

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0668

孟翔, 刘伟, 褚皓清, 颜安, 谢开云, 孙伶俐, 赵越. 灌溉、磷肥及 AM 真菌互作对紫花苜蓿地土壤养分的影响. 草业科学, 2023, 40(5): 1220-1231.

MENG X, LIU W, CHU H Q, YAN A, XIE K Y, SUN L L, ZHAO Y. Effects of irrigation, phosphate fertilizers, and arbuscular mycorrhizal fungal interaction on soil nutrient content in alfalfa fields. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1220-1231.

## 灌溉、磷肥及 AM 真菌互作对紫花苜蓿地土壤养分的影响

孟翔, 刘伟, 褚皓清, 颜安, 谢开云, 孙伶俐, 赵越

(新疆农业大学草业学院 / 新疆草地资源与生态重点实验室 /  
西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 土壤养分是影响紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 优质高产的重要因素。为探究灌溉、磷肥和丛枝菌根 (AM) 真菌对紫花苜蓿土壤养分的影响, 本研究设置调亏灌溉 (RDI) 和定额灌溉 (QI) 两个灌溉处理, 磷肥 0 ( $P_0$ )、60 ( $P_1$ )、120 ( $P_2$ ) 和 180  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $P_3$ ) 4 个肥力梯度, 以及 AM (土壤不灭 AM 真菌) 和 -AM (土壤灭 AM 真菌) 两种处理。结果表明: 定额灌溉处理提高了根际土壤和非根际土壤有效磷含量, 施磷肥和 AM 处理均显著增加了土壤中全磷和有效磷含量; 在 0-20、20-40 和 40-60 cm 土层紫花苜蓿根际土壤有效磷含量均大于土壤有效磷含量, 说明丛枝菌根真菌对紫花苜蓿根际土壤和非根际土壤有效磷含量有重要贡献。

**关键词:** 调亏灌溉; 定额灌溉; 施磷; 丛枝菌根; 根际土壤; 土壤全磷; 土壤有效磷

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2023)05-1220-12

### Effects of irrigation, phosphate fertilizers, and arbuscular mycorrhizal fungal interaction on soil nutrient content in alfalfa fields

MENG Xiang, LIU Wei, CHU Haoqing, YAN An, XIE Kaiyun, SUN Lingli, ZHAO Yue

(College of Grassland Sciences of Xinjiang Agricultural University / Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology /  
Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology for Western Arid Desert Rengion,  
Ministry of Education Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** Soil nutrient content is an important factor affecting the quality and high yield of alfalfa (*Medicago sativa*). In order to explore the effects of irrigation, phosphate fertilizers, and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on soil nutrients in alfalfa fields, two irrigation treatments, namely regulated deficit irrigation (RDI) and quota irrigation (QI), four fertility gradients generated by applying 0 ( $P_0$ ), 60 ( $P_1$ ), 120 ( $P_2$ ) and 180  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  ( $P_3$ ) of phosphate fertilizer, as well as two treatments, namely AM (soil can not kill AM fungi) and -AM (soil can kill AM fungi), were set up in this study. The results showed that QI treatment increased the available phosphorus content in rhizosphere and non-rhizosphere soil, and the application of phosphorus fertilizers and AM treatment significantly increased the total phosphorus and available phosphorus content in the soil. The available phosphorus content in rhizosphere soil at 0-20, 20-40 and 40-60 cm layers was higher than that in non-rhizosphere soil, indicating that AM fungi contributed considerably to the available phosphorus content in alfalfa rhizosphere and non-rhizosphere soil.

收稿日期: 2022-08-26 接受日期: 2022-10-12

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2022B02003); 国家自然科学基金 (31660604)

第一作者: 孟翔 (1994-), 男, 甘肃通渭人, 在读硕士生, 主要从事草地管理与牧草生产研究。E-mail: 1228339247@qq.com

通信作者: 谢开云 (1984-), 男, 甘肃武威人, 副教授, 博士, 主要从事牧草生产及养分利用教学与研究工作。E-mail: xkycah@163.com

**Keywords:** regulated deficit irrigation; quota irrigation; phosphate fertilizer application; mycorrhizal fungi; rhizosphere soil; total phosphorus in soil; soil available phosphorus

**Corresponding author:** XIE Kaiyun E-mail: xkycah@163.com

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 作为优质豆科牧草, 具有草产量高、品质优、根系发达、适应性强等优点<sup>[1-2]</sup>, 在现代畜牧业发展和农牧业产业结构调整中发挥着重要作用<sup>[3-4]</sup>。紫花苜蓿生产主要集中在我国北方地区, 产量和品质主要受品种、土壤和气候条件、水肥管理等多因素的影响, 其中灌溉和施肥是影响其优质高产的最重要因素<sup>[5-6]</sup>。调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, RDI) 作为一种生物节水技术, 将有限的水资源用到苜蓿生长最关键的时期, 不仅节水效果显著, 而且可以在保证苜蓿产量和品质的前提下提高水分利用效率<sup>[7]</sup>。现有的研究均认为调亏灌溉在一定程度上损失了紫花苜蓿的产量, 但显著提高了水分利用效率, 节水效果显著<sup>[8]</sup>。磷是紫花苜蓿生产的关键营养元素, 但在实际生产中施入的磷肥容易与土壤中金属离子结合形成难溶性磷酸盐<sup>[9]</sup>, 导致磷利用效率偏低。目前相关的研究虽在施磷量和施磷时期上存在部分差异, 但普遍认为施入适量的磷肥可以显著提高紫花苜蓿的产量和品质<sup>[10]</sup>。丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 能够与 80% 以上的陆生植物根系形成共生关系, 促进宿主植物对矿质营养的吸收 (尤其是磷)<sup>[11]</sup>, 增加宿主植物的抗性, 从而提高宿主植物的生物产量<sup>[12]</sup>。研究认为接种 AMF 能显著提高紫花苜蓿的产量和品质的主要原因是两者结合后形成的菌根扩大了紫花苜蓿养分吸收范围, 改善了其营养状况<sup>[13]</sup>。综合目前的研究, 围绕紫花苜蓿开展的灌溉方式和灌溉量<sup>[14-15]</sup>、不同磷肥水平<sup>[16]</sup> 和 AM 菌根真菌<sup>[17-18]</sup> 的研究相对较多, 重点关注了紫花苜蓿的生产性能和营养价值, 而水、肥和微生物因素综合对土壤养分的影响研究未见报道。本研究以紫花苜蓿为对象, 设置两种灌溉量、4 种磷肥梯度以及两种 AM 真菌处理, 研究灌溉、施磷及菌根真菌互作对紫花苜蓿土壤养分的影响, 以期为干旱半干旱地区紫花苜蓿在合理灌溉和科学施肥下实现优质高产提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

研究区位于新疆乌鲁木齐市头屯河区新疆农业

大学三坪实习农场 (43°92' E, 87°35' N, 海拔 580 m), 属于温带大陆性半干旱气候, 日照充足, 年日照时数为 2 829.4 h, 年降水量为 228.8 mm, 年均蒸发量为 2 647 mm, 无霜期为 163 d, 年均气温 7.2 °C, 最高气温 42 °C。土壤为含砾砂壤土, 偏黏性, 养分含量为有机质 15.998 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮为 1.632 g·kg<sup>-1</sup>, 速效氮为 60.223 mg·kg<sup>-1</sup>, 全磷为 0.215 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷为 18.569 mg·kg<sup>-1</sup>, 全钾为 18.440 g·kg<sup>-1</sup>, 速效钾为 296.659 mg·kg<sup>-1</sup>, pH 8.37。

### 1.2 试验方案

试验采用再裂区设计, 主区设置定额灌溉 (quota irrigation, QI) 和调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, RDI), 灌溉量分别为该区域紫花苜蓿种植正常灌溉量和定额灌溉的 70%<sup>[19]</sup>, 采用水表控制, 实际灌溉量如表 1 所列。灌溉方式采用地表滴灌, 每个小区铺设 5 条滴灌带, 间距 60 cm。副区设置土壤不处理 (AM) 和土壤灭 AM 真菌处理 (-AM), 即定期喷施苯菌灵 (6 g·m<sup>-2</sup> 苯菌灵)。处理小区内实际喷施苯菌灵 (50%) 为 180 g, 每间隔 20 d 喷施 1 次<sup>[20]</sup>。裂区处理设置 0、60、120、180 kg·hm<sup>-2</sup> 4 个磷肥梯度。试验所用磷肥为重过磷酸钙 [Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·CaHPO<sub>4</sub>; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≥ 46%], 返青后随水施肥, 小区实际施磷肥量

表 1 定额和调亏灌溉的实际灌溉量  
Table 1 Irrigation amount under the two methods

序号 No.	时间 Time/ (MM-DD)	调亏灌溉 Regulated deficit irrigation/m <sup>3</sup>	定额灌溉 Quota irrigation/m <sup>3</sup>
1	05-11	47	66
2	05-20	80	114
3	06-03	77	107
4	06-22	89	131
5	07-07	50	72
6	07-22	44	63
7	08-19	66	95
8	09-15	88	125
合计 Total		541	773

分别为 0、174.4、348.8、523.2 g。共计 16 个处理组合, 每个处理组合 4 次重复, 共计 64 个小区, 小区面积  $15 \text{ m}^2$  ( $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ), 小区间隔 1 m。试验处理期间每个小区补施钾肥(硫酸钾  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), 一次性均匀撒施在每个小区, 标准为  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (小区实际施入量为 82.5 g), 试验期间共刈割 3 次。紫花苜蓿选用‘新牧 4 号’品种(‘Xinmu No.4’)。播种时间为 2020 年 9 月 30 日, 返青时间为 2021 年 5 月 9 日, 3 次刈割时间为 2021 年 7 月 5 日, 2021 年 8 月 20 日, 2021 年 10 月 1 日, 取土时间为 2021 年 10 月 1 日。通过测定丛枝菌根真菌(AMF)对紫花苜蓿根系的侵染率, 得出 AM 处理下紫花苜蓿侵染率(36%)显著高于 -AM 处理下紫花苜蓿侵染率(15%) ( $P < 0.05$ )。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 土壤样品采集

试验结束后在每小区随机选取样点, 用土钻分 0—20、20—40、40—60 cm 层取土样, 装入自封袋, 风干两周后, 全量分析过 0.15 mm 筛备测, 速效养分分过 2 mm 筛备测。

#### 1.3.2 根际土壤样品采集

每个小区随机选取长势均匀一致的紫花苜蓿 5~6 株, 挖出苜蓿植株根系, 抖落与根系结合松散的土壤, 然后用镊子将附着在植株根系表面的土壤轻轻刮下作为根际土样, 装入自封袋, 风干两周后, 全磷分析过 0.15 mm 筛备测, 有效磷分析过 2 mm 筛备测。

#### 1.3.3 土壤养分含量测定

土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定, 土壤全磷含量采用碱熔融—钼锑抗比色测定, 有效磷含量采用 HCl 和  $\text{H}_2\text{SO}_4$  混合液浸提—钼锑抗比色测定, 土壤全钾含量采用碱熔融—原子吸收火焰光度法测定, 速效钾含量采用乙酸铵浸提—原子吸收火焰光度法测定<sup>[21]</sup>。

#### 1.3.4 隶属函数综合评价

采用隶属函数评价法进行综合评价, 具体方法:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min});$$

测定指标为负相关指标的隶属函数值计算公式:

$$\mu(X_j) = 1 - (X_j - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}).$$

式中:  $\mu(X_j)$  为隶属函数值,  $X_j$  表示  $j$  指标的测定值,  $X_{j\max}$  和  $X_{j\min}$  分别为  $j$  指标中的最大值和最小值。

### 1.4 数据统计

采用 Excel 2013 汇总数据, SPSS 20.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 所得的数据进行配对  $T$  检验, Graphpad Prism 8.0 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对土壤全氮和全钾含量的影响

灌溉量对土壤全钾含量具有显著影响 ( $P < 0.05$ ) (表 2)。在 0—20 和 40—60 cm 土层深度, 土壤全钾含量在 RDI 处理下显著高于 QI 处理 ( $|t_{0-20}| = 2.718, P = 0.011; |t_{40-60}| = 2.311, P = 0.028$ ), 在 20—40 cm

表 2 不同处理下土壤全钾和土壤全氮方差分析

Table 2 Variance analysis of soil total potassium and soil nitrogen under different treatments

项目 Item	df	土壤全钾 Soil total potassium						土壤全氮 Soil total nitrogen					
		0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm		0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
区组 Block	3	1.077	0.305	1.355	0.250	0.242	0.625	1.443	0.236	0.828	0.367	0.829	0.367
灌溉 Irrigation (I)	1	5.970	0.018	4.227	0.045	4.174	0.047	0.109	0.743	3.087	0.085	0.017	0.895
磷肥 Phosphate fertilizer (P)	3	1.227	0.311	0.412	0.745	0.365	0.779	0.806	0.497	2.040	0.121	0.236	0.871
丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungi (A)	1	0.010	0.921	0.128	0.722	0.248	0.621	0.012	0.912	2.180	0.146	0.205	0.653
I × P	3	0.761	0.522	0.449	0.719	0.142	0.934	0.212	0.887	1.339	0.273	0.916	0.440
I × A	1	0.278	0.601	3.604	0.064	0.076	0.783	0.025	0.876	3.956	0.053	0.050	0.823
P × A	3	0.980	0.410	0.522	0.669	0.413	0.745	0.294	0.830	0.583	0.629	0.584	0.628
I × P × A	3	0.266	0.850	0.592	0.623	0.088	0.966	0.253	0.859	0.277	0.842	0.643	0.591

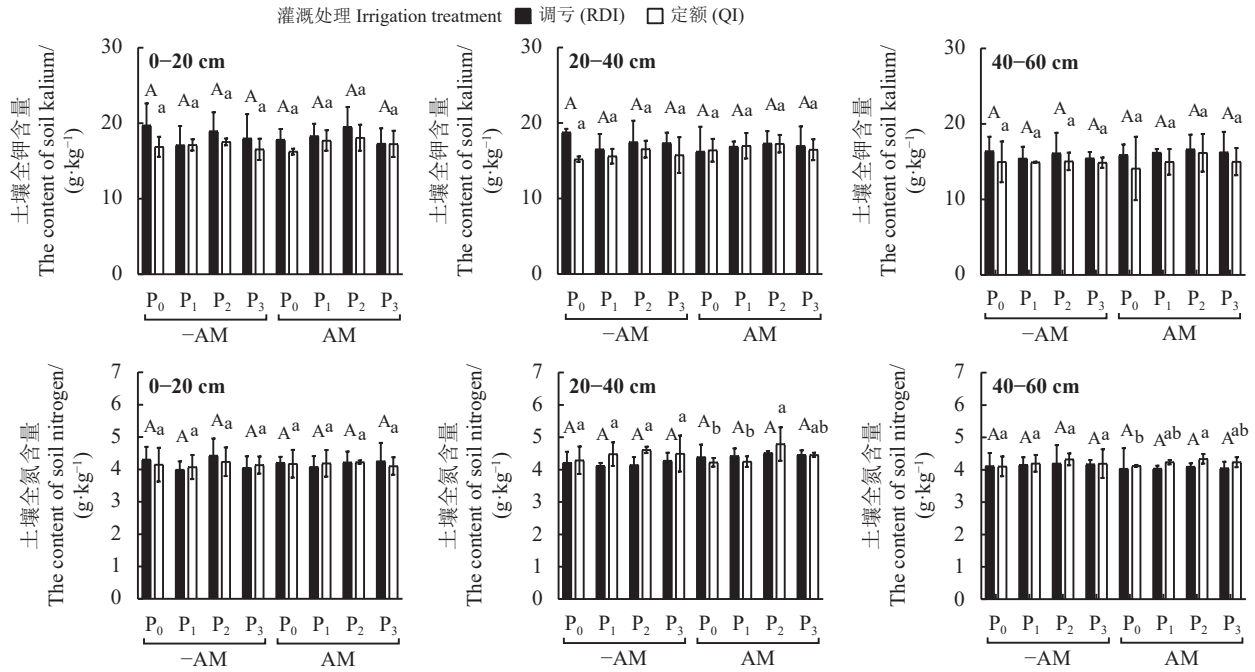


图 1 不同处理对土壤全钾和全氮含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on the content of total potassium and nitrogen in the soil

QI, 定额灌溉; RDI, 调亏灌溉; P<sub>0</sub>、P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>和P<sub>3</sub>表示施磷量分别为0、60、120和180 kg·hm<sup>-2</sup>; -AM为土壤灭AM真菌处理。不同大写字母表示同一菌根真菌处理在调亏灌溉和不同磷梯度间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一菌根真菌处理在定额灌溉下不同磷梯度间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同灌溉处理和真菌处理不做比较, 由配对  $T$  检验完成)。下图同。

QI, quota irrigation; RDI, regulated deficit irrigation; P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, and P<sub>3</sub> indicate the phosphorus application rates were 0, 60, 120, and 180 kg·hm<sup>-2</sup>; -AM and AM refer to the different AM treatments indicate the absence or presence of AM fungi in soil, respectively. different capital letters indicate significant difference with same mycorrhizal fungal treatment under regulated deficit irrigation and different phosphorus gradients, and different lowercase letters indicate significant difference with same mycorrhizal fungal treatment under quota irrigation and different phosphorus gradients (different irrigation and fungal treatments were not compared, and are completed by paired  $T$ -tests). this is applicable for the following figures as well .

土层深度下土壤全钾含量在 RDI 处理与 QI 处理无显著差异 ( $|t_{20-40}| = 2.023, P = 0.052$ ); 另外, 土壤全钾含量在 -AM 处理与 AM 处理无显著差异 ( $|t_{0-20}| = 0.107, P = 0.915$ ;  $|t_{20-40}| = 0.344, P = 0.733$ ;  $|t_{40-60}| = 0.494, P = 0.625$ ) (图 1)。

灌溉量和土壤灭 AM 真菌处理对土壤全氮含量无显著影响 ( $P > 0.05$ ) (表 2)。土壤全氮含量在 RDI 处理与 QI 处理间无显著差异 ( $|t_{0-20}| = 0.380, P = 0.706$ ;  $|t_{20-40}| = 1.880, P = 0.070$ ;  $|t_{40-60}| = 0.139, P = 0.890$ ); 土壤全氮 -AM 处理与 AM 处理间无显著差异 ( $|t_{0-20}| = 0.129, P = 0.898$ ;  $|t_{20-40}| = 1.501, P = 0.144$ ;  $|t_{40-60}| = 0.471, P = 0.641$ ); 随着土壤深度增加土壤全钾和全氮逐渐减少 (图 1)。

## 2.2 不同处理下土壤全磷和根际全磷含量

两种灌溉量对土壤全磷含量有显著影响 ( $P < 0.05$ ) (表 3); 不同磷肥处理对紫花苜蓿地 0—40 cm 土层全磷和根际土壤全磷含量均具有显著影响 ( $P < 0.05$ )。

在 0—20 cm 土层全磷含量在 RDI 处理与 QI 处理之间无显著差异 ( $|t_{0-20}| = 1.950, P = 0.060$ ), 但在 20—40 和 40—60 cm 土层全磷含量在 QI 处理显著高于 RDI 处理 ( $|t_{20-40}| = 2.430, P = 0.021$ ;  $|t_{40-60}| = 2.173, P = 0.038$ ) (图 2)。

根际土壤全磷含量在 RDI 处理与 QI 处理之间无显著差异 ( $|t_{0-20}| = 0.259, P = 0.797$ ;  $|t_{20-40}| = 0.268, P = 0.790$ ;  $|t_{40-60}| = 0.798, P = 0.431$ ); 土壤全磷 ( $|t_{0-20}| = 0.415, P = 0.681$ ;  $|t_{20-40}| = 0.923, P = 0.363$ ;  $|t_{40-60}| = 0.463, P = 0.647$ ) 和根际土壤全磷 ( $|t_{0-20}| = 0.136, P = 0.893$ ;  $|t_{20-40}| = 0.609, P = 0.547$ ;  $|t_{40-60}| = 0.951, P = 0.349$ ) 含量在 -AM 处理与 AM 处理均无显著差异。苜蓿土壤全磷和根际全磷随着施磷量的增加呈先增加后降低 (图 2)。

## 2.3 不同处理下土壤速效钾和有效磷含量

施磷肥处理对土层深度 20—40 和 40—60 cm 的土壤速效钾具有显著影响 ( $P < 0.05$ ) (表 4)。0—20 cm

表3 不同处理下土壤全磷和根际土壤全磷方差分析

Table 3 Variance analysis of soil total phosphorus and rhizosphere soil total phosphorus under different treatments

项目 Item	df	土壤全磷 Soil total phosphorus						根际土壤全磷 Total phosphorus in rhizosphere soil					
		0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
区组 Block	3	0.027	0.871	0.929	0.400	0.514	0.280	0.929	0.340	2.291	0.137	0.125	0.725
灌溉 Irrigation (I)	1	4.743	0.034	6.216	0.016	4.425	0.041	0.083	0.775	0.084	0.773	0.373	0.544
磷肥 Phosphate fertilizer (P)	3	8.514	<0.000 1	5.831	0.002	2.717	0.055	32.258	<0.000 1	6.022	0.001	2.014	0.125
丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungi (A)	1	0.268	0.607	1.108	0.298	0.203	0.654	0.021	0.886	0.383	0.539	0.776	0.383
I × P	3	4.503	0.007	0.061	0.980	0.230	0.875	4.580	0.007	0.527	0.666	0.124	0.945
I × A	1	3.682	0.061	0.328	0.570	1.729	0.195	2.537	0.118	0.400	0.530	1.915	0.173
P × A	3	5.231	0.003	0.596	0.621	0.836	0.481	3.061	0.037	0.734	0.537	0.177	0.912
I × P × A	3	0.721	0.545	0.672	0.573	1.336	0.274	1.301	0.285	2.526	0.069	0.247	0.863

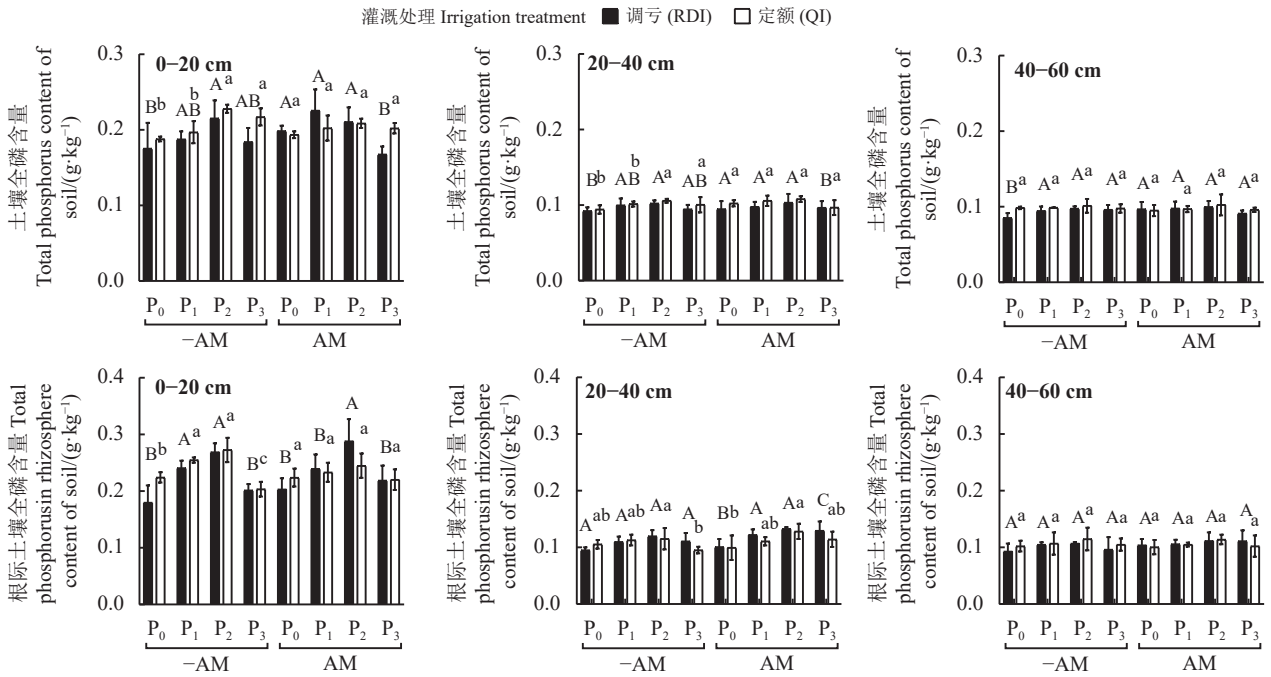


图2 不同处理对土壤全磷和根际土壤全磷含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on the content of total phosphorus in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil

土壤速效钾 RDI 条件与 QI 条件无显著差异 ( $|t_{0-20}| = 2.474, P = 0.190$ ), 20-40 cm 土壤速效钾 RDI 条件极显著高于 QI 条件 ( $|t_{20-40}| = 38.227, P < 0.01$ ), 40-60 cm 土壤速效钾 RDI 条件极显著高于 QI 条件 ( $|t_{40-60}| = 46.032, P < 0.01$ ); 0-20 cm 层土壤速效钾 -AM 处理极显著高于 AM 处理 ( $|t_{0-20}| = 3.033, P = 0.005$ ), 而在 20-40 和 40-60 cm 层土壤速效钾 -AM 处理与 AM 处理无显著差异 ( $|t_{20-40}| = 0.192,$

$P = 0.849$ ;  $|t_{40-60}| = 0.294, P = 0.770$ ) (图3)。

灌溉、磷肥和土壤灭 AM 真菌处理均对土壤有效磷具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ) (表4); 灌溉和磷肥处理均对根际土壤有效磷具有极显著影响, 土壤灭 AM 真菌处理对 0-20 和 40-60 cm 根际土壤有效磷具有极显著影响, 对 20-40 cm 根际土壤有效磷具有显著影响 ( $P < 0.05$ ); 灌溉和磷肥交互作用对根际土壤有效磷 (0-20 和 40-60 cm) 具有显著影响;

表 4 不同处理下土壤速效钾、土壤有效磷和根际土壤有效磷方差分析  
**Table 4 Analysis of variance of soil available potassium, soil available phosphorus in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil under different treatments**

项目 Item	df	土壤速效钾 Soil available potassium					
		0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm	
		F	P	F	P	F	P
区组 Block	3	0.169	0.069	2.264	0.139	0.059	0.809
灌溉 Irrigation (I)	1	4.026	0.051	1.493	0.228	0.040	0.842
磷肥 Phosphate fertilizer (P)	3	2.756	0.053	3.310	0.028	20.573	< 0.000 1
丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungi (A)	1	10.160	0.003	0.031	0.862	0.127	0.723
I × P	3	0.315	0.815	0.068	0.977	7.244	< 0.000 1
I × A	1	1.055	0.310	0.044	0.836	9.369	0.004
P × A	3	3.187	0.032	0.300	0.825	0.641	0.592
I × P × A	3	0.270	0.847	0.046	0.987	2.374	0.082

项目 Item	df	土壤有效磷 Soil available phosphorus					
		0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm	
		F	P	F	P	F	P
区组 Block	3	0.509	0.290	0.038	0.846	1.888	0.176
灌溉 Irrigation (I)	1	57.643	< 0.000 1	38.081	< 0.000 1	62.582	< 0.000 1
磷肥 Phosphate fertilizer (P)	3	391.834	< 0.000 1	509.828	< 0.000 1	159.614	< 0.000 1
丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungi (A)	1	92.344	< 0.000 1	21.501	< 0.000 1	15.752	< 0.000 1
I × P	3	2.031	0.122	4.068	0.012	2.222	0.098
I × A	1	12.075	0.001	6.701	0.013	2.242	0.141
P × A	3	8.748	< 0.000 1	0.496	0.687	0.854	0.472
I × P × A	3	2.008	0.126	0.092	0.964	0.333	0.801

项目 Item	df	根际土壤有效磷 Soil available phosphorus in rhizosphere					
		0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm	
		F	P	F	P	F	P
区组 Block	3	2.414	0.127	0.170	0.682	0.804	0.374
灌溉 Irrigation (I)	1	270.147	< 0.000 1	53.323	< 0.000 1	65.586	< 0.000 1
磷肥 Phosphate fertilizer (P)	3	683.734	< 0.000 1	448.780	< 0.000 1	92.372	< 0.000 1
丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungi (A)	1	264.592	< 0.000 1	5.279	0.026	14.875	< 0.000 1
I × P	3	5.336	0.003	2.079	0.116	3.125	0.035
I × A	1	74.654	< 0.000 1	1.085	0.303	0.454	0.504
P × A	3	20.391	< 0.000 1	0.349	0.790	3.000	0.040
I × P × A	3	12.273	< 0.000 1	0.850	0.474	1.340	0.273

磷肥和土壤灭 AM 真菌处理交互作用对 0—20 cm 根际土壤有效磷具有极显著影响, 对 40—60 cm 根际土壤有效磷具有显著影响。

土壤有效磷含量在 QI 处理下极显著高于 RDI 处理 ( $|t_{0-20}| = 6.627, P < 0.01; |t_{20-40}| = 5.127, P < 0.01; |t_{40-60}| = 7.407, P < 0.01$ ); 同样, 在 AM 处理下极显著

高于 -AM 处理 ( $|t_{0-20}| = 6.717, P < 0.01; |t_{20-40}| = 4.578, P < 0.01; |t_{40-60}| = 3.786, P = 0.001$ ); 根际土壤有效磷含量在 QI 处理极显著高于 RDI 处理 ( $|t_{0-20}| = 7.566, P < 0.01; |t_{20-40}| = 6.354, P < 0.01; |t_{40-60}| = 6.681, P < 0.01$ ); 同样, 在 AM 处理下显著高于 -AM 处理 ( $|t_{0-20}| = 6.530, P < 0.05; |t_{20-40}| = 2.535, P = 0.017$ ;

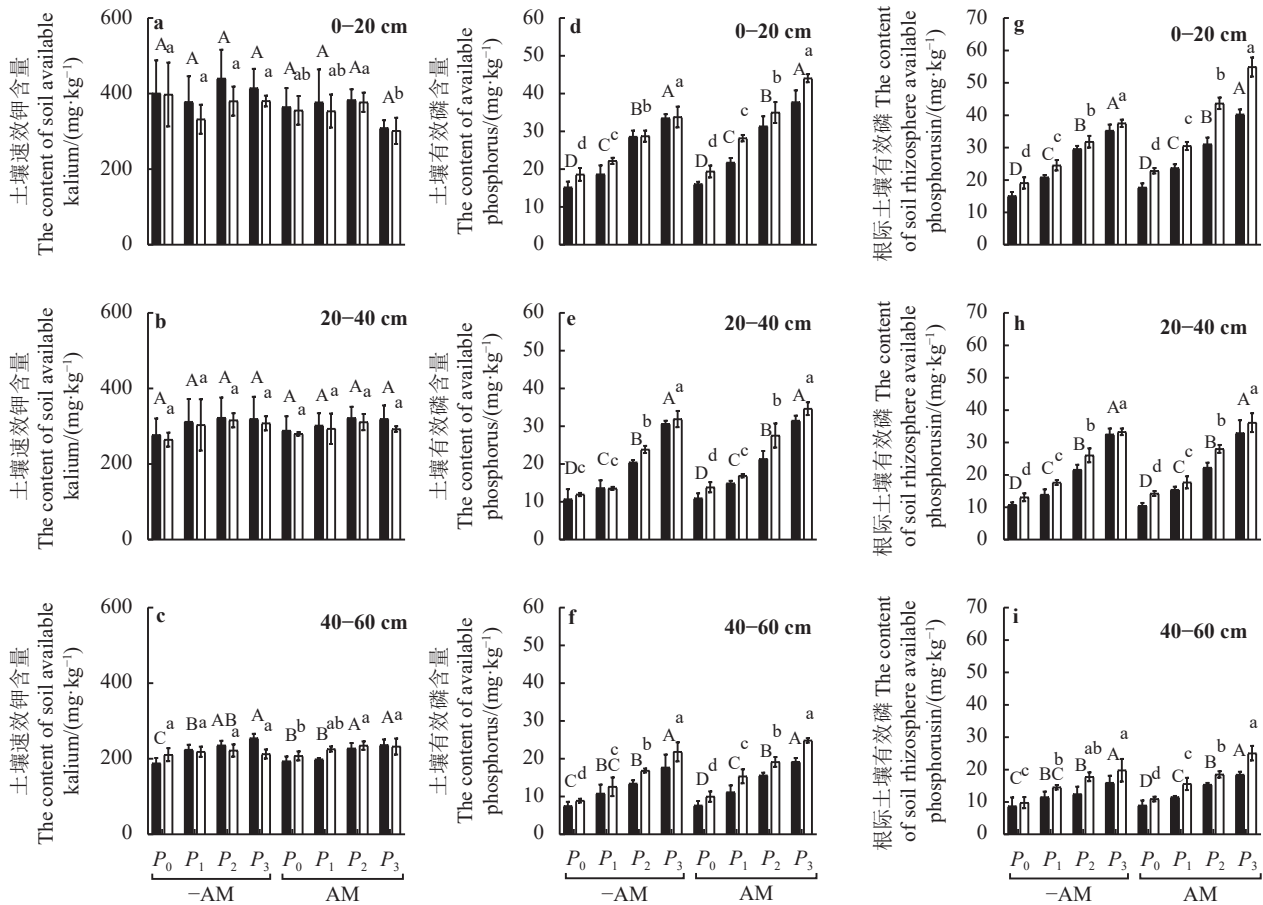


图3 不同处理对土壤速效钾和有效磷及根际土壤有效磷含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on the content of available potassium, available phosphorus and in rhizosphere and non-rhizosphere soil

表5 不同处理下各指标相关性分析  
Table 5 Correlation analysis of each index under different treatments

指标 Index	土壤全钾 Soil total kalium	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤全磷 Soil total phosphorus	根际土壤全磷 Soil total phosphorus in rhizosphere	土壤速效钾 Soil available kalium	土壤有效磷 Soil available phosphorus
土壤全氮 Soil total nitrogen	-0.091					
土壤全磷 Soil total phosphorus	0.350**	-0.124				
根际土壤全磷 Soil total phosphorus in rhizosphere	0.337**	-0.111	0.915**			
土壤速效钾 Soil available kalium	0.397**	0.013	0.702**	0.664**		
土壤有效磷 Soil available phosphorus	0.237**	0.033	0.507**	0.488**	0.482**	
根际土壤有效磷 Soil available phosphorus in rhizosphere	0.224**	0.042	0.549**	0.516**	0.482**	0.955**

$|t_{40-60}| = 3.643$ ,  $P = 0.001$ ); 在 0—20、20—40 和 40—60 cm 层次根际土壤有效磷含量 (分别为 29.91、21.62、14.68  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 均大于土壤有效磷含量 (分别为 27.08、20.55、14.56  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 土壤有效磷和根际有效磷随着施磷量的增加逐渐增加 (图 3)。

### 2.4 各指标相关性分析和隶属函数综合评价

通过 Pearson 相关性分析表明 (表 5), 不同处理条件下, 土壤全钾、土壤全磷、根际土壤全磷、土壤速效钾、土壤有效磷、根际土壤有效磷两两比较均

表 6 不同处理下各指标综合评价  
Table 6 Comprehensive evaluation of each index under different treatments

处理 Treatment	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤全磷 Soil total phosphorus	根际土壤 全磷 Soil total phosphorus in rhizosphere	土壤全钾 Soil total kalium	有效磷 Soil available phosphorus	根际 有效磷 Soil available phosphorus in rhizosphere	速效钾 Soil available kalium	平均 Mean	排名 Rank
RDI + P <sub>0</sub> + (-AM)	0.33	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.23	0.124	XVI
RDI + P <sub>1</sub> + (-AM)	0.00	0.35	0.67	0.29	0.14	0.14	0.51	0.315	XII
RDI + P <sub>2</sub> + (-AM)	0.45	0.76	0.77	0.71	0.41	0.36	1.00	0.654	IV
RDI + P <sub>3</sub> + (-AM)	0.20	0.26	0.24	0.50	0.69	0.60	0.95	0.508	VII
RDI + P <sub>0</sub> + (AM)	1.00	0.45	0.24	0.39	0.02	0.03	0.12	0.256	XIII
RDI + P <sub>1</sub> + (AM)	0.24	0.83	0.60	0.57	0.21	0.20	0.30	0.448	X
RDI + P <sub>2</sub> + (AM)	0.51	0.74	1.00	0.82	0.50	0.42	0.62	0.748	II
RDI + P <sub>3</sub> + (AM)	0.44	0.01	0.25	0.47	0.78	0.70	0.23	0.529	VI
QI + P <sub>0</sub> + (-AM)	0.24	0.33	0.38	0.04	0.09	0.09	0.27	0.213	XIV
QI + P <sub>1</sub> + (-AM)	0.43	0.53	0.64	0.11	0.21	0.27	0.16	0.378	XI
QI + P <sub>2</sub> + (-AM)	0.81	1.00	0.82	0.29	0.51	0.50	0.53	0.663	III
QI + P <sub>3</sub> + (-AM)	0.49	0.76	0.20	0.05	0.77	0.69	0.43	0.486	VIII
QI + P <sub>0</sub> + (AM)	0.22	0.46	0.34	0.00	0.14	0.16	0.10	0.191	XV
QI + P <sub>1</sub> + (AM)	0.36	0.63	0.49	0.36	0.39	0.36	0.27	0.452	IX
QI + P <sub>2</sub> + (AM)	0.98	0.80	0.73	0.58	0.69	0.68	0.56	0.829	I
QI + P <sub>3</sub> + (AM)	0.47	0.51	0.41	0.24	1.00	1.00	0.00	0.599	V

呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。通过隶属函数分析对苜蓿各指标的综合评价表明,  $QI + P_2 + (AM) > RDI + P_2 + (AM) > QI + P_2 + (-AM)$  是苜蓿生产性能排名前三的处理 (表 6)。

### 3 讨论

土壤水分不仅直接影响紫花苜蓿的产量和品质<sup>[22]</sup>, 同样也会影响其对土壤养分的利用效率<sup>[23]</sup>。充足的灌溉量既有利于牧草生长发育, 增加牧草产量和品质, 也促进牧草吸收更多的土壤养分<sup>[24]</sup>。在本研究中, 两种灌溉量对土壤全氮含量无显著影响, 这可能是因为紫花苜蓿作为豆科牧草具有生物固氮功能, 减少了对土壤氮素的消耗<sup>[25]</sup>。土壤全钾含量在 RDI 处理下显著高于 QI 处理, 主要是因为 QI 处理下紫花苜蓿的干草产量显著高于 RDI 处理, 导致 QI 处理的紫花苜蓿吸收更多的土壤钾元素<sup>[26]</sup>。土壤有效磷和根际土壤有效磷含量均表现为 QI 处理显著高于 RDI 处理, 是因为充足的水分条件更有益

于紫花苜蓿生长, 增加根系密度和分布空间, 产生的有机酸可以活化土壤磷, 产生植物所需的有效磷<sup>[27]</sup>。此外, Sardans 和 Peñuelas<sup>[28]</sup> 也研究发现土壤水分短缺条件下会显著降低土壤磷素的有效性。

磷是紫花苜蓿生长过程中需求量最大且最容易短缺的养分元素<sup>[29]</sup>。施磷肥可以显著增加土壤有效磷含量, 有利于紫花苜蓿草产量提高<sup>[30]</sup>, 施磷可以提高土壤有效磷含量<sup>[31]</sup>, 改善植物的生长环境<sup>[31-33]</sup>。另外, 有研究认为施磷肥可以显著增加土壤有机质含量<sup>[34]</sup>, 从而减少磷在土壤中的吸附, 提高土壤磷的有效性<sup>[35]</sup>。在本研究中发现根际土壤有效磷高于非根际土壤有效磷含量, 这与彭琪等<sup>[36]</sup> 研究中紫花苜蓿根际土壤有效磷含量高于非根际土壤有效磷含量的结果一致。同样, 李金辉等<sup>[37]</sup> 对不同种植年限紫穗槐根际的有效磷进行了研究, 结果也表明根际土壤的有效磷含量高于非根际土壤的有效磷含量。另外, 在本研究中施磷处理对土壤全氮和土壤全钾无显著影响, 这与毛小涛<sup>[38]</sup> 研究的施用磷肥对



苜蓿土壤氮和钾含量无显著影响的结果一致。

AM真菌能与大多数陆生植物的根系形成共生关系,参与磷循环过程,提高磷素利用效率<sup>[1]</sup>。在本研究中土壤速效钾含量在-AM处理显著高于AM处理,这主要是在同一钾水平下,AM真菌与植物形成的共生关系对土壤钾的吸收与利用有促进作用<sup>[39]</sup>,最终导致在AM处理下的土壤钾低于-AM处理。另外,在本研究中紫花苜蓿根际土壤有效磷和非根际土壤有效磷在AM处理高于-AM处理,主要是因为菌根互作(包括植物根系分泌物和土壤微生物真菌、细菌的互作)对植物调动和获取更多的养分至关重要<sup>[40]</sup>,AM真菌与根系共生作用可以促进植物根系分泌物如磷酸酶活性和有机酸的组成和量来活化土壤难溶性磷酸盐,以此可以提高磷利用率<sup>[36]</sup>。

土壤水分不仅影响着养分在土壤中的移动和植物对养分的吸收、利用和分配<sup>[41]</sup>,且也有利于AM真菌与植物根系形成共生关系,提高牧草根系对土壤养分的利用效率<sup>[42]</sup>。水磷耦合显著促进紫花苜蓿产量的增加,也可以增加土壤磷的有效含量,提高磷素利用效率<sup>[43-44]</sup>。这与本研究结果一致,调亏灌溉会显著降低土壤磷素的有效性,施磷肥会显著增加土壤磷有效性,水磷耦合处理下土壤有

效磷含量显著增加。此外,施磷和AM处理交互作用仅对0—20 cm土壤全磷和有效磷影响显著。AM真菌利用广泛的菌丝体网络,通过附着在菌丝上面的高亲和力磷转运蛋白摄取远离根系地区的磷,以此改善宿主植物的磷营养<sup>[45]</sup>。增加土壤磷的有效性会减少根际土壤羧酸盐的含量<sup>[46-47]</sup>。随着施磷量的增加,根际碱性磷酸酶活性减弱,苜蓿根系释放的羧酸盐含量也显著降低。Ryan等<sup>[48]</sup>研究表明高磷土壤中由于根际羧酸盐的减少,AM真菌共生作用对植物磷含量的影响可能较小,甚至可能是负值;而低磷环境中AM真菌共生作用能刺激植物根系向周围土壤释放更多的分泌物,从而增加土壤磷的有效性。

#### 4 结论

与定额灌溉处理相比,调亏灌溉降低了紫花苜蓿根际土壤和非根际有效磷含量。施磷肥显著增加了土壤中全磷和有效磷含量;水磷耦合对20—40 cm土壤有效磷含量影响显著。另外,土壤灭AM菌根真菌处理显著降低了紫花苜蓿根际土壤和非根际土壤有效磷含量,且根际土壤有效磷含量大于非根际土壤有效磷含量,说明丛枝菌根真菌对紫花苜蓿根际土壤和非根际土壤有效磷含量有重要贡献。

#### 参考文献 References:

- [1] 刘敏国,许瑞,杨惠敏.紫花苜蓿的水分响应及灌溉效应.西南民族大学学报(自然科学版),2019,45(1):16-22.  
LIU M G, XU R, YANG H M. Response of alfalfa to soil moisture and effect of the irrigation. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2019, 45(1): 16-22.
- [2] 杨青川,康俊梅,张铁军,刘凤歧,龙瑞才,孙彦.苜蓿种质资源的分布、育种与利用.科学通报,2016,61(2):261-270.  
YANG Q C, KANG J M, ZHANG T J, LIU F Q, LONG R C, SUN Y. Distribution, breeding and utilization of alfalfa germplasm resources. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 261-270.
- [3] 刘守威,张玉玲,刘蓓雯.新疆农业结构发展质量与农业竞争力分析:基于动态Esteban-Marquillas拓展模型.兰州财经大学学报,2019,35(5):50-63.  
LIU S W, ZHANG Y L, LIU E W. Analysis on structure quality and competitiveness of agriculture in Xinjiang-based on dynamic Esteban-Marquillas expansion model. Journal of Lanzhou University of Finance and Economics, 2019, 35(5): 50-63.
- [4] 石自忠,王明利.我国苜蓿生产技术效率测度:2011—2017年.中国草地学报,2019,41(3):100-106.  
SHI Z Z, WANG M L. Study on alfalfa production technical efficiency in China: 2011—2017. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(3): 100-106.
- [5] 寇丹,苏德荣,吴迪,李岩.地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响.农业工程学报,2014,30(2):116-123.  
KOU D, SU D R, WU D, LI Y. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 116-123.
- [6] 沙栢平.滴灌条件下水肥耦合对紫花苜蓿生产性能及土壤质量的影响.银川:宁夏大学硕士学位论文,2020.

- SHA B P. Effects of water and fertilizer coupling on alfalfa production performance and soil quality under drip irrigation. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [7] 陶雪, 苏德荣, 乔阳, 寇丹. 西北旱区灌溉方式对苜蓿产量及品质的影响. 草业科学, 2015, 32(10): 1641-1647.  
TAO X, SU D R, QIAO Y, KOU D. Effects of irrigation methods on yield and quality of alfalfa in arid northwest China. Pratacultural Science, 2015, 32(10): 1641-1647.
- [8] 刘敏国. 内陆干旱区调亏灌溉对紫花苜蓿草地生产性能和水分利用的影响. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2021.  
LIU M G. Effects of regulated deficit irrigation on production performance and water utilization of alfalfa grassland in the inland arid area of China. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [9] RODRÍGUEZ H, FRAGA R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 1999, 17(4-5): 319-339.
- [10] 汪茜, 王生文, 陈伟, 陈本建. 施肥对民乐低产田苜蓿产量、品质及经济效益的影响. 草业科学, 2016, 33(2): 230-239.  
WANG Q, WANG S W, CHEN W, CHEN B J. Effects of fertilization on yield, quality and economic efficiency of alfalfa in low-yield field in Mingle. Pratacultural Science, 2016, 33(2): 230-239.
- [11] 沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用. 生态学报, 2015, 35(20): 6584-6591.  
SHEN R F, ZHAO X Q. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6584-6591.
- [12] 曹红兵. 增温和施氮条件下AM真菌对松嫩草地土壤和植物碳、氮、磷化学计量特征的影响. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2016.  
CAO H B. Influence of AM fungi on plant and soil C : N : P stoichiometry in Songnen grassland under warming and nitrogen addition condition. Master Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2016.
- [13] 张鑫, 裴宗平, 孙干, 王瑜, 苏雪鹏. 紫花苜蓿根际丛枝菌根真菌与土壤理化性质的相关性研究. 北方园艺, 2016(13): 172-177.  
ZHANG X, PEI Z P, SUN G, WANG Y, SU X P. Correlation between physicochemical properties of rhizosphere soil and arbuscula mycorrhizae fungi in *Medicago sativa* L. *Grassland. Northern Horticulture*, 2016(13): 172-177.
- [14] 张静, 王倩, 肖玉, 庞晓攀, 贾婷婷, 宋锐, 刘慧霞. 交替灌溉对紫花苜蓿生物量分配与水分利用效率的影响. 草业学报, 2016, 25(3): 164-171.  
ZHANG J, WANG Q, XIAO Y, PANG X P, JIA T T, SONG R, LIU H X. Effects of alternate furrow irrigation on the biomass allocation and water use efficiency of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 164-171.
- [15] 肖玉, 贾婷婷, 李天银, 张静, 吴德斌, 栗亚平, 刘慧霞. 交替沟灌对紫花苜蓿产量和品质的影响. 中国草地学报, 2015, 37(6): 42-48.  
XIAO Y, JIA T T, LI T Y, ZHANG J, WU D B, LI Y P, LIU H X. Effects of alternate irrigation on alfalfa (*Medicago sativa*) yield and quality. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(6): 42-48.
- [16] 李生仪, 孙延亮, 刘选帅, 赵俊威, 赵建涛, 马春晖, 张前兵. 磷肥对滴灌苜蓿根际土壤微环境及干草产量的影响. 草地学报, 2022, 30(2): 495-502.  
LI S Y, SUN Y L, LIU X S, ZHAO J W, ZHAO J T, MA C H, ZHANG Q B. Effects of phosphate fertilizer on rhizosphere soil microenvironment and hay yield of alfalfa under drip irrigation. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2): 495-502.
- [17] 李法喜, 段廷玉. 土壤干扰、秸秆覆盖及AM真菌对蒺藜苜蓿生长及土壤水稳性团聚体的影响. 草业科学, 2021, 38(7): 1310-1318.  
LI F X, DUAN T Y. Effects of soil disturbance, residue application, and arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis on growth of *Medicago truncatula* and soil water-stable aggregates. *Pratacultural Science*, 2021, 38(7): 1310-1318.
- [18] 杨盼, 翟亚萍, 赵祥, 王绍明, 刘红玲, 张霞. AM真菌和根瘤菌互作对苜蓿根际土壤真菌群落结构的影响及功能预测. 草业科学, 2020, 37(9): 1669-1680.  
YANG P, ZHAI Y P, ZHAO X, WANG S M, LIU H L, ZHANG X. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium inoculation on soil fungal community structure and function in the rhizosphere of *Medicago sativa*. *Pratacultural Science*, 2020, 37(9): 1669-1680.
- [19] ZHANG Q, LIU J, LIU X, LI Y, SUN Y, LU W, MA C. Optimizing water and phosphorus management to improve hay yield and water and phosphorus use efficiency in alfalfa under drip irrigation. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(5): 2406-2418.
- [20] 杨高文. 菌根真菌与氮磷对针茅草原群落生产力变化的作用机制. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.

- YANG G W. Mechanisms of mycorrhizal fungi and soil nitrogen and phosphorus affecting community productivity changes in the *Stipa* steppe. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005: 25-109.  
BAO S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis (Third Version). Beijing: China Agricultural Press, 2005: 25-109.
- [22] 薛志士. 节水农业宏观决策基础研究. 北京: 气象出版社, 1998: 1-5.  
XUE Z S. Basic Research on Macro-decision-making of Water-saving Agriculture. Beijing: Meteorological Press, 1998: 1-5.
- [23] 刘华, 李东宁, 杨东海, 马晓霞, 王占军, 何建龙, 俞鸿千. 地下滴灌不同灌溉量对当年种植紫花苜蓿生长及产量的影响研究. 宁夏农林科技, 2017, 58(1): 13-14, 31.  
LIU H, LI D N, YANG D H, MA X X, WANG Z J, HE J L, YU H Q. Effects of different irrigation amounts of subsurface drip irrigation on the growth and yield of alfalfa. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry*, 2017, 58(1): 13-14, 31.
- [24] 李天琦, 林志玲, 卢轩, 黄佳媛, 杨宁, 沃野, 高凯, 柳小妮, 王显国. 灌溉量对科尔沁沙地紫花苜蓿土壤速效养分分布及淋失的影响. 草地学报, 2021, 29(7): 1454-1461.  
LI T Q, LIN Z L, LU X, HUANG J Y, YANG N, WO Y, GAO K, LIU X N, WANG X G. Effects of irrigation amount on soil available nutrient distribution and leaching loss of alfalfa in Horqin Sandy Land. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7): 1454-1461.
- [25] XIE K, LI X L, HE F, ZHANG Y J, WAN L Q, DAVID B H, WANG D, QIN Y, GAMAL M A F. Effect of nitrogen fertilization on yield, N content, and nitrogen fixation of alfalfa and smooth brome grass grown alone or in mixture in greenhouse pots. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(9): 1864-1876.
- [26] 霍娜, 王宏庭. 水分对土壤钾素植物有效性的影响研究进展. 山西农业科学, 2014, 42(12): 1330-1334.  
HUO N, WANG H T. Research progress of soil potassium availability on soil moisture. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(12): 1330-1334.
- [27] 吴小龙, 龚霞, 曹灯, 郝奇. 根际土壤磷素有效性的研究进展. 江西农业学报, 2022, 34(1): 127-133.  
WU X L, GONG X, CAO D, HAO Q. Research advance in availability of phosphorus in rhizosphere soil. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(1): 127-133.
- [28] SARDANS J, PEÑUELAS J. Increasing drought decreases phosphorus availability in an evergreen Mediterranean forest. *Plant and Soil*, 2004, 267(1): 367-377.
- [29] GAO X, SHI D, LYU A, WANG S, YUAN S, ZHOU P, AN Y. Increase phosphorus availability from the use of alfalfa (*Medicago sativa* L.) green manure in rice (*Oryza sativa* L.) agroecosystem. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-13.
- [30] LIU X, ZHAO J, LIU J, LU W, MA C, GU X, ZHANG Q. Water-phosphorus coupling enhances fine root turnover and dry matter yield of alfalfa under drip irrigation. *Agronomy Journal*, 2021, 113(5): 4161-4175.
- [31] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 马路军, 同延安, 赵秉强, 张夫道. 长期定位施肥对土表土耕层土壤养分和土地生产力的影响. 西北农业学报, 2004(3): 121-125.  
GU Q Z, YANG X Y, SUN B H, MA L J, TONG Y A, ZHAO B Q, ZHANG F D. Effects of long-term fertilization on soil nutrition and land productivity in topsoil of loess soil. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2004(3): 121-125.
- [32] 杨旻, 张树兰, 杨学云. 长期施肥对壤土冬小麦产量及土壤养分的影响. 土壤通报, 2018, 49(2): 402-408.  
YANG Y, ZHANG S L, YANG X Y. Effects of long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrients in rainfed loess soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(2): 402-408.
- [33] ASHKEVARI A S, HOSEINZADEH S H, MIRANSARI M. Effects of different nitrogen, phosphorus, potassium rates on the quality and quantity of citrus plants, variety Thomson novel under rainfed and irrigated conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(9): 1412-1423.
- [34] 张进霞, 刘晓静, 郝凤, 范俊俊, 冯博政, 齐鹏. 氮磷调控对紫花苜蓿氮积累与土壤氮磷营养的影响. 草地学报, 2016, 24(1): 61-68.  
ZHANG J X, LIU X J, HAO F, FAN J J, FENG B Z, QI P. Effects of nitrogen and phosphorus regulation on alfalfa nitrogen accumulation and the nitrogen and phosphorus nutrients of soil. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(1): 61-68.
- [35] BAKER D B, JOHNSON L T, CONFESOR R B, CRUMRINE J P. Vertical stratification of soil phosphorus as a concern for dissolved phosphorus runoff in the Lake Erie basin. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(6): 1287-1295.
- [36] 彭琪, 何红花, 张兴昌. 低磷环境下接种丛枝菌根真菌促进紫花苜蓿生长和磷素吸收的机理. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 293-300.

- PENG Q, HE H H, ZHANG X C. Mechanisms of increasing alfalfa growth and phosphorus uptake by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungal under low phosphorus application level. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 293-300.
- [37] 李金辉, 卢鑫, 周志宇, 赵萍, 金茜, 周媛媛. 不同种植年限紫穗槐根际非根际土壤磷组分含量特征. *草业学报*, 2014, 23(6): 61-68.
- LI J H, LU X, ZHOU Z Y, ZHAO P, JIN Q, ZHOU Y Y. Phosphorus contents in the rhizosphere and bulk soil under *Amorpha fruticosa* established in different years. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 61-68.
- [38] 毛小涛. 连续施肥对旱作苜蓿产量品质及土壤养分的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2017.
- MAO X T. Effects of continuous fertilization on yield and quality of alfalfa and soil mineral nutrients under non-irrigated conditions. PhD Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [39] 刘文娟, 马琨, 王兵兵, 何亚玲, 姜琴芳, 米扬. 冬小麦免耕覆盖与有机肥施用对土壤丛枝菌根真菌群落多样性的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(6): 1101-1108.
- LIU W J, MA K, WANG B B, HE Y L, JIANG Q F, MI Y. Effects of no-tillage, mulching, and organic fertilizer application on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in winter wheat field. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(6): 1101-1108.
- [40] BENDER S F, VAN DER HEIJDEN M G A. Soil biota enhance agricultural sustainability by improving crop yield, nutrient uptake and reducing nitrogen leaching losses. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(1): 228-239.
- [41] 阿芸, 师尚礼, 张晓燕, 张翠梅, 李文, 吴芳, 周彤, 来幸樑, 陈永岗, 孙守江. 5龄紫花苜蓿轮作草地早熟禾的土壤养分变化特征. *草业科学*, 2019, 36(11): 2863-2870.
- A Y, SHI S L, ZHANG X Y, ZHANG C M, LI W, WU F, ZHOU T, LAI X L, CHEN Y G, SUN S J. Variation characteristics of nutrient contents in a 5-year *Medicago sativa* and *Poa pratensis* rotation. *Pratacultural Science*, 2019, 36(11): 2863-2870.
- [42] SULIMAN K L, BARAKAH F N, ASSAEED A M. Structural colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in three acacia species of different sizes in Riyadh, Saudi Arabia. *International Journal of Biosciences*, 2017, 5(10): 308-318.
- [43] 向君, 樊利华, 张楠楠, 吴淑兰, 郭敏, 周星梅, 王彦杰. 施磷对干旱胁迫下箭竹根际土壤养分及微生物群落的影响. *生态学报*, 2021, 41(23): 9422-9431.
- XIANG J, FAN L H, ZHANG N N, WU S L, GUO M, ZHOU X M, WANG Y J. Effects of phosphorus application on soil nutrients and soil microbial community in rhizosphere of *Fargesia* under drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9422-9431.
- [44] 孙艳梅, 刘选帅, 张前兵, 吴昊, 张新田, 苗晓茸, 刘俊英, 于磊, 马春晖. 施磷对滴灌苜蓿干草产量及磷素含量的影响. *草业学报*, 2019, 28(3): 154-163.
- SUN Y M, LIU X S, ZHANG Q B, WU H, ZHANG X T, MIAO X R, LIU J Y, YU L, MA C H. Effects of phosphorus application on hay yield and phosphorus contents of alfalfa under drip irrigation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 154-163.
- [45] 薛英龙, 李春越, 王苾蓉, 王益, 刘津, 常顺, 苗雨, 党廷辉. 丛枝菌根真菌促进植物摄取土壤磷的作用机制. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 10-20.
- XUE Y L, LI C Y, WANG C R, WANG YI, LIU J, CHANG S, MIAO Y, DANG T H. Mechanisms of phosphorus uptake from soils by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 10-20.
- [46] PENG Q, WU M, ZHANG Z, SU R, HE H H, ZHANG X C. The interaction of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus inputs on selenium uptake by alfalfa (*Medicago sativa* L.) and selenium fraction transformation in soil. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11(966): 1-13.
- [47] URCOVICHE R C, GAZIM Z C, DRAGUNSKI D C, BARCELLOS F G, ALBERTON O. Plant growth and essential oil content of *Mentha crispera* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under different levels of phosphorus. *Industrial Crops and Products*, 2015, 67: 103-107.
- [48] RYAN M H, TIBBETT M, EDMONDS-TIBBETT T, SURIYAGODA L D B, LAMBERS H, CAWTHRAY G R, PANG J. Carbon trading for phosphorus gain: the balance between rhizosphere carboxylates and arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant phosphorus acquisition. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(12): 2170-2180.

(责任编辑 苟燕妮)