

硅对紫花苜蓿生物学特性的影响

郭正刚¹, 田福平², 王锁民¹, 张自和¹

(1. 兰州大学草地农业科技学院 农业部草地农业生态系统学重点开放实验室, 兰州 730020;

2. 中国农业科学院兰州畜牧与兽药研究所, 兰州 730070)

摘要: 硅是植物生长发育的有益元素, 目前关于硅对植物生长发育影响的研究多集中于禾本科和部分瓜果蔬菜, 对豆科植物的研究仅限于大豆和豇豆, 而对多年生豆科牧草的研究很少。通过盆栽试验观测了硅对豆科牧草紫花苜蓿生物学特性的影响。结果表明, 紫花苜蓿体内硅的含量随着施入硅量的增加而增加, 但在 0.100 g/kg 水平后紫花苜蓿吸收硅趋向于饱和。紫花苜蓿根系内的硅含量大于茎叶内含量; 硅对紫花苜蓿叶面积的影响呈单峰型分布, 0.05 g/kg 的硅处理增加效果最为明显; 硅对紫花苜蓿分枝数和株高的影响与测定时期有关, 分枝数在营养期差异不明显, 在生殖期施硅显著增加分枝数 ($p < 0.05$), 但施硅在营养生长阶段显著增加株高 ($p < 0.05$), 而生殖期差异不明显; 施硅能够显著增加紫花苜蓿草产量和根系生物量, 增幅分别为 20% ~ 60% 和 35%。中部叶和上部叶与茎之间的夹角随着施硅量的增加而逐渐减少, 但减少的幅度随着施硅量的增加而逐渐降低, 而下部叶与茎之间的夹角变化较为复杂, 随着施硅量的增加, 先减小后增加, 再减小。试验结果表明, 施入适量的硅有利于紫花苜蓿的生长和发育。

关键词: 硅; 紫花苜蓿; 硅浓度; 茎叶; 根

文章编号: 1000-0933(2006)10-3302-06 中图分类号: Q143, Q948.1, S551.701 文献标识码: A

Effect of silicon supply on alfalfa growth

GUO Zheng-Gang¹, TIAN Fu-Ping², WANG Suo-Min¹, ZHANG Zi-He¹ (1. Key Laboratory of Grassland Agror Ecosystem Ministry of Agriculture, College of Pastoral Agricultural Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Lanzhou Institute of Animal Science and Veterinary Pharmaceutical Science of Chinese Academy of Agricultural Science, Lanzhou 730050, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3302 ~ 3307.

Abstract: Although silicon is a quantitatively major inorganic constituent of higher plants, this element is not considered generally essential for them. Its beneficial effects have been observed in various plant species. Alfalfa (*Medicago sativa*) is significant in dryland farming system due to contributing to animal production, establishing pasture, rotation system. However, the role of silicon in alfalfa growth remains ambiguous. Therefore, it is essential to define well the role of Si in the alfalfa growth. An available silicon (Si)-deficient top soil was used in a pot experiment to investigate the effect of Si supply on the biological properties of alfalfa. The treatments consisted of six rates of addition of available Si: 0, 0.025, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 g kg⁻¹ (H₄SiO₄/soil) and each was replicated six times. This study indicated that the silicon content of roots and shoots increased significantly ($p < 0.05$) with increasing Si supply in the soil, and this increasing trendly reduced greatly when application Silicon was over 0.100 g/kg. Silicon content in roots was greater than that in shoots. Plants with Si supply had a significantly larger leaf area than no-feed Si plants, and leaf area peaked in the 0.05 g/kg treatments. Effect of Si supply on height and shoots were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30270947); 农业部草地农业生态系统学重点开放实验室基金资助项目 (ZDYSY20050-06); 兰州大学交叉学科青年创新研究基金资助项目 (LZU200515); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-05-0882)

收稿日期: 2005-11-29; **修订日期:** 2006-04-21

作者简介: 郭正刚 (1973 ~), 男, 甘肃岷县人, 博士, 副教授, 主要从事生态环境建设研究. E-mail: zhenggangguo200@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30270947), 2005 Opening Foundation of Key Laboratory of Grassland Agror Ecosystem Ministry of Agriculture (No. ZGYSY-2005-06), Interdisciplinary Innovation Research Fund for Young Scholars Lanzhou University (No. LZU200515) and the Program for New Century Excellent Talents, China (No. NCET-05-0882)

Received date: 2005-11-29; **Accepted date:** 2006-04-21

Biography: GUO Zheng-Gang, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in ecological environment construction. E-mail: zhenggangguo200@yahoo.com.cn

related to the growing stages of plants. In the vegetative period, shoots per plant was not different but significant increase was observed in the reproductive period. Fed-Si plants had higher height than control in the vegetative period. This study also indicated that fed-si plants had higher forage biomass than control, and was up 20% ~ 60%. The effects of adding Si also significantly increased root biomass compared with controls and were up over 35%. Angle between leaf and stem showed the decrease trend in the upper and middle leaf, and this trend reduced with increase of Si supply. Angle between leaf and stem in the lower leaf first increased and then decreased with increase of Si supply. Overall, overcoming Si deficiency resulted in a significant increase in shoot and root growth.

Key words: silicon; alfalfa; silicon concentration; shoots; root

硅元素在地壳中的含量仅次于氧,是植物生长发育的有益元素^[1]。但土壤中的硅多以难溶形态存在,能为植物所利用的有效硅含量一般比较低。研究表明,施硅可增强植物的光合效率和生物膜保护功能^[2],提高植物抗病性和重金属离子的毒害,促进土壤中磷的活化,增加植物对磷的利用率^[3],从而促进植物的营养生长,提高植物的籽实产量,但目前对硅的研究多集中于水稻^[4,5]、小麦^[6-8]、大麦^[9,10]、甘蔗^[11,12]、黄瓜^[13]等禾本科作物和瓜果类蔬菜,而对豆科植物影响的研究仅限于作物大豆^[3]和木本植物豇豆^[14]。同时硅对牧草影响的研究很少,国内外仅限于禾本科的草坪草,如黑麦草、结缕草和高羊茅毛^[15,16],而对豆科牧草的研究尚未报道。一般认为,硅在细胞壁的积累会导致牧草营养价值降低,但对豆科植物豇豆的研究表明,根系内硅的含量远远大于茎和叶内的含量^[14];对水稻的研究表明植物体内硅含量在成熟期最高^[17],这些结果客观上启迪了硅对牧草生长发育影响的研究。牧草的收获期一般在营养生长阶段或生殖生长阶段初期,同时根部硅的积累对牧草品质的影响相对较小。豆科植物紫花苜蓿(*Medicago sativa* L)是优质牧草,我国种植历史悠久,特别是随着西部生态环境的建设,其在农业生态系统中的作用日趋增加,它很难在无硅的环境条件下生长^[16],因此硅对紫花苜蓿生长发育的影响是客观存在的。从小麦、大豆和大麦的研究证实,施硅能够促进植物体内脯氨酸含量、不饱和酸和可溶性蛋白的积累,从而通过渗透调节提高植物的抗旱性^[2,3,8],这对西部地区种植紫花苜蓿具有重要的指导意义。因此研究硅对豆科牧草紫花苜蓿生长发育的影响具有重要的现实意义,同时为人工草地建植和管理提供科学施肥依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验采用盆栽试验在通风、光照良好的室外进行。盆栽试验施用分析纯的硅酸(H_4SiO_4)。试验选用瓷花盆。实验用土壤为属黄绵土,质地轻壤,有机质含量 0.66% (重铬酸钾氧化法),全氮含量 0.11%,有效磷为 57.7 mg/kg (钼蓝比色法),速效钾 240 mg/kg (火焰光度计),土壤有效硅为 112.14 mg/kg (用 pH=4 的醋酸缓冲液提取硅,钼蓝比色法测定)。设置 6 个处理: CK(不施硅); 0.025 g/kg (硅酸/土壤,下同), 0.05 g/kg; 0.10 g/kg; 0.20 g/kg; 0.30 g/kg,每个处理重复 6 次,总计 36 个花盆。每盆装土 27.5 kg,装土时将硅酸和土壤充分混合,不加其他营养元素。选取饱满均一的紫花苜蓿品种为 Ameristand201 种子,用 1.0 g L^{-1} 的 $HgCl_2$ 溶液浸泡 10min,蒸馏水冲洗后于 25℃ 恒温光照培养箱内催芽 18 h,2002 年 4 月 10 日播种,每盆 20 粒,幼苗期间苗,每盆保留 10 株。自苗期后,不再进行灌溉浇水,使试验处理在完全自然的状态下进行,以便结果更好的模拟自然界的真实情况,气候的主要特点是 5~6 月初干旱,降水稀少,6 月中旬开始降水最多。在分枝期和盛花期分别取样。

1.2 测定指标的选取

叶面积采用光电叶面积仪(CF301 美国)测定,每盆每次测定 50 个叶片。叶夹角测定方法,首先选定同一高度,相同方位的小叶,用量角器测定叶片与茎之间的夹角,每株从下到上测定下、中、上各叶位的叶片,每盆 4 株。分枝数从根颈处记录每株的枝条数,这里仅记录一级分枝数,不包括二级以上的分枝数,每盆测定 4 株。株高分自然高度和绝对高度两种,每次每盆测定 4 株,其平均值代表该盆植株株高。地上生物量:采用收

获法,以干重计,每盆测定4株。测定分别在营养生长(出苗后30d)阶段和生殖生长(盛花期)阶段分别进行。根系生物量的测定在盛花期进行。紫花苜蓿体内的含硅量测定采用灰化后,硅钼蓝比色法测定^[18]。

1.3 数据分析

统计分析采用 Statistic 程序,制图采用 Excel 程序。

2 结果

2.1 硅在紫花苜蓿体内的含量

试验结果表明,无论是紫花苜蓿的根系还是茎叶,其体内硅的含量均随着施硅水平的增加而增加(图1),采用对数方程拟合,其 R^2 值分别为 0.9596 和 0.9494。当施硅量在 0.100 g/kg 以下时,植物体内硅的含量增加显著,而当施硅量大于 0.100 g/kg,植物体内硅的含量增加趋势明显减少。当施入的硅超过 0.100 g/kg 时,植物对硅的吸收基本趋向于饱和。在紫花苜蓿生殖生长阶段,即牧草适宜收获时期(始花期),其茎叶和根系体内的硅含量均小于 1.0%,且根系内硅含量远远大于茎叶内的硅含量。

2.2 硅对紫花苜蓿茎叶生长的影响

2.2.1 叶面积和叶夹角的变化 不同的施硅水平对紫花苜蓿叶面积有较大的影响(图2)。试验结果表明,硅对紫花苜蓿叶面积的影响基本呈正态分布。0.05 g/kg 的硅处理显著大于 0.10 g/kg 和 0.20 g/kg 硅处理水平 ($p < 0.05$),而后两个处理又显著大于 0.25 g/kg 硅处理水平。但 0.30 g/kg 硅处理较其它硅处理和对照差异不显著。

叶面积的大小虽然从根本上决定了植物进行光合作用,生产有机物质的能力。但叶片在植物上的空间分布格局直接影响着叶片对光能的截获及利用能力,进而影响着草地生产力。叶夹角指小叶与植株主茎之间的开张程度。试验结果表明,中部叶和上部叶与茎之间的夹角随着施硅逐渐减少,但随着施硅量的增加,夹角减小的变幅也在下降,而下部叶与茎之间的夹角变化较为复杂,随着施硅量的增加,先减小后增加,再减小(图3)。从叶夹角的空间分布结构看,各个处理和对照均表现为植株上部叶夹角小于中部叶夹角,而中部叶夹角又显著小于下部叶夹角。

2.2.2 分枝数的变化 施硅对营养期紫花苜蓿单株的分枝数没有显著影响(图4),而进入生殖生长后,统计结果现实施硅处理的分枝数显著大于对照处理 ($p < 0.05$)。施硅对紫花苜蓿分蘖的影响发生在牧草生殖期,0.05 ~ 0.20 g/kg 处理的分枝数较高硅处理(0.30g/kg)和低硅处理(0.025g/kg)的分枝数多,对照的分枝数最低。

2.2.3 株高生长的变化 硅处理对紫花苜蓿株高生长的影响随着生育期而异。在营养生长阶段,硅处理的自然株高和绝对株高较对照株高显著增加 ($p < 0.05$),其增加趋势与施入的硅量度关系不大,但在生殖生长阶

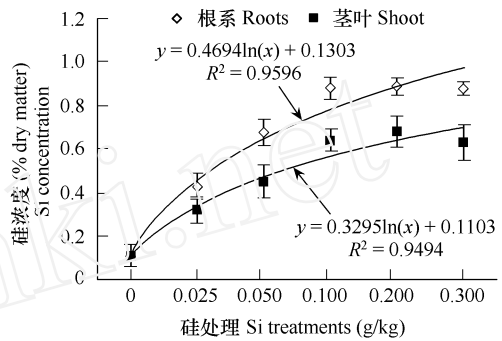


图1 紫花苜蓿茎叶和根系内硅的含量

Fig. 1 Si contraction in shoots and roots of alfalfa plants at reproductive stages

■ 营养生长 Vegetative growth □ 生殖生长 Productive growth

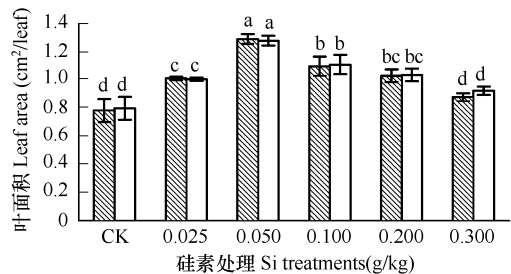


图2 不同水平硅处理对紫花苜蓿叶面积的影响

Fig. 2 Leaf area of alfalfa in different Si treatments

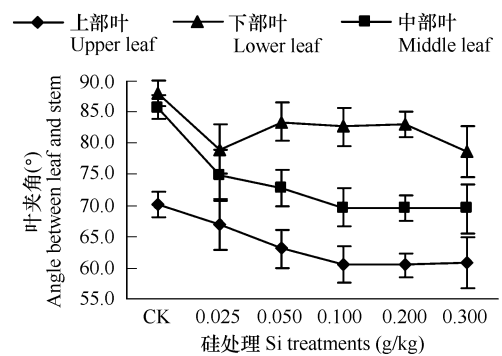


图3 不同水平硅处理对紫花苜蓿叶夹角的影响

Fig. 3 Angle between leaf and stem of alfalfa in different Si treatments
数值为生殖生长和营养生长的平均值 Data is mean value of reproductive and vegetative growth

段,硅处理的植株和对照处理的植株差异不明显(图5)。在营养期硅处理显著增加株高,这说明硅对豆科牧草紫花苜蓿的作用与禾本科作物水稻形态结构会产生类似的影响,即硅能够使紫花苜蓿茎秆挺直,进而提高紫花苜蓿的抗倒伏性和减少遮荫。但进入生殖生长阶段后,硅处理对紫花苜蓿株高生长没有影响。

2.2.4 地上生物量的变化 不同硅处理水平对紫花苜蓿地上总生物量的影响也很大(图6)。对照的总生物量显著小于硅处理的生物量。0.05 g/kg 和 0.10 g/kg 处理的生物量又显著大于 0.025 g/kg、0.20 g/kg 和 0.30 g/kg 的生物量。不同硅处理水平下,紫花苜蓿地上总生

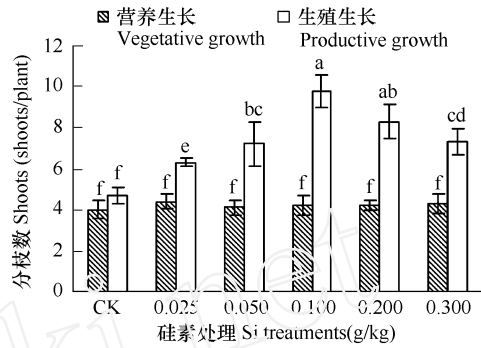


图4 不同水平硅处理对紫花苜蓿分枝数的影响
Fig.4 Shoots per plant of alfalfa in different Si treatments

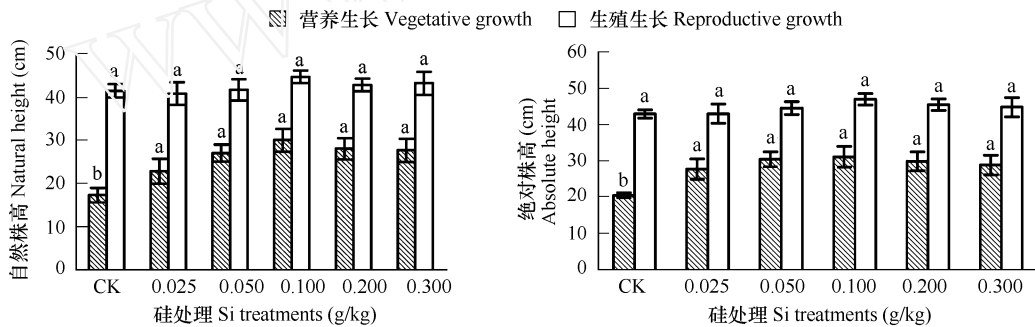


图5 不同水平硅处理对紫花苜蓿株高的影响
Fig.5 Plant height of alfalfa in different Si treatments

图案相同立柱间字母相同时差异不显著 ($p < 0.05$) The same bars with the same letter was not significantly different at 0.05 level

物量的大小次序依次为 0.10 g/kg > 0.05g/kg > 0.025 g/kg > 0.20 g/kg > 0.30 g/kg > 对照。统计结果显示,硅对紫花苜蓿地上生物量较对照提高了 20% ~ 60%。这说明硅能够促进紫花苜蓿地上部分的生长,增加生物量的积累。但硅与地上部分生物量积累的关系表现为随着土壤中硅含量的逐渐增大,生物量表现为先增加后下降的变化趋势,总体趋势表现为增产效应。

2.3 硅对紫花苜蓿根系生物量的影响

试验结果表明,硅处理对紫花苜蓿地下根系生物量的积累具有明显影响(图7),但各个处理间的方差分析比较复杂。统计分析显示,0.20 g/kg 硅处理的地下生物量显著大于 0.30 g/kg、0.10 g/kg 和对照 ($p < 0.05$),而与 0.025 g/kg 和 0.05 g/kg 间差异不显著,但 0.025 g/kg 和 0.05 g/kg 均显著大于对照。同时对照与 0.30 g/kg 间的差异不显著。地下生物量是紫花苜蓿地下生产能力的表现。因此,施硅可提高紫花苜蓿地下根系的生产能力。从整体上硅处理可促进紫花苜蓿地下生物量的积累,但施肥过多效果不太明显。试验中硅处理较对照可增加根系生物量 35% 以上。

3 讨论

硅对植物生长发育的影响始终是植物营养学研究的重要内容之一。硅在植物体内的含量因植物物种而出现分异,一般认为双子叶植物体内平均硅含量低于单子叶植物,而后者体内含硅量在种间存在差异,禾本科

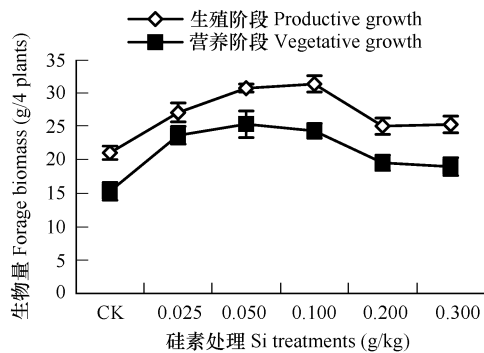


图6 施硅对紫花苜蓿地上部生物量的影响
Fig.6 Forage biomass of alfalfa in different Si treatments

和莎草科植物体内含硅量高,百合科含硅量居中,而豆科最低^[16,17]。关于硅在植物体内的分布规律分为3种类型,禾谷类作物水稻和燕麦表现为地上大于地下,非洲草和倭车轴草则表现为从根系到地上逐渐减少,而番茄和中国甘蓝地上地下大体相当^[17],豆科植物紫花苜蓿和豇豆^[14]内硅含量的分布与非洲草和倭车轴草一致,均表现为根系大于茎叶。植物体内的硅含量随着植物生长发育而不同,如硅在蓝莓(越桔属)老叶片中的含量显著高于嫩叶片^[11],这说明植物体内硅含量随着作物生育期而发生变化^[19]。紫花苜蓿收获和利用的主要是地上部分营养体,其适宜的收获时间为始花期,即大部分叶片处于幼叶阶段。同时紫花苜蓿根系中硅的含量大于根系内硅的含量,说明紫花苜蓿吸收的硅大部分被储藏在根系。因此施硅对其牧草品质的影响相对较低。当然紫花苜蓿植株体内硅含量随着生育期的变化规律有待进一步分析,以便确定施硅对其牧草品质的真实影响。

但目前关于硅与植物生长的关系因植物种类不同而存在差异。施硅能够促进水稻、小麦、玉米^[20]、大豆^[3]、竹子^[21]、甘蔗^[11]等植物的营养生长。但对冈茅属的盐生植物 *Spartina anglica* 的营养生长没有影响^[22]。本研究表明,施硅对紫花苜蓿的生长具有促进作用。叶片是植物进行光合作用的主要器官,所以其大小和分布状态,直接影响着紫花苜蓿群落对光能的截获及利用,进而影响着草地生产力。因此叶面积的大小直接关系着植物合成有机物质的能力,在适宜条件下,植物每个叶片都有各自相对固定的生长率和最大叶面积^[23]。叶面积数值越大,越有利于植物进行光合生产。试验结果表明,施硅对紫花苜蓿叶面积的影响以中等浓度时最好,而低浓度和高浓度虽然较对照有所增加,但均显著低于中等浓度的处理,这说明施硅虽然能够促增加紫花苜蓿的叶面积,但不同浓度的促进程度存在差异。叶夹角是衡量植物株型的一个关键指标。夹角小,植物群落生长紧密,受阳光直射的辐射面相对较小,在相同条件下,抗旱性较强,反之则弱。试验表明施硅能从整体上降低紫花苜蓿的叶夹角,促使其茎秆挺拔,株型紧凑,有利于抗旱和抗倒伏性。施硅使叶片外表皮细胞的硅质层增加^[11],从而阻止水分散失,提高了植物的抗旱性。因此无论是从叶夹角还是叶片的硅质层增厚,均说明了施硅能够增加紫花苜蓿的抗旱性。硅对紫花苜蓿株高生长随着植物生长发育期存在差异,在营养生长阶段较对照促进生长,而在生殖生长阶段较对照对紫花苜蓿株高生长没有影响,这说明紫花苜蓿对植物生长发育的能力随着物候期而发生变化,这点在小麦的生长发育过程中也得到了证实^[2]。在紫花苜蓿营养生长阶段,试验环境处于降水相对较少的时期,干旱胁迫较重,施硅提高了紫花苜蓿的抗旱性,从而促进了株高生长;当进入生殖生长阶段后,试验所在地的降水量相对增加,水分充沛,对照处理的干旱胁迫减轻,促使其株高快速生长,而硅处理的植株,由于硅增强了其抗旱性,干旱胁迫的解除对其影响没有对照剧烈,生长依然按照原来的速度增加,但其生长速率要比对照慢,故其生长量小。从整个生长期内,施硅对紫花苜蓿的株高生长是有利的,这有两方面原因,一是营养生长阶段较长,并且这一阶段是干旱胁迫较强,因此硅处理较对照株高显著增加。二是进入生殖生长之后,虽然硅处理对株高生长没有显著的促进作用,但作为优质牧草,紫花苜蓿的收获时间一般在始花期。硅对紫花苜蓿分蘖数的影响与株高生长的影响并不一致。在营养生长期,施硅对紫花苜蓿单株的分枝数没有显著影响,而进入生殖期后,施硅的紫花苜蓿分枝数较未施硅的分枝数显著增加,此时不同硅处理水平间的分枝数也存在差异。在营养生长阶段,由于施硅能够促进株高生长,从而促进了地上生物量的积累,而进入生殖生长后,分枝数的增加进一步促进了紫花苜蓿生物量的积累,最终表现为施硅能够显著增加紫花苜蓿生物量。硅对植物生长发育的影响表现为阶段性,这与非洲草(*Africa grass*)^[24]、水稻^[25]和竹子^[21]的研究结果一致。以往的研究表明施硅对植物根系生长的影响随着物种存在差异,即使同一物种,不同的报道结果也不尽一致。Epstein^[17]认为硅虽然有利于水稻和雀麦的茎叶生长,但对根系生长没有影响。但饶立华等^[4]的研究发现施硅可促进水稻根系生长。硅对豇豆根系生长具有促进作用,但对茎的生长没有影

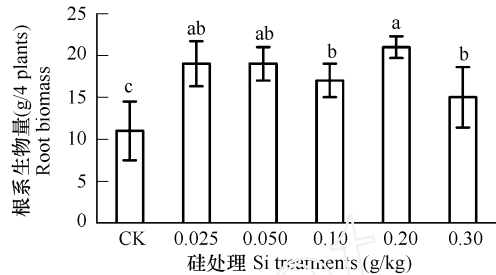


图7 不同水平硅对紫花苜蓿根系生物量影响

Fig. 7 Root biomass of alfalfa in different Si treatments

响^[14]。本试验结果表明,硅对多年生豆科牧草紫花苜蓿根系生物量的积累具有促进作用。目前虽然不能证实硅是紫花苜蓿生长发育的必要营养元素,但至少证实硅应是紫花苜蓿生长发育的有益元素,因此在紫花苜蓿人工草地管理中,适当的施入硅肥,可促进紫花苜蓿的生长发育,特别是在西北干旱地区。

References:

- [1] Mbrikawa C K, Saigusa M. Mineral composition and accumulation of silicon in tissues of blueberry (*Vaccinium corymbosus* cv. Bluecrop) cuttings. *Plant and Soil*, 2004, 258:1 ~ 8.
- [2] Gong H J, Chen K M, Chen G C, *et al.* Effect of silicon on the growth of wheat and its antioxidative enzymatic system. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1):55 ~ 57.
- [3] Li Q F, Ma C C, Li H P, *et al.* Effects of soil available silicon on growth, development and physiological functions of soybean. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):73 ~ 76.
- [4] Rao L H, Tan L X, Zhu Y X, *et al.* The effect of silicon on the morphological structure and physiology of hybrid rice. *Plant Physiology Communication*, 1986, 3:20 ~ 24.
- [5] Deren C W, Datnoff L E, Snyder G H. *et al.* Silicon concentration, disease response and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. *Crop Science*, 1994, 34:733 ~ 737.
- [6] Mayland H F, Wright J L, Sojka R E. Silicon accumulation and water uptake by wheat. *Plant and Soil*, 1991, 137:191 ~ 199.
- [7] Rafi M M, Epstein E. Silicon absorption by wheat (*Triticum aestivum*). *Plant and Soil*, 1999, 211:223 ~ 230.
- [8] Yang Y F, Liang Y C, Lou Y S, *et al.* Influence s of silicon on peroxidase, superoxide dismutase activity and lignin content in leaves of wheat (*Triticum aestivum* L.) and its relation to resistance to powdery mildew. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7):813 ~ 817.
- [9] Carver T L, Zeyen W R J, Ahlstrand G G. The relation between insoluble silicon and success or failure of attempted penetration by powdery mildew (*Erysiphe graminis*) germings on barley. *Physiological Plant Pathology*, 1987, 31:133 ~ 148.
- [10] Liang Y C. Effect of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil*, 1999, 209:217 ~ 224.
- [11] Lux A, Luxova M, Hattori T. *et al.* Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. *Annals of Botany*, 2002, 90:149 ~ 152.
- [12] Savant N K, Korndorfer G H, Datnoff L E, *et al.* Silicon nutrition and sugarcane production: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22:1853 ~ 1903.
- [13] Cherif M, Asselin A, Belanger R R. Defense response induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopathology*, 1994, 84:236 ~ 275.
- [14] Dakora F D, Nelwamondo A. Silicon nutrition promotes root growth and tissue mechanical strength in symbiotic cowpea. *Functional Plant Biology*, 2003, 30:947 ~ 953.
- [15] Jarvis S C. The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. *Plant and Soil*, 1987, 97:429 ~ 437.
- [16] Wang L J, Li M, Li T J, *et al.* Progress of Si-based nanocrystalline luminescent materials. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(8):625 ~ 632.
- [17] Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceeding of The National Academy of Science of The United States of America*, 1994, 91:11 ~ 17.
- [18] Nanjing Agricultural University. *Soil Agricultural Chemical Analysis*(2nd edition). Beijing:China Agricultural Press, 1981.
- [19] Ma J F, Goto S, Tamai K, *et al.* Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. *Plant Physiology*, 2001, 17:1773 ~ 1780.
- [20] Ma C C, Li Q F, Shu L Z, *et al.* Preliminary explanation of the mechanism about effects of Silicon on maize Seed germination and seedling Growth. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5):665 ~ 669.
- [21] Lux A, Luxova M, Abe J, *et al.* Silicification of bamboo (*Phyllostachys heterocyla*) root and leaf. *Plant and Soil*, 2003, 255:85 ~ 91.
- [22] DeBakker N V J, Hemminga M A, Soelen J V. The relationship between silicon availability, and growth and silicon concentration of the salt marsh halophyte *Spartina anglica*. *Plant and Soil*, 1999, 215:19 ~ 27.
- [23] Liu X Y, Luo Y P, Shi Y C. The Stimulating Effects of rewatering in subjecting to water stress on leaf area of winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(4):422 ~ 428.
- [24] McNaughton S J, Tarrants J L, McNaughton M M, *et al.* Silica as a defense against herbivory and a growth promotion in African grasses. *Ecology*, 1985, 62:528 ~ 535.
- [25] Sistani K R, Savant N K, Reddy K C. Effect of rice hull ash silicon on rice seedling growth. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20:195 ~ 201.

参考文献:

- [2] 宫海军, 陈坤明, 陈国仓, 等. 硅对小麦生长及其抗氧化系统的影响. *土壤通报*, 2003, 34(1):55 ~ 57.
- [3] 李清芳, 马成仓, 李韩平, 等. 土壤有效硅对大豆生长发育和生理功能的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(1):73 ~ 76.
- [4] 饶立华, 覃莲祥, 朱玉贤, 等. 硅对杂交水稻形态结构和生理的影响. *植物生理学通讯*, 1986, 3:20 ~ 24.
- [8] 杨艳芳, 梁永超, 姜运生, 等. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及与抗白粉病的关系. *中国农业科学*, 2003, 36(7):813 ~ 817.
- [16] 王荔军, 李敏, 李铁津, 等. 植物体内的纳米结构 SiO₂. *科学通报*, 2001, 46(8):625 ~ 632.
- [18] 南京农业大学. *土壤农业化学分析*(第二版). 北京:中国农业出版社, 1981.
- [20] 马成仓, 李清芳, 束良佐, 等. 硅对玉米种子萌发和幼苗生长作用的机制初探. *作物学报*, 2002, 28(5):665 ~ 669.
- [23] 刘晓英, 罗远培, 石元春. 水分胁迫后复水对冬小麦叶面积的激发作用. *中国农业科学*, 2001, 34(4):422 ~ 428.