

硅对大麦铝毒的消除和缓解作用研究

黄昌勇, 沈 冰

(浙江大学环境与资源学院, 浙江杭州 310029)

摘要:在温室和实验室进行了施硅对消除或缓解大麦酸害铝毒的土培和溶液培养试验。结果表明,施硅后大麦幼苗的地上部茎、叶和地下部根的生物量均比不施硅明显增加。施硅能有效地促使植株吸收的铝在根部积累,抑制铝向地上部分运转;施硅还能调节根吸收的磷向地上部分运移,以减轻因伴随铝毒而产生的缺磷症状。施硅消除或缓解酸害铝毒的可能机理是:铝与硅形成无毒的铝硅酸复合离子(HAS),降低活性铝的浓度,及硅能调节大麦幼苗地上部和根内铝和磷的再分配。

关键词:硅;大麦;铝毒

中图分类号:X506 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2003)01-0098-04

Effects of silicon applicated on allevation of aluminum toxicity to barley

HUANG Chang-yong, SHEN Bing

(College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The pot culture containing upland red soil from Longyou, Zhejiang province and Hoagland nutrient solution culture were conducted to study the role of silicon and its possible mechanism in reducing Al toxicity to barley crop. Equal amounts of N, P, K were added to the soil with varying silicon levels (Si 0.0, 0.10, 0.20 g/kg). Total Al in the solution was 13.5 mg/L with a Si/Al ratio of 0.0, 0.5, 1.0, respectively. Barley seedlings were harvested and analyzed. Results indicated that the average height, dry matter of shoots and roots of barley seedlings increased significantly after treatments of silicon. Silicon caused Al to accumulate in the roots and promoted phosphorus to be transferred to the shoots. The results suggested that silicon alleviated Al toxicity to barley by forming soluble, less toxic hydroxy-alumino silicate (HAS) ions in the soil and nutrient solution, thus reducing the concentration of toxic Al species, and by re-distributing Al and P in the shoots and roots.

Key words: silicon; barley; aluminum toxicity

全球范围内酸性沉降的日益严重以及酸性肥料在农业中的大量投入,大大地加速了土壤和沉积物中铝的释放。土壤和水体中高浓度的铝是一种生理毒性元素,它不仅对铝敏感的作物如大麦、玉米等造成毒害,水体中的铝可导致铝以凝胶形态积聚在鱼体上,使鱼窒息而死,进而通过食物链危及人畜的健康^[1~7]。

为了缓解或消除土壤及水体环境中的铝毒,改良酸性土壤是关键。Kinraide 等认为,改良酸性土壤的有效措施有两项:第一项是阳离子改良,即在有铝毒土壤中增施 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子。这种处理

不是减少土壤中铝的浓度,而是通过增加土壤中其它阳离子的浓度来减少土壤溶液中 Al^{3+} 离子的活度,达到消除或缓解 Al^{3+} 离子毒性的目的。加入土壤中的阳离子还能与 Al^{3+} 离子直接竞争土壤胶体表面的结合位点。在酸性土壤上施用石灰后,棉花、玉米、大麦、小麦和大豆等作物都有明显的增产效果^[8~10]。第二项措施是阴离子改良,即在酸害铝毒土壤中加施 SO_4^{2-} 、 F^- 、磷酸根、有机酸等等。通过阴离子与 Al^{3+} 离子的配位反应,生成毒性很小或没有毒性的络合物。这种处理能直接降低土壤和水体中毒性铝的浓度和活度。在酸性土壤上施用有机

肥、磷肥对缓解、消除铝毒,排除酸害能起到理想的效果^[5,10~14]。

在前人用阴离子改良酸性土壤、排除酸害及铝毒研究中,几乎都集中在通过施用有机肥和磷肥来研究有机酸和磷酸根与铝的作用机理及改良功能上,很少有通过施用硅肥来探讨硅酸根与 Al^{3+} 离子配位来缓解或消除酸害铝毒的报道。或者说,虽已做了不少作物施用硅肥的田间反应研究,但很少有人把施用硅肥与缓解消除酸性土壤的铝毒联系起来思考^[8,9,15]。众所周知,地壳和土壤中的硅和铝是仅次于氧(O)的第二、三位富集元素,土壤和水体中硅和铝的溶液化学反应是最普遍的土壤化学过程。据报道,土壤和水体中铝可与硅酸根形成可溶性铝硅酸盐复合离子(HAS),这种复合离子的性质与伊毛缟石、水铝英石等相似,被认为是伊毛缟石、水铝英石等矿物的前分子片段^[16,17],其对植物和水体中鱼的毒性甚小。据此,我们设计了施用硅肥对消除或缓解酸性土壤上铝毒的生物效应及硅、铝的土壤溶液化学反应过程、作用机理研究。

1 材料与方法

供试土壤取自浙江龙游县荒地黄筋泥土,其主要理化性质为 pH 值 4.44,有机碳 1.72 g/kg,全氮 0.21 g/kg,碱解氮 32.2 mg/kg,交换性 Ca 15.8 mg/kg,交换性 Mg 9.9 mg/kg,交换性 Al 2250 mg/kg。供试大麦品种为“浙皮 1 号”。

1.1 盆栽土培试验

将 500 g 过 1 mm 筛的土壤,装于高 10 cm,直径 8.5 cm 底部带孔的聚乙烯小钵中。施用底肥硫酸铵 1.00 g/kg,过磷酸钙 0.5 g/kg,氯化钾 0.5 g/kg。硅酸钠(硅肥)水平为 3 个处理:Si 0.00、0.10、0.20 g/kg 土与土混拌均匀。每钵播发芽的大麦种子 30 颗,出苗后间苗 20 株,生长期间保持土壤的湿度为 80~90% 田间持水量,重复 4 次。再生长 20 d 后收获,测定每钵大麦平均株高、地上部和地下部鲜重、干物

重以及植株体内磷与铝的含量。磷的测定方法为磷钼蓝法,铝的测定方法为铝试剂比色法。

1.2 溶液培养试验

水培营养液为霍格兰(Hoagland)旱作营养液(1950)。在霍格兰营养液中加入 AlCl_3 ,再加入单硅酸溶液,使得最终 Al^{3+} 浓度在 13.5 mg/L,3 个处理的 Si/Al 比分别为 0、0.5、1.0,基质为玻璃砂。营养液酸度控制在 pH 3.0~4.0 范围内。每钵播发芽的大麦种子 30 颗,出苗后间苗 20 株,重复 4 次。再生长 20 d 后收获,测定每钵大麦平均株高、地上部和地下部鲜重、干重以及植株体内磷与铝的含量。磷的测定方法为磷钼蓝法,铝的测定方法为铝试剂比色法。

2 试验结果

2.1 施硅对大麦幼苗生物量的影响

表 1 表明,土培和溶液培养施硅处理后大麦根系生物量有较显著的增加。土培大麦施硅 0.10 和 0.20 g/kg 后根系生物量(干重)比不施硅(空白)分别增加了 32.6% 和 71.2%;溶液培养大麦施硅后根生物量比不施硅(空白)增加了 62.5% 和 137.5%。施硅也促进了大麦幼苗地上部的生长,这主要表现在大麦平均株高的增加以及地上部鲜重和干重的显著增加。土培空白处理的大麦平均株高为 21.43 cm,施硅后株高分别增加了 1.35 cm 和 0.98 cm;溶液培养大麦空白处理平均株高为 20.81 cm,施硅处理后株高分别增加了 1.78 cm 和 3.00 cm。土培施硅后比空白对照地上部干物重增加了 30.3% 和 34.0%;溶液培养施硅地上部干物重分别增加了 14.2% 与 22.5%。另外,观察到施硅后大麦植株茎秆较健壮,抗倒伏能力有所增强,土培施硅大麦的老叶叶尖黄化程度比不施硅的大麦轻。

2.2 施硅对大麦幼苗地上部和根中铝、硅含量分布的影响

表 2 看出,无论土培或溶液培养,空白处理大麦

表 1 施硅对大麦幼苗生物量的影响

Table 1 Effect of silicon applied on the biomass of barley seedlings

培养方式 Culture method	施硅水平 ¹⁾ Si level (g/kg)	平均株高 Height (cm)	地上部(18 株)		根系(18 株)	
			Shoots of 18 plants		Root of 18 plants	
			鲜重 Fresh wt. (g)	干重 Dry wt. (g)	鲜重 Fresh wt. (g)	干重 Dry wt. (g)
土培试验 Soil culture	0.0	21.43b	11.02	1.52b	2.24	0.52c
	0.1	22.78a	13.35	1.98a	2.86	0.96b
	0.2	22.31a	14.17	2.04a	4.02	0.89a
溶液培养 Solution culture	0.0	20.81c	11.68	1.20b	2.26	0.40c
	0.5	22.59b	11.81	1.37a	3.10	0.65b
	1.0	23.81a	12.29	1.47a	4.01	0.95a

1) 溶液培养的施硅水平为营养液中的硅铝比。The Si levels means Si/Al ratio in solution culture.

地上部的铝含量均比地下部根中的铝含量高。土培试验空白地上部的铝含量是根的 1.5 倍,溶液培养则高达 1.9 倍。而施硅的 2 个处理地上部分铝含量比根中的铝含量明显要低,土培试验 2 种施硅处理根部的铝含量分别高达地上部的 420% 和 495%,溶液培养则分别高达 492% 和 700%。土培和溶液培养试验根中的铝含量占植株吸收总铝量的百分比均由空白的 40% 剧增至 80% 以上。与根中的铝因施硅在根部积累的变化相反,地上部分的含铝量因施硅而下降,成几倍的低于空白处理。对施硅处理地上部和根中硅含量分析结果表明,土培和溶液培养的施硅处理的地上部硅含量均略高于地下部根中的含硅量,但二者之间的差异不像铝含量那样悬殊。这些结果说明了施硅能够有效地使大麦植株吸收的铝积累在根中,因而抑制了大麦根吸收的铝向地上部茎、叶的运输过程。

表 2 施硅处理大麦幼苗地上部和根中的铝含量

Table 2 Effect of silicon applied on Al contents in shoot and root of barley

土培 Soil culture			溶液培养 Solution culture		
硅水平 Si level (g/kg)	铝含量 (μg/g) Al content		硅铝比 Si/Al ratio	铝含量 (μg/g) Al content	
	地上部 Shoot	根 Root		地上部 Shoot	根 Root
0.00	625	418	0.0	68	36
0.10	205	63	0.5	25	123
0.20	213	1054	1.0	16	112

2.3 施硅对大麦幼苗地上部和根中磷含量分布的影响

磷素的变化趋势与铝大致相反。无论是土培还是溶液培养,空白处理地上部的磷含量远低于地下部根的含量(表 3),土培大麦地上部含磷量为

表 3 施硅处理大麦幼苗地上部和根的磷含量

Table 3 Effect of silicon applied on P contents in shoot and root of barley

土培 Soil culture			溶液培养 Solution culture		
硅水平 Si level (g/kg)	磷含量 (μg/g) P content		硅铝比 Si/Al ratio	磷含量 (μg/g) P content	
	地上部 Shoot	根 Root		地上部 Shoot	根 Root
0.00	0.094	0.200	0.0	0.248	0.451
0.10	0.213	0.162	0.5	0.452	0.301
0.20	0.211	0.145	1.0	0.483	0.286

0.094%,根含量为 0.200%。溶液培养大麦地上部的磷含量为 0.248%,根含量则为 0.541%。施硅后,地上部磷含量的增加量和地下部的下降量均非常明显。土培试验的 2 个施硅处理地上部磷含量分别是地下部(根)的 1.3 倍和 1.5 倍。溶液培养则分别是 1.5 和 1.7 倍。以上结果说明,施硅不仅能使植株吸收的铝有效地积累在根系内,还有利于根吸收的磷向地上部运移,从而可以减轻伴随铝毒现象出现的缺磷症状。

3 讨论

硅和铝是地壳和土壤中仅次于氧,位居第二、三位的富集元素,又是生物体中分布很普遍的元素。但对大多数植物来说它们并不是必需的,在植物矿质营养中被列入植物生长的有益元素行列。尽管如此,除茶树等少数植物对铝有较高的积累外,大部分植物如水稻、大麦、小麦、玉米、豆类作物等对铝是很敏感的,只有在低铝浓度下才对生长有某些刺激作用。在 pH<5.0~4.5 的酸性或强酸性土壤上,植物的铝毒害是一个最常见的生产实践问题。

目前对消、缓解植物根际土壤环境的铝毒害主要集中在施用磷肥和有机肥料,通过磷酸根和有机肥分解的中间产物有机酸对铝的络合作用来降低土壤溶液中铝的活性。而本试验表明,施用硅肥(硅酸盐)亦可显著缓解或消除铝毒,其可能的机理如下:

3.1 与硅的生理功能和营养作用有关。本试验的土壤和溶液培养表明,硅肥不仅能显著增加大麦对铝毒最敏感期(幼苗期)的地上部分生物量,而且具有明显抑制铝向地上部分运移的趋势,使铝积累在根部,施硅大麦的地上部分铝含量成倍下降。并且硅还可能具有调节大麦根对磷的吸收利用,促使磷从根部向地上部茎叶移动,从而减轻伴随铝毒现象而出现的植株地上部的缺磷症状。

3.2 土壤和营养液中铝与硅形成铝硅酸盐复合离子(HAS),降低了溶液中铝的毒性。根据本试验条件,通过计算在 pH 3.0~4.0 营养液中各种铝形态的比例为:Al³⁺ 16.4%~7.8%,Al-SO₄ 52.0%~25.0%,AlPO₄ 19.5%~39.5%,HAS 12.0%~57.8%。在土壤中施用硅/(磷+硫)为 4~8 之间,与溶养液中硅/(磷+硫)3~6 较接近,但单硅酸在土培溶液中的浓度更高;土壤 pH 比营养液高,并且土壤施硅肥后 pH 仍有部分的升高,0、1、2 处理土壤 pH 分别为 4.44、4.69、4.93。因而推测得土壤溶液中 HAS 结合的铝的比例也应更高。

3.3 在土壤—植物根际界面上,植物的硅铝生理吸收过程和土壤硅铝的化学过程常常发生在同一空间里,存在一系列复杂的物理、化学和生物化学反应。因此,施硅肥后对植物铝毒的缓解或消除作用可能由某一机理控制,更可能受几种机理的共同作用,以待进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] Courtesy of INEGI and CAN. Soil acidity and its amelioration in the tropics[A]. Transaction of the 15th ICSS[C], Vol. 5a: 905-928, Vol. 5b: 233-291. Acapulco, Mexico, July, 1994.
- [2] 中国林业学会. 我国酸雨对土壤、农作物和水域的影响 [A]. 酸雨与农业 [C]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [3] 田仁生, 等. 酸化土壤中铝及其植物毒性 [J]. 环境化学, 1990; 11 (6): 41-45.
- [4] 宣家详. 根际土壤溶液中铝离子的形态及其对大麦铝的毒性 [J]. 土壤学报, 1995, 32 (增刊): 27-35.
- [5] Cameron R S *et al.* Relative toxicities of inorganic aluminum complexes to barley [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 1231-1236.
- [6] Fageria N K *et al.* Aluminum toxicity in crop plants [J]. J. Plant Nutri., 1988, 11 (3): 303-309.
- [7] Wright R J. Soil aluminum toxicity and plant growth [J]. Commun. in Soil Sci. Plant Anal., 1989, 20 (15-16): 1479-1497.
- [8] 何念祖, 等. 植物生长的有益元素 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1993.
- [9] 张福锁. 植物营养、生态学和遗传学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [10] Alva A K. Effects of phosphorus/aluminum molar ratio and calcium concentration on plant response to aluminum toxicity [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 133-137.
- [11] Kerven G L. Sterile solution culture techniques for aluminum toxicity studies involving organic acids [J]. J. Plant Nutri., 1991, 14 (9)
- [12] McColl J C *et al.* Soluble organic acids and their chelating influence on Al and other metal dissolution from forest soils [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1986, 31: 917-927.
- [13] Shuman L M *et al.* Amelioration of aluminum toxicity to sorghum seedlings by chelating agents [J]. J. Plant Nutri., 1991, 4 (2): 119-128.
- [14] Tanaka A *et al.* Comparison of toxicity to plants among Al^{3+} , $Al-SO_4$ and $Al-F$ complex Ions [J]. Soil Sci. Plant Nutri., 1987, 33 (1): 43-55.
- [15] Li Y C *et al.* Response of cotton cultivars to aluminum in soil solution with varying silicon concentration [J]. J. Plant Nutri., 1989, 12 (7): 881.
- [16] Wada S I *et al.* Synthetic allophane and imogolite [J]. J. Soil Sci., 1979, 30: 347-355.
- [17] Farmer V C *et al.* Imogolite and protoimogolite allophane in spodic horizons: evidence for a mobile aluminium silicate complex in podzol formation [J]. J. Soil Sci., 1980, 31: 675-684.