

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.005

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.

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

王一帆¹, 刘华清², 赵西宁^{2,3}, 高晓东^{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] 禾豆间作可兼顾生产和生态效益, 提高氮素利用效率并减少氮肥污染。目前对不同水分条件下禾豆间作体系氮素利用吸收及转移分配过程尚不清晰。[方法] 通过设置 2 时段总水量相同但间隔 3, 5 天的不同频次水处理, 结合根系分隔(不分隔、尼龙网分隔、塑料板分隔)和氮同位素标记方法, 研究间作禾豆牧草的地上生物量、氮素的吸收利用、固氮率和氮转移率。[结果] 间作披碱草的地上生物量、氮含量和氮素累积量相较单作披碱草显著提升, 而苜蓿间作相比单作均降低。在总水量持平的情况下, 高频水分处理使牧草的地上生物量比中低频水分处理分别提高 6.28%, 17.32%, 苜蓿的固氮率也在高频水处理下比中低频水处理分别提高 39.82%, 44.81%, 但部分中低频水分处理下氮含量和氮素累积量显著高于高频水分处理($p < 0.05$), 且促进氮素的转移。根系分隔使禾豆相互作用减弱, 表现为根系分隔增加间作苜蓿的地上生物量、各部位氮含量及地上部氮素累积量, 减小间作披碱草的对应指标。间作苜蓿的固氮和氮转移率表现为不分隔 > 尼龙网分隔 > 塑料板分隔。[结论] 适度的水分调控可以提高禾豆间作的优势, 且根系互作是促进豆科牧草生物固氮和氮转移的关键。

关键词: 禾豆间作; 根系分隔; 水分处理; 氮素利用; 氮转移效率

中图分类号: S344.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0279-09

Effects of Water and Root Separation on Nitrogen Uptake, Utilization and Transfer in a Gramineae-Legume Intercropping System

WANG Yifan¹, LIU Huaqing², ZHAO Xining^{2,3}, GAO Xiaodong^{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, Shannxi 712100, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Gramineae-legume intercropping can give consideration to production and ecological benefits, improve nitrogen use efficiency and reduce nitrogen pollution. At present, the process of nitrogen utilization, absorption and transfer distribution in gramineae-legume intercropping systems under different water conditions is not clear. [Methods] The above ground biomass, nitrogen absorption and utilization, nitrogen fixation rate, and nitrogen transfer rate of gramineae-legume intercropping were studied by using water treatment with the same total water amount in 2 periods but with an interval of 3 or 5 days, combined with root separation (non-separation, nylon mesh separation and plastic plate separation) and nitrogen isotope labeling methods. [Results] The aboveground biomass, nitrogen content and nitrogen accumulation of *E. dahuricus* intercropped with alfalfa were significantly increased compared with monoculture *E. dahuricus*, while, for alfalfa, the intercropping with *E. dahuricus* resulted in a decrease compared to monoculture alfalfa. Under the condition of the same total water amount, the above-ground biomass of the herbage increased by 6.28% and 17.32%, respectively, by high-frequency water treatment compared with medium and low frequency

收稿日期: 2023-12-20

修回日期: 2024-01-09

录用日期: 2024-01-22

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-10

资助项目: 区域创新发展联合基金重点项目 (U22A20613); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目 (42125705)

第一作者: 王一帆 (1999—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: wyftiffany@nwfau.edu.cn

通信作者: 赵西宁 (1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: zxn@nwsuaf.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

water treatments, and the nitrogen fixation rate of alfalfa was increased by 39.82% and 44.81%, respectively, under high-frequency water treatment compared with medium and low frequency water treatments. However, the nitrogen concentration and nitrogen accumulation under some middle and low frequency water treatments were significantly higher than those under high frequency water treatment ($p < 0.05$), and promoted nitrogen transfer. Root separation weakened the interaction between grass and bean, and showed that as root separation increased the aboveground biomass, nitrogen content and aboveground nitrogen accumulation of intercropping alfalfa, and decreased the corresponding indexes of intercropping *E. dahuricus*. The nitrogen fixation and nitrogen transfer rate of alfalfa intercropping were in the order of no separation > nylon mesh separation > plastic plate separation. [Conclusion] Moderate water regulation can improve the advantages of gramineae-legume intercropping, and root interaction is the key to promote the biological nitrogen fixation and nitrogen transfer of legume herbage.

Keywords: gramineae-legume intercropping; root separation; water treatment; nitrogen utilization; nitrogen transfer efficiency

Received: 2023-12-20

Revised: 2024-01-09

Accepted: 2024-01-22

Online(www.cnki.net): 2024-04-10

氮是陆地生态系统植物生产力中仅次于光和水的主要限制因素^[1-2]。而有限的自然 N 素供应一定程度上限制作物的生长与产量。施用氮肥是提高产量的重要方式。但是农业生产中投入过高的化学氮肥,导致大量残留氮素通过挥发、反硝化脱氮、淋溶和径流等方式损失,对土壤、大气和水体造成严重污染^[3-4]。而间作豆科作物则可兼顾生产和生态效益,通过生物固氮作用增加生态系统氮含量,提高氮素利用效率和生产力^[5-6],同时减少氮肥的使用,缓解农业污染。

禾豆间作中豆科植物固氮并向禾本科植物转移是产生混种效益的主要原因^[7-8]。同位素标记和根系分隔试验是研究间作体系氮素吸收利用转移的主要手段。同位素¹⁵N 技术不仅能区分植物氮营养中来源于土壤、肥料和大气氮的比例,而且可以测定豆科植物向非固氮植物的氮转移比例^[9];而根系分隔方法则可以减小或忽略地上互作对植株的影响,更好地阐释和控制地下部种间氮素吸收利用和转移的过程^[10]。

极端降水与干旱事件频发^[11],为农业生产带来新的挑战。众多研究表明,间作体系中通过种间作用的变化响应水分波动影响,间作系统能有效降低地表蒸发,提高作物的水分利用效率^[12],并且能使植物的根系形成互补,使水分得到及时补充^[13]。但目前关于不同水分频率变化通过调节地下部相互作用影响氮素吸收、利用和转移的研究较少,阻碍对于禾豆间作缓解气候变化机理的理解。

为解决上述问题,本研究通过设置不同频率的水分处理,结合根系分隔和氮同位素标记技术,对不同间作组合牧草的氮素利用吸收及转移分配过程进行研究,进一步为气候变化背景下氮素营养优化调控提供

理论依据,从而更好地服务于草原生态和草业生产。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

本研究采用盆栽控制试验,在西北农林科技大学旱区节水农业研究院的人工气候室进行。盆的规格为上直径 25 cm,下直径 22 cm,高 20 cm。基质土壤采自陕西西安寨,取样后过 2 mm 筛,筛除粒径较大的杂物和砾石,装土容重控制在 1.20 g/cm³。于 2022 年 10 月 18 日播种,基肥主要成分为尿素(46% N)、过磷酸钙(15% P₂O₅)和硫酸钾(52% K₂O),各处理的氮磷钾养分施用量相同(参照大田施肥量,N:100 kg/hm²;P₂O₅:120 kg/hm²;K₂O:90 kg/hm²),经计算施肥量为 N0:7 g/盆,P₂O₅:4.0 g/盆,K₂O:0.8 g/盆,与盆栽表层 10 cm 土壤混匀后加入。选取西北地区常见主栽品种紫花苜蓿(豆科)和披碱草(禾本科),每桶播种 30 株,间苗后单作每桶定植 12 株,间作处理则每侧各 6 株,一侧为苜蓿,另一侧为披碱草。并于 2022 年 12 月 10 日,追施¹⁵N 标记尿素(丰度 10%)和普通尿素 0.4 g/盆,溶于水后均匀施入土壤随后充分浇水使其均匀分布。

待植株缓苗并生长稳定后,于 2022 年 12 月 15 日开始 3 天为周期的水分处理,2023 年 1 月 11 日刈割后,第 2 茬在 2023 年 2 月 12 日开始 5 天为周期的水分处理。采用 3 因素设计试验:A 因素为 3 种不同水处理,通过称重法确定浇水量,即(1)高频率处理(3 天/5 天,浇水至田间持水量的 80%);(2)中频率处理(6 天/10 天,前 2 次水分处理的总和水量);(3)低频率处理(9 天/15 天,前 3 次水分处理的总和水量)。B 因素为 2 种植物品种组合,即(1)紫花苜蓿单作;

(2)披碱草单作;(3)紫花苜蓿与披碱草间作。C 因素为 3 种根系分隔方式,即(1)塑料片分离(0.5 mm 塑料片,防止根系接触、溶液和菌丝转移);(2)尼龙网分离(30 μm 尼龙网,防止根系接触,允许溶液和菌丝转移)(3)不分离(允许根系接触、溶液和菌丝转移)。设置 5 组重复,采用全因素试验,共 135 组处理。

1.2 测定项目与方法

生物量测定:在第一茬和第二茬刈割后,分采取集植物的叶片和茎部,根部则在第二茬刈割后冲洗法取出,并用吸水纸擦干,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min 后,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,之后放入干燥器中冷却,用电子天平称量植株各部分干重并计算总干重(根、茎、叶干重之和)。

全氮含量测定^[14]:将上述烘干样全株粉碎磨细并过 0.25 mm 筛,称取 2 g/份,湿润样品后加 5 mL 浓 H_2SO_4 ,摇匀后在消化炉上加热并于过程中加入 H_2O_2 ,反复 2~3 次直至消煮液呈无色或清亮色,定容后取过滤液用凯氏定氮仪测定其全氮含量。

^{15}N 相关指标测定及计算:分别于 2023 年 1 月 11 日和 3 月 13 日采集整株植物样,分部位称重烘干后粉碎过筛,并用同位素质谱仪(Isoprime 100 型,英国)测定 ^{15}N 丰度,并计算相应的生物固氮率($\text{NDFA}\%$)和生物固氮率($\text{NTFT}\%$)。计算公式为:

$$\text{氮素累积量}(\text{mg}/\text{株}) = \text{干物质质量} \times \text{氮含量} \quad (1)$$

$$\text{NDFA}\% = (1 - A\%E_{\text{MA}}/A\%E_{\text{PE}}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{NTFT}\% = 1 - (A\%E_{\text{ME}}/A\%E_{\text{PE}}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $A\%E$ 为施用 ^{15}N 肥料处理的植株样品 ^{15}N 的丰度与不施 ^{15}N 植株样品丰度差值; $A\%E_{\text{MA}}$ 为间作苜蓿的 ^{15}N 丰度; $A\%E_{\text{PE}}$ 为单作披碱草的 ^{15}N 丰度; $A\%E_{\text{ME}}$ 为间作披碱草的 ^{15}N 丰度。

1.3 数据处理

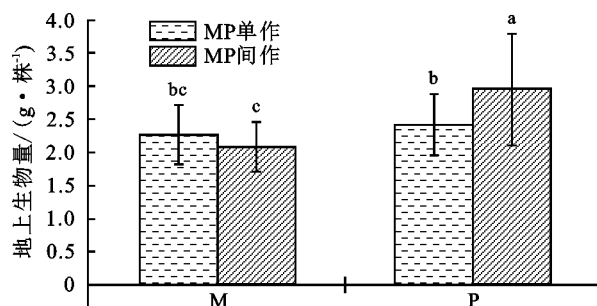
采用 Microsoft Excel 2018 软件对土壤含水量、植株氮含量、植株 ^{15}N 丰度等数据进行统计分析,并绘制柱状图折线图,利用 SPSS 22.0 统计分析软件包中的一般线性模型—单变量法和 Duncan 多重比较方法进行样本间差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水分处理和隔根方式对间作牧草地上生物量的影响

由图 1 和表 1 可知,苜蓿与披碱草间作使苜蓿的地上部生物量降低 8.23%,而披碱草的地上部生物量则显著上升 21.49%($p < 0.05$)。随 W1、W2、W3 水处理频率依次降低,苜蓿和披碱草各处理的地上生物量总体均呈下降趋势,与单作相比,苜蓿与披碱草间作使苜蓿的地上生物量降低幅度加大,其中在 R1 和 R3 隔根方式下 W3 低频水处理比 W1 高频水处理分别显著降低 6.43%和 21.90%($p < 0.05$),而苜蓿与披

碱草间作使披碱草的地上生物量下降幅度有所缓解,在 R2 和 R3 隔根方式下各水处理间均无显著差异;随 R3、R2、R1 根系互作强度逐渐增强,间作苜蓿的地上生物量随之下降,R1 隔根方式下的地上生物量比 R2 显著降低 15.27%,R2 比 R3 显著降低 15.41%($p < 0.05$);而间作披碱草的地上生物量则随根系互作强度增强得到显著提升,R1 隔根方式下的地上生物量比 R2 显著提升 16.22%,R2 比 R3 显著提升 23.85%($p < 0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同间作处理间差异显著($p < 0.05$);M 为苜蓿;P 为披碱草。下同。

图 1 各间作组合牧草地上生物量

Fig. 1 Aboveground biomass of forage in each intercropping combination

表 1 不同处理下各间作牧草地上部生物量

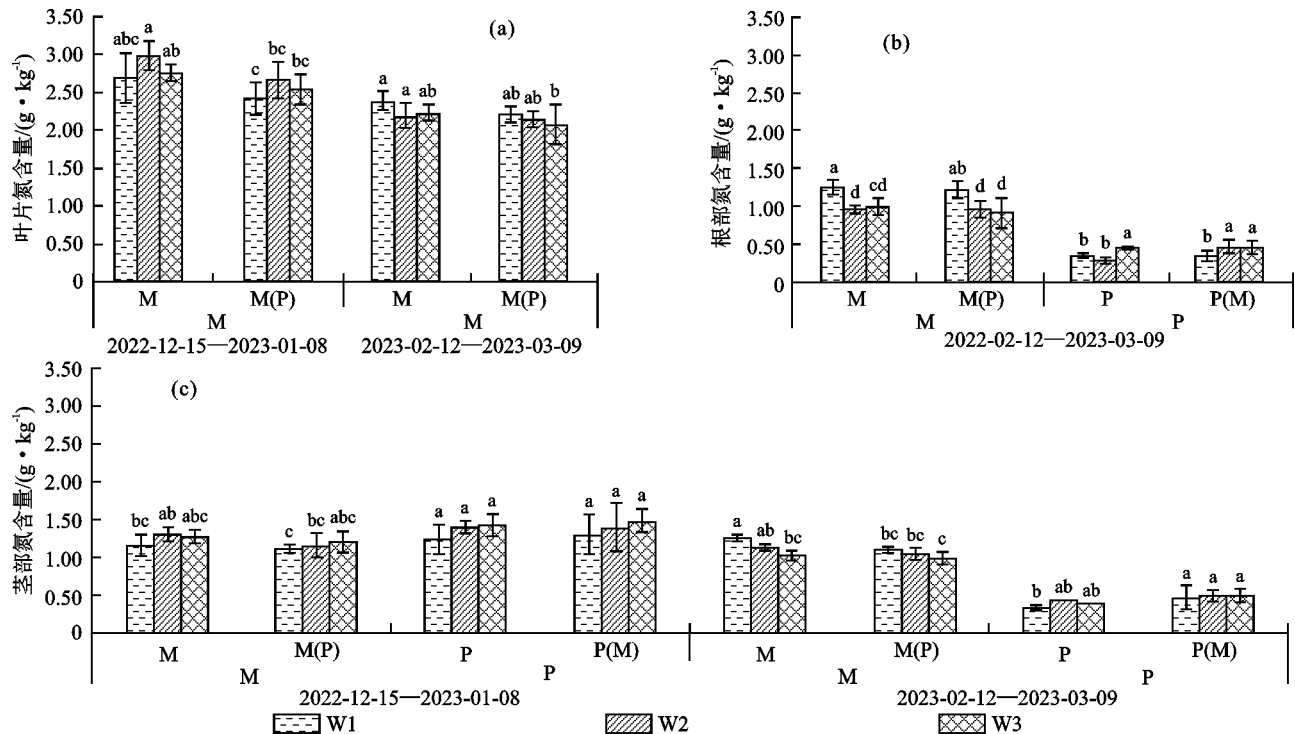
Table 1 The aboveground biomass of intercropping under different treatments g/株

隔根方式	水处理	M	M(P)	P	P(M)
R1	W1	2.62a	1.71ab	2.80a	3.79a
	W2	2.40a	1.84a	2.64a	3.34a
	W3	2.32a	1.60b	2.35b	3.18b
	平均	2.45A	1.72C	2.60A	3.44A
R2	W1	2.68a	2.14a	2.83a	3.40a
	W2	2.46ab	2.05a	2.50ab	3.01a
	W3	2.31b	1.89a	2.33b	2.46a
	平均	2.48A	2.03B	2.55A	2.96B
R3	W1	2.61a	2.74a	2.86a	2.78a
	W2	2.42ab	2.33b	2.70a	2.33a
	W3	2.32b	2.14b	2.13b	2.07a
	平均	2.45A	2.40A	2.56A	2.39C
水处理(W)		* *	* *	* *	NS
显著性隔根方式(R)		NS	* *	NS	* *
W×R		NS	NS	* *	NS

注:W1 为 3 天/5 天 1 次;W2 为 6 天/10 天 1 次;W3 为 9 天/15 天 1 次;R1 为不隔根;R2 为尼龙网分隔;R3 为塑料板分隔;同列不同小写字母表示同一种牧草在同一隔根方式下不同水处理间差异显著($p < 0.05$);同列不同大写字母表示同一种牧草不同隔根方式处理间差异显著($p < 0.05$);* 表示 $p < 0.05$; * * 表示 $p < 0.01$;NS 表示差异不显著。下同。

2.2 水分处理和隔根方式对间作牧草各部位氮含量的影响

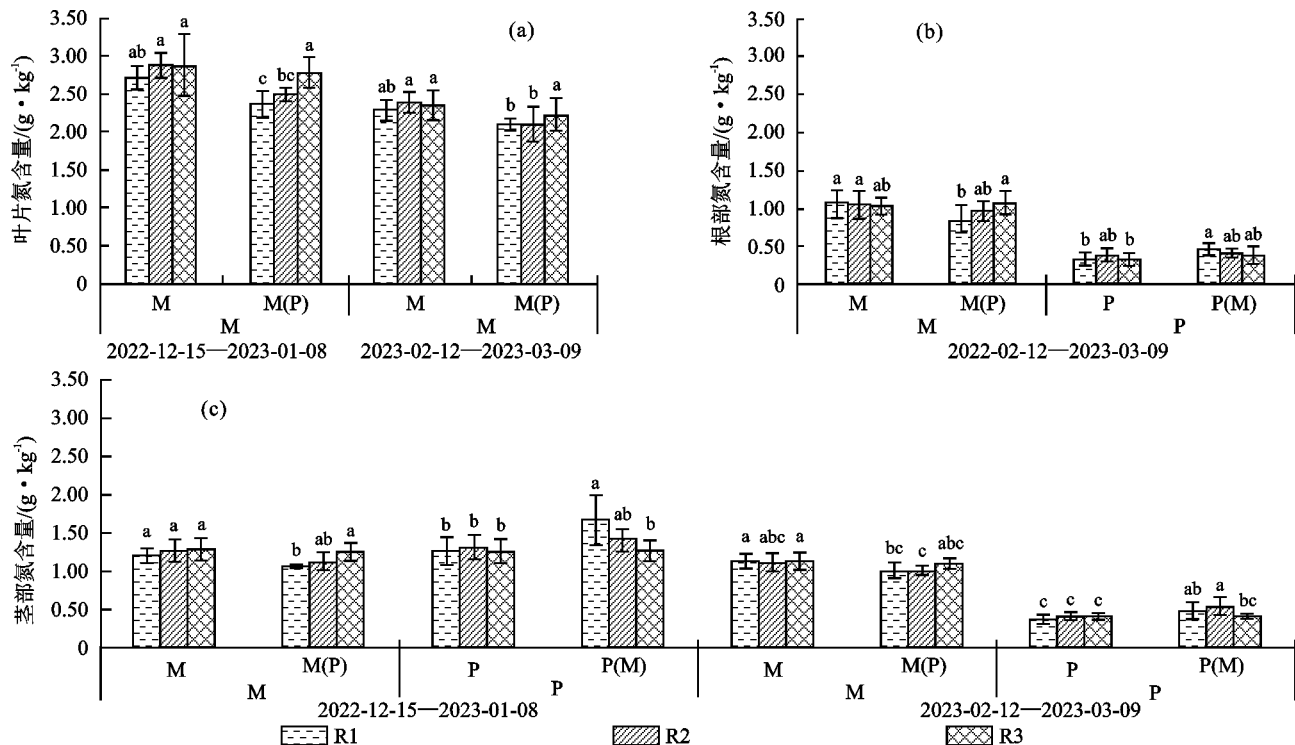
不同水处理和隔根方式下牧草各器官氮含量详见



注:图柱上方不同小写字母表示同一时段同一种牧草不同水处理间差异显著性($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同水处理下 2 个时段间作牧草各器官氮含量

Fig. 2 Nitrogen concentration in each organ of forage intercropping at two periods under different water treatment



注:图柱上方不同小写字母表示同一时段同一牧草不同隔根处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同隔根方式下 2 时段间作牧草各器官氮含量

Fig. 3 Nitrogen concentration in each organ of forage intercropping at two periods under different root separation methods

关于水处理对牧草各部位氮含量的影响。苜蓿 在第 1 时段 3 天为周期的水处理下,随处理频率的降

低呈上升或先上升后略微下降的趋势,但各处理间无显著差异,均在 W2、W3 的中低频水处理下达到最大值;而第 2 时段 5 天为周期的水处理下,苜蓿各部位的氮含量则随处理频率下降呈明显的下降趋势,其中单作苜蓿的茎部氮含量在 W3 低频处理下比 W1 显著降低 17.81%,根部氮含量在 W2、W3 中低频处理下分别比 W1 显著降低 22.47%,20.77%,间作苜蓿的根部氮含量在 W2、W3 中低频处理下分别比 W1 显著降低 20.49%,23.63% ($p<0.05$)。披碱草则在第 1 时段 3 天为周期的水处理和第 2 时段 5 天为周期的水处理下,均随处理频率的降低呈上升趋势,在 W2、W3 的中低频水处理下达到最大值,其中单作披碱草的根部氮含量在 W3 低频处理下分别比 W1、W2 显著提升 38.53%,63.48% ($p<0.05$)。

关于隔根方式对牧草各部位氮含量的影响,苜蓿和披碱草单作时,各隔根方式处理间无显著差异,而间作苜蓿和披碱草,随不分隔到塑料板分隔方式的互作强度降低呈现出不同趋势:间作苜蓿的各部位氮含量呈上升趋势,其中第 1 时段 R3 塑料板分隔时的叶片和茎部氮含量分别比 R1 不分隔时显著提升 16.97%,20.46%,第 2 时段 R3 塑料板分隔时的根部氮含量比 R1 不分隔时显著提升 26.77% ($p<0.05$);相反,间作披碱草的各部位氮含量则呈下降趋势,第 1 时段 R3 塑料板分隔时的茎部氮含量比 R1 不分隔时显著下降 24.33%,第 2 时段 R3 塑料板分隔时的茎部氮含量比 R2 尼龙网分隔时显著下降 21.85% ($p<0.05$)。

2.3 水分处理和隔根方式对间作牧草氮素累积及分配的影响

由图 4 可知,不同单作和间作牧草的地上部氮素累积量存在显著差异,间作苜蓿的地上部氮素累积量低于单作,间作披碱草的地上部氮素累积量则显著高于单作 ($p<0.05$)。可见,豆科牧草与禾本科牧草间作提高禾本科牧草的氮素累积量,而使豆科牧草的氮素累积量下降。

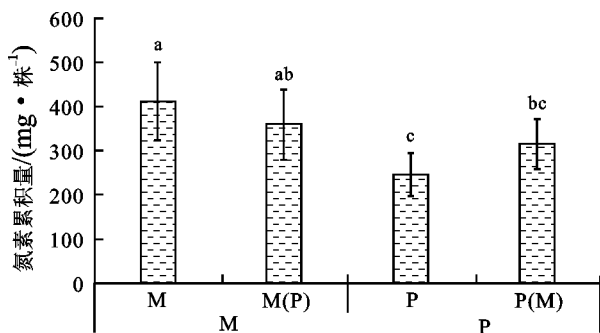


图 4 各间作组合牧草的地上部氮素累积量

Fig. 4 Aboveground nitrogen accumulation of forage each intercropping combination

牧草不同水处理和隔根方式下各部位氮素累积量见表 2、表 3。2 个时段苜蓿的氮素累积量均表现为叶片>茎部;且与单作相比,间作降低苜蓿叶片和茎部的氮素累积量,而提升了披碱草的地上部氮素累积量。

表 2 不同水处理下各间作牧草地上部各部位氮素累积量

Table 2 Nitrogen accumulation in the aboveground biomass of intercropped grassland under different water treatment mg/株				
间作方式	水处理	叶片	茎	地上部
M	W1	270.04a	148.26bc	418.30ab
	W2	284.84a	160.16bc	445.00a
	W3	230.53a	138.45c	368.98abc
M(P)	W1	227.51a	132.04c	359.55abc
	W2	232.68a	133.07c	365.75abc
	W3	208.74a	125.58c	334.32abc
P	W1		272.06ab	272.06bc
	W2		235.56abc	235.56c
	W3		236.78abc	236.78c
P(M)	W1		317.02a	317.02abc
	W2		298.33a	298.33abc
	W3		314.90a	314.90abc

注:同列不同小写字母表示同一时段同一种牧草不同水处理间差异显著 ($p<0.05$)。

表 3 不同隔根方式下各间作牧草地上部各部位氮素累积量

Table 3 Nitrogen accumulation in the aboveground biomass of each intercropped pasture under different root separation methods mg/株				
间作方式	水处理	叶片	茎	地上部
M	R1	302.89a	168.41cd	471.30a
	R2	312.99a	174.13c	487.12a
	R3	309.37a	171.63c	481.00a
M(P)	R1	191.94b	115.92e	307.86bc
	R2	222.56b	135.97de	358.53b
	R3	290.80a	174.74c	465.54a
P	R1		265.24b	265.24bcd
	R2		273.34b	273.34bcd
	R3		274.93b	274.93bcd
P(M)	R1		354.47a	354.47b
	R2		331.24a	331.24b
	R3		245.80b	245.80cd

注:同列不同小写字母表示同一时段同一种牧草不同隔根处理间差异显著 ($p<0.05$)。

关于水处理对牧草各部位氮素累积量的影响。随 W1、W2、W3 水处理频率依次降低,苜蓿各部位氮累积量随频率的降低呈先上升后下降的趋势,在 W2 中频水处理下达到最大值,而披碱草地上部氮素累积量则随频率的降低呈先下降后上升的趋势,在 W2 中频水处理下达到最小值,但二者各处理间均无显著差异。

关于隔根方式对牧草各部位氮素累积量的影响。

苜蓿和披碱草单作时,各隔根方式处理间无显著差异,而间作苜蓿和披碱草的地上部氮素累积量随根系互作强度的降低呈现出不同趋势:从 R1 不分隔到 R3 塑料板分隔,间作苜蓿呈现出上升趋势,R3 塑料板分隔时的叶片氮素累积量比 R1、R2 不分隔和尼龙网分隔时显著上升 51.51%,30.66% ($p<0.05$),R3 分隔时的茎部氮素累积量比 R1、R2 显著上升 50.74%,28.51% ($p<0.05$);而间作披碱草 R3 塑料板分隔时的地上部氮素累积量比 R1、R2 不分隔和尼龙网分隔时显著下降 30.66%,25.79% ($p<0.05$),第 2 时段 R3 分隔时的地上部氮素累积量比 R1 不分隔时显著下降 41.37% ($p<0.05$)。

2.4 水分处理和隔根方式对苜蓿生物固氮率及氮素由苜蓿向披碱草转移的影响

苜蓿在不同时段隔根方式和水处理下的固氮率见表 4。不同部位的固氮率在不同时段的隔根方式和水处理下存在差异:2 个时段植株地上部和地下部的固氮率均随水处理频率降低而下降,其中第 1 时段 R1 隔根方式下 W2 水处理比 W1 显著下降 42.13%;R2 隔根方式下 W3 水处理比 W1 和 W2 分别显著降低 40.83%和 32.12%;R3 隔根方式下 W2 和 W3 水处理分别比 W1 显著降低 38.60%和 40.64% ($p<0.05$)。第 2 时段植株地上部 R2 隔根方式下 W2 和 W3 水处理分别比 W1 显著降低 32.92%和 55.84%,植株地下部 R1 隔根方式下 W3 水处理比 W2 显著降低 58.53%;R2 隔根方式下 W2 和 W3 水处理分别比 W1 显著降低 50.31%和 59.63%;R3 隔根方式下 W2 和 W3 处理分别比 W1 显著降低 82.92%和 81.30% ($p<0.05$)。经方差分析得出,除隔根方式对第 2 时段植株地上部的固氮率无显著影响外,其余处理均在水处理和隔根方式下存在显著差异。

与披碱草间作的苜蓿在不同时段隔根方式和水处理下的氮转移率见表 5。氮素转移率在不同时段的隔根方式和水处理下存在差异,2 个时段植株地上部和地下部的氮转移率均随水处理频率降低总体呈现上升趋势,但具体表现存在差异,植株地上部氮转移率第 1 时段 R1 隔根方式下 W2 处理比 W1 显著提升 83.67%,植株地上部氮转移率第 2 时段 R1 隔根方式下 W2 和 W3 水处理比 W1 分别显著提高 63.37%和 56.87%;R2 隔根方式下 W3 水处理比 W1 和 W2 分别显著提高 43.32%和 41.44% ($p<0.05$),植株地下部 R1 隔根方式下 W3 水处理比 W2 处理显著提升 63.83%;R2 隔根方式下 W2 水处理比 W1 和 W3 分别显著提升 54.18%和 51.84% ($p<0.05$)。经

方差分析得出,水处理和隔根方式对不同时段苜蓿不同部位的氮素转移率均产生显著影响。

表 4 不同处理下与披碱草间作的苜蓿各部位的固氮率

Table 4 The nitrogen fixation rate (Ndfa) of alfalfa intercropped with alkaline grass under different treatments %				
隔根方式	水处理	第 1 时段	第 2 时段	
		植株地上部	植株地上部	植株地下部
R1	W1	14.86a	32.69ab	—
	W2	8.60bc	27.77ab	21.97a
	W3	—	24.92abc	9.11bc
R2	W1	15.60a	34.99a	22.74a
	W2	14.24a	23.47bc	11.30b
	W3	9.23bc	15.45c	9.18bc
R3	W1	12.72ab	25.03abc	19.09a
	W2	7.81c	23.64bc	3.26c
	W3	7.55c	22.22bc	3.57c
水处理(W)		* *	*	* *
显著性隔根方式(R)		* *	NS	* *
W×R		*	*	* *

表 5 不同处理下与披碱草间作的苜蓿各部位的氮转移率

Table 5 The nitrogen transfer rate (NTFT) of alfalfa intercropped with alkaline grass under different treatments %				
隔根方式	水处理	第 1 时段	第 2 时段	
		植株地上部	植株地上部	植株地下部
R1	W1	14.64b	8.19c	—
	W2	26.89a	22.36a	24.88b
	W3	—	18.99ab	40.76a
R2	W1	12.99b	9.00c	8.61c
	W2	12.62b	9.30c	18.79b
	W3	16.05b	15.88b	9.05c
R3	W1	0.23c	0.47d	0.20d
	W2	0.15c	−0.40d	0.23d
	W3	−0.16c	0.10d	0.17d
水处理(W)		*	* *	* *
显著性隔根方式(R)		* *	* *	* *
W×R		* *	* *	* *

3 讨论

3.1 水分处理和隔根方式对间作牧草氮素吸收利用的影响

氮素作为植物生长发育阶段最重要的元素之一,在植株内处于不断吸收、同化、转运和分配的动态中^[15-16],并由此影响干物质累积过程。本研究中,苜蓿与披碱草间作有利于披碱草各部位氮含量和氮素累积量的提升,而降低苜蓿各部位的氮含量和氮素累积量,进而显著提升披碱草的地上生物量、降低苜蓿的地上生物量,由此表明披碱草具有较强的资源获取

能力和竞争能力,在禾豆间作模式下处于竞争优势,生长高度超过苜蓿,并对其遮阴抑制苜蓿的根系发育,影响苜蓿对氮素的吸收和利用^[17],进而对其生长和干物质质量累积产生影响。且在第1时段施用土壤基肥的情况下,披碱草可以通过快速发芽和根系拓展优势对土壤资源拥有更大的获取能力^[18],氮含量与苜蓿无显著差异,甚至略高于苜蓿,但第2时段经过刈割且未追肥的情况下,土壤氮素相对匮乏,披碱草的氮含量明显快速下降,与苜蓿间作使氮含量得到显著提升。

当进行频率依次降低的水处理时,苜蓿和披碱草大部分于中低频处理时达到氮含量和累积量的峰值,可知适度降低水频率更有利于光合产物向根系的分配,减少养分随水分向深层土壤的迁移流失,对作物氮素吸收有一定促进作用^[19-20];而部分苜蓿在5天为周期的水处理下,氮含量在低频处理下有显著下降,披碱草的氮含量仍保持上升趋势,这可能是由于披碱草的抗旱性强于苜蓿,对水处理频率的需求不高,故更适应于中低频的水分处理。

在不同的根系互作强度下,间作牧草的氮吸收表现不同。间作苜蓿的氮含量和氮素累积量表现为塑料板分隔>尼龙网分隔>不分隔,而披碱草则表现相反,该结果与汪雪等^[21]和董楠等^[22]的研究结果一致。塑料板分隔时,根系和养分被隔开,地下无任何互作,牧草的氮含量和氮素累积量与其单作时无显著差异;尼龙网分隔时,根系具有半交互作用,根系无法直接接触,但菌根可以通过并吸收养分,故使披碱草氮含量和氮素累积量得到提升;不分隔时,苜蓿与披碱草根系相互重叠,菌根侵染率升高,加强披碱草从苜蓿一侧竞争性地吸收氮素,使氮素浓度和氮素累积量显著上升,苜蓿根系环境中的氮素浓度则降低。

3.2 水分处理和隔根方式对苜蓿生物固氮及氮素转移的影响

本研究表明,苜蓿与披碱草间作有利于披碱草氮含量和氮素累积量的提升,而降低苜蓿的氮含量和累积量,探究其内在原因:一是苜蓿根须腐烂分解释放养分,被间作披碱草吸收利用^[23];二是苜蓿的共生固氮作用,将固定的氮素直接转移给披碱草^[24];三是在间作苜蓿与披碱草根系互作逐渐增强,披碱草根系空间得到扩展,有利于披碱草竞争到更多氮素^[25-26]。本研究针对固氮和氮转移这一过程,进一步深入研究水分和根系互作对其产生的影响。

关于生物固氮,本试验前期的固氮率明显低于刈割后的生物固氮率,分析其主要受牧草生长和土壤有

效氮的影响,前期苜蓿根系和根瘤发育未完全成熟且施用基肥使土壤有效氮含量充足,苜蓿固氮率较低;随着苜蓿生长逐渐成熟,且未追施氮肥,在刈割后的第2时段固氮率得到显著提升。随着水处理频率降低,苜蓿各部位的生物固氮率随之下降,主要因为水分短缺抑制牧草生长,降低土壤中根瘤菌存活率及苜蓿根系结瘤数,进而削弱苜蓿的固氮能力^[27]。另外,苜蓿的固氮率在根系不分隔时大于尼龙网分隔和塑料板分隔,主要由于根系互作减弱或隔绝时,养分和水分被部分或完全隔开,披碱草无法竞争到苜蓿根系周围的氮素,而苜蓿周围较高的氮素浓度抑制根瘤的生长^[28],而不分隔时,披碱草刺激根系生长并获取更多的氮营养,以此降低苜蓿根系环境中的氮素浓度,进而有利于苜蓿固氮有效性的增加,且苜蓿结瘤固氮加强种间氮素的互馈利用,并随生育期的推进更加强烈^[22]。由此可知,根系互作关系越紧密,越有利于苜蓿增加根瘤固氮的有效性,提高其结瘤固氮能力。

关于氮素转移,有研究^[29]表明,豆科植物与非豆科植物间作系统中80%的氮素转移是从固氮的豆科植物流向非豆科植物,氮素转移率平均在3.1%~15.0%,豆科植物根系组织的分解、根系分泌物和菌根途径是目前已知的3个重要转移途径。本研究中氮转移率表现为不分隔>尼龙网分隔>塑料板分隔,未分隔和尼龙网分隔可以使苜蓿和披碱草之间形成交错复杂的菌丝网络,并通过菌丝网对氮素养分进行充分利用和再分配,从而使氮转移率显著高于塑料板分隔,且本研究采用的30 μm孔径尼龙网在有效阻止根系接触的同时允许菌丝通过发生氮素转移^[30],表明部分氮是通过根系充分接触进行转移的,使其氮转移率低于不分隔处理。且随水处理频率的升高,氮转移率整体上呈下降趋势,这表明过高频率的水处理造成土壤氮随水向深层土壤迁移,不利于牧草间养分的互馈吸收,影响氮素的吸收与转运。

4 结论

本研究结果表明,在不同水分处理和隔根方式下,豆科与禾本科牧草间作在氮素的吸收利用及分配方面具有显著优势。总水量持平的情况下,高频率的水分处理虽有利于植物地上部生物量的累积,且能适当促进苜蓿的固氮效能,但不利于作物各部位氮素的吸收累积和转移分配;植物的地下根系交互程度越高,越能促进地上部的生长,且通过增强牧草间的养分竞争促进氮素的吸收与利用,与此同时还能增加苜蓿固氮的有效性,并将更高比例的氮素转移至非固氮的披碱草。因此,在发挥禾本科牧草与豆科牧草间作

优势的同时,要考虑牧草品种的选择、水分调控管理及作物空间布局等因素,通过科学优化牧草的种间互补、充分发挥豆科牧草的生物固氮潜力,实现牧草对氮素的高效利用并减少氮肥施用量,促进农业生态的可持续发展。

参考文献:

- [1] TAYLOR B N, MENGE D N L. Light regulates tropical symbiotic nitrogen fixation more strongly than soil nitrogen[J]. *Nature Plants*, 2018, 4: 655-661.
- [2] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555: 363-366.
- [3] MARTIN-GUAY M O, PAQUETTE A, DUPRAS J, et al. The new green revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 767-772.
- [4] PANKOU C, LITHOURGIDIS A, DORDAS C. Effect of irrigation on intercropping systems of wheat (*Triticum aestivum* L.) with pea (*Pisum sativum* L.)[J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): e283.
- [5] 任媛媛, 赵兰兰, 张岁岐. 旱区间作水分高效利用机制探讨[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 55-62.
REN Y Y, ZHAO L L, ZHANG S Q. Mechanism of high-efficient water use of intercropping in arid regions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 55-62.
- [6] 陆保福, 康文娟, 师尚礼, 等. 豆科植物-根瘤菌固氮系统及其碳氮互作[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(11): 119-135, 144.
LU B F, KANG W J, SHI S L, et al. Nitrogen fixation system of legume-rhizobia and its carbon-nitrogen interaction[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(11): 119-135, 144.
- [7] 焦念元, 汪江涛, 尹飞, 等. 施用乙烯利和磷肥对玉米//花生间作氮吸收分配及间作优势的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1477-1484.
JIAO N Y, WANG J T, YIN F, et al. Effects of ethephon and phosphate fertilizer on N absorption and intercropped advantages of maize and peanut intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1477-1484.
- [8] XU R X, ZHAO H M, LIU G B, et al. Alfalfa and silage maize intercropping provides comparable productivity and profitability with lower environmental impacts than wheat-maize system in the North China Plain[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 195: e103305.
- [9] 任静, 刘小勇, 刘芬, 等. 核桃/大豆间作对氮素吸收利用及转移的影响[J]. *经济林研究*, 2022, 40(1): 1-10.
REN J, LIU X Y, LIU F, et al. Absorption, utilization and transfer efficiency of nitrogen in walnut-soybean intercropping pattern[J]. *Non-wood Forest Research*, 2022, 40(1): 1-10.
- [10] 赵雅姣, 刘晓静, 童长春, 等. 紫花苜蓿/玉米间作对紫花苜蓿结瘤固氮特性的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(1): 95-105.
ZHAO Y J, LIU X J, TONG C C, et al. Factors influencing nodulation and N fixation ability of alfalfa in a simulated alfalfa/maize intercropping system[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 95-105.
- [11] PACHAURI K, MEYER A. Climate change 2014. Synthesis report[J]. *Environmental Policy Collection*, 2014, 27(2): e408.
- [12] 安颖蔚, 史书强, 冯良山, 等. 玉米/大豆间作提高农田生产力和水分利用效率研究[J]. *园艺与种苗*, 2016, 36(9): 80-83.
AN Y W, SHI S Q, FENG L S, et al. Productivity enhancement and water use efficiency of maize-soybean intercropping[J]. *Horticulture and Seed*, 2016, 36(9): 80-83.
- [13] 刘丽娟, 魏云霞, 黄洁, 等. 木薯间作玉米共生期间的作物生长及根系互作[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(3): 732-742.
LIU L J, WEI Y X, HUANG J, et al. Growth and root interaction during symbiotic period when intercropping cassava with maize[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(3): 732-742.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-268.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 264-268.
- [15] 彭正萍. 植物氮素吸收、运转和分配调控机制研究[J]. *河北农业大学学报*, 2019, 42(2): 1-5.
PENG Z P. Absorption, transportation and regulation of nitrogen element in plants[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42(2): 1-5.
- [16] 王春晓, 郑永美, 矫岩林, 等. 以¹⁵N示踪技术分析叶面施氮对花生氮素吸收、分配及利用率的影响[J/OL]. *中国油料作物学报*: 1-8 [2023-12-15]. <http://doi.org/10.19802/j.jssn.1007-9084.2023012>.
WANG C X, ZHENG Y M, JIAO Y L, et al. Effects of foliar topdressing of labeled urea (¹⁵N) on nitrogen absorption, distribution and utilization of peanut[J/OL]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*: 1-8 [2023-12-15]. <http://doi.org/10.19802/j.jssn.1007-9084.2023012>.
- [17] 汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 等. 根系分隔方式下紫花苜蓿/燕麦间作氮素利用及种间互馈特征研究[J]. *草业学报*, 2021, 30(8): 73-85.

- WANG X, LIU X J, ZHAO Y J, et al. Nitrogen utilization and interspecific feedback characteristics of intercropped alfalfa/oat with different root barriers[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 73-85.
- [18] 张叶, 聂凌利, 邢蔓, 等. 施氮水平对油菜生育后期氮素吸收积累和分配的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(5): 67-73.
- ZHANG Y, NIE L L, XING M, et al. Effects of nitrogen application level on nitrogen uptake, accumulation and distribution in oilseed rape during late growing period[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5): 67-73.
- [19] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 119-126.
- SONG M D, LI Z P, FENG H. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 119-126.
- [20] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对甘肃河西地区滴灌春小麦氮素吸收和利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 597-605.
- ZHANG Y X, ZHANG F C, ZOU H Y, et al. Effects of soil water regulation at different growing stages on nitrogen uptake and utilization of spring wheat in the Hexi Region, Gansu Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 597-605.
- [21] 汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 等. 不同根系交互强度下紫花苜蓿/甜高粱体内氮营养动态特征研究[J]. *草地学报*, 2022, 30(1): 76-83.
- WANG X, LIU X J, ZHAO Y J, et al. Dynamic characteristics of nitrogen nutrition in alfalfa/sweet sorghum intercropping under different root interaction intensities[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 76-83.
- [22] 董楠, 唐明明, 崔文倩, 等. 不同根系分隔方式对栗和茶幼苗生长的影响[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(1): 62-73.
- DONG N, TANG M M, CUI W Q, et al. Growth of chestnut and tea seedlings under different root partitioning patterns[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(1): 62-73.
- [23] HAUGGAARD-NIELSEN H, GOODING M, AMBUS P, et al. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64-71.
- [24] NEUMANN A, WERNER J, RAUBER R. Evaluation of yield-density relationships and optimization of intercrop compositions of field-grown pea-oat intercrops using the replacement series and the response surface design[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(2): 286-294.
- [25] 汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 等. 紫花苜蓿/燕麦间作对燕麦碳、氮代谢及其物质积累的影响研究[J]. *草地学报*, 2021, 29(10): 2258-2264.
- WANG X, LIU X J, ZHAO Y J, et al. Effects of alfalfa/oat intercropping on carbon and nitrogen metabolism and matter accumulation of oat[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10): 2258-2264.
- [26] 冯晓敏, 高翔, 臧华栋, 等. 燕麦-绿豆间作效应及氮素转移特性[J]. *植物学报*, 2023, 58(1): 122-131.
- FENG X M, GAO X, ZANG H D, et al. Intercropping effect and nitrogen transfer characteristics of oat-mungbean intercrop[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2023, 58(1): 122-131.
- [27] MARQUEZ-GARCIA B, SHAW D, COOPER J W, et al. Redox markers for drought-induced nodule senescence, a process occurring after drought-induced senescence of the lowest leaves in soybean (*Glycine max*) [J]. *Annals of Botany*, 2015, 116(4): 497-510.
- [28] 李娟, 王文丽, 赵旭, 等. 根际分隔对玉米/豌豆间作种间竞争及豌豆结瘤固氮的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(6): 177-183.
- LI J, WANG W L, ZHAO X, et al. Effect of roots partitions on interspecific competition and nitrogen fixation in the pea-maize intercropping[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(6): 177-183.
- [29] 刘振洋, 吴鑫雨, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作体系氮素吸收累积动态及其种间氮素竞争关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(7): 1284-1294.
- LIU Z Y, WU X Y, TANG L, et al. Dynamics of N acquisition and accumulation and its interspecific N competition in a wheat-faba bean intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(7): 1284-1294.
- [30] 朱亚琼, 黎松松, 王宁欣, 等. 根瘤菌-根系构型-丛枝菌根真菌对混播草地氮素固定与转移效率的影响[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(11): 18-31.
- ZHU Y Q, LI S S, WANG N X, et al. Effects of rhizobium-root system-arbuscular mycorrhizal fungi features on nitrogen fixation and transfer efficiency of mixed sowing meadow[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(11): 18-31.