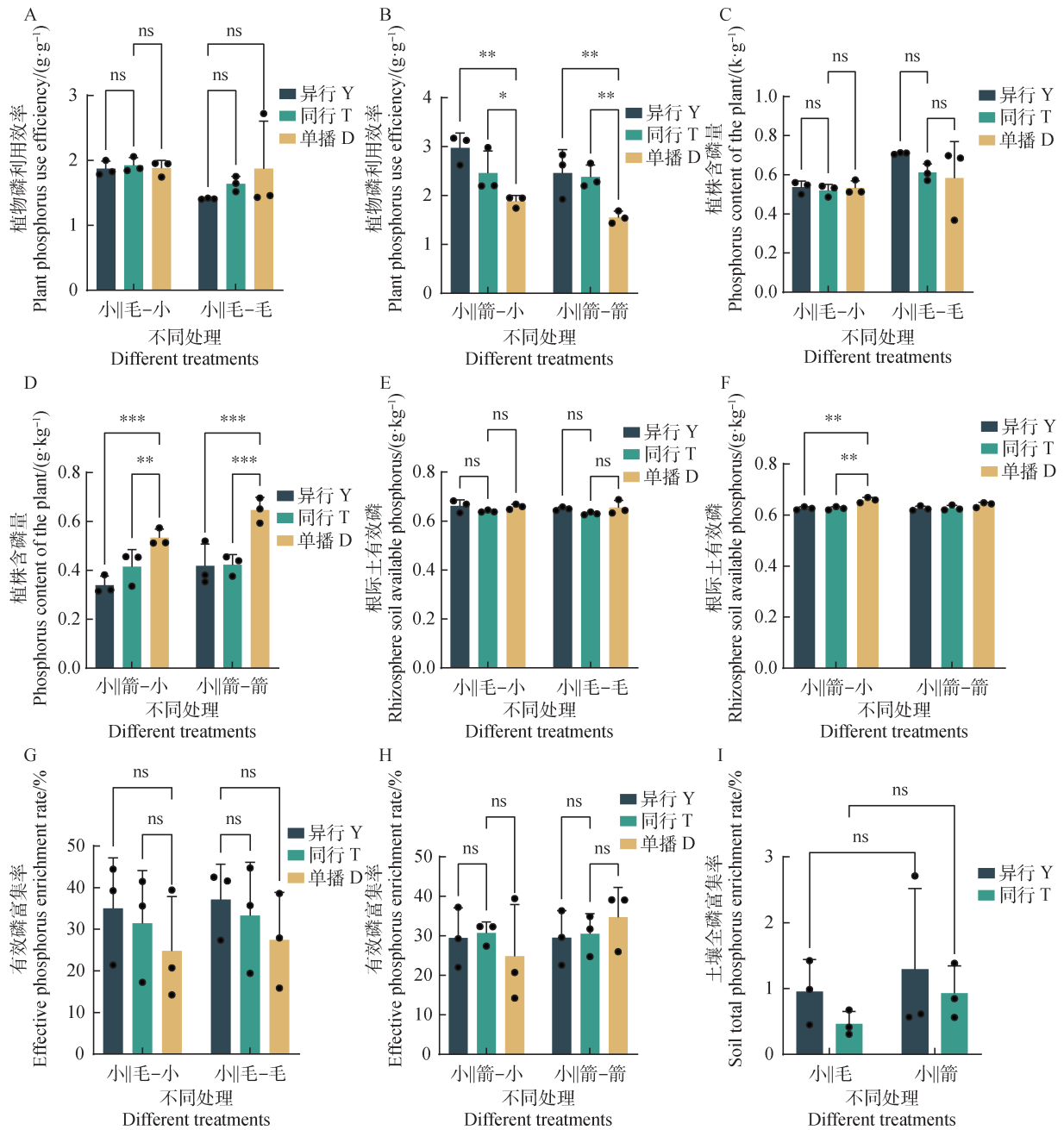


图3 不同混播方式下牧草磷利用效率比较

Fig. 3 Comparison of phosphorus use efficiency (PUE) of forage under different planting arrangements

注:A表示同行混播与异行混播下小黑麦与箭筈豌豆的磷利用效率,B表示同行混播与异行混播下小黑麦与毛苕子的磷利用效率,小||毛-小表示小黑麦与毛苕子混播系统中的小黑麦;小||毛-毛表示小黑麦与毛苕子混播系统中的毛苕子;小||箭-小表示小黑麦与箭筈豌豆混播系统中的小黑麦;小||箭-箭表示小黑麦与箭筈豌豆混播系统中的箭筈豌豆;C表示同行混播与异行混播下小黑麦与箭筈豌豆的含磷量,D表示同行混播与异行混播下小黑麦与毛苕子的含磷量,E表示同行混播与异行混播下小黑麦与箭筈豌豆的根际土有效磷含量,F表示同行混播与异行混播下小黑麦与毛苕子的根际土有效磷含量,G表示同行混播与异行混播下小黑麦与箭筈豌豆的有效率富集率,H表示同行混播与异行混播下小黑麦与毛苕子的根际土有效磷有效率富集率,I表示同行混播与异行混播下小黑麦与毛苕子和小黑麦与箭筈豌豆的土壤全磷富集率.用不同符号标注显著性水平,其中*表示($P<0.05$),**表示($P<0.01$),***表示($P<0.001$);若差异不显著,则标注“ns”

Note: A denotes phosphorus utilization efficiency of triticale and arrowhead peas under same-row and different-row interplanting; B denotes phosphorus utilization efficiency of triticale and foxtail millet under same-row and different-row interplanting. Triticale||Foxtail millet-Triticale indicates triticale in the triticale-foxtail millet interplanting system; L||T-T denotes Tithonia in the triticale-Tithonia mixed cropping system; L||P-P denotes Triticale in the triticale-Pisum sativum mixed cropping system; L||P-P denotes Pisum sativum in the triticale-Pisum sativum mixed cropping system; C denotes phosphorus content in triticale and arrowhead peas under same-row and different-row interplanting; D denotes phosphorus content in triticale and hairy vetch under same-row and different-row interplanting; E denotes available phosphorus content in rhizosphere soil of triticale and arrowhead peas under same-row and different-row interplanting; F denotes the available phosphorus content in the rhizosphere soil of triticale and foxtail millet under co-row and inter-row mixtures; G indicates the available phosphorus enrichment rate of triticale and arrowhead peas under co-row and inter-row mixtures; H represents the available phosphorus enrichment rate of triticale and foxtail millet in the rhizosphere soil under co-row and inter-row mixtures; I denotes the total phosphorus accumulation rate in soil for rye and foxtail millet, and rye and arrowhead peas under same-row and different-row interplanting. Different symbols indicate significance levels: *denotes ($P<0.05$), **denotes ($P<0.01$), ***denotes ($P<0.001$); if no significant difference exists, “ns” is labeled

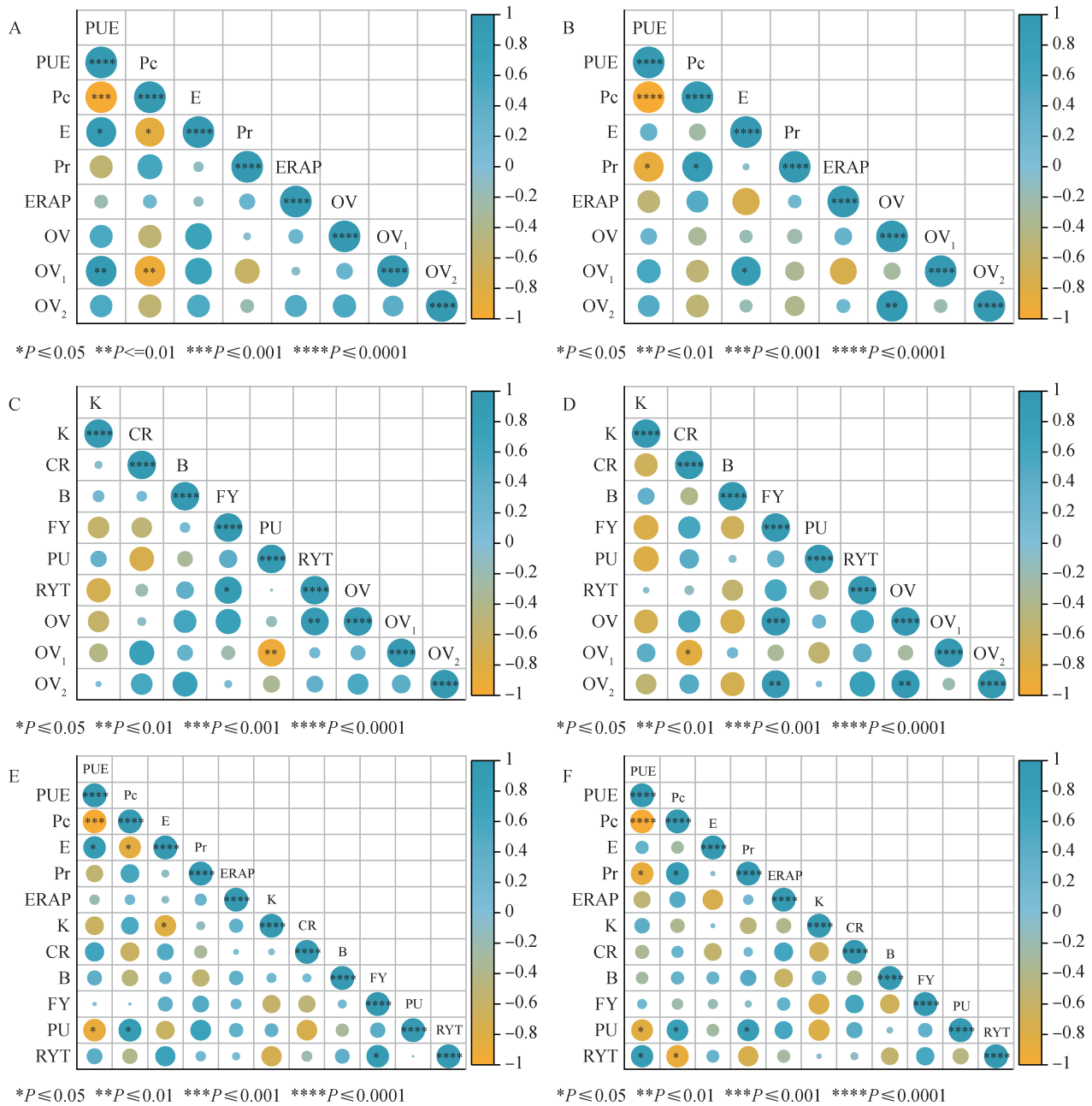


图4 种间竞争格局与土壤磷利用效率的响应

Fig. 4 Relationship between interspecific competition dynamics and soil phosphorus use efficiency

注:图A表示同行混播牧草磷利用效率与牧草超产效应的相关性图;图B表示异行混播牧草磷利用效率与超产效应的相关性图;图C表示同行混播牧草竞争格局与超产效应的相关性图;图D表示异行混播牧草竞争格局与超产效应的相关性图;图E表示同行混播牧草竞争格局与牧草磷利用效率的相关性图;图F表示异行混播牧草竞争格局与牧草磷利用效率的相关性图;RY表示相对产量;K表示相对拥挤率;CR表示竞争率;A表示侵占率;PUE表示磷利用效率;Pc表示植株磷含量;E表示土壤全磷富集率;Pr表示根际土有效磷;ERAP表示有效磷富集率;OV表示超产;OV₁表示超产效应1;OV₂表示超产效应2;B表示牧草地下生物量;FY表示牧草产量;PU表示吸磷量

Note: Figure A shows the correlation between phosphorus use efficiency and overproduction effect in co-mixed grasses of the same species; Figure B shows the correlation between phosphorus use efficiency and overproduction effect in co-mixed grasses of different species; Figure C shows the correlation between competitive structure and overproduction effect in co-mixed grasses of the same species. Figure D shows the correlation between competitive structure of heterococious mixed-cropped forage grasses and the super-yield effect; Figure E shows the correlation between competitive structure of co-dominant mixed-cropped forage grasses and phosphorus utilization efficiency; Figure F shows the correlation between competitive structure of heterococious mixed-cropped forage grasses and phosphorus utilization efficiency; RY denotes relative yield; K denotes relative crowding rate; CR denotes competition rate; A denotes invasion rate; PUE denotes phosphorus utilization efficiency; Pc denotes plant phosphorus content; E denotes soil total phosphorus accumulation rate; Pr denotes rhizosphere soil available phosphorus; ERAP denotes available phosphorus accumulation rate; OV denotes overproduction; OV₁ denotes overproduction effect 1; OV₂ denotes overproduction effect 2; B denotes forage belowground biomass; FY denotes forage yield; PU denotes phosphorus uptake

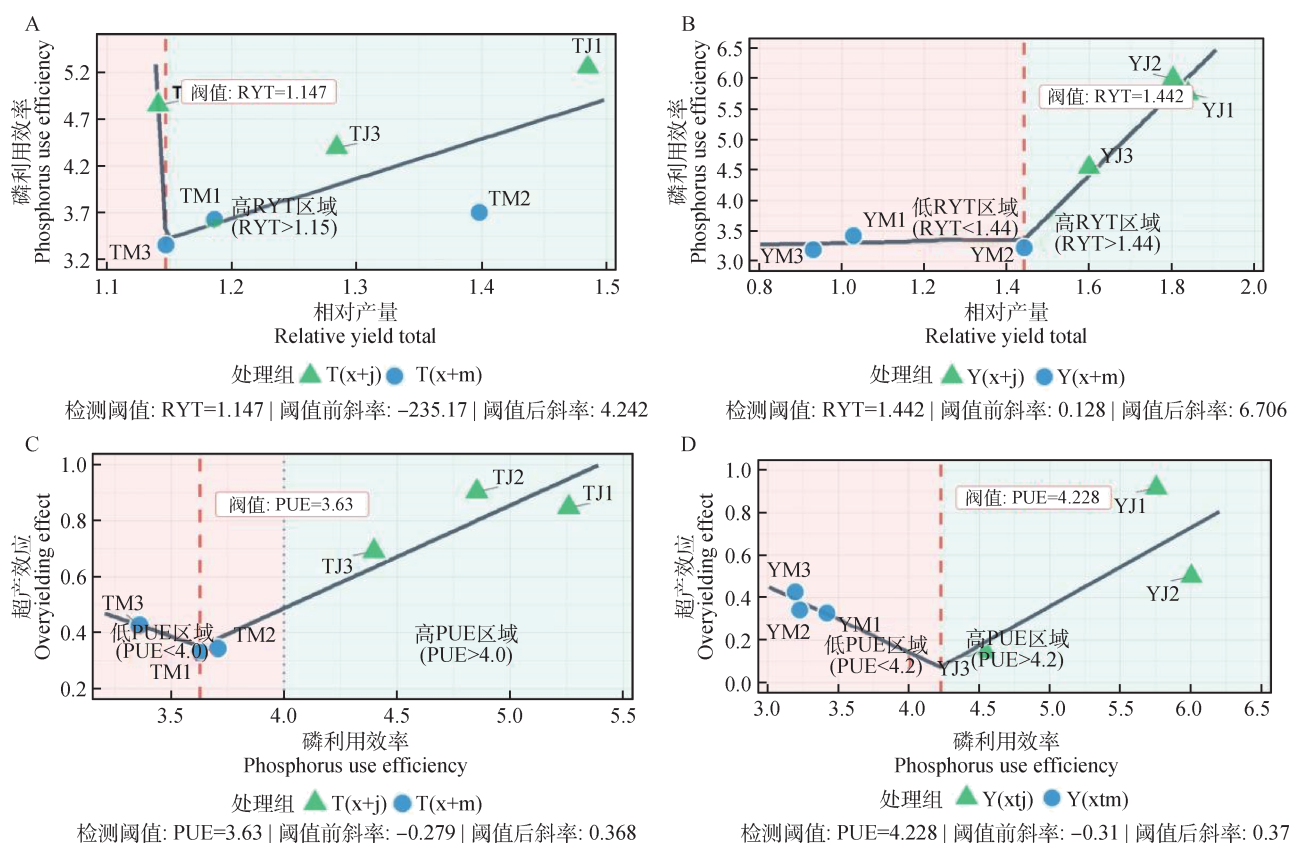


图5 竞争格局、牧草磷利用效率与超产之间的阈值分析

Fig. 5 Threshold analysis of the relationships among competition dynamics, forage phosphorus use efficiency (PUE), and the overyielding effect

注: A表示同行混播下种间竞争强度与磷利用效率的阈值关系; B表示异行混播下种间竞争强度与磷利用效率的阈值关系; C表示同行混播下磷利用效率与超产效应的阈值关系; D表示异行混播下磷利用效率与超产效应的阈值关系

Note: A denotes the threshold relationship between inter-seedling competition intensity and phosphorus use efficiency under co-cropping; B denotes the threshold relationship between inter-seedling competition intensity and phosphorus use efficiency under mixed cropping; C denotes the threshold relationship between phosphorus use efficiency and super-yield effect under co-cropping; D denotes the threshold relationship between phosphorus use efficiency and super-yield effect under mixed cropping

用分泌有机酸,活化土壤中难溶性磷素^[33],且豆禾牧草在根际分布上存在空间差异,推动磷源的相互吸收与优化分配,最终提升牧草磷利用效率^[34]。因此,混播草地磷资源的高效利用直接影响种间竞争格局与超产效应的形成。郇继承等^[35]研究表明,隔行混播更有利于土壤有机质和速效钾的积累,而同行混播则能维持较高的土壤有效磷含量。另外,娜尔克孜等^[36]发现,燕麦与箭筈豌豆异行混播可通过提高土壤磷酸酶活性,显著增强根际土壤磷富集能力,使植株磷含量与磷利用效率显著提升,进而形成混播优势并获得较高牧草产量。本研究中,小黑麦||毛苕子和小黑麦||箭筈豌豆两种混播系统的植物磷利用效率、根际土有效磷含量及有效磷富集率均呈现异行混播高于同行混播的特征(图3),这可能是因为同行混播中,豆科与禾本科根系在同一行内

高度重叠,限制了豆科根际酸化带的水平扩散,缩小了难溶性磷的活化范围^[37];同时,浅层土壤中根系混杂度较高,易引发对同一磷源的直接竞争^[38]。而异行混播通过增大行间距离,促进根系空间,形成豆科(深层根系)与禾本科(浅层根系)的分层分布格局,豆科可吸收深层土壤磷素,而禾本科则高效利用浅层磷资源,植物这从空间维度减少了同层位资源的冲突^[33]。

磷利用效率、种间竞争与超产效应的阈值关系分析显示(图5):同行混播中,当相对产量总和(RYT)>1.147时,PUE呈缓慢上升趋势;当PUE>3.63时,超产效应(OV₁)开始显现;而异行混播中,当RYT>1.442时,PUE呈陡然上升趋势;当PUE>4.228时,OV₁显著增加。这表明同行混播遵循“低竞争弱互补”运行机制,而异行混播则呈现

“高竞争-强互补”特征,产生这种现象的原因可能是PUE提升是超产效应触发的前置条件。同行混播中, $RYT > 1.147$ 后豆科植物通过根际酸化、招募解磷细菌及提高酸性磷酸酶活性,逐步增加土壤活化磷供给^[39],推动PUE稳定提升;当PUE超过3.63时,豆科与禾本科的磷吸收互补效应达到促进群落生长的临界强度,进而影响超产效应。异行 $RYT > 1.442$ 时,种间竞争压力小黑麦根系磷吸收效率的提升^[40];当PUE突破4.228时,混播系统互补增强 OV_1 显著提升,该模式与混播系统“互补阈值理论”基本一致^[41]。此外,还有研究认为根系互作是连接PUE与超产效应的关键,豆科根系通过分泌有机酸、促进无机磷吸收与有机磷的矿化,进而提高混播体系的磷利用效率。同行混播与异行混播的阈值关系与机制差异可能源于群落空间结构、资源利用方式等多重因素的影响,这与于辉等^[16]在五种豆禾混播草地种间竞争关系的研究结果基本一致。同行与异行两种混播系统通过种间竞争作用,驱动群落空间结构、资源利用方式及牧草根系特性发生适应性变化,进而促进土壤磷素的高效吸收,提升混播草地生产性能,最终实现超产效应。

4 结论

在昭苏地区一年生牧草小黑麦||毛苕子和小黑麦||箭筈豌豆不同混播方式(同行混播与异行混播)的混播试验中,小黑麦-毛苕子混播系统中同行混播的牧草产量、超产效应大于异行混播;在小黑麦-箭筈豌豆混播系统中异行混播大于同行混播。磷产量及竞争格局在两个混播系统中均表现为异行混播大于同行混播。整体而言,小黑麦||箭筈豌豆混播系统优于小黑麦||毛苕子混播系统。因此在昭苏冷凉地区建植混播牧草时,建议小黑麦-箭筈豌豆异行混播,以提高昭苏地区豆禾混播牧草地的生产性能和养分利用效率。未来应结合土壤类型、年际气候波动与降水格局,进一步优化行距、播幅及密度,以构建更高效的混播结构。

参考文献

[1] 芦奕晓,牟乐,杨惠敏. 豆科与禾本科牧草混播改良土壤的研究进展[J]. 中国草地学报,2019,41(1):94-100
LU Y X, MU L, YANG H M. Advances in improved soil fertility with legume-grass mixtures[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(1): 94-100

[2] 焦念元,宁堂原,赵春,等. 玉米花生间作复合体系光合特性的研究[J]. 作物学报,2006,32(6):917-923
JIAO N Y, NING T Y, ZHAO C, et al. Studies on characters of photosynthesis in intercropping system of maize and peanut [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(6): 917-923

[3] LI L, TILMAN D, LAMBERS H, et al. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture [J]. The New Phytologist, 2014, 203(1): 63-9

[4] 朱亚琼,郑伟,王祥,等. 混播方式对豆禾混播草地植物根系构型特征的影响[J]. 草业学报,2018,27(1):73-85
ZHU Y Q, ZHENG W, WANG X, et al. Effects plant spacing pattern on root morphological and architectural characteristics of legume-grass mixtures [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(1): 73-85

[5] 张艾明,徐玉梅,朱建宇,等. 蒙东地区水肥耦合对紫花苜蓿土壤磷组分的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(11):4004-4010
ZHANG A M, XU Y M, ZHU J Y, et al. Effects of the coupling water and fertilizer on soil phosphorus components in alfalfa field in Eastern Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4004-4010

[6] 朱亚琼,陈雪,郑伟,等. 混播牧草根系和根际特征对磷素利用效率的影响[J]. 草业科学,2023,40(8):2129-2139
ZHU Y Q, CHEN X, ZHENG W, et al. Effects of root characteristics on phosphorus use efficiency of orage grass under different phosphorus supply levels [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(8): 2129-2139

[7] LI L, LI S M, SUN J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27): 11192-6

[8] 胡宇. 紫云英/绿肥油菜混作体系氮磷养分利用特征研究[D]. 武汉:华中农业大学,2023:5-8
HU Y. Study on nitrogen and phosphorus utilization characteristics of chinese milk vetch/green manure rapeseed mixed cropping [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 5-8

[9] 戴杰,刘亚林,李春杰,等. 低磷条件下玉米||蚕豆间作物根系间距对玉米磷吸收的影响[J]. 中国农业大学学报,2023,28(6):88-97
DAI J, LIU Y L, LI C J, et al. Effects of root distances between intercropped maize and faba bean on the phosphorus uptake of maize under low phosphorus conditions [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(6): 88-97

[10] HECTOR A, HAUTIER Y, SANER P, et al. General stabilizing effects of plant diversity on grassland productivity through population asynchrony and overyielding [J]. Ecology, 2010, 91(8): 2213-2220

[11] GRIME J P. Plant strategies and vegetation processes [M]. Chichester: Wiley, 1979: 69-75

[12] XUE W, HUANG L, DONG B, et al. Patchy distributions of

- competitors affect the growth of a clonal plant when the competitor density is high[J]. PLoS One, 2017, 8(10):e78221
- [13] REN Y Y, ZHANG L, YAN M F, et al. Effect of sowing proportion on above-and below-ground competition in maize - soybean intercrops[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):15760
- [14] 黄玺, 李春杰, 南志标. 紫花苜蓿与醉马草的竞争效应[J]. 草业学报, 2012, 21(1):59-65
HUANG X, LI C J, NAN Z B. Competitive effects between *Medicago sativa* and *Achnatherum inebrians*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1):59-65
- [15] 黎松松, 王宁欣, 郑伟, 等. 一年生和多年生豆禾混播草地超产与多样性效应的比较[J]. 植物生态学报, 2021, 45(1):23-37
LI S S, WANG N X, ZHENG W, et al. Comparison of transgressive overyielding effect and plant diversity effects of annual and perennial legume-grass mixtures [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 2021, 45(1):23-37
- [16] 于辉, 郑伟, 张鲜花, 等. 群落空间结构对豆禾混播草地种间竞争关系的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2015, 38(2):87-92
YU H, ZHENG W, ZHANG X H, et al. Effects of spatial structure on the relationship of interspecific competition in legume-grass mixtures community[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2015, 38(2):87-92
- [17] 窦梓懿, 郑伟华, 田燕燕, 等. 一年生豆禾混播草地生产性能的综合比较[J]. 草业科学, 2023, 40(10):2639-2650
DOU Z Y, ZHENG W H, TIAN Y Y, et al. Comprehensive comparison of production performance of annual mixed legume-grass pastures[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(10):2639-2650
- [18] ALRUN S, JENS S, CHRISTIANE R. Resource availability alters biodiversity effects in experimental grass-forb mixtures [J]. PloS One, 2016, 11(6):e0158110
- [19] KARPENSTEIN-MACHAN M, STUELPNAGEL R. Biomass yield and nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop[J]. Plant and Soil, 2000, 218(1-2):215-232
- [20] DIMANDE P, ARROBAS M, RODRIGUES A M. Intercropped maize and cowpea increased the land equivalent ratio and enhanced crop access to more nitrogen and phosphorus compared to cultivation as sole crops [J]. Sustainability, 2024, 16(4):1440
- [21] 朱亚琼, 关正翮, 郑伟, 等. 混播种类和群体结构对豆禾牧草混播系统氮素利用效率的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(10):1-14
ZHU Y Q, GUAN Z X, ZHENG W, et al. Effects of species diversity and community structure on nitrogen use efficiency of mixed legume+grass pastures [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(10):1-14
- [22] BONILLA D P, FUENTES J A, HANSEN N C, et al. Winter cereal root growth and aboveground-belowground biomass ratios affected by site and tillage system in dryland Mediterranean conditions[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1-2):925-939
- [23] MALAMY J E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture[J]. Plant, Cell & Environment, 2005, 28(1):67-77
- [24] GUSWA J A. Effect of plant uptake strategy on the water-optimal root depth [J]. Water Resources Research, 2010, 46(9):W09522
- [25] MUGGEO V M R. Estimating regression models with unknown break-points [J]. Statistics in medicine, 2003, 22(19):3055-3071
- [26] 郑伟, 朱进忠, 库尔班, 等. 不同混播方式下豆禾混播草地种间竞争动态研究[J]. 草业学报, 2010, 18(4):568-575
ZHENG W, ZHU J Z, KU E B, et al. Dynamics of interspecific competition of legume-grass mixture under different mixed sowing patterns [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(4):568-575
- [27] 谢开云, 赵云, 李向林, 等. 豆-禾混播草地种间关系研究进展 [J]. 草业学报, 2013, 22(3):284-296
XIE K Y, ZHAO Y, LI X L, et al. Relationships between grasses and legumes in mixed grassland: a review [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(3):284-296
- [28] 祁军, 郑伟, 张鲜花, 等. 不同豆禾混播模式的草地生产性能 [J]. 草业科学, 2016, 33(1):116-128
QI J, ZHENG W, ZHANG X H, et al. Determination and comparison of the production performance of pastures among different spatial structure of legume-grass mixtures [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(1):116-128
- [29] 关正翮, 娜尔克孜, 朱亚琼, 等. 不同混播方式下燕麦+箭筈豌豆混播草地的生产性能及土壤养分特征[J]. 草业科学, 2019, 36(3):772-784
GUAN Z X, NA E, ZHU Y Q, et al. Effect of different sowing patterns on production performance and soil nutrients in *Avena sativa* + *Vicia sativa* mixtures [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(3):772-784
- [30] 白音仓. 不同播种方式及比例对紫花苜蓿和老芒麦混播草地的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011:25-35
BAI Y C. Different sowing styles and proportion of alfalfa and elymus sibiricus with the influence of mixed seeding grass [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011:25-35
- [31] 魏志敏, 孙斌, 方成, 等. 根瘤菌与固氮菌联合对毛叶苕子的促生效果[J]. 草业学报, 2021, 30(5):94-102
WEI Z M, SUN B, FANG C, et al. Co-inoculation with rhizobia and azotobacter affects the growth of *Vicia villosa* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(5):94-102
- [32] 朱亚琼, 于辉, 郑伟, 等. 燕麦+箭筈豌豆混播草地混播优势的测度与影响因素分析[J]. 草业学报, 2020, 29(1):74-85
ZHU Y Q, YU H, ZHENG W, et al. Effects of different planting configurations on yield of *Avena sativa* and *Vicia sativa* mixed plantings with soybean in alpine pastures [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(1):74-85
- [33] PAUL KEDDY L T. Experimental evidence that interspecific competitive asymmetry increases with soil productivity [J]. Oikos, 1997, 80(2):253-256
- [34] 张德, 龙会英, 金杰, 等. 豆科与禾本科牧草间作的生长互作效应及对氮、磷养分吸收的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(10):15-22

- ZHANG D, LONG H Y, JIN J, et al. Effects of growth interaction effect of leguminous and gramineous pasture intercropping and absorption of nutrient and phosphorus on pasture expression [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(10): 15-22
- [35] 邵继承, 张宏宇, 杨恒山, 等. 播种方式对紫花苜蓿+无芒雀麦人工草地土壤剖面养分分布的影响[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 24(4): 392-396
- TAI J C, ZHANG H Y, YANG H S, et al. Effect of sowing methods on nutrients distribution of soil profiles in mixed grassland (alfalfa+bromus inermis) [J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences)*, 2009, 24(4): 392-396
- [36] 娜尔克孜, 于辉, 朱亚琼, 等. 不同混播方式和供磷水平对燕麦+箭筈豌豆混播草地磷利用效率的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2019, 42(3): 161-169
- NA E K Z, YU H, ZHU Y Q, et al. Effects of different mixed patterns and soil phosphorus level on phosphorus utilization efficiency in mixed grassland of vicia [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2019, 42(3): 161-169
- [37] LITHOURGIDIS A, VASILAKOGLU I, DHIMA K, et al. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios [J]. *Field Crops Research*, 2006, 99(2-3): 106-113
- [38] 张德闪, 王宇蕴, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际pH值的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 127-133
- ZHANG D S, WANG Y Y, TANG L, et al. Effects of wheat and fababean intercropping on available phosphorus of red soils and its relationship with rhizosphere soil pH [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(1): 127-133
- [39] 赵文杰, 张丽静, 畅倩, 等. 低磷胁迫下豆科植物有机酸分泌研究进展[J]. *草业科学*, 2011, 28(6): 1207-1213
- ZHAO W J, ZHANG L J, CHANG Q, et al. Research progress on organic acid secretion of leguminous plants under low phosphorus stress [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 280(6): 1207-1213
- [40] HINSINGER P, BENGOUH G A, VETTERLEIN D, et al. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance [J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1-2): 117-152
- [41] M L, A H. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments [J]. *Nature*, 2001, 412(6842): 72-76
- (责任编辑 刘婷婷)