

饲草间作方式对增产及节水效应的影响

马龙¹, 刘华清², 高晓东^{2,3}, 赵西宁^{2,3}

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 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; 3.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究黄土高原 4 种多年生饲草不同间作方式对其生长、光合生理特征及土壤水分的综合影响, 筛选最优间作方式, 为黄土高原建设高产、高效、可持续的人工草地提供理论支撑。[方法] 以紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、无芒雀麦 (*Bromus inermis*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 4 种多年生饲草为研究对象, 设置单作、两物种、三物种和四物种间作方式, 分析不同间作方式对饲草生长、光合作用和水分利用的影响。[结果] 各间作模式相对产量总和均大于 1。紫花苜蓿与无芒雀麦间作处理的相对产量总和达到 2.08, 其中, 无芒雀麦生物量达到单作的 279.1%, 紫花苜蓿达到单作的 132.4%。二者间作处理显著提高了紫花苜蓿的净光合速率和蒸腾速率 ($p < 0.05$), 对无芒雀麦净光合速率无显著影响, 但显著提高了其叶片水分利用效率 ($p < 0.05$)。紫花苜蓿与无芒雀麦间作增加了深层土壤含水量。熵权-TOPSIS 综合评价结果表明: 紫花苜蓿与无芒雀麦间作在饲草产量、生长生理特征、水土资源利用效率和土壤贮水能力方面的综合效应最优, 禾本科单作综合效应最差。[结论] 合理的间作方式能够优化土壤水分垂直分布, 提高饲草的净光合速率, 从而提高间作系统的产量和水分利用效率。紫花苜蓿与无芒雀麦间作方式能够提高间作系统的生产力和水分利用效率, 为黄土高原半干旱区饲草间作方式优化提供了重要实践参考。

关键词: 饲草间作; 生长特征; 生理特征; 水分利用; 种间竞争

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0161-12

中图分类号: Q945.79

文献参数: 马龙, 刘华清, 高晓东, 等. 饲草间作方式对增产及节水效应的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 161-172. Ma Long, Liu Huaqing, Gao Xiaodong, et al. Effects of forage intercropping methods on yield and water use efficiency [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 161-172. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.027; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.027.

Effects of forage intercropping methods on yield and water use efficiency

Ma Long¹, Liu Huaqing², Gao Xiaodong^{2,3}, Zhao Xining^{2,3}

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The comprehensive effects of different intercropping methods of four perennial forage grasses on growth, photosynthesis, and soil moisture in the Loess Plateau were analyzed. Screening of the optimal intercropping method was also done to provide theoretical support for establishing high-yield, efficient, and sustainable artificial grasslands in the Loess Plateau. [Methods] Four perennial forage grasses (*Medicago sativa*, *Bromus inermis*, *Elymus dahuricus*, and *Astragalus adsurgens*), with intercropping of one ($n=4$), two ($n=4$), three ($n=2$), and four ($n=1$) species were established to analyze the growth, photosynthetic, and water use characteristics of the forages under the different mixture patterns. [Results] The total relative yield of all intercropping treatments exceeded one. The intercropping treatment of *M. sativa* and *B. inermis* achieved a total relative yield of 2.08. This treatment increased the biomass of *B. inermis* and *M. sativa* to 279.1% and 132.4%, respectively, compared to their monoculture. Intercropping of *M. sativa* and *B. inermis* significantly increased the net photosynthetic rate and transpiration rate of *M. sativa* ($p < 0.05$). There was no significant effect on the net

收稿日期: 2025-02-14

修回日期: 2025-04-28

采用日期: 2025-04-30

资助项目: 区域创新发展联合基金重点项目“山西黄土高原坡面降雨产汇流机制与生态化调控”(U22A20613); 国家重点研发计划项目“黄土高原旱作适水改土与产能提升技术模式及应用”(2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目“雨水资源化与水土保持”(42125705)

第一作者: 马龙(2000—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源高效利用。Email: mal0155@163.com。

通信作者: 赵西宁(1976—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 研究员, 主要从事农业水土资源高效利用研究。Email: zxn@nwsuaf.edu.cn。

photosynthetic rate of *B. inermis*, but leaf water use efficiency increased significantly ($p < 0.05$). This intercropping also increased the water content of the deep soil. Entropy-weighted TOPSIS evaluation revealed that the *M. sativa* and *B. inermis* intercropping produced the best comprehensive effects in terms of forage yield, growth physiological characteristics, water and soil resource utilization efficiency, and soil water storage capacity. The comprehensive effect of gramineous monoculture was the worst. [Conclusion] Reasonable intercropping configurations can optimize vertical soil moisture distribution and enhance forage net photosynthetic rate, thereby improving system productivity and water utilization. Intercropping of *M. sativa* and *B. inermis* could effectively enhance production capacity and water use efficiency, providing valuable practical guidance for optimizing forage intercropping systems in semi-arid regions of the Loess Plateau.

Keywords: forage intercropping; growth characteristics; physiological characteristics; water use; interspecific competition

生物多样性丧失是全球面临的重大生态环境危机^[1],其中单一物种为主导的农业集约化种植模式是导致生物多样性急剧下降的关键因素^[2]。饲草间作通过结合两种或多种饲草进行播种,在维持产量的同时降低农业对生态环境的不利影响。大量研究表明,饲草间作对提升间作系统产量,优化资源利用及促进养分循环均有积极影响^[3-5]。然而,不同物种组合产生的效益存在明显差异^[6],如何通过间作实现多目标的协同提升也存在挑战,选择适宜当地气候和土壤条件的物种组合方式是解决上述问题的关键。

禾本科(Gramineae)和豆科(Leguminosae)饲草间作(禾豆间作)是构建高产、高效、可持续人工草地的重要方式。氮素是限制生产力的重要因素,禾本科和豆科饲草间作时,豆科饲草一方面通过共生固氮作用将固定的氮素直接转移给禾本科饲草,从而提高间作系统的生产力和资源利用效率^[7],另一方面豆科和禾本科饲草在株高、根系特征等生长形态上存在明显差异,有利于间作体系对水分和养分资源的时空互补性利用。Yan Huilin等^[8]研究苜蓿和两种禾本科饲草间作,发现豆科饲草可以通过改变禾本科饲草根际细菌群落,提高饲草产量。姚泽英等^[9]研究垂穗披碱草与紫花苜蓿不同播期混播效果,发现垂穗披碱草播种15 d后混播紫花苜蓿可以提高混播系统产量和品质,但披碱草播种30 d后交叉混播紫花苜蓿,混播系统饲草总产量及饲草品质均下降。Foster A等^[10]研究发现,与2到4个物种简单的饲草间作系统相比,复杂的间作系统不能提高间作系统的生产力。Dhruva D等^[11]研究表明,苜蓿与不同禾本科饲草间作产量存在显著差异,苜蓿与雀麦两物种间作产量高于其他处理。综上所述,合理配置不同饲草的间作组合,能够有效提高间作系统的生产力,这与间作处理物种的选择及物种数量的合理配置密切相关。

黄土高原地区干旱缺水,土壤水分胁迫影响了

植物的生理活动,是饲草产量的限制性因素。间作可以通过调节土壤水分利用方式缓解水分胁迫,是干旱半干旱地区提高饲草产量的有效措施。李恩慧等^[12]研究发现,小麦(*Triticum aestivum*)和苜蓿共生期间作提高了小麦和苜蓿的产量和水分利用效率。高砚亮等^[13]研究玉米(*Zea mays*)与花生在不同间作模式下的产量和水分利用,发现玉米和花生间作能够改善玉米对土壤水分的过度消耗,提高农田生产力和水分利用效率。合理的间作配置能够促进不同物种对土壤水分的时空互补性利用,改善作物水分消耗,促进生物量积累。光合作用是植物重要的生理过程,是作物吸收能量、转化产量的根本过程^[14]。光合作用不仅受到地上部分光照强度和空间利用的影响,还受到土壤水分、养分状况等诸多因素的影响。然而,不同间作方式如何影响牧草的光合特性进而促进生物量积累仍不明确,亟需开展相关研究。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为一种优质的豆科饲草,具有固氮能力强、营养价值高等特点,是畜牧业中的重要饲料来源^[15]。沙打旺(*Astragalus adsurgens*)是一种适应性广、抗逆性强的豆科饲草,能够在干旱贫瘠的土壤中生长,对于改善土壤孔隙结构和提高土壤肥力具有重要作用。披碱草(*Elymus dahuricus*)与无芒雀麦(*Bromus inermis*)作为禾本科饲草资源中的优势物种^[16],具有突出的生态适应性和饲用营养价值,并展现出显著的水土保持效能,是构建高产高效人工草地的重要组成部分。因此,本研究选取紫花苜蓿、沙打旺、披碱草和无芒雀麦4种多年生饲草为研究材料,构建不同间作方式的人工草地,比较分析不同间作方式对饲草光合、产量和土壤水分的影响,探讨饲草生长生理特征对不同间作处理竞争协同效应的响应,筛选增产与节水协同的最佳间作方式,为黄土高原建植高产、高效、可持续的人工草地提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

黄土高原地区年降水量适中,土壤水分条件适宜于经济树木和饲草的生长。杨凌农业高新技术产业示范区地处陕西省关中平原腹地,黄土台塬地貌与渭河阶地交错分布,为旱作农业与草畜产业协同发展提供了典型研究场景。本试验于2023年4月至2024年6月在杨凌水土保持野外科学试验站进行。试验区年平均降水量610.2 mm,年平均气温13.0℃,气候类型为大陆性季风气候,极端高温42.0℃,极端低温-19.4℃,最大积雪厚度23.0 cm,最大冻土深度24.0 cm,海拔431~559 m,多年平均蒸发量1 505.3 mm。

1.2 试验设计

本研究采用野外小区定位试验(图1)。选取两种豆科饲草紫花苜蓿(M)、沙打旺(S)和两种禾本科饲草披碱草(P)、无芒雀麦(W)为试验材料,种子由宁夏上古农牧业开发有限公司提供。经种子发芽试验测定,豆科饲草(紫花苜蓿、沙打旺)发芽率达到85%以上,禾本科饲草(披碱草、无芒雀麦)发芽率达到80%以上。试验共设置12个处理组合:单作(M, S, P, W),两种饲草间作(M+W, M+P, S+W, S+P),3种饲草间作(S+W+P, M+W+P),4种饲草间作(M+S+W+P)及裸地对照(CK)。试验于2022年4月采用间行条播法播种,按20 cm行距开3 cm深播种沟,各试验小区设置10条平行播种带,将种子按等比例均匀撒播于沟内。每个处理设置4个重复,共布设48个试验小区,间作处理4个重复播种带的各物种按照不同顺序排列,以四物种间作处理为例,4个重复小区播种带的播种顺序分别为MSWP, SWPM, WPMS, PMSW。紫花苜蓿和沙打旺播种密度为1.5 g/m²,披碱草和无芒雀麦播种密度为3 g/m²。试验小区坡度为12°,面积为1 m×2 m,小区完全随机排列,边行两小区间距15 cm,中间预留70 cm采样带,上下小区间距1.5 m。本研究于2022年完成试验小区布设后,实施定期灌溉养护以保障种子正常萌发所需的水分条件,同时周期性人工除草以控制竞争植被。经系统培育,于当年11月完成首次牧草刈割,试验观测于2023—2024年进行。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标

(1) 地上生物量(t·hm⁻²)。为系统评估完整生长周期内的资源利用效率,以紫花苜蓿为参考对象,在其结籽期后分别于2023年6月28日、2023年12月4日及2024年6月9日,按物种分类刈割试验小区饲

草的地上部分,留茬高度5 cm,分草种测定鲜重(fresh weight, F_y),并采集代表性样本进行茎秆与叶片分离。样品经105℃杀青30 min后,于65℃条件下烘干至恒重,测定其干重(Dry weight, D_y)及茎叶比(stem/leaf ratio, Slr),基于干鲜质量比换算单位面积混合干草产量。

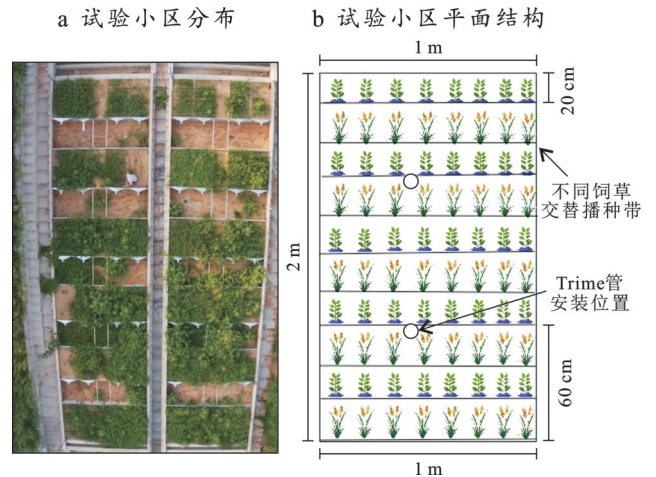


图1 试验小区布设示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental plot layout

(2) 株高(plant height, H_e)。饲草刈割时,分物种随机选取10株饲草,测定植株绝对高度后求平均值,确定其平均株高(cm)。

1.3.2 生理指标

(1) 光合作用参数。分别2023年8月13日(分枝期)、9月8日(开花期)、10月10日(盛花期)、10月23日(结籽期)以及2024年4月9日(分枝期)、5月2日(开花期)和6月2日(结籽期)采用LI-6800便携式光合仪(LI-COR公司,美国)测定叶片光合性能。测定指标包括净光合速率[Net photosynthetic rate, P_n, μmol/(m²·s)]、气孔导度[Stomatal conductance, g_s, mol/(m²·s)]、蒸腾速率[Transpiration rate, T_r, mmol/(m²·s)]及胞间CO₂浓度(Intercellular carbon dioxide concentration, C_i, μmol/mol)。测量部位为各处理植株中上部发育较好的叶片,每个处理重复测定3次。

(2) 叶绿素相对含量(SPAD):于饲草幼苗期至休眠期,每隔30 d选择饲草最上部完全展开、发育较好的叶片,用日本柯尼卡公司的SPAD-502叶绿素仪测定叶绿素相对含量,每个小区每个物种选择5片叶子进行测量,取其平均值。

1.3.3 土壤含水量

在试验小区竖向对称轴上,距小区顶部和底部边界各60 cm处分别布设两根Trime-IPH探测管,采用Trime-IPH管式TDR土壤水分测量系统(IMKO, 德国)对0—80 cm土壤含水量持续监测,同时利用烘

干法测定土壤水分以便对TDR测定值进行校正,饲草生育期内每15 d测量一次,且雨后加测。

1.3.4 径流量

在试验小区下方设置V型集流槽,并连接集水桶,槽底坡度 $>3\%$,确保径流能够完全导入,降雨产流后马上称取集水桶重量,采用公式(1)计算径流量。观测期内,分别在2023年6月5日、2023年8月28日和2023年9月29日收集到3次有效径流量。

$$R = \frac{V}{A \times \cos \theta} \quad (1)$$

式中: R 为径流量(mm); V 集水桶中收集的径流量(kg); A 为试验小区面积(m^2); θ 为小区坡度。

1.3.5 评价指标与计算方法

相对产量总和(Y_{RT}):

$$Y_{RT} = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} + \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}} \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 为*i*与*j*间作时播*i*草的产量; Y_{ii} 单作时的*i*草产量; Y_{ji} 为*i*与*j*间作时播*j*草的产量; Y_{jj} 单作时的*j*草产量^[17-18]。

竞争率(R_c):

$$C_{RJ} = \frac{Y_{ji}/Y_{jj} \times Z_{ij}}{Y_{ij}/Y_{ii} \times Z_{ji}} \quad (3)$$

式中: C_{RJ} 表示禾本科的竞争率; Z_{ji} 为间作中禾本科饲草的间作比例; Z_{ij} 为间作中豆科饲草的间作比例。当 $C_{RJ}>1$ 时,表示禾本科饲草的竞争力大于豆科饲草;当 $C_{RJ}=1$ 时,表示禾本科与豆科饲草的竞争力相同;当 $C_{RJ}<1$ 时,表示禾本科的竞争力小于豆科饲草。对于三物种和四物种间作,采用同科牧草配置比例和产量的代数和进行运算,以整合多物种间作条件下的竞争效应。

土壤贮水量(SWS):

$$\text{SWS} = \sum \text{SWC}_i \times H_i \times b \quad (4)$$

用0—80 cm的土壤含水量计算土层储水量(SWS, mm), SWC_i 为第*i*层土壤含水量(%); H_i 为第*i*层土层深度(cm); b 为土壤容重^[19]。

耗水量(E_T):

$$E_T = P + I + \Delta \text{SWS} - R \quad (5)$$

其中: E_T 为耗水量(mm); P 为饲草生育期内降雨量(mm); R 为径流量(mm); I 为灌溉量(mm)。本研究试验期间 $I=0$, ΔSWS 为前一时期与后一时期的土壤贮水量之差^[20]。

水分利用效率[WUE, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$]:

$$\text{WUE} = \frac{D_y}{E_T} \quad (6)$$

瞬时水分利用效率(WUE_{in} , $\mu\text{mol}/\text{mol}$):

$$\text{WUE}_{in} = \frac{P_n}{T_r} \quad (7)$$

1.4 数据分析

1.4.1 熵权—TOPSIS综合评价体系

(1) 熵权法确定各个指标权重。对数据进行归一化处理,正向指标用式(8)处理,负向指标采用式(9)处理,式中 X_{ij} 为第*i*个处理的第*j*个指标; Z_{ij} 为归一化后的数值。

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

$$Z_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (9)$$

计算各指标熵值及权重

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n a_{ij} \ln(a_{ij}) \quad (10)$$

$$a_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad (11)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (12)$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (13)$$

式中: e_j 为各指标熵值; n 为处理个数; a_{ij} 为 Z_{ij} 规范后结果; d_j 为信息熵冗余度; W_j 为各指标权重。

(2) TOPSIS综合评价。确定归一化矩阵 $Z = W_j X_{ij}$,分别使用式(14)和式(15)确定最优解和最劣解。

$$Z^+ = (X_{\max 1}, X_{\max 2}, \dots, X_{\max}) \quad (14)$$

$$Z^- = (X_{\min 1}, X_{\min 2}, \dots, X_{\min}) \quad (15)$$

第*i*个处理与最优、最劣方案(D_i^+ , D_i^-)的距离分别使用式(16)和(17)计算。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{\max j} - Z_{ij})^2} \quad (16)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{\min j} - Z_{ij})^2} \quad (17)$$

第*i*个处理与最优方案的贴合度 C_i 为

$$C_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (18)$$

C_i 值越大,表明评价对象越优。

1.4.2 试验数据统计分析方法

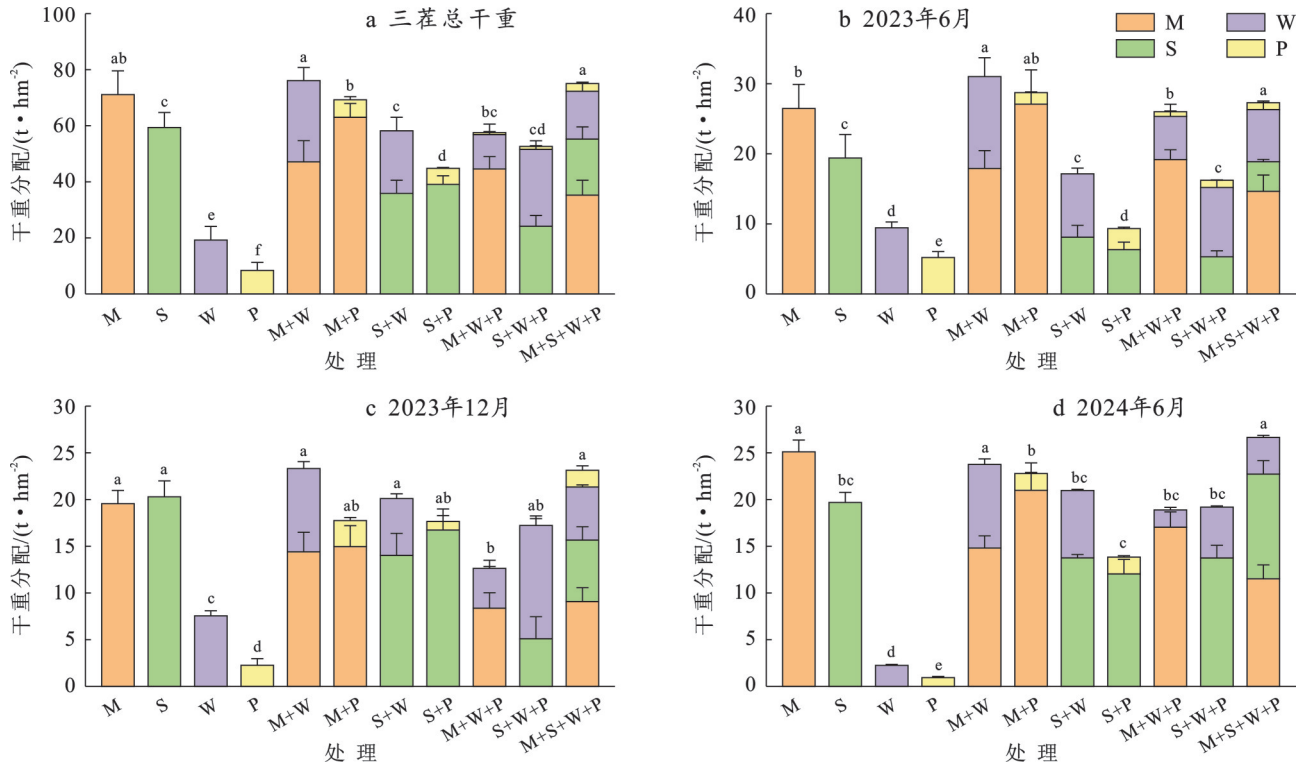
数据采用Microsoft Excel 2019进行预处理,生物量分配及土壤贮水量空间分布通过Origin 2024软件完成可视化表达,土壤水分时间动态变化利用Surfer软件完成。不同处理间生长指标、光合参数及土壤贮水量的差异显著性检验采用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 间作方式对饲草生长的影响

由图2可以看出,不同间作处理总生物量存在较大差异。禾本科饲草单作时生物量显著低于豆科饲草($p < 0.05$)。间作系统中:紫花苜蓿与无芒雀麦间作系统三茬总生物量最高,为76.03 t/hm²,其次是4物种间作处理,为75.02 t/hm²,沙打旺与披碱草间作系统三茬总生物量最低,为44.79 t/hm²。紫花苜蓿

与无芒雀麦间作处理使无芒雀麦的生物量达到单作处理的279.1%,同时使紫花苜蓿的生物量为单作处理的132.4%,二者具有较好的间作效益。紫花苜蓿与披碱草间作处理对紫花苜蓿生物量增产最为明显,达到了203.5%,但披碱草的生物量大幅下降。沙打旺与披碱草间作系统三茬总生物量显著低于沙打旺单作($p < 0.05$)。随着植物的生长,两种禾本科饲草的生物量逐渐下降,无芒雀麦单作生物量下降速度明显高于间作处理。



注:①不同小写字母表示不同处理差异显著($p < 0.05$);②M为紫花苜蓿,S为沙打旺,W为无芒雀麦,P为披碱草。下同。

图2 不同间作处理饲草的生物量分配

Fig.2 Biomass distribution of forage under different intercropping treatments

由表1可知,豆科饲草株高显著高于禾本科饲草($p < 0.05$)。紫花苜蓿和无芒雀麦间作株高显著高于单作,沙打旺单作株高显著高于四物种间作,无芒雀麦单作株高显著低于各间作处理,披碱草单作株高显著高于三物种和四物种间作株高。紫花苜蓿单作和间作的株高分别为115.40~152.50 cm和113.60~172.50 cm,平均株高分别为137.86 cm和147.37 cm。无芒雀麦单作和间作的株高分别为71.40~103.90 cm和81.80~117.50 cm,平均株高分别为92.42 cm和105.43 cm。披碱草单作和间作的株高分别为73.70~122.00 cm和51.00~102.10 cm,平均株高分别为93.62 cm和76.92 cm。沙打旺单作和间作的株高分别为130.10~172.20 cm和125.00~168.70 cm,平均株高分别为148.49 cm和142.65 cm。紫花苜蓿和无芒雀麦间作株高较单作有所上升,沙打旺和披

碱草间作株高较单作有所下降。不同处理下紫花苜蓿的茎叶比差异不显著($p > 0.05$),除四物种间作外,其余间作处理均显著降低了沙打旺和披碱草的茎叶比($p < 0.05$)。此外,两物种间作也显著降低了沙打旺和无芒雀麦的茎叶比($p < 0.05$)。

2.2 不同间作方式的相对产量总和及种间关系

由图3可以看出,不同间作方式相对产量总和及种间竞争率均存在差异($p < 0.05$),各间作处理的相对产量总和均大于1,紫花苜蓿和无芒雀麦的相对产量总和最大,为2.08,沙打旺和披碱草间作的相对产量总和最小,为1.12。紫花苜蓿和披碱草间作处理中,豆科种间竞争强度显著高于其他处理($p < 0.05$)。M+P和M+W+P处理中豆科饲草种间竞争率大于1,分别为3.71和1.56,表明在紫花苜蓿和披碱草间作系统中紫花苜蓿更具竞争优势。沙打旺与无芒雀麦

间作处理中禾本科种间竞争强度显著高于其他处理 ($p < 0.05$)。除 M+P 和 M+W+P 处理外,其他处理的禾本科饲草种间竞争率均大于 1, S+W 和 S+

W+P 处理的禾本科种间竞争率最大,分别为 4.93 和 3.07,表明在沙打旺和禾本科间作处理中,禾本科饲草更具竞争优势。

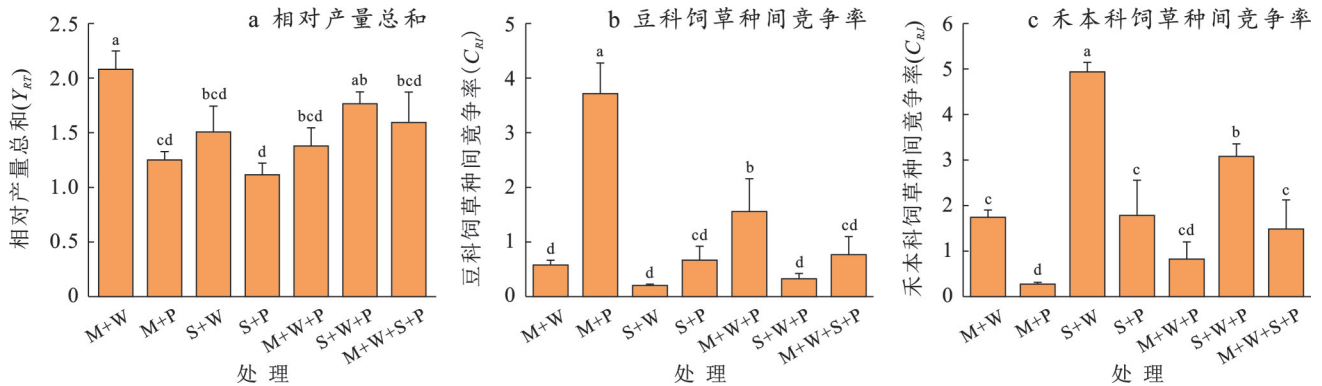


图 3 不同间作处理饲草的相对产量总和及种间关系

Fig.3 Interspecific relationship and total relative yield of forage treated with different intercropping methods

表 1 不同饲草间作方式下各物种的生长和光合生理特征

Table 1 Growth and photosynthetic characteristics of various forage species under different intercropping methods

物种	处理	株高/ cm	茎叶比	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	叶片水分 利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	叶绿素 相对含量
紫花苜蓿	M	137.86±3.23 ^b	3.75±0.10 ^a	9.67±0.53 ^{bc}	0.31±0.03 ^{ab}	6.81±0.45 ^b	304.56±4.41 ^a	1.52±0.10 ^{abc}	50.13±1.05 ^b
	M+W	149.99±1.65 ^a	3.62±0.17 ^a	11.38±0.49 ^a	0.38±0.03 ^{ab}	7.52±0.71 ^{ab}	295.86±4.88 ^{ab}	1.66±0.09 ^{ab}	55.01±1.20 ^a
	M+P	148.49±2.06 ^{ab}	3.60±0.16 ^a	10.97±0.53 ^{ab}	0.34±0.03 ^{ab}	7.71±0.57 ^{ab}	297.59±8.73 ^{ab}	1.45±0.06 ^{bc}	53.60±1.34 ^a
	M+W+P	147.34±3.98 ^{ab}	4.00±0.22 ^a	8.53±0.58 ^c	0.29±0.03 ^b	6.76±0.70 ^b	279.78±9.20 ^b	1.66±0.11 ^a	53.63±1.08 ^a
	M+S+W+P	143.67±5.71 ^{ab}	3.73±0.19 ^a	10.75±0.50 ^{ab}	0.39±0.03 ^a	9.14±0.86 ^a	306.56±3.59 ^a	1.30±0.10 ^c	53.36±0.93 ^a
沙打旺	S	148.49±4.41 ^a	4.04±0.40 ^a	13.10±0.73 ^b	0.25±0.01 ^b	5.93±0.47 ^b	257.79±10.89 ^a	2.42±0.13 ^{ab}	58.65±1.66 ^a
	S+W	143.50±4.65 ^{ab}	2.66±0.16 ^b	12.92±0.41 ^b	0.32±0.03 ^a	5.85±0.31 ^b	251.02±6.77 ^a	2.40±0.11 ^{ab}	62.48±1.24 ^a
	S+P	143.15±4.38 ^{ab}	2.92±0.24 ^b	15.55±0.55 ^a	0.12±0.02 ^d	6.77±0.76 ^{ab}	247.68±5.96 ^a	2.74±0.14 ^a	59.91±3.16 ^a
	S+W+P	148.41±2.73 ^a	2.83±0.31 ^b	13.79±1.02 ^{ab}	0.26±0.02 ^b	6.90±0.90 ^{ab}	261.55±15.43 ^a	2.12±0.20 ^b	58.97±1.86 ^a
	M+S+W+P	135.55±1.88 ^b	3.40±0.29 ^{ab}	13.21±0.63 ^b	0.18±0.02 ^c	7.94±0.47 ^a	246.64±9.62 ^a	2.08±0.16 ^b	56.63±1.20 ^a
无芒雀麦	W	92.42±2.56 ^b	3.17±0.16 ^a	9.74±0.89 ^a	0.19±0.01 ^b	5.53±0.47 ^{ab}	274.90±10.29 ^a	2.03±0.09 ^b	39.70±1.65 ^a
	M+W	107.25±5.02 ^a	2.53±0.20 ^{bc}	10.38±0.50 ^a	0.24±0.01 ^a	6.92±0.63 ^a	271.80±8.02 ^a	2.84±0.08 ^a	40.83±1.19 ^a
	S+W	108.23±5.49 ^a	2.52±0.11 ^{bc}	8.82±0.68 ^a	0.21±0.02 ^{ab}	5.84±0.64 ^{ab}	275.61±11.91 ^a	2.03±0.15 ^b	40.67±0.92 ^a
	M+W+P	103.31±2.16 ^a	2.38±0.17 ^{bc}	9.44±0.47 ^a	0.20±0.01 ^{ab}	4.83±0.61 ^b	259.84±6.08 ^a	2.87±0.18 ^a	39.51±0.78 ^a
	S+W+P	103.75±1.93 ^a	2.30±0.21 ^c	10.15±0.52 ^a	0.20±0.02 ^{ab}	6.15±0.41 ^{ab}	270.48±10.69 ^a	1.98±0.16 ^b	40.87±0.97 ^a
M+S+W+P	104.60±2.88 ^a	2.98±0.34 ^{ab}	10.16±0.62 ^a	0.18±0.01 ^b	4.96±0.44 ^b	253.46±13.99 ^a	2.33±0.17 ^b	38.58±1.20 ^a	
披碱草	P	93.62±4.88 ^a	1.73±0.20 ^a	3.88±0.29 ^{ab}	0.11±0.02 ^{abc}	3.52±0.35 ^a	270.17±10.27 ^{ab}	1.39±0.26 ^{ab}	36.17±0.82 ^a
	M+P	85.60±2.80 ^a	1.27±0.10 ^b	2.94±0.26 ^c	0.07±0.01 ^c	2.81±0.24 ^{ab}	259.93±21.57 ^{ab}	1.83±0.17 ^a	38.89±1.14 ^a
	S+P	88.29±2.85 ^a	1.38±0.12 ^{ab}	3.69±0.24 ^{abc}	0.08±0.01 ^{bc}	2.40±0.29 ^b	238.52±11.90 ^b	1.91±0.15 ^a	38.34±1.90 ^a
	M+W+P	72.85±3.87 ^b	1.28±0.16 ^b	3.10±0.34 ^{bc}	0.14±0.03 ^a	2.68±0.50 ^{ab}	292.95±7.23 ^a	1.17±0.11 ^b	37.37±1.47 ^a
	S+W+P	71.14±3.34 ^b	1.26±0.10 ^b	3.03±0.25 ^c	0.13±0.03 ^{ab}	2.88±0.24 ^{ab}	279.78±9.20 ^a	1.18±0.08 ^b	37.59±1.39 ^a
M+S+W+P	66.72±4.72 ^b	1.34±0.13 ^{ab}	4.05±0.27 ^a	0.11±0.01 ^{abc}	3.23±0.37 ^{ab}	297.16±7.17 ^a	1.34±0.09 ^b	41.16±1.47 ^a	

2.3 间作方式对饲草光合生理特征的影响

由表 1 可以看出, M+W 间作处理下紫花苜蓿净光合速率显著高于单作 ($p < 0.05$), 较紫花苜蓿单作提高 17.68%。S+P 间作处理中沙打旺净光合速率显著高于单作 ($p < 0.05$), 较沙打旺单作提高 18.70%。间作处理对无芒雀麦净光合速率无显著影

响。S+W 处理中沙打旺气孔导度显著高于其他处理 ($p < 0.05$)。M+W 间作处理中无芒雀麦气孔导度显著高于单作 ($p < 0.05$)。4 个物种间作的蒸腾速率分别较紫花苜蓿和沙打旺单作显著提高 ($p < 0.05$), S+P 处理的蒸腾速率较披碱草单作显著降低 ($p < 0.05$)。

除四物种混播外,间作处理的紫花苜蓿胞间CO₂浓度较单作有所下降,间作处理对沙打旺和无芒雀麦胞间CO₂浓度无显著影响。S+W+P和M+S+W+P间作处理中沙打旺叶片水分利用效率低于沙打旺单作,M+W和M+W+P间作处理显著提高了

无芒雀麦的叶片水分利用效率($p < 0.05$),M+P和S+P间作处理显著提高了披碱草的叶片水分利用效率($p < 0.05$)。各间作处理均显著提高了紫花苜蓿的相对叶绿素含量($p < 0.05$),但对沙打旺、无芒雀麦和披碱草无显著影响。

表2 不同间作方式下的饲草水分利用效率

Table 2 Water use efficiency of forages under different intercropping methods

处理	水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)			
	平均	第一茬饲草	第二茬饲草	第三茬饲草
M	73.51±8.67 ^b	86.48±10.97 ^c	58.58±8.26 ^{cd}	75.46±7.37 ^a
S	61.70±11.15 ^c	62.51±11.21 ^{de}	64.22±11.14 ^{bc}	58.38±10.16 ^{bc}
W	20.34±8.22 ^e	31.66±7.27 ^f	22.73±5.17 ^f	6.63±0.94 ^e
P	9.02±2.07 ^f	17.29±4.11 ^e	7.10±1.98 ^g	2.68±0.03 ^f
M+W	81.64±12.79 ^a	105.48±12.91 ^a	76.16±15.48 ^a	63.29±5.43 ^b
M+P	73.05±12.43 ^b	96.69±15.22 ^{ab}	56.21±11.28 ^d	66.26±11.27 ^b
S+W	60.40±11.35 ^c	56.68±12.13 ^e	64.42±11.96 ^{bc}	60.10±8.94 ^{bc}
S+P	45.64±13.17 ^d	29.61±5.12 ^f	66.16±16.24 ^b	41.16±6.29 ^d
S+W+P	49.22±17.28 ^d	53.95±10.33 ^e	39.72±12.33 ^e	53.97±17.71 ^c
M+W+P	65.03±11.14 ^c	85.36±16.27 ^c	53.70±8.98 ^d	56.03±7.04 ^c
M+S+W+P	81.02±15.98 ^a	92.26±7.69 ^b	71.11±13.59 ^{ab}	79.68±20.41 ^a

2.4 间作方式对土壤含水量和水分利用效率的影响

图4可知,不同处理土壤含水量均值随土层深度增加而递增,此外,不同处理土壤含水量差异较大,60—80 cm土层差异最为明显。S+W处理中0—20,20—40,40—60 cm土层土壤含水量均值最大,分别为14.1%,14.4%,15.2%,60—80 cm土壤含水量均值最大的处理为P。M+W处理0—20 cm土壤含水量均值最小,为10.1%,表明紫花苜蓿和无芒雀麦间作加剧了表层水分的消耗。20—40,40—60,60—80 cm土壤含水量均值最小的处理分别为W,M+W+P,M+W+P,土壤含水量均值分别为10.96%,12.2%,12.5%。由图5可以看出,S+W间作处理总的土壤贮水量高于其他间作处理。饲草间作方式改变了土壤贮水量的分布,与紫花苜蓿单作相比,紫花苜蓿与无芒雀麦间作增加了对表层土壤水分的消耗,二者间作使0—20 cm土层土壤贮水量较紫花苜蓿单作下降11.7%,而60—80 cm土层贮水量较单作提高14.4%;沙打旺与无芒雀麦间作提高了土壤的蓄水能力,0—80 cm的平均土壤贮水量较沙打旺单作提高13.24%。

由表2可以看出,豆科和禾本科饲草的水分利用效率差异明显,豆科饲草单作的水分利用效率显著高于禾本科饲草。紫花苜蓿与无芒雀麦间作较紫花苜蓿单作显著提高了间作系统的水分利用效率($p < 0.05$),沙打旺与披碱草间作较沙打旺单作显著降低

了间作系统的水分利用效率($p < 0.05$)。M+W处理的平均水分利用效率最高,为81.64 kg/(hm²·mm),M+W和M+S+W+P处理的平均水分利用效率较紫花苜蓿单作分别提高了11.1%和10.2%。S+P和S+W+P间作处理的平均水分利用效率较沙打旺单作分别下降26.03%和20.23%。随着刈割次数的增加,禾本科饲草单作的水分利用效率逐渐降低,而豆科饲草单作无明显变化。

2.5 不同处理各指标综合评价

单一指标不能评价种植方式的优劣,因此选取不同种植方式下饲草干重、相对产量总和、土壤贮水量、水分利用效率、株高、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶片瞬时水分利用效率和相对叶绿素含量10项指标作为正向指标,茎叶比和胞间CO₂浓度作为负向指标,从不同种植方式下饲草产量、生长生理状况(株高、茎叶比、光合参数)、资源利用效率(相对产量总和、水分利用效率)和土壤贮水能力多方面进行综合考量,基于熵权-TOPSIS法对不同处理的各项指标进行综合评价,根据各处理到最优解的距离 D_i^+ 和最劣解的距离 D_i^- ,计算各处理到最优方案的贴合度 C_i 。

表3表明,贴合度最大的处理为M+W,P处理的贴合度最小,表明M+W间作处理的饲草产量、生长生理状况、资源利用效率和土壤贮水能力综合效应最好。

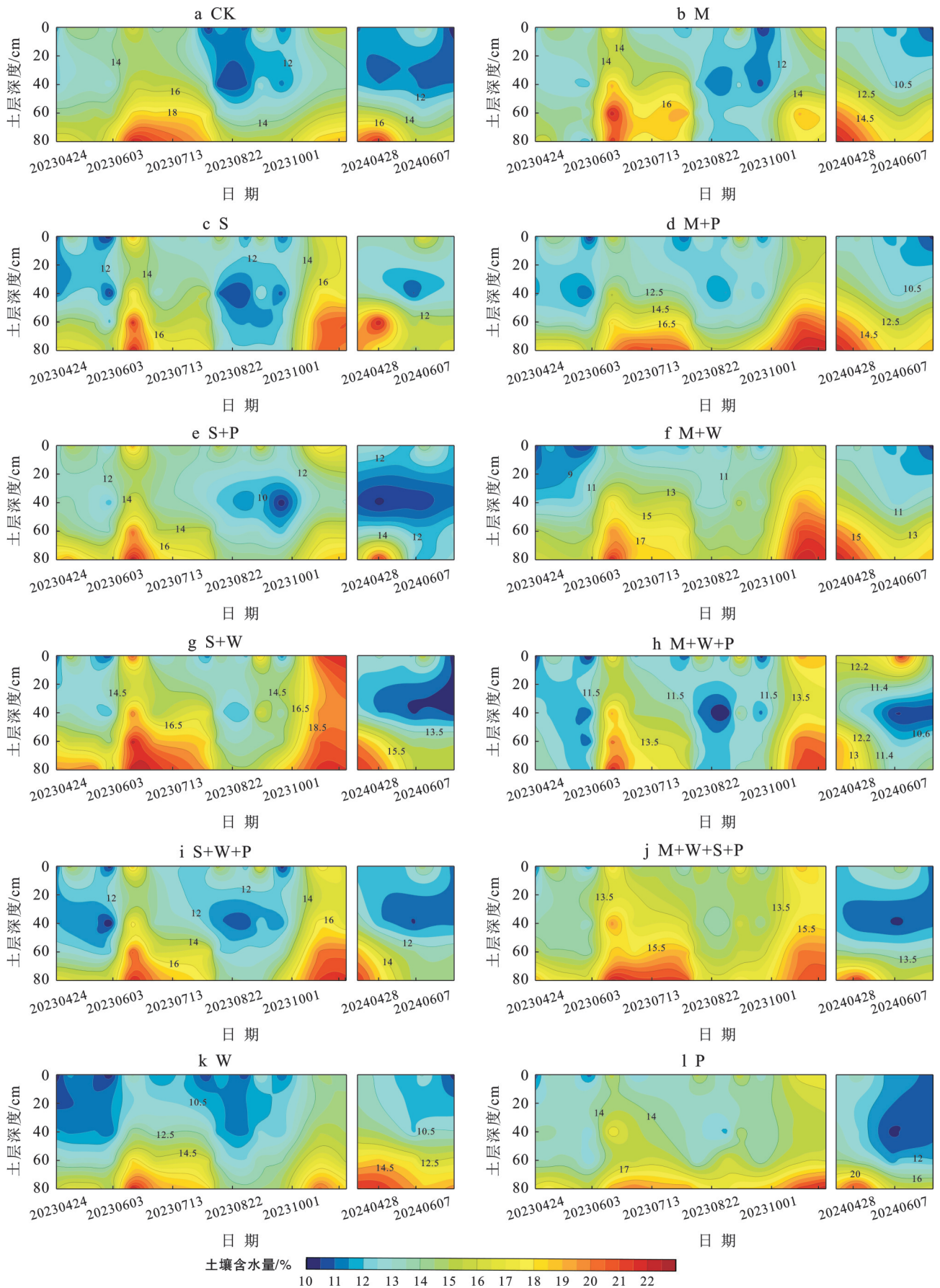
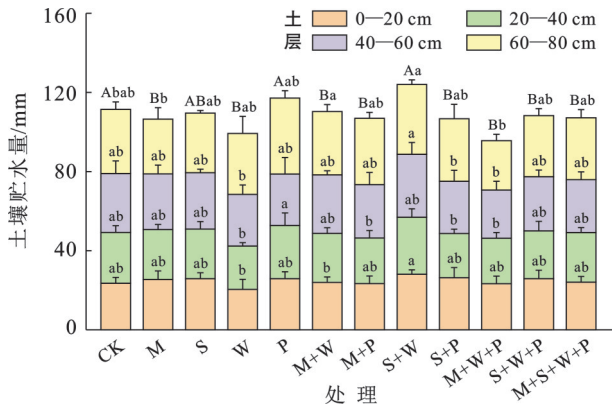


图 4 不同饲草间作方式土壤含水量时间变化特征

Fig. 4 Temporal variation of soil water content in different forage intercropping methods



注: 不同大写字母表示不同处理总土壤贮水量差异显著 ($p < 0.05$); 不同小写字母表示不同处理不同土层土壤贮水量差异显著 ($p < 0.05$)。

图 5 不同饲草间作方式不同土层土壤贮水量

Fig.5 Soil water storage in different soil layers under different forage intercropping methods

3 讨论

3.1 间作方式对饲草光合生理特征和水分利用的影响

光合作用和同化物分配决定了作物的产量和品

质^[21], 更高的净光合速率、叶绿素含量及合适的叶面积指数是作物获得高产的重要因素^[22]。在本研究中, 两种豆科饲草的株高、净光合速率和蒸腾速率均显著高于禾本科饲草, 这与不同草种的生长特征有关。紫花苜蓿和沙打旺两种豆科饲草株高显著高于禾本科饲草, 间作系统中两种豆科饲草能够占据有利的空间位置, 充分利用光能提高净光合速率和蒸腾速率, 而两种禾本科饲草在生长过程中, 受到豆科饲草的遮蔽, 无芒雀麦的净光合速率和蒸腾速率无显著变化, 披碱草则出现下降趋势。瞬时水分利用效率能够反映作物叶片某一瞬间利用水分进行光合作用的能力。

本研究中紫花苜蓿与无芒雀麦间作对紫花苜蓿瞬时水分利用效率无显著影响, 但提高了无芒雀麦的瞬时水分利用效率。这可能是由于间作系统中无芒雀麦受到更强的光照竞争和水分限制, 为了应对这种环境压力, 无芒雀麦通过提高瞬时水分利用效率, 来优化光合作用过程。

表 3 基于 TOPSIS 的不同饲草间作方式各项指标综合评价结果

Table 3 Comprehensive evaluation results of various indexes for different forage intercropping methods based on TOPSIS

处理	M	S	W	P	M+W	M+P	S+W	S+P	S+W+P	M+W+P	M+S+W+P
最优方案 (D_i^+)	0.68	0.59	0.79	0.90	0.32	0.60	0.41	0.59	0.61	0.50	0.48
最劣方案 (D_i^-)	0.59	0.70	0.34	0.36	0.82	0.49	0.66	0.55	0.46	0.56	0.59
贴合度 (C_i)	0.46	0.54	0.30	0.29	0.72	0.45	0.62	0.48	0.43	0.53	0.55
排序	7	4	10	11	1	8	2	6	9	5	3

土壤水分状况是影响作物光合作用的重要因素, 合理的间作系统在时间、空间上能充分利用光能和水分, 使得作物产量及水分利用效率显著提高^[23]。本研究中, 沙打旺与无芒雀麦间作的土壤贮水量最大, 这可能是二者的根系分布在土壤中具有互补性, 提高了间作系统土壤的水分资源。间作处理改变了紫花苜蓿和无芒雀麦的土壤水分垂直分布, 提高了间作处理 20—80 cm 土层土壤含水量, 间作后植物对深层土壤水分的利用增强^[24], 紫花苜蓿耗水量较大, 其根系向下生长较多, 深层土壤水分的增加有助于促进紫花苜蓿的生长发育, 提高混播系统生产力。紫花苜蓿和沙达旺与无芒雀麦间作均改变了土壤的水分状况, 紫花苜蓿与无芒雀麦间作对紫花苜蓿的生长和水分利用均表现出积极影响; 而沙打旺和无芒雀麦间作初期对沙打旺表现出抑制作用, 随着间作时间的推移, 沙打旺的产量逐渐增加。这是由于沙打旺和无芒雀麦在生长初期的生育期重叠, 无芒雀麦占据竞争优势, 抑制了沙打旺的生长。紫花苜蓿初期生长速度较快, 根系较为发达, 能够快速深入

土壤深层, 吸收和储存更多的水分。而无芒雀麦的根系则相对集中在土壤表层, 二者间作能够更好地利用表层土壤中的水分, 表现出较好的间作效应。不同饲草的生长周期和特征不同, 合理的间作能够充分利用光能, 提高系统光能利用效率。通过优化作物组合方式、播种时期、间距、播种密度能有效改善低位作物的光合特性, 缓解矮秆作物光能竞争劣势^[25]。这就需要我们进一步研究不同播种时期和播种距离对物种光合、产量和水分利用的影响, 选择适宜当地生产条件的播种方式。

3.2 间作方式对饲草产量和水分利用效率的影响

饲草产量是反映间作草地是否具有优势的重要指标, 同时也决定了人工栽培草地的承载力。合理的间作方式有利于维持间作系统的稳定性和高产性, 同时有利于改良饲草品质^[26-27]。本研究中, 紫花苜蓿与无芒雀麦间作处理的产量和水分利用效率均高于紫花苜蓿单作, 相对产量总和最大, 二者产量较单作均得到显著提高, 这与谢开云等^[28]的研究结果一致。紫花苜蓿与披碱草间作虽显著高于紫花苜蓿

产量,但披碱草的生长受到明显抑制,导致披碱草产量下降,后期甚至出现死亡现象。这可能是紫花苜蓿和披碱草两种饲草的生育期不同,紫花苜蓿生长初期发育较快,能优先利用地上部分资源,导致披碱草生长发育不良甚至死亡。在生长初期,沙打旺和无芒雀麦间作对表层土壤水分和养分竞争激烈^[29],其中,无芒雀麦更具优势,从而抑制了沙打旺的生长,导致其产量下降,这主要与物种对资源的竞争能力有关。随着间作时间的推移,沙打旺根系逐渐深入土壤,间作系统的空间互补性逐渐显现,沙打旺的产量也逐渐增加。沙打旺在间作系统中的三茬生长表现存在较大差异,这与不同生长阶段的资源分配及种间相互作用密切相关。当前基于两年试验周期的数据分析不足以全面评估该饲草间作系统的稳定性,后续还需对间作系统中沙打旺的生长生理状况持续监测。

赵泽欢等^[30]研究表明适宜的土壤含水量可以有效提高作物光合作用强度和水分利用效率。本研究中,紫花苜蓿和无芒雀麦间作的水分利用效率最大,这主要归因于间作对紫花苜蓿生理特性的积极影响。间作处理显著提高了紫花苜蓿的净光合速率和蒸腾速率,促进了光合产物的合成和积累,提高了紫花苜蓿的产量,进而增强了紫花苜蓿的水分利用效率。尽管紫花苜蓿和无芒雀麦间作对无芒雀麦的光合速率无显著影响,但其叶片水分利用效率显著提高。同时紫花苜蓿作为豆科植物,其固氮作用可以为间作体系中的无芒雀麦提供良好的养分条件,促进了无芒雀麦的生长与发育,进而提高了其产量和水分利用效率。利用TOPSIS综合评价方法对不同处理的各项指标进行综合评价,紫花苜蓿和无芒雀麦间作的贴合度最大,说明紫花苜蓿和无芒雀麦间作的综合效应最好。综上分析,不同饲草间作的合理配置,能够有效改善间作系统的土壤水分状况,提高间作系统的净光合速率,进而提高间作系统的生产力,这与草种的搭配方式、播种方式密不可分,因此,紫花苜蓿和无芒雀麦间作是一种合理的间作方式。

4 结论

(1) 禾豆饲草间作能够提高间作系统的生产力,所有间作处理相对产量总和均大于1,间作群体的水土资源利用效率优于单作。

(2) 紫花苜蓿和无芒雀麦间作大幅提高了紫花苜蓿和无芒雀麦的产量和水土资源利用效率,相对产量总和达到了2.08,水分利用效率较紫花苜蓿单作

提高了11.1%。与两种豆科饲草间作,披碱草的生长受到抑制,其生物量下降。紫花苜蓿和无芒雀麦间作提高了紫花苜蓿的净光合速率和蒸腾速率,对无芒雀麦净光合速率和蒸腾速率无显著影响,但显著提高了其叶片水分利用效率。紫花苜蓿和无芒雀麦间作改变了土壤水分的空间分布,增加了紫花苜蓿与无芒雀麦间作系统深层土壤的含水量。综上所述,合理的间作方式可以改变土壤水分空间分布,提高饲草的净光合速率,增加光合产物的合成和积累,进而提高间作系统生产力和水分利用效率。紫花苜蓿和无芒雀麦间作表现出较好的间作效应,能够提高间作系统水土资源的利用效率,为黄土高原半干旱区饲草间作方式优化提供了实践参考。

参考文献(References)

- [1] Weiskopf S R, Isbell F, Arce-Plata M I, et al. Biodiversity loss reduces global terrestrial carbon storage [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4354.
- [2] Jones S K, Estrada-Carmona N, Juventia S D, et al. Agrobiodiversity index scores show agrobiodiversity is underutilized in national food systems [J]. *Nature Food*, 2021, 2(9): 712-723.
- [3] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices [J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671-677.
- [4] Huang Mengjiao, Liu Xiang, Cadotte M W, et al. Functional and phylogenetic diversity explain different components of diversity effects on biomass production [J]. *Oikos*, 2020, 129(8): 1185-1195.
- [5] Elgersma A, Sørensen K. Effects of species diversity on seasonal variation in herbage yield and nutritive value of seven binary grass-legume mixtures and pure grass under cutting [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 73-83.
- [6] 文石林, 刘强, 董春华, 等. 罗顿豆与3种多年生禾本科牧草的混播[J]. *草地学报*, 2012, 20(2): 305-311.
Wen Shilin, Liu Qiang, Dong Chunhua, et al. Study on *Lotononis bainesii* mixed sowing respectively with three kinds of perennial forage grasses [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(2): 305-311.
- [7] 王一帆, 刘华清, 赵西宁, 等. 禾豆间作系统水分和根系分隔对牧草氮素吸收利用及转移的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 279-287.
Wang Yifan, Liu Huaqing, Zhao Xining, et al. Effects of water and root separation on nitrogen uptake, utilization and transfer in a Gramineae-Legume intercropping system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 279-287.

- [8] Yan Huilin, Gu Songsong, Li Shuzhen, et al. Grass-legume mixtures enhance forage production *via* the bacterial community [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 338:108087.
- [9] 姚泽英, 李军, 宋连昭, 等. 垂穗披碱草与紫花苜蓿不同时期交叉混播效果研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(5): 1454-1459.
- Yao Zeying, Li Jun, Song Lianzhao, et al. Study on the effect of cross sowing of *Elymus nutans* and *Medicago sativa* in different periods [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5):1454-1459.
- [10] Foster A, Vera C L, Malhi S S, et al. Forage yield of simple and complex grass-Legume mixtures under two management strategies [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2014, 94(1):41-50.
- [11] Dhakal D, Islam M A. Grass-Legume mixtures for improved soil health in cultivated agroecosystem [J]. *Sustainability*, 2018, 10(8):2718.
- [12] 李恩慧, 穆阳阳, 何亚男, 等. 小麦和苜蓿套作种植对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1):54-58.
- Li Enhui, Mu Yangyang, He Yanan, et al. Effects of wheat/alfalfa intercropping systems on soil moisture and water utilization efficiency [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1):54-58.
- [13] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19):3702-3713.
- Gao Yanliang, Sun Zhanxiang, Bai Wei, et al. Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19):3702-3713.
- [14] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(4):551-560.
- [15] 马晓霞, 秘一先, 陈宏亮, 等. 14个引进紫花苜蓿品种在宁夏引黄灌区的生产性能和营养价值综合分析[J]. *草业科学*, 2022, 39(2):328-342.
- Ma Xiaoxia, Bei Yixian, Chen Hongliang, et al. Comprehensive analysis of production performance and nutritional value of 14 alfalfa varieties in the Ningxia Yellow River diversion irrigation area [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(2):328-342.
- [16] 耿依仪, 于露, 张万通, 等. 丛枝菌根真菌对垂穗披碱草的生长发育和防御性酶活的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(12):3225-3232.
- Geng Yiyi, Yu Lu, Zhang Wantong, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth development and defense enzymes of *Elymus nutans* Griseb [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12):3225-3232.
- [17] 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 Jun, Zheng Wei, Zhang Xianhua, 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.
- [18] 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 Zhengxuan, Naerkezi, Zhu Yaqiong, 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.
- [19] 杨敏. 黄土丘陵区苹果园深层耗水过程及其生态水文效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- Yang Min. Deep soil water consumption process and its eco-hydrological impacts of apple orchard on the loess hilly plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.
- [20] Yang Wenjia, Zhou Jianli, Wang Shiwen, et al. Different supplemental irrigation methods result in discrepant water use efficiency and yield by changing steps of water use process in dryland wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 160:127318.
- [21] Dai Jianlong, Li Weijiang, Tang Wei, et al. Manipulation of dry matter accumulation and partitioning with plant density in relation to yield stability of cotton under intensive management [J]. *Field Crops Research*, 2015, 180:207-215.
- [22] Gaju O, DeSilva J, Carvalho P, et al. Leaf photosynthesis and associations with grain yield, biomass and nitrogen-use efficiency in landraces, synthetic-derived lines and cultivars in wheat [J]. *Field Crops Research*, 2016, 193:1-15.
- [23] Liu Huaqing, Gao Xiaodong, Li Changjian, et al. Intercropping increases plant water availability and water use efficiency: A synthesis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 379:109360.
- [24] 张绪成, 王红丽, 于显枫, 等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(3):468-481.
- Zhang Xucheng, Wang Hongli, Yu Xianfeng, et al. The study on the effect of potato and beans intercropping with whole field plastics mulching and ridge-furrow planting on soil thermal-moisture status and crop yield

- on semi-arid area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016,49(3):468-481.
- [25] 范虹,殷文,柴强.间作优势的光合生理机制及其冠层微环境特征[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2022,30(11):1750-1761.
Fan Hong, Yin Wen, Chai Qiang. Research progress on photo-physiological mechanisms and characteristics of canopy microenvironment in the formation of intercropping advantages [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022,30(11):1750-1761.
- [26] 独双双,祁娟,李霞,等.苜蓿与老芒麦混播对牧草产量及土壤养分的影响[J].*中国草地学报*,2024,46(2):74-82.
Du Shuangshuang, Qi Juan, Li Xia, et al. Effect of alfalfa and *Elymus sibiricus* mixture on forage yield and soil nutrients [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2):74-82.
- [27] 王文虎,曹文侠,王小军,等.河西走廊荒漠灌区不同豆禾混播对土壤养分及牧草产量的影响[J].*中国草地学报*,2022,44(5):40-49.
Wang Wenhui, Cao Wenxia, Wang Xiaojun, et al. Effects of Legume-grass mixtures on soil nutrients and forage yield in desert irrigated area of Hexi Corridor [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022,44(5):40-49.
- [28] 谢开云,张英俊,李向林,等.无芒雀麦和紫花苜蓿在(1:1)混播中的竞争与共存[J].*中国农业科学*,2015,48(18):3767-3778.
Xie Kaiyun, Zhang Yingjun, Li Xianglin, et al. Competition and coexistence of alfalfa(*Medicago sativa* L.) and smooth brome(*Bromus inermis* Layss.) in mixture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015,48(18):3767-3778.
- [29] 李惠珍,王天琦,宝音陶格涛,等.植物多样性水平对豆禾混播群落根系形态及叶面积指数的影响[J].*中国草地学报*,2022,44(1):50-57.
Li Huizhen, Wang Tianqi, Baoyintaogetao, et al. Effects of plant diversity on root morphology and leaf area index of Legume-grass mixture community [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022,44(1):50-57.
- [30] 赵泽欢,范兴科.土壤含水量对夏玉米蒸发蒸腾量和光合性能的影响[J].*干旱地区农业研究*,2022,40(5):126-133.
Zhao Zehuan, Fan Xingke. Effects of soil moisture content on evapotranspiration and photosynthetic performance of summer maize [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022,40(5):126-133.

(上接第 142 页)

- [17] 王茂林,宋玲,刘杰,等.双排高立式尼龙网阻沙障与草方格固沙障的优化配置及防沙效益[J].*水土保持学报*,2024,38(1):368-377.
Wang Maolin, Song Ling, Liu Jie, et al. Optimized configuration and sand control benefits of double-row high vertical nylon mesh sand barrier and grass lattice sand barrier [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(1):368-377.
- [18] Hesp P A, Walker I J, Chapman C, et al. Aeolian dynamics over a coastal foredune, prince Edward Island, Canada [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013,38(13):1566-1575.
- [19] Hesp P A, Smyth T A G. Jet flow over foredunes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016,41(12):1727-1735.
- [20] 张克存,屈建军,牛清河,等.青藏铁路沿线阻沙栅栏防护机理及其效应分析[J].*中国沙漠*,2011,31(1):16-20.
Zhang Kecun, Qu Jianjun, Niu Qinghe, et al. Protective mechanism and efficiency of sand-blocking fences along Qinghai-Tibet railway [J]. *Journal of Desert Research*, 2011,31(1):16-20.
- [21] 孙显科.辩证思维与风沙运动理论体系的创建和应用[M].北京:中国林业出版社,2010.
Sun Xianke. The creation and apply of eolian sand movement theory system in dialectical thinking [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [22] 姚正毅,屈建军,肖建华,等.刷状沙柳沙障固沙性能风洞模拟[J].*中国沙漠*,2024,44(3):290-297.
Yao Zhengyi, Qu Jianjun, Xiao Jianhua, et al. Wind tunnel simulation on the sand fixation performance of a kind of brush shaped *Salix psammophila* sand barrier [J]. *Journal of Desert Research*, 2024,44(3):290-297.