

# 石灰性土壤磷矿粉直接施用对紫花苜蓿生长的影响

胡蕊梅, 李亚娟\*, 姜智英, 刘艳君

(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, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目的】磷矿粉是一种难溶性磷肥, 探索磷矿粉在石灰性土壤施用的可能性, 以期充分利用我国大量的难溶性磷矿资源。【方法】以3个不同品位磷矿粉为磷肥源(PR I、PR II和PR III), 以水溶性磷肥过磷酸钙为对照(CK), 对3个紫花苜蓿品种阿尔冈金、陇东苜蓿和金皇后进行了土培盆栽试验, 分别测定其株高、叶数、叶绿素含量(SPAD值)、地上生物量及根系生物量。【结果】地上生物量干、鲜重均表现出PR I于阿尔冈金苜蓿最高, 分别较CK提高了111.07%和98.09%; 根系生物量干、鲜重表现出PR II于陇东苜蓿最高, 分别较CK提高了483.33%和502.97%。PR III于阿尔冈金紫花苜蓿株高较高, 较CK提高了16.66%, 在陇东紫花苜蓿上与CK基本相同; 叶片数施PR I品位磷矿粉于阿尔冈金紫花苜蓿上最多, 较CK提高了57.07%; 叶绿素SPAD值施PR I磷矿粉于陇东紫花苜蓿上最大, 较CK提高了32.56%, 于阿尔冈金紫花苜蓿上次之, 较CK提高了15.45%。【结论】PR I磷矿粉有利于促进紫花苜蓿的生长, 陇东紫花苜蓿和阿尔冈金紫花苜蓿对磷矿粉表现出较好的吸收利用能力, 金皇后紫花苜蓿的施用效果最差。

**关键词:**磷矿粉; 石灰性土壤; 紫花苜蓿; 生物量; 生长指标

**中图分类号:**S541 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)05-0220-08

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2024.05.026



磷矿是生产水溶性磷肥的原料, 是不可再生的重要战略资源<sup>[1]</sup>。我国磷矿虽丰富, 但以中低品位为主, 选矿难度较大, 且不适合加工水溶性磷肥。现有的水溶性磷肥过磷酸钙等产品养分利用率低, 加剧了磷资源的消耗<sup>[2-3]</sup>。传统的磷肥生产要用大量硫酸, 而我国硫资源严重不足, 酸法制磷肥生产费用较高, 又易导致环境污染。因此, 直接利用中低品位磷矿, 是缓解磷肥供应不足的途径之一<sup>[4]</sup>, 是磷资源可持续高效利用的关键, 对我国农业发展及磷肥工业的环境治理有极其重要的意义。一般认为磷矿粉适用于强酸性

土壤兼根系分泌酸性强或吸磷能力强的作物<sup>[5-6]</sup>, 如油菜、萝卜、豆科作物等, 或一般在高降水量和气温较低的气候条件下效果较好<sup>[7]</sup>。研究表明红壤稻田直接施用磷矿粉对油菜的增产效果显著<sup>[8-9]</sup>, 磷矿粉直接施用于旱地缺磷的红壤, 对芥菜、大豆等多种作物都有显著增产效果, 无论是对当季作物还是后季作物均有肥效<sup>[10]</sup>。

虽有研究人员在淮北石灰性土壤上对油菜施用磷矿粉, 促进了油菜的生长发育, 提高了油菜的产量<sup>[11]</sup>, 但在石灰性土壤上的研究还是尚少, 石灰性土壤由于pH高, 碱性, 所以理论上认为施用磷矿粉的效果不好<sup>[12]</sup>。但是近年来为了更好的利用磷矿粉, 人们通过各种途径尝试在石灰性土壤施用磷矿粉。磷矿粉经超微细处理后用于石灰性土壤能显著促进玉米幼苗生长和磷素利用, 提高土壤有效磷含量<sup>[13]</sup>, 特别是颗粒细度在20 μm以下时, 磷矿粉的有效磷和水

**收稿日期:**2023-01-08; **修回日期:**2023-04-03

**基金项目:**甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA036)

**作者简介:**胡蕊梅(1998-), 女, 甘肃会宁人, 硕士研究生。

E-mail:3387723661@qq.com

\*通信作者。E-mail:liyj@gsau.edu.cn

溶性磷含量提高幅度较大<sup>[14]</sup>。也有研究者通过对磷矿粉改性处理后直接利用,改性磷矿粉处理均不同程度提高了石灰性土壤上春小麦的干重、植株吸磷量以及磷利用效率<sup>[15-16]</sup>,膨润土等高表面活性矿物处理磷矿粉能显著促进石灰性土壤上磷矿粉中磷的释放<sup>[17-18]</sup>。石灰性土壤中 $\gamma$ -聚谷氨酸处理可促进土壤中的难溶性磷向有效磷转化,提高土壤有效磷含量<sup>[19]</sup>。

紫花苜蓿是双子叶豆科植物,根系利用难溶性养分的能力较强,有直接利用磷矿粉的可能性。有研究表明豆科作物及油菜等吸磷能力强或根系分泌酸能力强的作物可适当施用难溶性磷肥<sup>[20]</sup>。在酸性土壤上的研究表明磷矿粉可以促进紫花苜蓿生长,提高养分吸收,改善土壤性能,可以替代水溶性磷肥成为土壤紫花苜蓿的肥料来源<sup>[21]</sup>,但目前在石灰性土壤上还没有紫花苜蓿直接施用磷矿粉的研究。因此,本研究以3种不同品位磷矿粉在石灰性土壤对3个紫花苜蓿品种进行盆栽试验,通过对不同磷矿粉处理下紫花苜蓿株高、叶片数、叶绿素含量(SPAD值)和地上、根系生物量的系统研究,以期初步明确石灰性土壤磷矿粉

直接施用对紫花苜蓿的生物有效性,为我国磷矿资源的合理利用以及紫花苜蓿栽培中磷肥的管理提供理论支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

3种磷矿粉:PR I来自广东广州, $P_2O_5$ 含量19.27%,为低品位;PR II来自湖北襄阳, $P_2O_5$ 含量27.69%,为中品位;PR III来自四川汉源, $P_2O_5$ 含量32.24%,为高品位。磷矿粉品位等级参考张俊伶的标准划分<sup>[22]</sup>。

3种供试紫花苜蓿品种:阿尔冈金(*Medicago sativa* ‘Algonquin’)表示为M1、金皇后(*M. sativa* ‘Glodqueen’)表示为M2、陇东(*M. sativa* ‘Longdong’)表示为M3,3个紫花苜蓿品种均购买于兰州兴陇草业技术服务有限公司。

### 1.2 试验设计

以石灰性土壤紫花苜蓿栽培中普遍施用的水溶性磷肥过磷酸钙作为对照(CK),设置3个品位磷矿粉处理:PR I、PR II和PR III,3个紫花苜蓿品种处理,共计12个处理(表1)。

表1 试验处理

Table 1 Experimental treatment

磷肥处理	阿尔冈金(M1)	金皇后(M2)	陇东紫花苜蓿(M3)
CK	CKM1	CKM2	CKM3
PR I	PR I M1	PR I M2	PR I M3
PR II	PR II M1	PR II M2	PR II M3
PR III	PR III M1	PR III M2	PR III M3

### 1.3 试验方法

本研究采用盆栽土培方法,试验于2021年5—9月在甘肃农业大学草业学院实验室进行,试验用塑料盆规格为上端内径25 cm、高27 cm、下端内径20 cm。供试土壤采自甘肃农业大学草业学院校园实训基地,基本理化性质为:有机质22.68 g/kg、全磷0.68 g/kg、全氮2.21 g/kg、有效磷10.98 mg/kg、碱解氮31.10 mg/kg、pH值8.37。

盆栽试验每盆装土4.5 kg,施肥量N 0.05 g/kg土、 $P_2O_5$  0.18 g/kg土、 $K_2O$  0.15 g/kg土,氮肥为尿素(N 46%),钾肥为硫酸钾( $K_2O$  52%)。氮肥、磷矿粉和钾肥随土装盆一次性基施,每盆磷矿粉的施入量以

过磷酸钙的实物量加入以保证每盆的重量一致,每个处理重复3次,共36盆。室内培养条件:温度20~25℃,空气湿度30%~50%,日照时长8 h。每盆装好土后浇透水待土壤含水量适宜时,按品种挑选颗粒饱满的紫花苜蓿种子,点植于土壤表面,每盆点播60个紫花苜蓿种子后覆干土2 cm。待紫花苜蓿出苗后每盆定苗至35株,根据土壤湿度情况,浇相同的水量,以保证紫花苜蓿正常生长。

### 1.4 测定指标

在紫花苜蓿刈割前对株高,叶片数,叶绿素SPAD值进行测定,刈割后测定地上部草的鲜重,洗净根系吸干水分后测定根系鲜重,后将地上部和根系在烘箱

分别于105℃杀青30 min,70℃烘干至恒重,称重记录地上部分和地下部分的干重。

株高:用直尺测量已标记植株自然高度;每盆10株测定株高,取平均值为该处理的株高。

生物量:紫花苜蓿刈割后根和地上部时称量为鲜重,烘干后称量为干重。

叶片数:每盆选取10株,测定每株全株的叶片数,取10株的平均值为此盆每株平均叶片数,3个重复的平均数为该处理的叶片数,测定时采用人工数取的办法。

叶绿素:数值为测定时的SPAD值,仪器为日本柯尼卡美能达传感公司生产的SPAD-502型便携式叶绿素仪。每盆随机选取10株紫花苜蓿,每株均避开叶脉均匀取10个点进行测量,使用仪器的AVERAGE功能计算平均值,作为该株的SPAD值,最后将10株的SPAD值计算平均值作为1盆的SPAD值。

## 1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2016进行整理,用SPSS 19.0软件进行单因子方差分析(One-way ANOVA, LSD),并进行Duncan多重比较检验,结果采用平均值±标准差表示,以 $P<0.05$ 作为差异显著性判断标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对株高的影响

阿尔冈金品种PRⅢ、PRⅠ的株高显著高于PRⅡ( $P<0.05$ ),分别高37.30%、32.98%,最好的PRⅢ较CK高了16.66%;金皇后各磷矿粉处理均低于CK,但PRⅠ处理下的株高与CK差异不显著;陇东紫花苜蓿PRⅡ处理下的株高比CK提高了2.02%(表2)。

CK、PRⅠ和PRⅡ处理下紫花苜蓿品种株高均表现出陇东紫花苜蓿>阿尔冈金>金皇后;PRⅢ处理下株高以阿尔冈金紫花苜蓿最大,金皇后最小。

表2 不同磷肥处理紫花苜蓿株高

Table 2 Plant height of different alfalfa varieties under different P fertilizer treatments

cm

磷肥处理	阿尔冈金	金皇后	陇东紫花苜蓿
CK	19.09±0.45 <sup>abA</sup>	18.11±0.64 <sup>aA</sup>	19.82±1.23 <sup>abA</sup>
PRⅠ	21.57±1.10 <sup>aA</sup>	17.01±0.81 <sup>abB</sup>	17.09±0.4 <sup>bb</sup>
PRⅡ	16.22±0.26 <sup>bb</sup>	15.68±0.27 <sup>bb</sup>	20.22±1.16 <sup>aA</sup>
PRⅢ	22.27±1.51 <sup>aA</sup>	13.32±0.85 <sup>cC</sup>	18.70±0.18 <sup>abB</sup>

注:表中不同小写字母表示同一品种不同磷肥处理之间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示同一施肥处理不同紫花苜蓿品种之间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

### 2.2 不同施肥处理对叶片数的影响

叶片数阿尔冈金PRⅠ显著高于CK、PRⅡ及PRⅢ,分别高了57.07%、110.84%及85.28%,金皇后3个磷矿粉处理及对照间均无显著差异,叶片数大小为CK>PRⅠ>PRⅡ>PRⅢ;陇东PRⅡ显著高于CK

及PRⅠ32.73%、40.95%(表3)。

叶片数各紫花苜蓿品种(CK)均无显著差异,大小顺序为金皇后>阿尔冈金>陇东;PRⅠ,阿尔冈金紫花苜蓿品种的叶片数最多,陇东的最少;PRⅡ及PRⅢ陇东的叶片数最多,阿尔冈金最少。

表3 不同磷肥处理紫花苜蓿叶片数

Table 3 Leaves amount of different alfalfa varieties under different P fertilizer treatments

片/株

磷肥处理	阿尔冈金	金皇后	陇东紫花苜蓿
CK	151.23±7.38 <sup>ba</sup>	165.50±11.47 <sup>aA</sup>	126.29±15.91 <sup>ba</sup>
PRⅠ	237.53±31.99 <sup>aA</sup>	163.63±11.65 <sup>ab</sup>	118.93±5.80 <sup>bb</sup>
PRⅡ	112.66±8.46 <sup>bb</sup>	154.2±0 <sup>aA</sup>	167.63±15.65 <sup>aA</sup>
PRⅢ	128.20±7.70 <sup>bb</sup>	142±0 <sup>aAB</sup>	153.08±4.33 <sup>abA</sup>

### 2.3 不同施肥处理对紫花苜蓿生物量的影响

2.3.1 鲜重 PR I 处理下阿尔冈金的地上部分鲜重最高,为 99.64 g/盆,阿尔冈金 PR I 较 CK 提高了 98.09%;金皇后 PR III 较 CK 提高了 24.73%;陇东各磷肥处理间无显著差异,地上部鲜重大小顺序为 CK > PR III > PR II > PR I。

鲜重各紫花苜蓿品种 CK 间无显著差异,其中阿

尔冈金 > 陇东 > 金皇后;PR I 处理下阿尔冈金的地上部鲜重是金皇后和陇东的两倍多;PR II 处理下金皇后的地上部鲜重显著高于阿尔冈金和陇东;PR III 处理下金皇后的地上部鲜重显著高于陇东。因此,PR I 处理下阿尔冈金、PR II 和 PR III 处理下金皇后均有较高的地上部鲜重(表4)。

表4 不同磷肥处理紫花苜蓿地上部鲜重

Table 4 Grass fresh weight of different alfalfa varieties under different P fertilizer treatments

g/盆

磷肥处理	阿尔冈金	金皇后	陇东紫花苜蓿
CK	50.30±5.55 <sup>ba</sup>	43.43±2.51 <sup>ba</sup>	43.79±3.96 <sup>aA</sup>
PR I	99.64±8.43 <sup>aA</sup>	46.93±1.63 <sup>bb</sup>	37.21±2.73 <sup>bB</sup>
PR II	38.66±1.10 <sup>bb</sup>	48.76±1.49 <sup>abA</sup>	41.99±1.47 <sup>bB</sup>
PR III	47.72±2.97 <sup>baB</sup>	54.17±2.19 <sup>aA</sup>	42.77±0.49 <sup>bB</sup>

2.3.2 干重 地上部干重阿尔冈金 PR I 较 CK、PR II 和 PR III 分别显著高了 111.07%、148.46% 和 131.28%;金皇后各磷肥处理间无显著差异,其中 PR III > CK > PR II > PR I,陇东紫花苜蓿品种各磷肥处理间无显著差异,其中 PR II > PR III > CK > PR I ( $P > 0.05$ )(表5)。

CK 处理下各紫花苜蓿品种间地上部干重无显著

差异,但金皇后 > 阿尔冈金 > 陇东紫花苜蓿;PR I 处理下阿尔冈金的地上部干重是金皇后和陇东的两倍多;PR II 处理下各紫花苜蓿品种间地上部干重无显著差异,但陇东紫花苜蓿 > 金皇后 > 阿尔冈金;PR III 处理下金皇后紫花苜蓿品种干重较阿尔冈金紫花苜蓿品种显著高了 31.81%。因此,PR I 处理下阿尔冈金、PR III 处理下金皇后均有较高的地上部干重(表5)。

表5 不同磷肥处理紫花苜蓿地上部干重

Table 5 Grass dry weight of different alfalfa varieties under different P fertilizer treatments

g/盆

磷肥处理	阿尔冈金	金皇后	陇东紫花苜蓿
CK	10.30±2.47 <sup>ba</sup>	12.35±1.13 <sup>aA</sup>	10.63±1.59 <sup>aA</sup>
PR I	21.74±3.72 <sup>aA</sup>	10.38±0.83 <sup>bB</sup>	10.32±0.94 <sup>bB</sup>
PR II	8.75±0.41 <sup>ba</sup>	11.44±1.95 <sup>aA</sup>	10.92±0.71 <sup>aA</sup>
PR III	9.40±0.88 <sup>bb</sup>	12.39±0.45 <sup>aA</sup>	10.68±0.41 <sup>aAB</sup>

### 2.4 不同施肥处理对紫花苜蓿根系生物量的影响

3个磷矿粉处理下阿尔冈金的根系鲜重和干重均低于CK;PR III 处理下金皇后的根鲜重和干重均高于CK,分别提高了 22.22% 和 22.66%;3个磷矿粉处理下陇东紫花苜蓿的根系生物量鲜重和干重均显著高于CK ( $P < 0.05$ ),但3个磷矿粉处理之间无显著差异,PR I、PR II 和 PR III 处理下鲜重分别较CK显著提高了 488.12%, 502.97%, 488.12%(图1-A),干重分别显著提高了 476.67%, 483.33%, 253.33%(图1-B)。

### 2.5 不同施肥处理对叶绿素 SPAD 值的影响

阿尔冈金 PR I 显著高于CK及PR III,分别高了

15.45%、15.05%;金皇后3处理间无显著差异,且均显著低于CK;陇东3处理均显著高于CK ( $P < 0.05$ ),其中最好的PR I 较CK显著高了 32.56%(表6)。

CK 处理下金皇后的 SPAD 值最高,陇东最低;PR I、PR II 处理下陇东的 SPAD 值最高,金皇后最差;PR III 处理下 SPAD 值表现出陇东紫花苜蓿 > 金皇后 > 阿尔冈金。

## 3 讨论

### 3.1 施用磷矿粉对紫花苜蓿生长生理指标的影响

植株高度可以衡量牧草生长发育状况及生产能

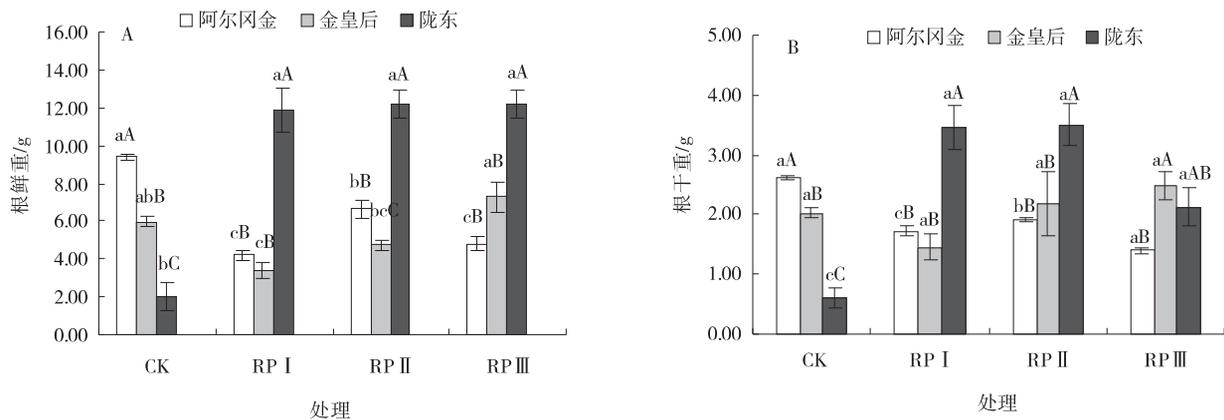


图1 不同磷肥处理紫花苜蓿根鲜重(A)和干重(B)

Fig. 1 Fresh root weight(A) and dry weight(B) of different alfalfa varieties under different P fertilizer treatments

注:图中不同小写字母表示同一品种不同磷肥处理之间差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示同一施肥处理不同紫花苜蓿品种之间差异显著( $P < 0.05$ )。

表6 不同磷肥处理紫花苜蓿叶绿素 SPAD 值

Table 6 Chlorophyll SPAD value of different alfalfa varieties under different P fertilizer treatments

磷肥处理	阿尔冈金	金皇后	陇东紫花苜蓿
CK	42.98 ± 1.44 <sup>bb</sup>	47.50 ± 0.37 <sup>aA</sup>	37.53 ± 1.09 <sup>cC</sup>
PR I	49.62 ± 0.51 <sup>aA</sup>	45.11 ± 0.03 <sup>bb</sup>	49.75 ± 0.48 <sup>aA</sup>
PR II	46.15 ± 0.64 <sup>abB</sup>	44.35 ± 0.78 <sup>bb</sup>	48.63 ± 0.52 <sup>abA</sup>
PR III	43.13 ± 1.87 <sup>ba</sup>	44.8 ± 0.09 <sup>ba</sup>	46.95 ± 0.80 <sup>ba</sup>

力,磷肥对紫花苜蓿生物量的影响主要体现在植株高度上,植株高度直接影响到紫花苜蓿干草生物量<sup>[23]</sup>。本研究中,PR I 和 PR III 处理下阿尔冈金的株高均超过了CK,而阿尔冈金在PR I 处理下的地上生物量也最高,有研究表明株高可以决定干草生物量的65%左右<sup>[24]</sup>。磷能够提高紫花苜蓿根瘤的数量,进而提高固氮水平,通过影响氮的代谢提高紫花苜蓿生长速率<sup>[25]</sup>。

叶片是植物进行光合作用的重要器官,施磷肥可提高叶片数量<sup>[26]</sup>。本研究中,PR I 处理下阿尔冈金的叶片数最大,所有磷矿粉处理下陇东紫花苜蓿的SPAD值均高于CK。以上结果表明PR I 处理有利于紫花苜蓿的生长和发育。有研究表明磷矿粉对叶片厚度、叶片栅栏组织厚度有一定的促进作用<sup>[27]</sup>,施磷肥后提高了土壤中磷元素含量,促进了叶片光合酶以及相关光合色素合成,从而提高植物光合作用能力<sup>[28]</sup>。不同品位磷矿粉对紫花苜蓿生长指标的影响存在差异性的原因,主要是取决于自身的磷含量和用

量。在一定范围内磷矿粉施用量越大,植株叶片N、P、K含量越高,其产量也越高<sup>[29]</sup>。因此,关于磷矿粉对紫花苜蓿生长的影响还有待于在施用量上进一步研究。

### 3.2 施用磷矿粉对紫花苜蓿生物量的影响

紫花苜蓿生长中施用磷肥能够显著提高其地上部生物量鲜重及干重,促进紫花苜蓿根系向土壤深层生长,提升其吸收深层土壤养分的能力,有效促进了紫花苜蓿主根的生长<sup>[30-31]</sup>。本研究中,磷矿粉可提高紫花苜蓿地上部及根系生物量,PR I 对阿尔冈金的地上部生物量效果最高,PR II 处理下对陇东紫花苜蓿的根系生物量产量最高,说明磷矿粉在石灰性土壤对紫花苜蓿表现出了较好的肥效。也有在碱性土壤上,直接施用超微细磷矿粉显著提高了作物的生物量<sup>[32]</sup>。但是本研究中,高品位磷矿粉PR III对紫花苜蓿的生物量未表现出较好的效果,可能是高品位的磷矿粉导致植物呼吸作用旺盛,干物质消耗量大于干物质的积累量,致使植物过早成熟,产量降低<sup>[33]</sup>,也可能与磷矿粉

的内部结构和成分有关,有些磷矿粉虽然含磷量低,但是内部结构松散,在土壤中容易溶解转化为有效态,从而表现出较好的肥效<sup>[34]</sup>。其机理有待进一步研究。

### 3.3 紫花苜蓿品种对磷矿粉的反应

作物种类不同对磷矿粉的吸收利用能力也不同,常见作物利用磷矿粉的能力大小为十字花科>豆科>禾本科<sup>[35]</sup>,不同作物品种利用难溶性磷的能力也存在差异<sup>[36]</sup>。本研究中,不同紫花苜蓿品种对磷矿粉的反应存在差异,各生长指标在陇东紫花苜蓿上表现最好,这与前人对紫花苜蓿品种耐低磷评价及耐低磷品种筛选的结果相同<sup>[37]</sup>,其次为阿尔冈金,金皇后表现最差,这与张文杰<sup>[38]</sup>的研究结果一致,但也有结果表明金皇后在低磷条件下的各生长指标表现突出<sup>[39]</sup>,对磷矿粉的反应还有待进一步研究。

## 4 结论

磷矿粉直接施用于石灰性土壤,不同程度促进了紫花苜蓿的生长,但是效果因磷矿粉品位和紫花苜蓿品种而有差异。本试验条件下,PR I 磷矿粉对阿尔冈金紫花苜蓿的地上部干、鲜重、叶片数以及陇东紫花苜蓿的SPAD值均最高,而PR II 磷矿粉对陇东紫花苜蓿的根系干、鲜重表现出最高,表明阿尔冈金和陇东紫花苜蓿品种对磷矿粉表现出较好的吸收利用能力,而金皇后紫花苜蓿对磷矿粉的反应较差。

### 参考文献:

- [1] He H H, Peng Q, Wang X, *et al.* Growth morphological and physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa*) to phosphorus supply in two alkaline soils[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1): 565–584.
- [2] Han W, Fang J, Guo D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *The New phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [3] 王先之, 蒋海亮, 许可旺, 等. 磷添加对紫花苜蓿幼苗地上部及根系生长模式的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(1): 87–91, 99.
- [4] 马林, 夏晓阳, 普正仙, 等. 聚磷酸磷肥不同基追比对石灰性土壤上滴灌盆栽棉花生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(5): 946–952.
- [5] 刘永红. 有机酸对磷矿粉的活化及其对溶液中铜的去除[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [6] 周杰, 郭海超, 罗雪华, 等. 磷矿粉在橡胶园不同母质砖红壤中溶解特性研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1119–1126.
- [7] 朱希茹, 姜润, 连祯雯, 等. 肥料—土壤—作物系统镁—磷营养互作研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 211–216, 250.
- [8] 滕淳茜, 孟赐福, 吴崇书, 等. 红壤稻田施用磷矿粉和硫酸对油菜和水稻产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 2004(2): 34–35.
- [9] 胡红青, 黄巧云, 李学垣, 等. 磷矿粉缓解酸性土壤铝毒的研究[J]. *中国农业科学*, 1995, 28(2): 51–57.
- [10] 黄俊福. 红壤旱地直接施用磷矿粉的增产效果[J]. *湖南农业科学*, 1995(1): 46–48.
- [11] 孙浩, 张玉霞, 梁庆伟, 等. 施肥对科尔沁沙地苜蓿产量与品质的影响[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(3): 30–41.
- [12] 孙庚寅. 石灰性土壤磷矿粉直接施用的效果[J]. *土壤通报*, 2001, 32(3): 118–119+125.
- [13] 国林涛, 史衍玺, 盖国盛. 超微细磷矿粉的特性及其肥效机理研究[J]. *化工矿物与加工*, 2008, 37(2): 14–16, 19.
- [14] 齐美娟, 李菊梅, 谷思玉, 等. 微细磷矿粉的有效性研究[J]. *化肥工业*, 2011, 38(1): 26–30.
- [15] 李亚娟, 杨翠红, 陈博, 等. 改性磷矿粉在石灰性土壤上的生物有效性及其机理研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3): 303–309.
- [16] 赵鑫, 蔡慢弟, 董倩倩, 等. 中低品位磷矿资源高效利用机制与途径研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 1121–1130.
- [17] 陈智文, 张清, 李晓青, 等. 改性膨润土对东北石灰性土壤磷肥利用率的影响[J]. *非金属矿*, 2005, 28(1): 13–14, 32.
- [18] 应媛芳. 低品位磷矿有效磷机械活化分离研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- [19] 薛亚男, 万亚珍, 梅丹丹, 等. 不同类型解磷剂对施入磷矿粉土壤有效磷含量的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(5): 1029–1032.
- [20] 朱希茹, 许梦瑶, 王芳, 等. 主要磷肥产品的发展历程与展望[J]. *肥料与健康*, 2021, 48(4): 10–16.
- [21] 尤哈娜. 磷矿粉施用对砖红壤上苜蓿(*Medicago sativa* L.)生长和土壤养分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [22] 张俊伶. 植物营养学(第1版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.

- [23] 张文杰,杨亮,张龙骥,等. 低磷土壤条件对不同苜蓿品种的生长和磷效率的影响[J]. 草原与草坪,2013,49(1):81-87.
- [24] 吴瑞香,杨建春. 不同密度对晋亚9号旱作产量及其相关性状的影响[J]. 山西农业科学,2011,39(7):664-666.
- [25] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen - phosphorus interactions[J]. Ecological applications,2010,20(1):5-15.
- [26] 吉艳芝,陈立新,薛宝民,等. 施肥对落叶松人工林植物养分及生理特性的影响[J]. 生态环境,2004,13(2):217-219.
- [27] 姚占军. 宁夏河东沙地紫花苜蓿对施肥的响应研究[D]. 北京:北京林业大学,2018.
- [28] 卫新菊. 施肥对苜蓿开花期叶面积及比叶重的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(7):50-53.
- [29] 肖文芳. 施用石灰和磷矿粉对桃园土壤养分和树木营养的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2009.
- [30] 齐敏兴,刘晓静,张晓磊,等. 不同磷水平对接根瘤菌紫花苜蓿生长特性的影响[J]. 草原与草坪,2013,33(1):50-53.
- [31] Arahad I, Ali W, Khan Z A, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus on the growth and yield of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under agro-climatic conditions of Tando Adam [J]. PSM Biological Research, 2016, 1 (2) : 74-77.
- [32] 何振全,刘春生,盖国胜,等. 磷矿粉超微细化对磷有效性的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(2):209-212.
- [33] 张凡凡,于磊,马春晖,等. 绿洲区滴灌条件下施磷对紫花苜蓿生产性能及品质的影响[J]. 草业学报,2015,24(10):175-182.
- [34] 李庆逵,蒋柏藩,鲁如坤. 中国磷矿的农业利用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992
- [35] 中国科学院土壤研究所磷矿粉工作组. 哪些作物适宜施用磷矿粉[J]. 土壤学报,1996,14(1):83-84.
- [36] 李锋,曲雪艳,潘晓华,等. 不同水稻品种对难溶性磷利用能力的初步研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(4):420-424.
- [37] 栗振义,张绮芯,仝宗永. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J]. 中国农业科学,2017,50(20):3898-3907.
- [38] 张文杰,杨亮,张龙骥. 低磷土壤条件对不同苜蓿品种的生长和磷效率的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(6):81-87.
- [39] 赵娇阳,朱慧森,张士敏. 8个紫花苜蓿品种在山西中部地区的农艺性状和营养价值评价[J]. 山西农业科学,2021,49(4):414-419.
- [40] 马红,黎力乙,李宁. 不同供磷水平对苜蓿生理特征和磷素营养的影响[J]. 中国草地学报,2021,43(8):34-41.

## Effect of phosphate rock powder application on alfalfa growth in calcareous soil

HU Rui-mei, LI Ya-juan\*, JIANG Zhi-ying, LIU Yan-jun

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to evaluate the effects of phosphate rock powder, an insoluble phosphate fertilizer, on the growth of three alfalfa varieties (*Medicago sativa* ‘Algonquin’, *M. sativa* ‘Longdong’, and *M. sativa* ‘Goldqueen’) in calcareous soil. 【Method】 Three grades of phosphate rock powder (PR I, PR II and PR III) were used as phosphate fertilizer sources, while water-soluble phosphate and calcium superphosphate was used as the control treatments (CK). A soil pot cultivation experiment on three alfalfa varieties (*M. sativa* ‘Algonquin’, *M. sativa* ‘Longdong’ and *M. sativa* ‘Goldqueen’), was conducted to assess the potential utilization of insoluble phos-

phate resources in China and application of phosphate powder in calcareous soil. Key parameters measured plant height, number of leaves, chlorophyll content (SPAD value), and aboveground and root biomass for each alfalfa varieties under different phosphorous fertilizer treatments. **【Result】** The dry and fresh weight of aboveground biomass of *M. sativa* 'Algonquin' were highest under PR I, increasing by 111.07% and 98.09% respectively, compared to CK. The dry and fresh weights of root biomass of *M. sativa* 'Longdong' were highest under PR II, and increased 483.33%、502.97% respectively, compared to CK. The plant height of *M. sativa* 'Algonquin' under PR III was the highest, with a 16.66% increase compared to CK; however, there was no significant difference between the phosphate rock treatments and CK for *M. sativa* 'Longdong'. The number of leaves for *M. sativa* 'Algonquin' under PR I showed the highest increase, with 57.07% compared to CK, while the SPAD value was highest for *M. sativa* 'Longdong' under PR I, increasing by 32.56% compared to CK, followed by *M. sativa* 'Algonquin' under PR I, which increased by 15.45% compared to CK. **【Conclusion】** PR I effectively promoted the growth of alfalfa. *M. sativa* 'Longdong' and 'Algonquin' varieties exhibited better absorption and utilization of phosphate rock powder, whereas *M. sativa* 'Glodqueen' responded poorly to the phosphate treatments in this study.

**Key words:** phosphate rock; calcareous soil; alfalfa; biomass; growth index

(责任编辑:新奇峰)