

# 不同土壤水分条件下硅对紫花苜蓿水分 利用效率及产量构成要素的影响

刘慧霞<sup>1</sup>, 郭正刚<sup>2,\*</sup>, 郭兴华<sup>2</sup>, 周雪荣<sup>2</sup>, 惠文森<sup>1</sup>, 王康英<sup>1</sup>

(1. 西北民族大学生命与工程学院; 兰州 730030; 2. 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020)

**摘要:** 硅是地壳中含量仅次于氧的元素, 植物不可能在无硅的环境中生长。通过盆栽试验研究了不同土壤水分条件下硅对紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 水分利用效率及产量构成要素的影响。结果表明, 在土壤含水量为田间最大持水量的 35% 和 80% 的条件下, 硅对紫花苜蓿水分利用效率和生物量没有显著影响, 而在土壤含水量为田间最大持水量的 50% 和 65% 的条件下, 硅显著提高了紫花苜蓿水分利用效率和生物量 ( $p < 0.05$ ), 紫花苜蓿水分利用效率的增幅分别为 35% 和 20%, 主要途径为降低叶片蒸腾速率; 紫花苜蓿生物量增幅分别为 41% 和 14%, 主要通过促进分枝和株高生长, 而不受单枝生物量的影响。因此硅对紫花苜蓿水分利用效率和生物量的有益作用与其生长环境中的土壤水分条件密切相关。

**关键词:** 紫花苜蓿; 土壤水分含量; 水分利用效率; 产量构成要素

文章编号: 1000-0933(2009)06-3075-06 中图分类号: Q143, Q948.1, S314, S551.7 文献标识码: A

## Effect of addition of silicon on water use efficiency and yield components of alfalfa under the different soil moisture

LIU Hui-Xia<sup>1</sup>, GUO Zheng-Gang<sup>2,\*</sup>, GUO Xing-Hua<sup>2</sup>, ZHOU Xue-Rong<sup>2</sup>, HUI Wen-Sen<sup>1</sup>, WANG Kang-Ying<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Life Science and Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou City, 730030, China

<sup>2</sup> College of Pastoral Agricultural Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou City, 730020, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3075 ~ 3080.

**Abstract:** As the second most abundant mineral element in the soil, silicon has been found to alleviate the adverse impact of drought in many plant species and increase the water use efficiency in others. If the water use efficiency of alfalfa could be enhanced by simply adding silicate to the soil, this measure could potentially be applied in pasture management to face rising irrigation costs and water demand from inadequate supplies of surface water, together with declining water tables. Therefore, the effects of addition of silicon on the water use efficiency and forage yield component of alfalfa (*Medicago sativa* L.) were investigated across four soil moisture environments. This study shows that addition of silicon improved water use efficiency of alfalfa under lightly (65% of field water capacity) and moderately (50% of field water capacity) water-stressed conditions, by decreasing the transpiration rate ( $p < 0.05$ ) but it had no effect on alfalfa water use efficiency under wet (80% of field water capacity) and seriously (35% of field water capacity) water-stressed conditions. This study also indicated that addition of silicon significantly increased the forage biomass by promoting shoot development ( $p < 0.05$ ) and enhancing the plant height under the moderately water-stressed condition and only by enhancing the shoot development under the slightly water-stress rather than biomass per branch ( $p < 0.05$ ). The results of this study suggest that improvement of water use efficiency of alfalfa by added silicon is regulated by soil moisture.

基金项目: 国家新世纪优秀人才计划资助项目 (NCET-05-0882); 中国博士后科学基金资助项目 (20060390191; 200801242); 国家自然科学基金资助项目 (30700562)

收稿日期: 2008-03-24; 修订日期: 2008-09-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guozhg@lzu.edu.cn

**Key Words:** alfalfa; soil moisture; water use efficiency; yield component

水资源短缺严重威胁着我国西北地区农业的可持续发展,因此“生物节水”被“国家中长期科学和技术发展规划纲要”列为农业综合节水技术的重要内容。提高植物水分利用效率不仅是生物节水的主要途径之一,也是进一步节水增产的关键和最终潜力所在<sup>[1]</sup>。优质牧草紫花苜蓿(*Medicago sativa*)在我国西北地区畜牧业生产和生态环境建设中发挥着极其重要的作用<sup>[2]</sup>。灌溉是维系紫花苜蓿人工草地高产的主要措施<sup>[3]</sup>,但一般条件下灌溉的水量并不是全部用于初级生产,部分由于蒸腾而损失<sup>[4]</sup>。因此提高紫花苜蓿水分利用效率,让每一滴水生产出更多的植物性产品<sup>[5,6]</sup>,成为生物节水中亟待解决的关键科学问题。

西北地区水分和养分胁迫同时存在,但水分和养分又是一对联因互补的因子,它们间的耦合既能增加植物生物量<sup>[7]</sup>,又能提高植物水分利用效率<sup>[8,9]</sup>。虽然磷能够降低紫花苜蓿的耗水系数<sup>[3]</sup>,但其易引起土壤非点源污染,迫使人们寻找其他元素能够部分替代磷。硅和磷结构相似<sup>[10]</sup>,不仅能够促进土壤中磷的活化<sup>[11]</sup>,而且能避免磷过量使用引起的土壤污染问题<sup>[12,13]</sup>。硅能够提高紫花苜蓿的生物量<sup>[14]</sup>,而硅对紫花苜蓿水分利用效率的影响并不清楚。因此本研究通过盆栽试验,确定在不同土壤水分条件下硅对紫花苜蓿产量构成因素和水分利用效率的影响,为紫花苜蓿人工草地管理中通过以肥增水效实现生物节水提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验采用盆栽试验于2006年在兰州大学草地农业科技学院自制的塑料遮雨棚中进行,供试紫花苜蓿品种为Ameristand201。硅源为 $K_2SiO_3$ 。试验选用塑料桶,每桶装土23.8 kg,土壤属黄绵土,质地轻壤,基本性质为有机质含量0.66%(重铬酸钾氧化法),全氮含量0.072%,有效磷57.66 mg/kg(钼蓝比色法),速效钾240 mg/kg(火焰光度计),土壤有效硅112.14 mg kg<sup>-1</sup>(用pH=4的醋酸缓冲液提取硅,钼蓝比色法测定)。试验设置4个土壤水分梯度,分别为田间最大持水量的80%(湿润),65%(轻度干旱),50%(中度干旱),35%(重度干旱)。在每个土壤水分梯度下,设置3个处理,即硅处理(土壤中加4.0 g  $K_2SiO_4$ ),无硅处理(土壤中加入8.0g KCl),对照(不加 $K_2SiO_4$ 和KCl),每个处理4个重复。2006年4月30日播种,每桶中播种饱满种子20粒,苗期选生长均一的保留10株。在试验期间保证实验材料在通风、透光、遮雨的条件下生长,并通过手工清除杂草,于7月25日取样,即试验结束。期间每天9:00,采用纯净水通过称重法维持土壤水分含量基本不变,记录每天加入的水量。每周将塑料桶随机调整位置,避免自然因素的不均。

### 1.2 指标测定

在紫花苜蓿初花期进行指标测定。首先采用便携式光合测定仪(LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE)测定光合速率和蒸腾速率,光合速率和蒸腾速率测定时间为9:00~11:00,每个盆测定3次;然后测定每盆每株的分枝数,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。株高为自然高度。地上生物量采用收获法,以干重计。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<sup>[8]</sup>。

水分利用效率采用公式 $WUE = FB/ET$ 计算,其中 $WUE$ 是水分利用效率(g/kg), $FB$ 是生物量(g), $ET$ 是消耗的总水量(kg)。消耗总水量理论上由下列公式决定:

$$ET = \Delta S + P + I - D$$

式中, $\Delta S$ 是试验期间土壤含水量的变化,由于整体试验期间土壤含水量基本保持不变,因此在本研究中 $\Delta S = 0$ 。 $P$ 为降水量,由于采取了遮雨措施,因此 $P = 0$ ; $I$ 是灌溉量(L),指每天灌溉量的总和。 $D$ 是地下水水分损失量, $D = 0$ 。因此本研究中水分生产力采用下列公式计算: $WUE = FB/I$

### 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 水分利用效率

试验结果表明,硅对紫花苜蓿水分利用效率的影响与土壤含水量密切相关(图1),表现为在湿润条件下(土壤含水量为田间最大持水量的80%)和重度干旱胁迫条件下(土壤含水量为田间最大持水量的35%)硅处理对紫花苜蓿水分利用效率没有显著影响,但在轻度干旱胁迫(土壤含水量为田间最大持水量的65%)和中度干旱胁迫条件下(土壤含水量为田间最大持水量的50%),硅显著提高了紫花苜蓿水分利用效率( $p < 0.05$ ),增幅分别为20%和35%。在4个水分梯度下,钾处理对紫花苜蓿水分利用效率均无显著影响。

### 2.2 生物量及其构成要素

在土壤湿润和重度干旱胁迫条件下,硅对紫花苜蓿地上生物量没有明显的影响,表现为硅和钾处理均与对照间差异不显著(图2A),但在中度和轻度干旱胁迫条件下,硅对紫花苜蓿生物量的积累是有益的,表现为硅和钾处理的生物量显著大于钾处理的生物量,而后者又显著大于对照的生物量( $p < 0.05$ )。紫花苜蓿生物量与其构成要素密切相关,这些要素主要包括单枝生物量、株高和分枝数,它们是生物量的组成部分。试验结果表明,硅对紫花苜蓿株高生长和分枝的影响与土壤含水量十分密切,硅只有在中度干旱胁迫条件下对紫花苜蓿的株高生长具有显著的促进作用( $p < 0.05$ ),而在重度、轻度和湿润条件下硅对紫花苜蓿的株高生长没有显著影响(图2B)。硅对紫花苜蓿分枝数的影响与株高生长的影响并不一致,表现为在重度干旱胁迫和湿润条件下,硅对紫花苜蓿分枝数没有明显的影响,而在轻度和中度干旱胁迫条件下,硅能够显著促进紫花苜蓿

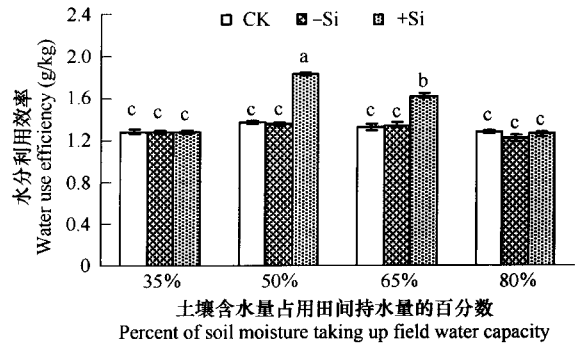


图1 不同土壤含水量条件下硅对紫花苜蓿水分利用效率的影响  
Fig. 1 Effect of addition of silicon on water use efficiency across four soil moisture conditions

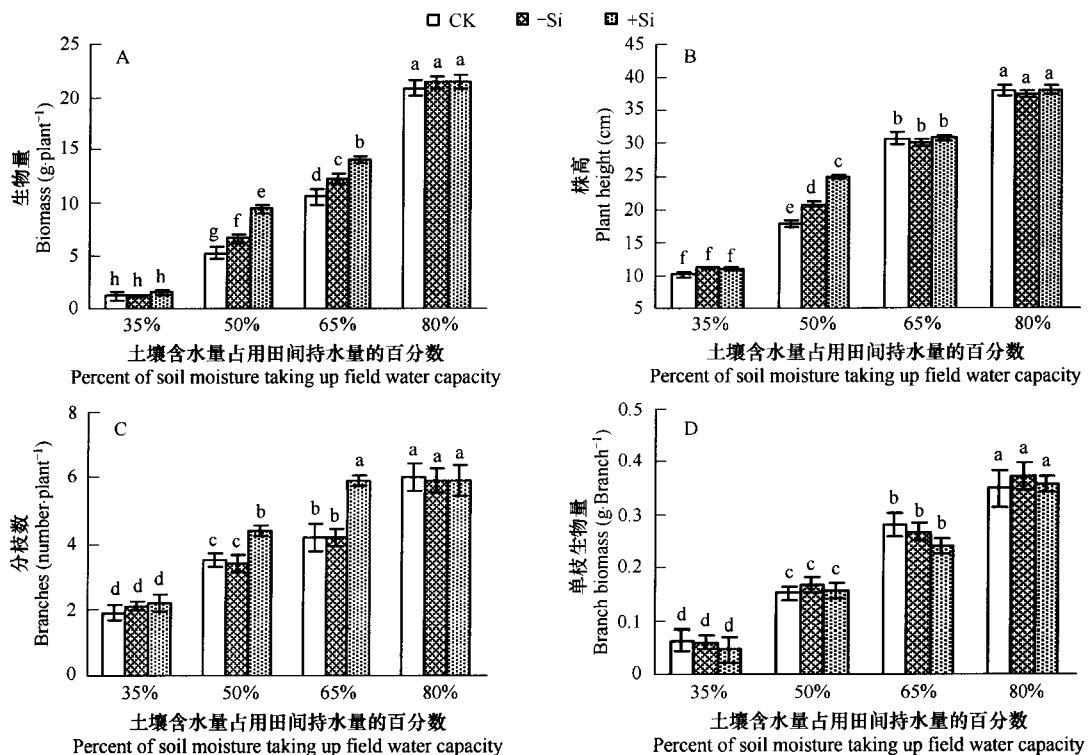


图2 不同土壤含水量条件下硅对紫花苜蓿生物量(A)、株高(B)、分枝数(C)及单枝生物量(D)的影响

Fig. 2 Effect of addition of silicon on biomass, plant height, branch and branch biomass of alfalfa under different soil moisture environments

分蘖(图2C)。钾处理除了在中度干旱条件下显著促进了紫花苜蓿的株高生长外,对分蘖数和株高没有显著的促进作用。在4种土壤水分条件下,硅对紫花苜蓿的单枝生物量没有显著的影响(图2D)。

### 2.3 蒸腾速率和光合速率

硅总体上显著降低了紫花苜蓿的蒸腾速率,只是在重度干旱胁迫条件下,其与对照间差异不显著(图3A),而钾对紫花苜蓿蒸腾速率的影响随着土壤含水量变化而变,在湿润条件下,钾表现出与硅一样的效应,降低紫花苜蓿蒸腾速率,在中度和轻度干旱胁迫时钾对紫花苜蓿蒸腾速率没有显著影响,但在重度干旱胁迫条件下,钾增加了紫花苜蓿的蒸腾速率,导致在重度干旱胁迫条件下硅与对照间的蒸腾速率差异不显著,其原因可能是硅与钾在紫花苜蓿蒸腾作用方面表现为拮抗,而不是协同。虽然硅处理植物的光合速率均显著大于对照( $p < 0.05$ ),但硅处理和施钾处理间植株的光合速率差异不明显(图3B),这说明硅并没有显著增加紫花苜蓿的光合速率,而是钾增加了紫花苜蓿的光合速率。虽然硅在不同干旱胁迫条件下对紫花苜蓿蒸腾速率和光合速率影响存在分歧,但硅对紫花苜蓿叶片的气孔导度影响并不显著。

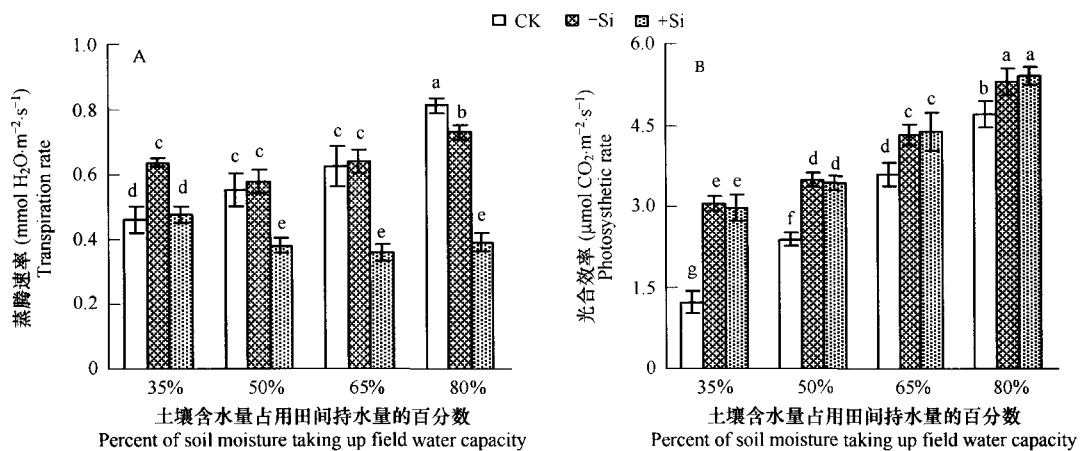


图3 不同土壤含水量条件下硅对紫花苜蓿蒸腾速率(A)和光合速率(B)的影响

Fig. 3 Effect of addition of silicon on transpiration rate (A) and photosynthesis rate (B) of alfalfa under different soil moisture environments

## 3 讨论

随着地表可利用水资源日趋匮乏、地下水位的下降,泵井抽灌成本的增加,提高紫花苜蓿水分利用效率成为目前亟待解决的科学问题<sup>[5]</sup>。本研究结果表明,硅能够提高紫花苜蓿在轻度和中度干旱胁迫下的水分利用效率,其主要途径是降低了紫花苜蓿的蒸腾速率,这一结果与硅提高向日葵<sup>[8]</sup>和玉米<sup>[9]</sup>水分利用效率的结果一致。其主要原因可能是硅在运输管道的沉积增加了水分和运输管道的亲和力,使植物木质部汁液的流动速率比未施硅植物木质部汁液的流动速率慢的多<sup>[8]</sup>;另外硅在组织中的沉积减轻了水势压力,从而减少了蒸腾速率<sup>[10,15]</sup>。然而在重度干旱和湿润条件下硅对紫花苜蓿水分利用效率没有显著影响,这说明硅对紫花苜蓿水分生产力的影响与其所生长环境中的土壤水分含量密切相关。在重度干旱胁迫条件下,紫花苜蓿对硅的吸收能力降低,从而使其体内硅的沉积量较少(图4),从而导致硅的作用未被充分发挥,而在湿润条件下,由于土壤透气性相对较差,紫花苜蓿根系活力受抑,从而影响了根系对硅的吸收。这说明硅对紫花苜蓿水分利用效率的有益作用依赖于土壤水分干旱胁迫的程度。Yamaji 和 Ma<sup>[16]</sup>的研究发现,干旱胁迫降低了水稻吸收硅的能力,这与本研究的结果相似,说明干旱胁迫可能通过影响植物对硅吸收能力,使植物体内硅浓度发生变化,而硅对植物有益作用与植物体内积累硅含量的大小有关。

虽然硅是硅藻属植物生长的必需元素已经得到共识,但硅对高等植物生长发育的影响仍然存在分歧。已有研究表明,硅对大豆<sup>[16]</sup>、坦桑尼亚草原牧草<sup>[17]</sup>、水稻<sup>[18,19]</sup>、竹子<sup>[20]</sup>的营养生长具有促进作用,但是硅对 *Spartina anglica*<sup>[21]</sup>、豇豆<sup>[22]</sup>和向日葵<sup>[8]</sup>的营养生长没有显著的促进作用。本试验结果表明硅在轻度和中度干旱胁迫条件下能够增加紫花苜蓿的生物量,这与大豆、水稻和小麦幼苗、竹子的结果一致,与豇豆、向日葵和

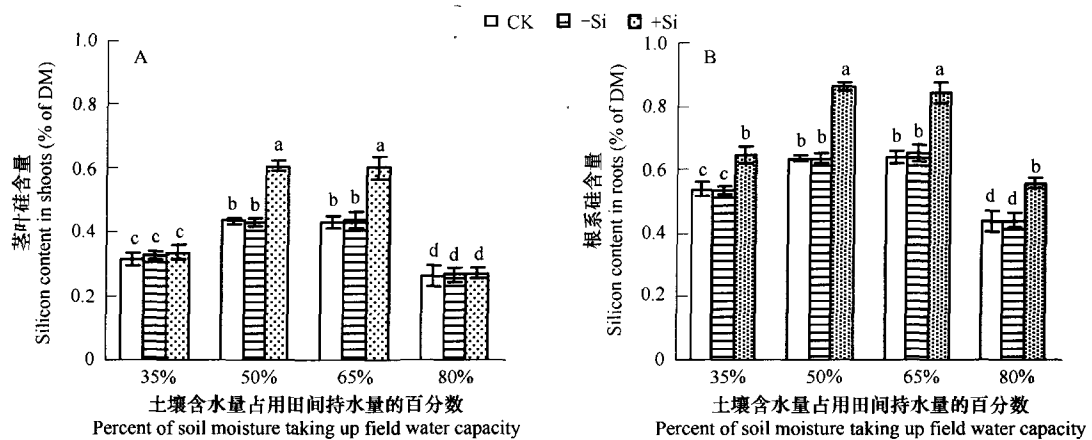


图4 不同土壤含水量条件下硅对紫花苜蓿茎叶(A)和根系中硅含量(B)的影响

Fig. 4 Effect of addition of silicon on silicon content in shoots (A) and roots (B) of alfalfa under different soil moisture environments

*Spartina anglica* 的结果不同。不同于干旱胁迫条件下,硅对紫花苜蓿地上产量构成要素的影响并不一致,中度干旱胁迫时硅既促进紫花苜蓿分蘖,又能促进株高生长,从而增加紫花苜蓿的地上生物量,但在轻度干旱胁迫时,硅则主要通过刺激植株分蘖而增加紫花苜蓿生物量,对株高生长并没有明显的促进作用。这和磷对紫花苜蓿产量构成要素的影响不一样,磷主要通过增加紫花苜蓿单枝生物量而达到增产的目的<sup>[23]</sup>,但本研究中发现硅对紫花苜蓿单枝生物量并无显著影响。硅通过刺激植株分枝增产在玉米上也得到证实,即硅通过增加玉米茎的节间长度达到增加生物量<sup>[24]</sup>。

硅虽然降低了紫花苜蓿的蒸腾速率,但并没有影响紫花苜蓿的光合速率,这是因为:第一硅降低了叶片中叶绿素的分解速率,从而维持了叶片中叶绿素的含量<sup>[25]</sup>;第二是硅在植物体内沉积,尤其是叶片表面的硅化细胞对散射光的透过率较绿色细胞要大的多<sup>[26]</sup>,从而维持了光合速率,增加了紫花苜蓿在轻度和中度干旱胁迫条件下的生物量。Epstein<sup>[27]</sup>认为施硅后植物光合作用不会下降,而且还可能增加群体光合作用,这与本试验的结果一致。

尽管从生理角度硅仍然不能确定硅为紫花苜蓿生长发育的必需元素,但本研究结果表明在适度干旱胁迫条件下硅能够增加紫花苜蓿的生物量和提高水分利用效率,这为西北地区减轻土壤磷非点源污染现状,通过以肥增水效措施实现生物节水提供了科学依据。

#### References:

- [ 1 ] Shi Y C. To raise the water use efficiency by modern biotechnology. *Science and Technology Review*, 1999, (10):3-5.
- [ 2 ] Guo Z G, Liu H X, Wang S M, *et al.* Biomass, persistence, and drought resistance of nine varieties in dryland conditions of west China. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2005, 45:59-64.
- [ 3 ] Sun H R, Zhang Y J, Li W H, *et al.* Water consumption coefficient and water use efficiency of *Medicago sativa* in the establishment year in the Beijing Plain. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16 (1):41-46.
- [ 4 ] Zhou W B, Li P C. Study on integrated benefit of water resources in arid and semi-arid irrigated district. *Journal of Natural Resource*, 2003, 18 (3): 288-193.
- [ 5 ] Guo Z G, Liu H X, Wang Y R. Irrigating at podding and regrowth stages increases seed yield and improves pod distribution in lucerne grown in the Hexi Corridor in China. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 50: 285-290.
- [ 6 ] Stanhill G. Water use efficiency. *Advance in Agronomy*, 1986, 39: 53-85.
- [ 7 ] Liu W G, Zhang J C, Cao W X, *et al.* Effects of different wheat cultivation methods on soil moisture use efficiency in dry land soil. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2006, 15 (5):47-51.
- [ 8 ] Zou C Q, Gao X P, Liu Y J, *et al.* Effects of Silicon on water use efficiency in sunflower with solution culture. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(4):547-550.

- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 2006, 11: 392 – 397.
- [ 12 ] Elmi A A, Madramootoo C, Egeh M, *et al.* Water and fertilizer nitrogen management to minimize nitrate pollution from a cropped soil in southwestern Quebec, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 151:117 – 134.
- [ 13 ] Li Q, Chen L D, Qi X, *et al.* Catchments scale risk assessment and critical source area identification of agricultural phosphorus loss. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (9): 1982 – 1986.
- [ 14 ] Guo Z G, Tian F P, Wang S M, *et al.* Effect of silicon supply on alfalfa growth. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10):3302 – 3307.
- [ 15 ] Ma J F, Tamai K, Ichii M, *et al.* A rice mutant defective in Si uptake. *Plant Physiology*, 2002, 130: 2111 – 2117.
- [ 16 ] 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 Application Ecology*, 2004, 15:73 – 76.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Gong H J, Randall D P, Flowers T J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing by pass flow. *Plant, Cell and Environment*, 2006, 29: 1970 – 1979
- [ 20 ] Lux A, Luxova M, Abe J, *et al.* Silicon concentration of bamboo (*Phyllostachys heterocyla*) root and leaf. *Plant and Soil*, 2003, 255: 85 – 91.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Dakora F D, Nelwamondo A. Silicon nutrition promotes root growth and tissue mechanical strength in symbiotic cowpea *Functional Plant Biology*, 2003, 30: 947 – 953
- [ 23 ] Berg W K, Cunningham S M, Brouder S M, *et al.* Influence of phosphorus and potassium on alfalfa yield and yield components. *Crop Science*, 2005, 45:297 – 304
- [ 24 ] Corrales I, Poschenrieder C, Barcel J. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. *Plant and Soil*, 1997, 190:203 – 209.
- [ 25 ] Wallace A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal by plants. *Soil Science*, 1989, 147: 457 – 460
- [ 26 ] Savant N K, Sayder G H, Datnoff L E. Silicon management and sustainable rice production. *Advance in Agronomy*, 1997, 58: 151 – 199.
- [ 27 ] Epstein E. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 641 – 664.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 石元春. 开拓中的蹊径:生物性节水. *科技导报*, 1999, (10):3 ~ 5.
- [ 3 ] 孙洪仁, 张英俊, 历卫宏, 等. 北京地区紫花苜蓿建植当年的耗水系数和水分利用效率. *草业学报*, 2007, 16(1):41 ~ 46.
- [ 4 ] 周维博, 李佩成. 干旱半干旱地域灌区水资源综合效益评价体系研究. *自然资源学报*, 2003, 18(3):288 ~ 193.
- [ 7 ] 刘文国, 张建昌, 曹卫贤, 等. 旱地小麦不同栽培条件对土壤水分利用效率的影响. *西北农业学报*, 2006, 15(5):47 ~ 51.
- [ 8 ] 邹春琴, 高霄鹏, 刘颖杰, 等. 硅对向日葵水分利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4):547 ~ 550.
- [ 9 ] 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机制初探. *作物学报*, 2002, 28(5): 665 – 669.
- [ 13 ] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 流域尺度农业磷流失危险性评价与关键源区识别方法. *应用生态学报*, 2007, 18(9):1982 ~ 1986.
- [ 14 ] 郭正刚, 田福平, 王锁民, 等. 硅对紫花苜蓿生物学特性的影响. *生态学报*, 2006, 26(10): 3302 ~ 3307.
- [ 16 ] 李清芳, 马成仓, 李韩平. 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.