

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.032

引用格式:马玉颜,胥成梅,陈思凡,等.不同混播比例对圈窝地燕麦-豌豆系统养分竞争及生产性能的影响[J].草地学报,2026,34(7):2708—2720

MA Yu-yan, XU Cheng-mei, CHEN Si-fan, et al. Effects of Different Mixture Ratios on Nutrient Competition and Productivity in Oat-Pea Intercropping System in Corral Lands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2708—2720

## 不同混播比例对圈窝地燕麦-豌豆系统养分竞争及生产性能的影响

马玉颜<sup>1</sup>, 胥成梅<sup>2</sup>, 陈思凡<sup>1</sup>, 邵涛<sup>1,3</sup>, 蒲小剑<sup>4</sup>, 赵雅姣<sup>1\*</sup>, 林刚<sup>1,5</sup>,  
武涛<sup>1</sup>, 向佳鸿<sup>1</sup>, 王诗涛<sup>1</sup>

- (1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中—美草地畜牧业可持续发展研究中心/国家林业和草原局高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 甘肃兰州 730070;  
2. 青海省海晏县畜牧兽医站, 青海海北 812200; 3. 南京农业大学草业学院, 江苏南京 210095;  
4. 青海大学畜牧兽医科学院草原研究所, 青海西宁 810016; 5. 甘肃省自然资源规划研究院, 甘肃兰州 730030)

**摘要:**本研究旨在探究青海高寒地区圈窝地不同混播比例下燕麦(*Avena sativa* L.)与饲用豌豆(*Pisum sativum* L.)系统的养分种间竞争特征及其对生产性能的影响。于2023—2024年在青海海晏县进行田间试验,设置燕麦:豌豆混播比例2:1(O<sub>2</sub>P)、1:1(OP)、1:2(OP<sub>2</sub>)及单播燕麦与豌豆对照(MO, MP)。测定干草产量、株高、叶面积、茎叶比、氮、磷、钾含量与积累量,计算土地当量比(Land equivalent ratio, LER)以及竞争比率(Competition rate, CR)。结果表明:(1)各混播比例LER均大于1,其中OP处理最高,表明混播具有土地资源利用优势;(2)燕麦产量CR均大于1,种内竞争占优;豌豆CR小于1,种间竞争更强;(3)燕麦对氮、磷的竞争能力在各混播比例下均强于豌豆;对钾的竞争则随比例变化,在OP<sub>2</sub>下豌豆优于燕麦;(4)OP处理干草产量最高,但其燕麦个体叶面积最低,说明系统高产主要依赖于种间功能互补与群体协同,而非个体形态优势。综上,燕麦/豌豆混播通过资源互补与竞争协调提升系统生产力,其中1:1混播为高寒圈窝地饲草生产的适宜模式。

**关键词:**燕麦;豌豆;混播;养分竞争

中图分类号:S541

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2708-13

## Effects of Different Mixture Ratios on Nutrient Competition and Productivity in Oat-Pea Intercropping System in Corral Lands

MA Yu-yan<sup>1</sup>, XU Cheng-mei<sup>2</sup>, CHEN Si-fan<sup>1</sup>, SHAO Tao<sup>1,3</sup>, PU Xiao-Jian<sup>4</sup>, ZHAO Ya-jiao<sup>1\*</sup>,  
LING Gang<sup>1,5</sup>, WU Tao<sup>1</sup>, XIANG Jia-Hong<sup>1</sup>, WANG Shi-Tao<sup>1</sup>

- (1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 2. Haixian County Animal Husbandry and Veterinary Station, Haibei, Qinghai Province 812200, China; 3. College of Grassland Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu Province 210095, China; 4. Institute of Grassland Science, Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 5. Gansu Provincial Research Institute of Natural Resources Planning, Lanzhou, Gansu Province 730030, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the interspecific nutrient competition characteristics and their effects on the productive performance of an oat (*Avena sativa* L.) and forage pea (*Pisum sativum* L.) system under

收稿日期:2025-09-08;修回日期:2025-10-31

基金项目:甘肃省高校青年博士支持项目(2024QB-076);草业生态系统教育部重点实验室揭榜挂帅项目(KLGE-2024-04);青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2025-03)资助

作者简介:马玉颜(2000-),女,汉族,甘肃金昌人,博士研究生,主要从事牧草栽培研究,E-mail: 15593598782@163.com;\*通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhaoyj@gsau.edu.cn

different intercropping ratios in Corral lands of the Qinghai alpine region. A field experiment was conducted in Haiyan County, Qinghai Province, from 2023 to 2024, with treatments including *Avena sativa*:*Pisum sativum* intercropping ratios of 2:1 (O2P), 1:1 (OP), and 1:2 (OP2), as well as monocropping oat (MO) and monocropping pea (MP) as controls. Measurements included dry matter yield, plant height, leaf area, stem-to-leaf ratio, contents and accumulations of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). The land equivalent ratio (LER) and competition rate (CR) were calculated. The results showed that: (1) The LER values under all intercropping ratios were greater than 1, with the OP treatment exhibiting the highest value, indicating that intercropping provided an advantage in land resource utilization; (2) The yield CR of oat was consistently greater than 1, demonstrating that intraspecific competition predominated, whereas the CR of pea was less than 1, indicating stronger interspecific competition; (3) Oat exhibited stronger competitive ability for N and P than pea across all intercropping ratios, while competition for K varied with the ratio-pea outperformed oat only under the OP2 ratio; (4) The OP treatment achieved the highest dry matter yield, despite oat individual leaf area being the lowest in this treatment, suggesting that the high system productivity relied primarily on interspecific functional complementarity and population synergy rather than individual morphological advantages. In conclusion, oat/pea intercropping enhances system productivity through resource complementarity and competition coordination, with the 1:1 intercropping ratio being a suitable model for forage production in alpine Corral lands.

**Key words:** Oats; Peas; Mixed cropping; Nutrient competition

青海省海晏县天然草地总面积为25.04万公顷,可利用草场面积为24.17万公顷,这些草地主要分布在环青海湖地区,是该地区畜牧业的重要基础<sup>[1]</sup>。近年来海晏县草地由于不合理的放牧和环境变化,致使草地生产力下降,并导致草少畜多的现象<sup>[2]</sup>。该现象不仅增加了草地的压力,同时加剧了草地的退化,形成恶性循环<sup>[3]</sup>。圈窝是牧民冷季圈养牲畜的场所,每年在牲畜转入夏季草场时处于闲置状态,得不到有效利用<sup>[4]</sup>。而在圈窝种植一年生牧草既能够充分利用夏季草场闲置土地、增加牧草的贮备、改善家畜冬春补饲条件、提高抗灾保畜的水平、减轻冬春草场的压力,又能保护和绿化圈窝暴露在表面的土地,不仅会减缓天然草地退化,同时对当地生态也具有一定的保护作用<sup>[5]</sup>。

燕麦(*Avena sativa* L.)和饲用豌豆(*Pisum sativum* L.)均是优质饲草的重要来源,广泛种植于青藏高原<sup>[6]</sup>。燕麦产量高、耐旱、抗寒、牲畜喜食<sup>[7]</sup>;其根系发达,能够深入土壤,增加土壤的稳定性和保水能力<sup>[8]</sup>;同时,燕麦生长迅速,能在较短时间内形成茂盛的植被覆盖<sup>[9]</sup>,从而间接抑制杂草的生长,改善土壤环境<sup>[10]</sup>。饲用豌豆具有固氮作用,能够增加土壤中氮素含量,提高土壤肥力,为后续草种提供良好的生长环境<sup>[11]</sup>。燕麦具有较深、较广的根系分布,能够更好地吸收深层的土壤养分,而豌豆根系更倾向于向深层土壤延伸,从而更好地获取深层土壤中的磷<sup>[12]</sup>和水分<sup>[13]</sup>,二者混播后利用土壤资源增效<sup>[14]</sup>;同时,燕麦对氮肥的需求较高,而饲用豌豆能够结瘤固氮,可为自身及燕麦提供氮肥来源<sup>[15]</sup>,这

种营养需求的互补性使得二者混播草地营养更加均衡<sup>[16]</sup>。当二者混播时,饲用豌豆的茎秆能够缠绕燕麦进行生长,饲用豌豆根系具有固氮能力,能够为燕麦提供养分<sup>[11]</sup>。因此,燕麦和饲用豌豆混播能够有效平衡光照、水分及土壤营养,从而显著提高牧草的自然株高、草产量以及营养成分<sup>[17]</sup>。

燕麦和豌豆混播研究中认为,燕麦在竞争中占有优势,其竞争力大于豌豆<sup>[18]</sup>,这意味着虽然混播能够提高牧草的产量和品质,但在实际应用中需要考虑不同植物之间的竞争关系,以确保资源的有效利用,充分发挥混播的优势。不同混播比例对作物之间的养分竞争产生不同的影响,进而影响作物的生长和发育。深入研究不同混播比例下燕麦和豌豆的养分竞争,对于优化种植模式、提高资源利用效率以及保障农业可持续发展具有重要意义。而现有成果多聚焦单一产量或养分指标,对氮磷钾多元素竞争动态及种间互作机制缺乏系统性解析。因此,本研究对混播体系中燕麦与豌豆的生产性能和养分竞争进行深入分析,以期探究混播系统中燕麦和豌豆的养分竞争状态,为青海省海晏县圈窝地的牧草种植提供科学依据,从而推动畜牧业的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试燕麦品种选用‘青引1号’(*Avena sativa* ‘Qingyin No. 1’),豌豆选用‘青建1号’(*Pisum sativum* ‘Qingjian No. 1’),由青海省畜牧兽医科学院

草原所提供。当燕麦处于抽穗期,豌豆处于开花期时进行刈割。

### 1.2 试验地概况

试验地位于青海省海北藏族自治州海晏县圈窝地(36.93°N,100.86°E,海拔3132.0 m)。该地区属高原亚干旱气候,春季干旱多风,夏季凉爽,秋季短暂,冬季漫长。年平均气温1.5℃,年日照时数2980 h左右,无绝对无霜期,冰雹、霜冻、干旱、风沙等自然灾害频繁。2023年与2024年该区域月平均降水量与气温如图1所示。试验地土壤的有机质含量为69.31 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为1.12 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量为0.98 g·kg<sup>-1</sup>,全钾含量为13.35 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 试验设计

**1.3.1 播前管理** 牧民转场后,收集圈窝内集中堆积的粪便,均匀撒施在圈窝表层,厚度保持在1~2 cm,将圈窝中多余的牛羊粪铲除,用旋耕机一次深翻20~30 cm,清除圈窝内的碎石以及灌木残根,敲碎大块土后耙平,使圈内地面平整,做好圈窝播前准备工作。

**1.3.2 种植与管理** 试验分别于2023年与2024年

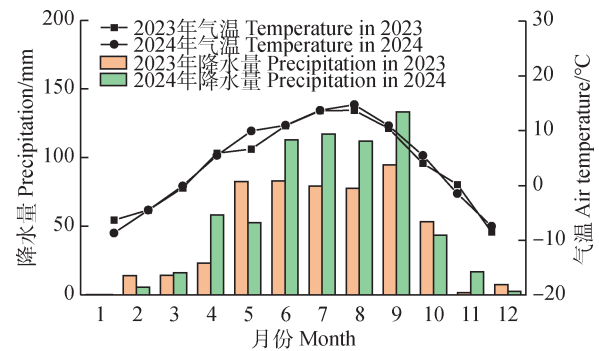


图1 2023–2024年试验区不同月份的降水量和温度

Fig. 1 Precipitation and temperature in different months from 2023 to 2024 in the experimental area

5月下旬开展,采取随机区组试验设计,即燕麦+饲用豌豆混播共设3个处理混播比例O<sub>2</sub>P(2:1),OP(1:1),OP<sub>2</sub>(1:2),另设燕麦单播(MO)、豌豆单播(MP)、各处理设3次重复,每个小区面积为128 m<sup>2</sup>(8 m×16 m)。每个小区禾本科与豆科播量按各单播处理的百分比分别播入,以燕麦+饲用豌豆1:1混播组合为例,燕麦播量=燕麦单播播种量187.5 kg·hm<sup>-2</sup>×50%=93.75 kg·hm<sup>-2</sup>、豌豆播量120 kg·hm<sup>-2</sup>×50%=60 kg·hm<sup>-2</sup>。播种方式为撒播,之后不再进行其他田间管理。

表1 燕麦和饲用豌豆的混播比例与播种量

Table 1 Mixture ratio and sowing amount of oats and peas

| 编号 Code          | 混播比例 Mixture ratio | 播种量 Seeding rate/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |        |
|------------------|--------------------|-----------------------------------------|--------|
|                  |                    | 燕麦 Oat                                  | 豌豆 Pea |
| MO               | 1:0                | 187.50                                  | 0.00   |
| O <sub>2</sub> P | 2:1                | 93.75                                   | 60.00  |
| OP               | 1:1                | 125.00                                  | 40.00  |
| OP <sub>2</sub>  | 1:2                | 62.50                                   | 80.00  |
| MP               | 0:1                | 0.00                                    | 120.00 |

### 1.4 测定指标

**1.4.1 生产性能及农艺性状** 饲草分别于2023年于9月28日以及2024年9月15日进行混合刈割,此时燕麦处于抽穗期、饲用豌豆处于开花期。

**干草产量(Dry grass yield):**在各小区随机选取2个具有代表性的5 m×5 m的样方(远离边行),齐地表刈割,称取其鲜重,置入烘箱中,105℃杀青30 min后调温度至70℃烘干至恒重测得干重。

**株高(Plant height):**在每个小区随机取燕麦(抽穗期)、豌豆(开花期)各10株,测量从地面至植株穗尖的自然高度。

**叶面积(Leaf area):**每个小区各取10片长势均匀的植株,取均匀大小的叶片,用方格法测量叶面积。

**茎叶比(Ratio of stem to leaf):**在测定完鲜草产量之后,将每个单播、混播处理内牧草茎、叶分离,装袋标记、称重,用茎重与叶重的比值来表示茎叶比。

**1.4.2 土地当量比及产量竞争比率** (1)土地当量比(Land equivalent ratio, LER)的计算<sup>[19]</sup>:

$$L = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}}, L_j = \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}}$$

$$L = L_i + L_j$$

式中: $L_i$ 表示混播系统中豌豆的土地当量比, $L_j$ 表示混播系统中燕麦的土地当量比, $L$ 表示混播系统土地当量比。 $Y_{ii}$ 和 $Y_{jj}$ 分别表示豌豆和燕麦的单播产量, $Y_{ij}$ 表示豌豆同燕麦混播时豆科牧草的产量,

$Y_{ji}$ 表示燕麦同豌豆混播系统中燕麦的产量。

(2)竞争比率(Competition rate, CR)的计算<sup>[19]</sup>:

$$C_i = \frac{L_i}{L_j} \times \frac{P_j}{P_i}, C_j = \frac{L_j}{L_i} \times \frac{P_i}{P_j}$$

式中: $C_i$ 表示混播系统中豌豆的竞争比率, $C_j$ 表示混播系统中燕麦的竞争比率。 $L_i$ 表示混播系统中豌豆的土地当量比, $L_j$ 表示混播系统中燕麦的土地当量比, $L$ 表示混播系统土地当量比; $P_i$ 和 $P_j$ 分别表示豌豆和燕麦的混播比例,且 $P_i + P_j = 1$ 。

**1.4.3 氮、磷、钾含量** 将牧草收获后,105℃杀青40 min,60℃烘干后粉碎,用于测定牧草的磷钾氮含量。用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消煮后,用钒钼黄吸光度法<sup>[20]</sup>测定全磷含量,用火焰光度法测定<sup>[20]</sup>全钾含量,用凯氏定氮法测定全氮含量<sup>[21]</sup>。

**1.4.4 氮、磷、钾积累** 氮磷钾积累量以牧草的氮磷钾含量与每平方米的干草产量计算<sup>[22]</sup>得到,计算公式为

$$\text{氮(磷、钾)素积累量}(\text{g} \cdot \text{m}^{-2}) =$$

$$\text{干草产量} \times \text{含氮(磷、钾)量} \times 10^{-4}$$

**1.4.5 氮、磷、钾竞争** 氮磷钾竞争比率(Competition ratio, CR)是度量一种作物相对于另一种作物竞争吸收养分能力强弱的指标。根据Li等<sup>[23]</sup>提供的公式进行计算:

$$CR = \frac{U_j}{U_{mj}} \times \frac{F_j \times U_{mi}}{U_i} \times F_i$$

式中: $U_j$ 和 $U_i$ 分别为燕麦与豌豆的吸氮、磷及钾量, $U_{mj}$ 和 $U_{mi}$ 分别为单作燕麦和单作豌豆的吸氮、磷及钾量, $F_j$ 和 $F_i$ 分别为混播中燕麦与豌豆所占比例。当 $CR > 1$ ,表明燕麦的竞争能力强于豌豆;当 $CR < 1$ ,表明豌豆的竞争能力强于燕麦。

## 1.5 数据处理

采用Excel 2019进行数据整理统计;SPSS 26.0进行显著性检验、单因素方差分析,使用Duncan法进行多重比较分析,结果以算术平均值表示,用Origin 2021进行绘图。 $P < 0.05$ 表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 农艺性状及生产性能

#### 2.1.1 干草产量

$\text{O}_2\text{P}$ ,  $\text{OP}$ ,  $\text{OP}_2$ 的干草产量较

MP均显著提高( $P < 0.05$ ), $\text{O}_2\text{P}$ ,  $\text{OP}$ ,  $\text{OP}_2$ 较MP在2023年显著提高了32.47%,35.99%和24.13%,在2024年分别显著提高34.65%、36.37%和24.40%( $P < 0.05$ )。 $\text{O}_2\text{P}$ 以及 $\text{OP}$ 显示为两年均高于MO,2023年分别提高了6.28%和9.41%,2024年提高了7.80%和8.88%。 $\text{OP}$ 的干草产量最高,MP的干草产量最低。

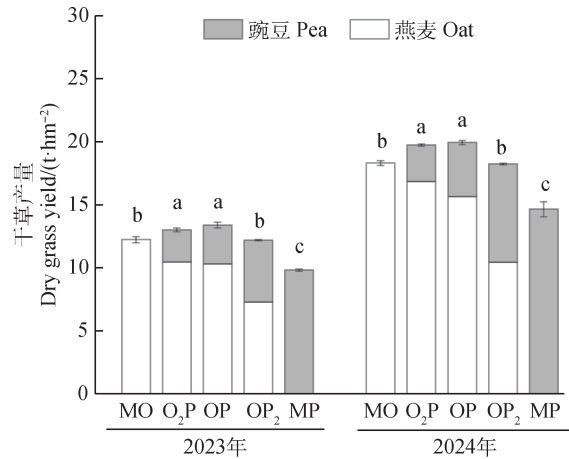


图2 不同比例下混播燕麦与豌豆的干草产量

Fig. 2 Dry grass yield of mixed oats and peas at different proportions

注:MO,  $\text{O}_2\text{P}$ ,  $\text{OP}$ ,  $\text{OP}_2$ , MP代表燕麦与豌豆混播比例分别为1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1。不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著( $P < 0.05$ )。下同

Note: MO,  $\text{O}_2\text{P}$ ,  $\text{OP}$ ,  $\text{OP}_2$ , MP represent oat: pea mixed planting ratios of 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, and 0:1, respectively. Different lower-case letters indicated that there was a significant difference between different treatments at the 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below

**2.1.2 株高** 由图3得,燕麦的株高在两年内有相似趋势,具体表现为, $\text{OP}$ 处理下燕麦的株高最高(图3A),分别为102.5 cm和179.25 cm,较MO分别提高了8.46%和11.10%。2023年MO株高最低,2024年 $\text{OP}_2$ 的株高最低,且显著低于 $\text{OP}$ ( $P < 0.05$ )。豌豆的株高在两年内也呈现相似规律。其中, $\text{OP}$ 处理下豌豆的株高最高(图3B),分别为86.4 cm和175.5 cm。MP的株高最低, $\text{OP}$ 较MP在2023年提高了68.26%,2024年提高了78.38%。同时,2024年 $\text{OP}$ 显著高于 $\text{OP}_2$ ( $P < 0.05$ )。2024年与2023年相比,各比例下燕麦与豌豆的株高均大于2023年。

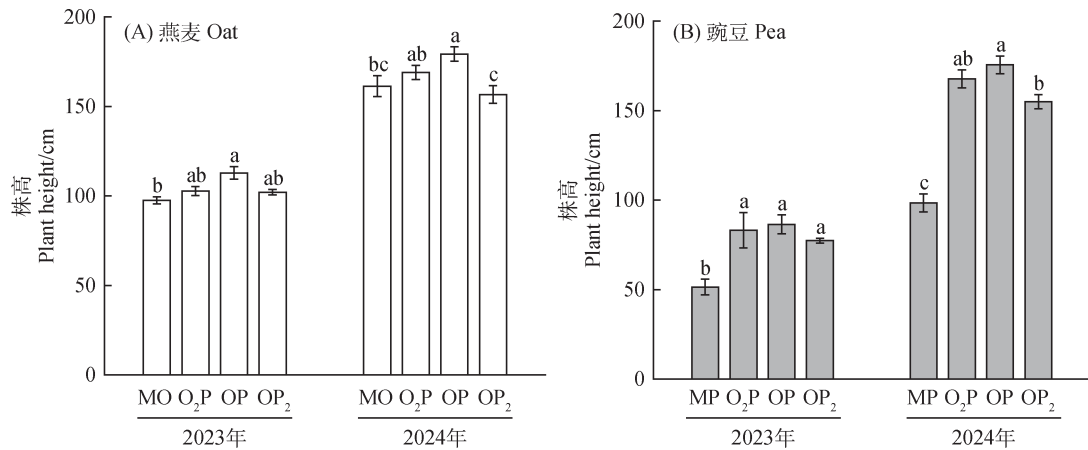


图3 不同比例下混播燕麦与豌豆的株高

Fig. 3 Plant height of mixed sowing oats and peas at different ratios

**2.1.3 叶面积** 由图4得,燕麦与豌豆的叶面积在两年中变化趋势一致。对于燕麦(图4A),两年中,MO的叶面积最高,OP的叶面积最低,MO较O<sub>2</sub>P, P和OP<sub>2</sub>显著高出21.31%, 38.64%和12.10% ( $P < 0.05$ )。混播处理中,OP<sub>2</sub>叶面积显著高于OP

和O<sub>2</sub>P, O<sub>2</sub>P显著高于OP。

对于豌豆(图4B),两年内均显示为MP的叶面积最高,显著高于O<sub>2</sub>P, OP和OP<sub>2</sub>处理 ( $P < 0.05$ ), OP最低,且显著低于MP以及O<sub>2</sub>P。混播处理中, O<sub>2</sub>P较之OP和OP<sub>2</sub>,分别增加了27.95%和27.07%。

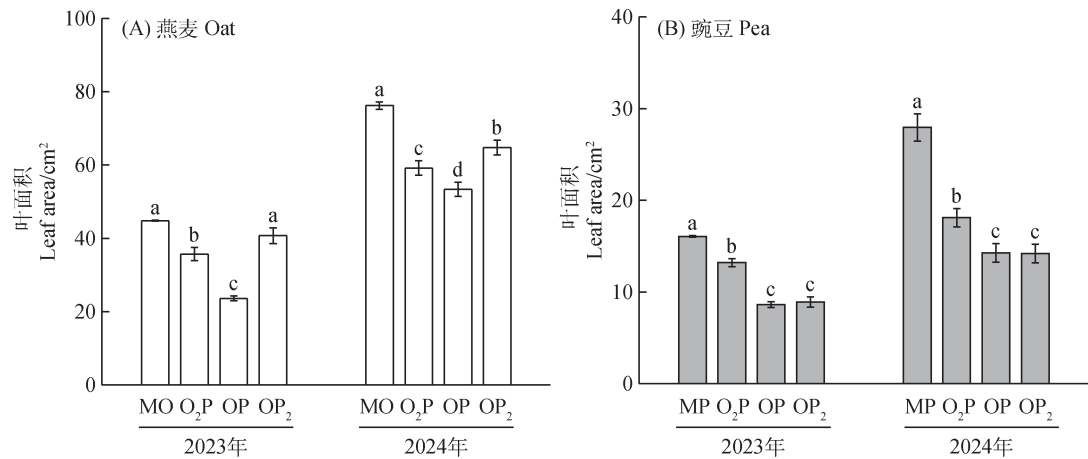


图4 不同比例下混播燕麦与豌豆的叶面积

Fig. 4 Leaf area of mixed sowing oats and peas at different ratios

**2.1.4 茎叶比** 由图5得,不同混播比例下燕麦和豌豆的茎叶比存在显著差异。对于燕麦(图5(A)),两年中均体现为OP的茎叶比最高,分别为4.07和3.90, OP<sub>2</sub>的茎叶比最低,分别为3.11和2.55。OP较MO在2023年显著提高了26.54%, 2024年显著提高了28.76% ( $P < 0.05$ ), OP较O<sub>2</sub>P在2023年提升了14.00%, 2024年提升了9.22%, OP较OP<sub>2</sub>在2023年显著提高了23.59%, 2024年显著提高了34.72% ( $P < 0.05$ )。

由图5(B)得,对于豌豆,两年内均显示为OP的茎叶比最高,分别为1.96和1.99, MP的茎叶比最低,分别为0.94和1.15。OP显著高于MP、O<sub>2</sub>P和OP<sub>2</sub>处理, OP较MP在2023年显著提高了

52.04%, 在2024年显著提高了41.97%, OP较O<sub>2</sub>P在2023年显著提高了21.42%, 2024年显著提高了16.57% ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 不同混播比例下的土地当量比及产量竞争比率

如图6(A)得,燕麦与饲用豌豆不同比例混播两年内LER值均大于1.0,说明混播各组分共同利用资源效率比各组分单独利用资源更有效,混播较单播在使用相同的土地面积下可生产更多的饲草量。两年中, LER均显示为OP最高, OP<sub>2</sub>最低,两年内平均值显示为1.15和1.11。随着饲用豌豆混播比例的上升,燕麦的偏土地当量比随之下降,而饲用豌豆的偏土地当量比则随之上升。

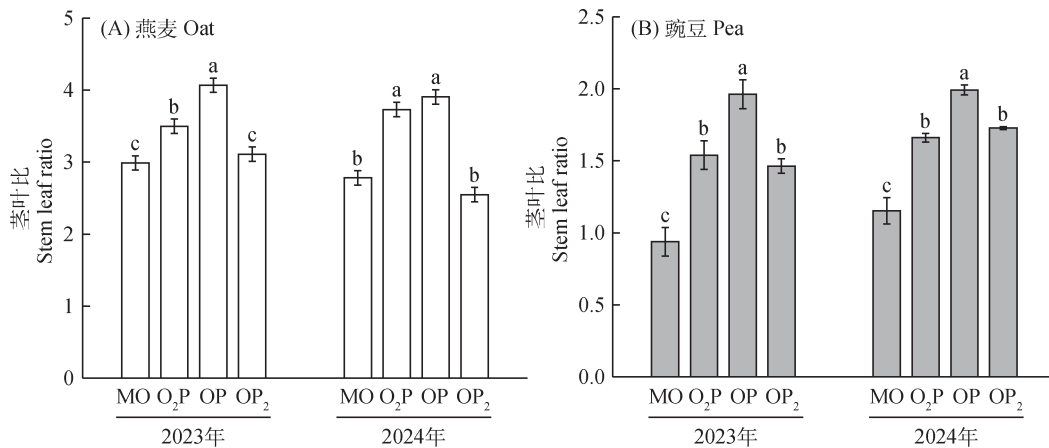


图5 不同比例下混播燕麦与豌豆的茎叶比

Fig. 5 Stem leaf ratio of mixed sowing oats and peas at different ratios

燕麦与饲用豌豆不同比例混播两年内燕麦的产量竞争比率(CR)均大于1.0, O<sub>2</sub>P, OP, OP<sub>2</sub>在2年内平均值分别为1.33, 1.70, 1.75, 均大于1, 表明混播燕麦的种内竞争大于种间竞争, 而两年内饲用

豌豆的CR则小于1, 表明混播饲用豌豆的种间竞争大于种内竞争。随着混播比例的上升, 燕麦的相对产量随之上升, 饲用豌豆则先下降后上升, OP为最低。

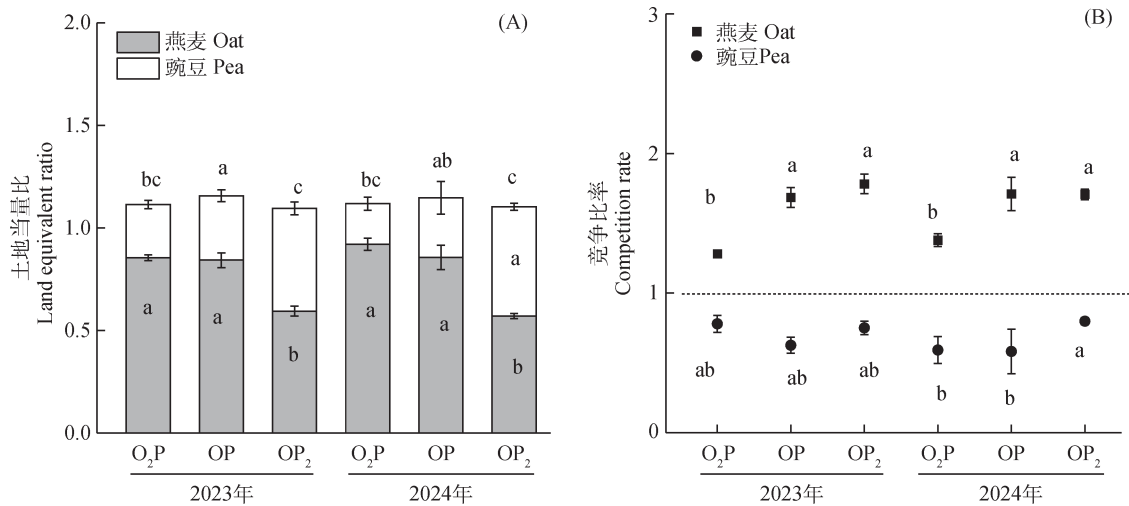


图6 不同混播比例下混播系统中的土地当量(A)比及产量竞争比率(B)

Fig. 6 Land equivalent ratio and competition rate under different intercropping ratios

## 2.3 不同混播比例下对氮的竞争

**2.3.1 氮含量** 不同比例下混播燕麦与豌豆的氮含量如图7所示。两年内燕麦的氮含量均为O<sub>2</sub>P最高, 为1.46 g·kg<sup>-1</sup>和1.77 g·kg<sup>-1</sup>, MO的氮含量最低, 分别为1.31 g·kg<sup>-1</sup>和1.37 g·kg<sup>-1</sup>。其中, O<sub>2</sub>P的氮含量显著高于MO, 2023年高出9.6%, 2024年高出22.78%。豌豆的氮含量显示为MP的全氮含量最高, 为2.22 g·kg<sup>-1</sup>和2.44 g·kg<sup>-1</sup>, O<sub>2</sub>P的氮含量最低, 为1.89 g·kg<sup>-1</sup>和2.23 g·kg<sup>-1</sup>, O<sub>2</sub>P较MP在2023年显著降低了14.71%, 2024年显著降低了8.65% ( $P < 0.05$ )。

**2.3.2 氮积累** 不同比例下混播燕麦与豌豆的氮

积累量如图8所示。图8(A)得, 燕麦的氮积累量2023年体现为MO最高, 为1.61 g·m<sup>-2</sup>, 2024年显示为O<sub>2</sub>P的氮积累量最高, 为2.98 g·m<sup>-2</sup>, 2023年与2024年均显示为OP<sub>2</sub>氮积累量最低, 分别为0.97 g·m<sup>-2</sup>和1.57 g·m<sup>-2</sup>。2023年OP<sub>2</sub>显著低于OP, O<sub>2</sub>P较MO在2023年降低了5.43%, 在2024年升高了19.11%。由图8(B)得, 豌豆的氮积累量两年中均为MP最高, O<sub>2</sub>P, OP和OP<sub>2</sub>处理间存在显著差异。OP较O<sub>2</sub>P在2023年显著增加了25.62%, 2024年显著增加了54.24%, OP<sub>2</sub>较OP在2023年显著增加了69.64%, 在2024年显著增加了88.9% ( $P < 0.05$ )。

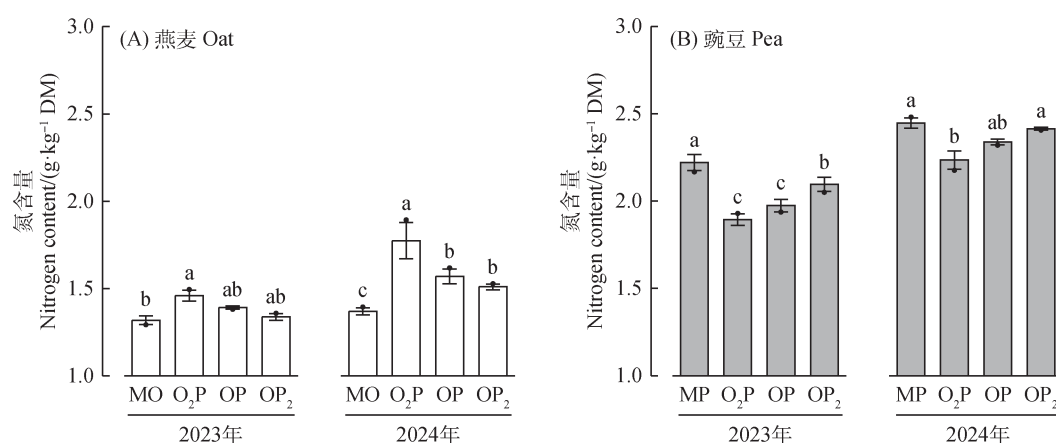


图 7 不同比例下混播燕麦与豌豆的氮含量

Fig. 7 Nitrogen content of mixed sowing oats and peas at different ratios

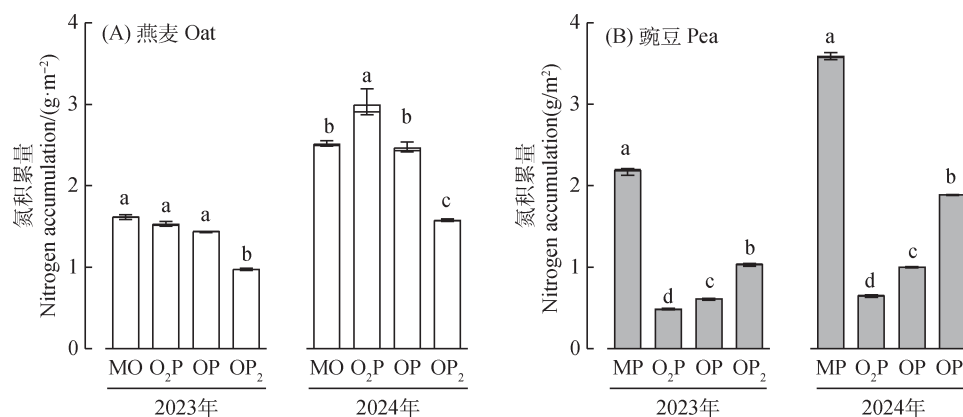


图 8 不同比例下混播燕麦与豌豆的氮积累量

Fig. 8 Nitrogen accumulation of mixed sowing oats and peas at different ratios

**2.3.3 氮竞争比率** 由图 9 得, 2023 年与 2024 年结果相似。在 3 个混播比例下, 燕麦对于氮的竞争

比率始终大于 1, 豌豆对于氮的竞争比率始终小于 1, 燕麦对于氮的竞争强于豌豆。

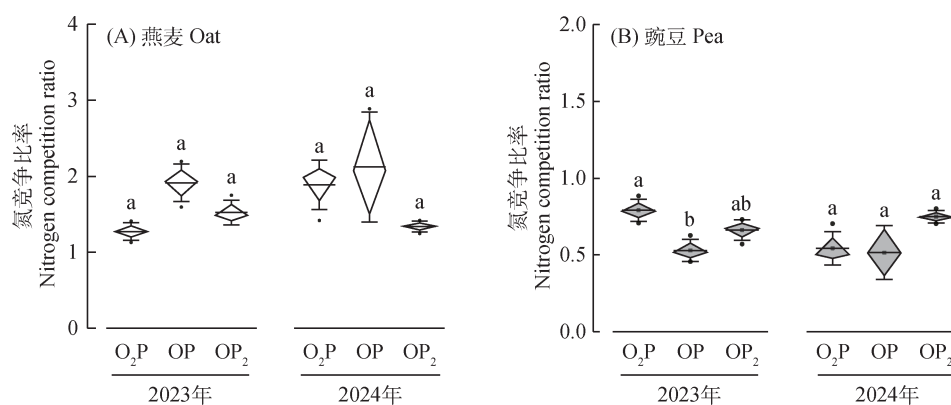


图 9 不同比例下混播燕麦与豌豆的氮竞争比率

Fig. 9 Competition ratio of nitrogen between mixed oats and peas under different ratios

## 2.4 不同混播比例下对磷的竞争

**2.4.1 磷含量** 由图 10 得, 不同混播比例下燕麦与豌豆的磷含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。由图 10 (A) 得, 对于燕麦, 两年中均表现为  $OP_2$  磷含量最

低, 为  $0.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $O_2P$  磷含量最高, 为  $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。  $O_2P$  显著高于  $MO$ , 两年内分别提高了 29.86% 和 40.94%。

对于豌豆 (图 10(B)), 两年均显示为  $MP$  的磷含量

最高,分别为 $0.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{O}_2\text{P}$ 的磷含量最低,分别为 $0.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 $\text{O}_2\text{P}$ 较MP两年中显著降低了43.55%和32.67%( $P<0.05$ ),OP

较MP在2023年显著降低了35.28%,在2024年显著降低了30.04%, $\text{OP}_2$ 较MP在2023年显著降低了28.57%,在2024年显著降低了21.85%( $P<0.05$ )。

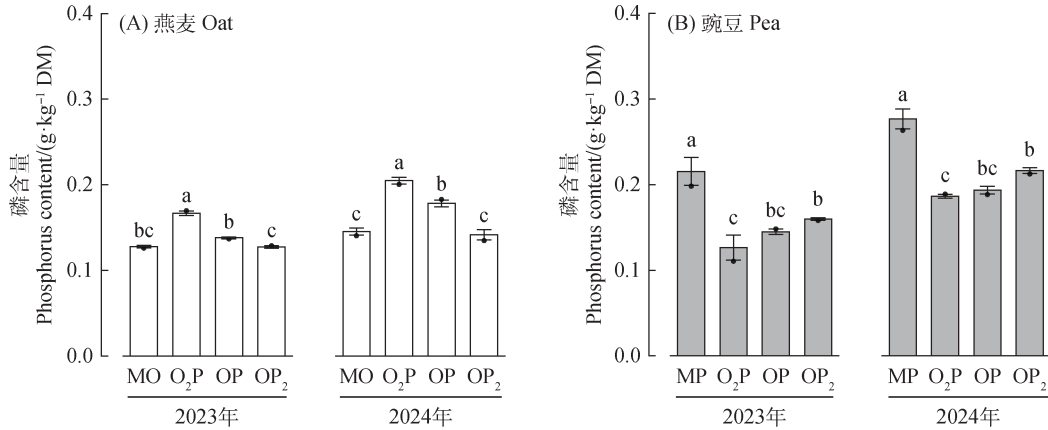


图10 不同比例下混播燕麦与豌豆的磷含量

Fig. 10 Phosphorus content of mixed sowing oats and peas at different ratios

**2.4.2 磷积累量** 不同比例下混播燕麦与豌豆的磷积累量如图11所示。燕麦的磷积累量两年内均显示为 $\text{O}_2\text{P}$ 最高,分别为 $0.17 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.34 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,2023年和24年均均为 $\text{OP}_2$ 最低, $\text{O}_2\text{P}$ 显著高

于MO,OP及 $\text{OP}_2$ 处理,OP较 $\text{O}_2\text{P}$ 在2023年降低了18.38%,在2024年降低了19.08%, $\text{OP}_2$ 较 $\text{O}_2\text{P}$ 在2023年降低了46.90%,2024年降低了57.17%。

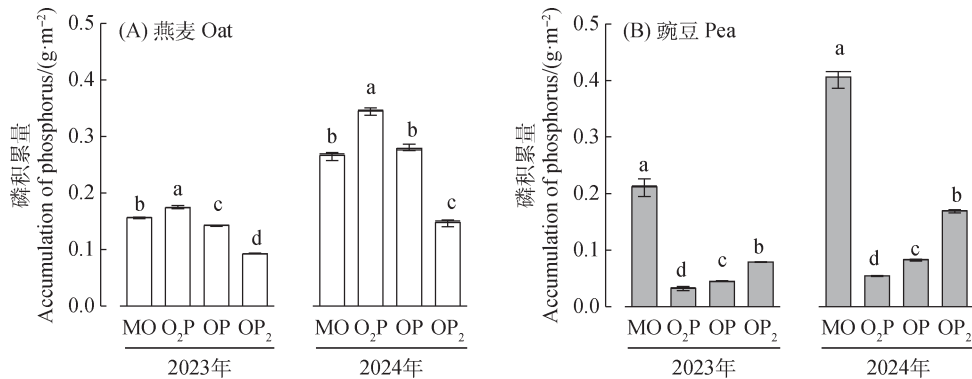


图11 不同比例下混播燕麦与豌豆的磷积累量

Fig. 11 Phosphorus accumulation of mixed sowing oats and peas at different ratios

豌豆在两年内显示为MP的磷积累量最高,分别为 $0.21 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.41 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,2023年与2024年均均为 $\text{O}_2\text{P}$ 最低,分别为 $0.03 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.05 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。 $\text{O}_2\text{P}$ 较MP在2023年显著降低了84.73%,2024年显著降低了86.70%,OP较MP在2023年显著降低了78.91%,2024年显著降低了79.62%; $\text{OP}_2$ 较MP在2023年显著降低了62.80%,2024年显著降低了58.35%。

**2.4.3 磷竞争比率** 由图12得,2023年与2024年结果相似。在3个混播比例下,燕麦对于磷的竞争比率始终大于1,豌豆对于磷的竞争比率始终小于1,燕麦对于磷的竞争强于豌豆。

## 2.5 不同混播比例下对钾的竞争

**2.5.1 钾含量** 图13得,不同混播比例下燕麦与豌豆的钾含量存在显著差异( $P<0.05$ )。对于燕麦,两年内均显示为MO的钾含量最高,分别为 $12.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $13.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{OP}_2$ 的钾含量最低,分别为 $9.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且随着燕麦混播比例的下降,燕麦钾含量随之下降。其中,OP较MO在2023年显著下降了11.11%,在2024年显著下降了23.15%, $\text{OP}_2$ 较MO显著下降了18.63%和27.81%( $P<0.05$ )。

对于豌豆,两年内均显示为 $\text{OP}_2$ 的钾含量最高,为 $9.39 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{O}_2\text{P}$ 的钾含量最低,分别为 $6.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{OP}_2$ 较MP在2023年显著提高了16.06%,2024年显著提高了13.37%( $P<0.05$ )。

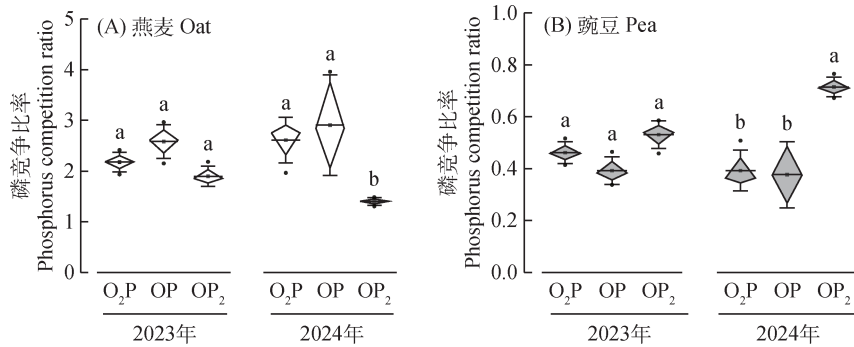


图 12 不同比例下混播燕麦与豌豆的磷竞争比率

Fig. 12 Competition ratio of phosphorus between mixed oats and peas under different ratios

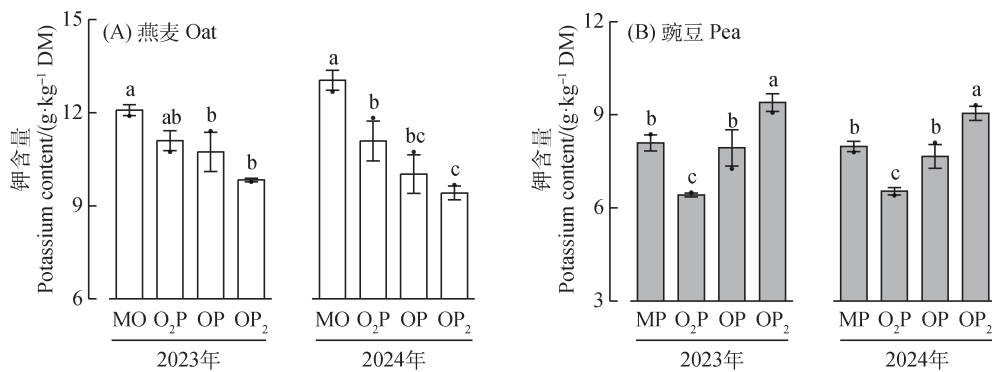


图 13 不同比例下混播燕麦与豌豆的钾含量

Fig. 13 Potassium content of mixed sowing oats and peas at different ratios

**2.5.2 钾积累** 由图 14 得,不同混播比例下燕麦的钾积累量存在显著差异。燕麦两年内的钾积累量 2023 年与 2024 年均以 MO 最高,分别为  $14.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $23.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\text{OP}_2$  最低,为  $7.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $9.81 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。  $\text{O}_2\text{P}$  较 MO 在 2023 年显著下降了 21.51%,在 2024 年显著下降了 21.79%,  $\text{OP}_2$  较 OP 在 2023 年降低了

35.46%,2024 年  $\text{OP}_2$  较 OP 降低 37.48%。

对于豌豆,两年间豌豆的钾积累量均显示为 MP 最高,分别为  $7.95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $11.69 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。  $\text{O}_2\text{P}$  较 MP 在 2023 年显著下降了 79.38%,2024 年显著下降了 83.82%,OP 较 MP 在 2023 年显著下降了 69.27%,2024 年显著下降了 72.04%。

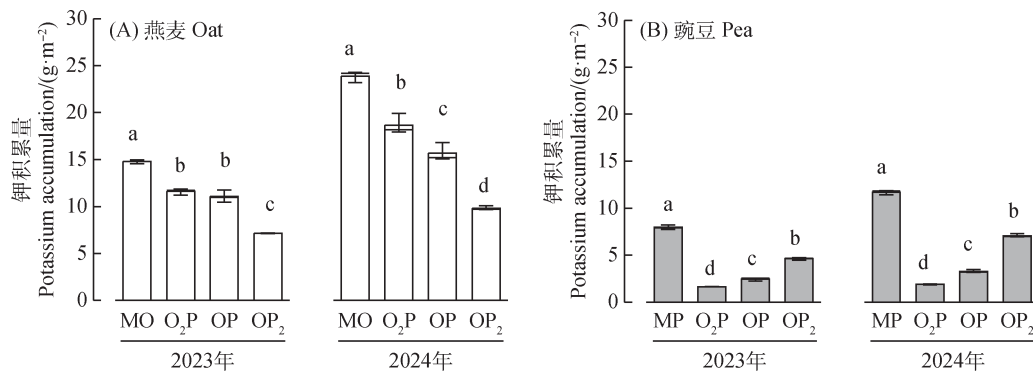


图 14 不同比例下混播燕麦与豌豆的钾积累量

Fig. 14 Potassium accumulation of mixed sowing oats and peas at different ratios

**2.5.3 钾竞争比率** 由图 15 得,在 3 个混播比例下,2023 年以及 2024 年结果相似。燕麦对于钾的竞争比率在  $\text{O}_2\text{P}$  以及 OP 比例下始终大于 1,燕麦在  $\text{O}_2\text{P}$  以及 OP 下对于钾的竞争能力强于饲用豌豆,  $\text{OP}_2$  比例下燕麦对于钾的竞争比率小于 1,饲用豌豆的钾的竞争比率大于 1,饲

用豌豆在  $\text{OP}_2$  比例下对于钾的竞争能力强于燕麦。

## 2.6 相关性分析

由皮尔逊相关性分析结果(图 16)可得,燕麦与豌豆在不同混播比例下混播后,燕麦的干草产量与株高呈显著正相关关系,氮含量与磷含量呈显著正

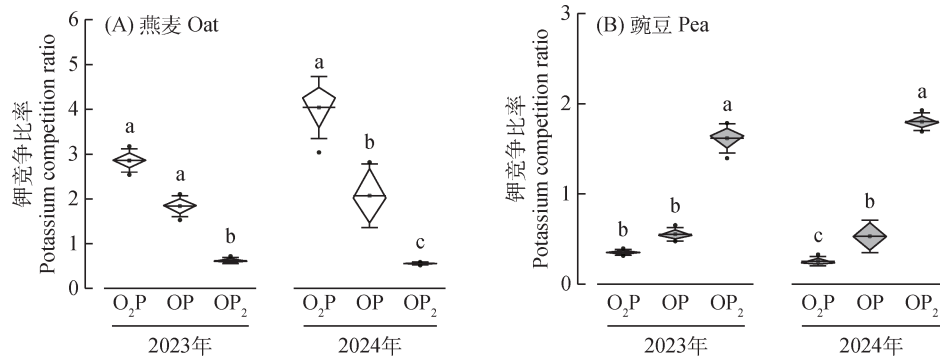


图15 不同比例下混播燕麦与豌豆的钾竞争比率

Fig. 15 Competition ratio of potassium between mixed oats and peas under different ratios

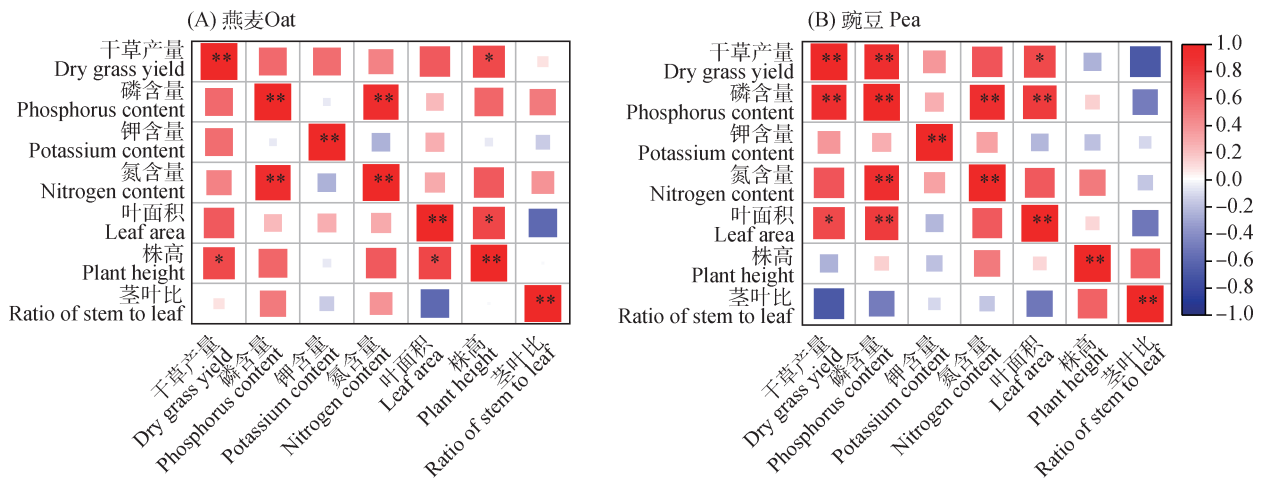


图16 不同混播比例下燕麦与豌豆的相关性分析

Fig. 16 Correlation analysis between oats and peas under different mixed planting ratios

注: \*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$

Note: \*,  $P < 0.05$ , \*\*,  $P < 0.01$

相关关系, 株高与叶面积呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。

豌豆的干草产量与磷含量、叶面积呈显著正相关关系, 同时, 磷含量与干草产量、氮含量以及叶面积呈显著正相关关系; 叶面积与干草产量以及磷含量呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

在本试验中, 燕麦与豌豆不同混播比例对二者生长发育、养分吸收分配的影响不同。随着燕麦混播比例降低、豌豆混播比例上升, 燕麦干草产量下降, 豌豆的则上升。混播比例为 1:1 时, 燕麦和豌豆的株高及茎叶比均达到最高, 这可能由于该比例下燕麦与豌豆对于光、空间等资源竞争激烈, 牧草徒长, 进而影响株高、叶面积与茎叶比的变化, 燕麦与豌豆通过茎秆缠绕优化了光资源截获与形态建成。燕麦与豌豆单播下各自叶面积最高; 混播时, 燕麦

在 1:2 混播比例下叶面积最高, 豌豆则在 2:1 混播比例下最高。这可能是由于当混播比例为 2:1 时, 燕麦的直立茎秆为豌豆提供了有效的生物支撑, 显著改善了豌豆的冠层光环境, 从而使豌豆的叶面积达到最大。当比例为 1:2 时, 豌豆通过生物固氮增强了土壤氮素供应, 同时其对燕麦形成的弱遮荫环境, 触发了燕麦的避荫反应, 促使燕麦增加株高与叶面积以增强光截获能力, 因此燕麦叶面积在此比例下最高。此结果与 Klimek-Kopyra 等<sup>[24]</sup>对于在裸燕麦与蚕豆的间作系统中, 无限生长型蚕豆表现出更高的叶面积指数 (LAI), 表明豌豆在混播中占据更多光合资源。本研究观察到叶面积随混播比例出现逆转现象, 这可能是由于青藏高原高辐射环境强化了种间光竞争所致。杜国祯等<sup>[25]</sup>的研究表明, 箭筈豌豆在与燕麦混播时处于竞争劣势, 其生长受到显著抑制, 这与本研究关于燕麦竞争优势的结论一致, 但本研究进一步发现, 这种抑制关系会随混播比例发生动态变化。赵保文等<sup>[26]</sup>的研究指出, 燕麦

与箭筈豌豆以1:1混播时株高最高,马晓东<sup>[16]</sup>等也报道了混播后株高显著高于单播,这些结果均支持了本研究关于混播促进植株垂直生长的发现。

试验发现,在混播条件下,当燕麦与豌豆混播比例为2:1和1:1时,燕麦的氮和磷含量均高于其单播含量,但钾含量有所下降;相比之下,豌豆的氮、磷含量均低于其单播处理,但当燕麦与豌豆混播比例为1:2时,K含量高于其单播处理。这可能是由于在混播系统中,燕麦与豌豆的混播通过影响植物间的竞争与互补关系,优化了氮、磷、钾等养分的分配和利用效率<sup>[27]</sup>。豌豆具有生物固氮能力,能改善土壤氮素环境,在一定混播比例下可促进燕麦对氮的吸收<sup>[10]</sup>,混播还会影响土壤有机质、碱解氮等养分的含量,从而间接影响植物对氮磷钾的吸收和积累<sup>[28]</sup>。

本试验结果表明,在燕麦/豌豆混播系统中,两种作物对氮、磷、钾的竞争能力存在显著差异。燕麦对氮和磷的竞争能力在所有比例下均占优势,这与董祥开等<sup>[29]</sup>的研究结论一致,可能归因于燕麦发达的深广根系<sup>[30]</sup>能优先获取深层土壤的磷资源<sup>[31]</sup>。然而,对钾的竞争则呈现出明显的比例依赖性:在燕麦占优的2:1和1:1比例下,其竞争能力强于豌豆;但在豌豆占优的1:2比例下,豌豆对钾的竞争能力反超燕麦,其钾含量也较单播显著提高。这种钾竞争格局的逆转,可能与不同比例下根际过程的差异有关。在1:2比例下,豌豆群体密度增大,其根瘤菌共生体系能分泌更多如脯氨酸、琥珀酸等小分子有机物<sup>[32]</sup>。这些物质能通过螯合作用破坏含钾矿物的晶格结构,并竞争土壤胶体上的吸附位点,从而显著提升速效钾的释放量<sup>[33]</sup>。同时,豌豆根系分泌的磷酸酶等酶活性通常高于禾本科燕麦<sup>[34]</sup>,有助于通过促进有机质分解来释放有机结合态钾。相比之下,燕麦根系分泌有机酸的能力有限,对难溶性钾的活化作用较弱,且主要依赖高亲和性转运体吸收已活化的钾<sup>[32]</sup>,因此在豌豆密度高时其钾获取相对受到抑制。最终,各处理下氮、磷、钾养分积累量的变化趋势与干草产量高度一致,符合“养分吸收是干物质积累的重要前提”这一基本规律<sup>[35]</sup>。

本试验的相关性分析表明,燕麦与豌豆在混播系统中采用了不同的养分利用与生长分配策略。对于燕麦,其氮含量与磷含量呈显著正相关,说明氮素供应的增加直接促进了体内氮积累。干草产量与叶面积的显著正相关关系,说明干物质生产主

要依赖光合器官的扩展。叶面积与株高呈正相关,叶面积与株高呈显著正相关,表明燕麦可通过增加株高、拓展生长空间,从而提高对光资源的捕获能力,以适应混播系统的生长环境。对于豌豆,其干草产量与磷含量、叶面积呈显著正相关关系,表明光合器官的扩展是其生物量积累的直接基础。磷含量与干草产量、氮含量以及叶面积呈显著正相关关系,说明豌豆对氮、磷养分存在协同吸收与利用的特性;叶面积与干草产量以及磷含量呈显著正相关关系,说明磷供应在驱动其光合结构建成中的关键作用。这些结果与张筠钰等<sup>[36]</sup>的结论,即燕麦和豌豆的叶面积、株高等形态特征与其干草产量密切相关,在混播系统中通过竞争与互补作用相互影响。本试验中,在1:2混播比例下饲用豌豆仍能维持较高的生产力,这与杜国祯等<sup>[24]</sup>关于豆科植物在混播中常处竞争弱势的一般性结论有所差异。这一差异是由于饲用豌豆的攀缘生长习性,该习性有助于缓解其对直立作物(燕麦)的竞争压力,从而在特定空间配置下更有效地利用光资源和空间。

综上,燕麦与豌豆在不同混播比例下表现出显著的相关性关系,可能是混播比例、氮磷相互作用、根系吸收能力以及植株间的竞争与互补作用共同作用的结果。这意味着在优化混播种植模式时,可通过调控混播比例,改善植株的养分吸收和生长环境,促进干物质积累,提高牧草产量和品质。

## 4 结论

本研究通过田间试验探究了青海高寒地区燕麦与饲用豌豆混播系统的养分竞争与生产性能。结果表明,混播系统表现出显著的土地利用优势,其中燕麦与豌豆混播比例为1:1时干草产量最高。燕麦在混播中竞争优势显著,对氮、磷的竞争能力强于豌豆;而豌豆处于竞争劣势,燕麦与豌豆混播比例为1:2时对钾的竞争能力超过燕麦。综上,燕麦与豌豆混播通过种间互补效应提高了资源利用效率,1:1比例种植下干草产量最高。该结果为高寒地区饲草生产提供了优化种植模式的理论依据。

## 参考文献

- [1] 胥成梅. 青海省海晏县草原生态环境治理对策[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2009(24):33-35
- XU C M. Countermeasures of grassland ecological environment control in Haiyan county, Qinghai Province[J]. Heilongji-

- ang Animal Science and Veterinary Medicine, 2009(24):33-35, 2009(24):33-35
- [2] 李成云. 青海省草原生态畜牧业发展现状及建议[J]. 畜牧兽医科技信息, 2020(9):188
- LI C Y. Development status and suggestions of grassland ecological animal husbandry in Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2020(9):188
- [3] 张世萍. 海晏县加强草业建设发展意见[J]. 青海草业, 2016, 25(4):42-45
- ZHANG S P. Opinions on strengthening grass industry construction and development in Haiyan County[J]. Qinghai Prataculture, 2016, 25(4):42-45
- [4] 宋国英, 普布贵吉, 秦基伟. 藏北牧区圈窝饲草种植及应用前景[J]. 西藏农业科技, 2019, 41(1):71-73
- SONG G Y, PUBUGUI J, QIN J W. Forage planting in corrals and application prospects in Northern Tibetan pastoral areas[J]. Tibet Agricultural Science and Technology, 2019, 41(1):71-73
- [5] 王俊伶. 互助县家庭圈窝种植燕麦现状及前景[J]. 现代畜牧兽医, 2009(11):39-40
- WANG J L. Current situation and prospect of oat planting in family corrals in Huzhu County[J]. Modern Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2009(11):39-40
- [6] TAMIRU M, ALKHTIB A, BELACHEW B, et al. Oat - Field Pea Intercropping for sustainable oat production: effect on yield, nutritive value and environmental impact[J]. Sustainability, 2023, 15(4):3514
- [7] RAMIN M, FANT P, HUHTANEN P. The effects of gradual replacement of barley with oats on enteric methane emissions, rumen fermentation, milk production, and energy utilization in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(5):5617-5630
- [8] 刘文辉, 魏小星, 刘芳, 等. 高寒区施肥和混播对燕麦人工草地植物器官碳氮储量分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4):100-106
- LIU W H, WEI X X, LIU F, et al. Effects of fertilization and mixed sowing on carbon and nitrogen storage allocation in plant organs of oat artificial grassland in alpine region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4):100-106
- [9] 王娟, 李荫藩, 杨富, 等. 除草剂对不同燕麦品种杂草防治效果及其产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(19):133-137
- WANG J, LI Y F, YANG F, et al. Effects of herbicides on weed control efficacy and yield of different oat varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(19):133-137
- [10] 关正翔, 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, NAERKEZI, ZHU Y Q, et al. Production performance and soil nutrient characteristics of oat+ *Vicia sativa* mixed grassland under different mixed sowing methods[J]. Prataculture Science, 2019, 36(3):772-784
- [11] 吴晓娟, 杨梅, 芦奕晓, 等. 混播比例和施氮肥对箭筈豌豆/燕麦草地根系特性的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(9):106-116
- WU X J, YANG M, LU Y X, et al. Effects of mixed sowing ratio and nitrogen fertilization on root characteristics of *Vicia sativa*/oat grassland[J]. Acta Prataculture Sinica, 2019, 29(9):106-116
- [12] PLAZA J, CRIADO M, MORALES-CORTS M R, et al. Yield and nutritional quality of intercropped forages for organic production in a hot-summer Mediterranean oak grassland ecosystem[J]. Crop and Pasture Science, 2024, 75:CP23172
- [13] 周娟娟, 白玛嘎翁, 魏巍, 等. 西藏高寒区禾-豆混播对牧草营养品质及土壤养分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2):143-149
- ZHOU J J, BAIMA Gawong, WEI W, et al. Effects of grass-legume mixed sowing on forage nutritional quality and soil nutrients in the alpine region of Tibet[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2):143-149
- [14] 杨鹏年, 杜文华, 田新会. 甘南高寒牧区加拿大饲用燕麦与豌豆的混播效果研究[J]. 中国草地学报, 2022, 44(3):39-48
- YANG P N, DU W H, TIAN X H. Study on the mixed sowing effect of Canadian forage oats and peas in the alpine pastoral area of Gannan[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(3):39-48
- [15] 渠佳慧, 李立军, 李晓婷. 燕麦与箭筈豌豆不同行比例间作对饲草产量及土壤理化性状的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(5):1176-1183
- QU J H, LI L J, LI X T. Effects of different row ratio intercropping of oats and *Vicia sativa* on forage yield and soil physical and chemical properties[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5):1176-1183
- [16] 马晓东, 孙金金, 汪鹏斌, 等. 青海三江源区燕麦与豆类混播对草产量和品质的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(7):21-27
- MA X D, SUN J J, WANG P B, et al. Effects of oat and legume mixed sowing on grass yield and quality in the Sanjiangyuan region of Qinghai[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(7):21-27
- [17] KRGA I, SIMIĆ A, DŽELETOVIĆ Ž, et al. Biomass and protein yields of field peas and oats intercrop affected by sowing norms and nitrogen fertilizer at two different stages of growth[J]. Agriculture, 2021, 11(9):871
- [18] 辛亚芬, 张磊, 陈晨, 等. 燕麦与箭筈豌豆混播草地牧草产量及种间关系研究[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(6):935-941
- XIN Y F, ZHANG L, CHEN C, et al. Study on forage yield and interspecific relationship in Oat and *Vicia sativa* mixed grassland[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(6):935-941
- [19] 张辉辉. 紫花苜蓿与不同生活型多年生禾草混播草地竞争关系及生产力[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022:26-27
- ZHANG H H. Competition relationship and productivity of alfalfa mixed with perennial grasses of different life forms [D].

- Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022: 26-27
- [20] 高秀丽. 土壤和植物分析测试方法[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2022: 11
- GAO X L. Soil and plant analysis testing methods[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2022: 11
- [21] SRAVYA C G, KUMAR U K, GAUTAM S, et al. Assessing the nutrient balance and nutrient use efficiency of various concentration of low-density polyethylene (LDPE) on green gram (*Vigna radiata* L. Wilczek) cultivation[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2024, 14(4): 750-758
- [22] 王亚江, 魏海燕, 颜希亭, 等. 光、氮及其互作对超级梗稻产量和氮、磷、钾吸收的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1235-1244
- WANG Y J, WEI H Y, YAN X T, et al. Effects of light, nitrogen and their interaction on yield and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in super japonica rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(7): 1235-1244
- [23] LI C, LI Y, YU C, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1-2): 221-231
- [24] AGNIESZKA K K, KULIG B, OLEKSY A, et al. Agronomic performance of naked oat (*Avena nuda* L.) and faba bean intercropping[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2015, 75(2): 168-173
- [25] 杜国祯, 王刚, 赵松岭. 两种一年生植物在替代试验中的相互竞争关系[J]. 草业学报, 1993(1): 6-14
- DU G Z, WANG G, ZHAO S L. Competition between two annual plants in substitution experiments[J]. Acta Prataculturae Sinica, 1993(1): 6-14
- [26] 赵保文, 詹圆, 方嘉琪, 等. 混播比例对燕麦与箭筈豌豆生产性能的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(3): 81-90
- ZHAO B W, ZHAN Y, FANG J Q, et al. Effects of mixed sowing ratio on production performance of oat and *Vicia sativa* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(3): 81-90
- [27] 秦燕, 刘勇, 张永超, 等. 不同混播比例对燕麦和箭筈豌豆混播草地植物生长特征的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1768-1774
- QIN Y, LIU Y, ZHANG Y C, et al. Effects of different mixed-sowing ratios on plant growth characteristics of oat and *Vicia sativa* mixed grassland[J]. Acta Agrestis Sinica, 2020, 28(6): 1768-1774
- [28] 来幸樑, 师尚礼, 吴芳, 等. 紫花苜蓿与 3 种多年生禾草混播草地的土壤养分特征[J]. 草业科学, 2020, 37(1): 52-64
- LAI X L, SHI S L, WU F, et al. Soil nutrient characteristics of alfalfa mixed with three perennial grasses[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(1): 52-64
- [29] 董祥开, 刘恩财, 衣莹, 等. 氮磷钾对燕麦产量和品质的影响研究进展[J]. 农机化研究, 2008(11): 219-222
- DONG X K, LIU E C, YI Y, et al. Research progress on the effects of nitrogen, phosphorus and potassium on oat yield and quality[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(11): 219-222
- [30] 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. Measurement and influencing factors analysis of mixing advantages in oat+*Vicia sativa* mixed grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(1): 74-85
- [31] 张小明, 来兴发, 杨宪龙, 等. 施氮和燕麦/箭筈豌豆间作比例对系统干物质和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 489-498
- ZHANG X M, LAI X F, YANG X L, et al. Effects of nitrogen application and oat/*Vicia sativa* intercropping ratio on dry matter yield and nitrogen utilization in the system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 489-498
- [32] 王旭, 曾昭海, 朱波, 等. 箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2007(11): 1892-1895
- WANG X, ZENG Z H, ZHU B, et al. Effects of different intercropping and mixed-sowing patterns of *Vicia sativa* and oat on yield and quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007(11): 1892-1895
- [33] 张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等. 菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6016-6022
- ZHANG L, HUANG J G, HAN Y Z, et al. Activation effect of rhizobia from *Phaseolus vulgaris* on soil potassium[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6016-6022
- [34] 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. Research progress on interspecific relationships in legume-grass mixed sown grasslands[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(3): 284-296
- [35] 傅晨野, 李多, 滕思远, 等. 化肥配施复合微生物肥对大豆养分积累及产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2024, 43(1): 54-63
- FU C Y, LI D, TENG S Y, et al. Effects of combined application of chemical fertilizers and compound microbial fertilizers on nutrient accumulation, yield and quality of soybean[J]. Soybean Science, 2024, 43(1): 54-63
- [36] 张筠钰, 吴晓娟, 吴宛萍, 等. 施氮对箭筈豌豆/燕麦间作系统叶性状和土壤矿质氮含量的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(11): 52-61
- ZHANG J Y, WU X J, WU W P, et al. Effects of nitrogen application on leaf traits and soil mineral nitrogen content in *Vicia sativa*/oat intercropping system[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(11): 52-61