

DOI: 10.5846/stxb201311142729

宾振钧, 张仁懿, 张文鹏, 徐当会. 氮磷硅添加对青藏高原高寒草甸垂穗披碱草叶片碳氮磷的影响. 生态学报, 2015, 35(14): 4699-4706.

Bin Z J, Zhang R Y, Zhang W P, Xu D H. Effects of nitrogen, phosphorus and silicon addition on leaf carbon, nitrogen, and phosphorus concentration of *Elymus nutans* of alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4699-4706.

氮磷硅添加对青藏高原高寒草甸垂穗披碱草叶片碳氮磷的影响

宾振钧, 张仁懿, 张文鹏, 徐当会*

兰州大学, 生命科学学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000

摘要:以甘南高寒草甸常见牧草垂穗披碱草(*Elymus nutans*)为研究对象,比较不同氮磷硅添加下,垂穗披碱草叶片对元素添加的反应。研究发现:氮添加显著提高土壤中硝态氮和铵态氮的含量;磷添加提高了土壤中全磷和速效磷的含量;高浓度的硅单独、硅与氮或磷混合可提高土壤中硝态氮的含量或全磷和速效磷的含量;氮和磷单独添加分别能提高垂穗披碱草叶片全氮和全磷含量,高浓度的硅单独、硅与氮或磷混合添加都能提高垂穗披碱草叶片全氮和全磷的含量。就硅元素而言,高浓度的硅添加,硅与氮或磷混合添加能提高土壤硝态氮、全磷和速效磷的含量,促进垂穗披碱草对土壤中氮磷的吸收,从而使植物叶片中氮磷的含量增加。

关键词:硅; 垂穗披碱草; 高寒草甸; 叶片氮磷含量; 青藏高原

Effects of nitrogen, phosphorus and silicon addition on leaf carbon, nitrogen, and phosphorus concentration of *Elymus nutans* of alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau, China

BIN Zhenjun, ZHANG Renyi, ZHANG Wenpeng, XU Danghui*

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: *Elymus nutans*, widely distributed in natural and cultivated pastures with favorable forage yield, good quality and adaptability to local environment, plays an important role in animal husbandry and environmental sustainability on Qinghai-Tibetan Plateau, China. Silicon (Si) is not considered as an essential element for higher plants and thus is believed to have no effect on primary metabolism in unstressed plants. But previous studies have shown that silicon can promote nutrient root absorption and enhance plant productivity in various plant species such as rice, alfalfa and celery. In greenhouse study, silicon nutrition improves root absorption of nitrogen and phosphorus; however, no attempt has been made to study the absorption of nitrogen and phosphorus in root and the content of nitrogen and phosphorus in leaf when silicon, nitrogen and phosphorus were added at different concentration in field. A study was conducted with *Elymus nutans* to address the physiological effect caused by the addition of these elements. Sixteen treatments consisted of: three rates of nitrogen addition: 7, 14, 21 g/m²; three rates of phosphorus addition: 4.92, 9.84, 14.76 g/m²; three rates of available silicon addition: 0.718, 1.436, 2.154 g/m²; three rates of nitrogen and one rate of silicon addition: nitrogen 7, 14, 21 g/m² and silicon 1.436 g/m²; three rates of phosphorus and one rate of silicon addition: phosphorus 4.92, 9.84, 14.76 g/m² and silicon 1.436 g/m²; and one control: neither nitrogen and phosphorus nor silicon addition. Each treatment was replicated six

基金项目:国家自然科学基金项目(30900171); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(Lzujbky-2013-95, lzujbky-2012-109)

收稿日期:2013-11-14; **网络出版日期:**2014-09-09

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

times. Results showed that in soil, nitrogen addition alone enhanced contents of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($P < 0.001$) and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($P < 0.001$). Silicon addition alone or addition with phosphorus did not affect $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content. Phosphorus addition alone enhanced total and available phosphorus contents. Low concentration silicon addition alone did not affect $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($P > 0.5$) content, or total and available phosphorus content ($P > 0.5$). High concentration silicon addition alone, silicon addition with nitrogen or phosphorus together increased $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content ($P < 0.001$), or total and available phosphorus content ($P < 0.001$). In leaf of *E. nutans*, nitrogen and phosphorus addition alone enhanced total nitrogen and phosphorus content. Low concentration silicon addition alone did not affect total nitrogen and phosphorus content. High and moderate concentration silicon addition alone, silicon addition with nitrogen or phosphorus together can increase leaf of total nitrogen and phosphorus content. There were significant linear positive relationships between total nitrogen content in leaf of *E. nutans* and soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($R^2 = 0.96$, $P < 0.001$) and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content ($R^2 = 0.91$, $P < 0.001$) and also between leaf total phosphorus and soil total phosphorus ($R^2 = 0.88$, $P < 0.001$) and soil available phosphorus content ($R^2 = 0.96$, $P < 0.001$). In the field experiment, silicon can promote the uptake of nitrogen and phosphorus by *E. nutans*. These results suggested that silicon application is useful to increase leaf nitrogen and phosphorus content of *E. nutans* through the enhancement of $\text{NO}_3^-\text{-N}$, total and available phosphorus content in soil. We identify Si nutrition as an important target in attempts to improve the uptake of nitrogen and phosphorus by *E. nutans*.

Key Words: silicon; *Elymus nutans*; alpine meadow; leaf nitrogen (N) and phosphorus (P) content; Qinghai-Tibetan Plateau

硅是地壳中的第二大元素^[1]。研究表明,硅对高等植物矿质营养的吸收有重要影响,施硅能提高杂交粳稻全株氮含量^[2]、提高水稻对氮的利用效率^[3]、增强植物的光合效率^[4]、能促进铁离子在黄瓜根质外体中的移动,减轻植物的缺铁症^[5]、促进土壤中磷的活化,增加植物对磷的利用率^[6]等。

青藏高原高寒草甸是一类重要的草地资源,在畜牧业生产中占有重要地位。为了提高牧草产量,当地牧民每年都要施入大量的氮磷肥^[7],但过多的氮磷肥输入将会改变土壤的营养状况,降低生物多样性,改变群落结构^[8],同时也会引起土壤非点源污染。这些问题迫使人们寻找其他元素能够部分替代氮和磷。硅和磷结构相似^[9],不仅能够促进土壤中磷^[10]和氮的活化,而且能避免氮磷过量使用引起的土壤污染问题。

垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb)为禾本科披碱草属多年生疏丛型禾草,高寒草甸中的优势种之一,是重要的优良牧草,抗寒、抗旱能力强,具有较强的可塑性^[11],同时对氮磷等营养元素添加比较敏感^[12]。因此,本文通过在天然高寒草甸添加氮磷硅,确定硅对植物营养元素吸收的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区自然概况

研究样地位于青藏高原东缘甘南藏族自治州玛曲县境内兰州大学高寒草甸与湿地生态系统定位研究站(阿孜分站)。地理坐标为 $33^\circ 39' \text{ N}$, $101^\circ 53' \text{ E}$,海拔 3 650 m,年平均气温为 2.2° C ,年降水量为 672 mm^[13],属于高寒半湿润半干旱气候,降雨集中在短暂的夏季 7—8 月份。年日照时数约 2580 h,年平均霜期大于 270 d。植被属于高寒草甸类。植被类型为莎草类+禾草类+双子叶杂草类群系,优势种主要有莎草科的嵩草(*Kobresia myosuroides*)和矮藨草(*Scirpus pumilus*);禾本科的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、胡氏剪股颖(*Agrostis hugoniana*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*);双子叶杂草类有菊科、毛茛科、玄参科、蔷薇科、豆科等,共有 80 多种植物^[14]。土壤类型为亚高山草甸土,氮磷硅添加前试验地土壤养分状况见表 1。

1.2 试验方法

试验采用完全随机区组设计,实验地四周应用围栏保护以防止牛羊的踩踏和取食,以减少扰动对实验结果可靠性的影响。2012 年 5 月初,实验地内选取 96 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的样方,各样方间隔 2 m,分别编号 1—96,每

个样方四角用 PVC 管标记,并进行氮磷硅添加实验。根据以往在该地的长期施肥试验资料^[14-15]和硅的试验研究^[16],本试验氮磷硅的添加水平和添加量见表 2。氮磷硅均为小颗粒状,溶于水之后喷洒使之均匀溶于样方的土壤中,对照只洒水,每个处理 6 个重复。

表 1 氮磷硅添加前土壤的养分状况

Table 1 Soil nutrient status before N, P, and Si addition

土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter/(g/kg)	全氮 Total nitrogen/(g/kg)	全磷 Total phosphorus/(g/kg)	pH
0—15	70.5	3.72	0.984	6.33
15—30	36.3	1.95	0.712	6.44
30—45	24.0	1.23	0.618	6.63

表 2 氮磷硅添加水平和添加量

Table 2 Addition level and amount of N, P, and Si

处理 Treatments	氮磷硅添加水平/(g/m ²) N, P, and Si addition level			氮磷硅添加量/(g/m ²) N, P, and Si addition amount		
	硝酸铵 Ammonium nitrate	过磷酸钙 Calcium superphosphate	硅酸 Silicic acid	N Nitrogen	P Phosphorus	Si Silicon
CK	0	0	0	0	0	0
N1	20	0	0	7	0	0
N2	40	0	0	14	0	0
N3	60	0	0	21	0	0
P1	0	40	0	0	4.92	0
P2	0	80	0	0	9.84	0
P3	0	120	0	0	14.76	0
Si1	0	0	2	0	0	0.718
Si2	0	0	4	0	0	1.436
Si3	0	0	6	0	0	2.154
N1Si2	20	0	4	7	0	1.436
N2Si2	40	0	4	14	0	1.436
N3Si2	60	0	4	21	0	1.436
P1Si2	0	40	4	0	4.92	1.436
P2Si2	0	80	4	0	9.84	1.436
P3Si2	0	120	4	0	14.76	1.436

1.3 测定指标和方法

8 月初,每个样方内用 5 cm 孔径的土钻钻取 3 个不同位置 0—15 cm 的土壤,装入布袋带回实验室进行风干(无机氮和速效磷用湿土测量),过 0.149 mm 筛孔,标记好装袋。采集每个样方内垂穗披碱草的叶片装袋,70 ℃烘干至恒重。土壤有机质和叶片碳含量采用 K₂Cr₂O₇容量法-外加热法,全氮采用浓 H₂SO₄消煮-半自动凯氏定氮仪法,铵态氮采用 KCl 浸提-蒸馏法,硝态氮采用饱和 CaSO₄浸提-酚二磺酸比色法,全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法,速效磷采用 NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 整理和计算数据。对不同氮磷硅添加下土壤有机质、全氮、铵态氮和硝态氮、全磷和速效磷、植物有机碳、全氮、全磷含量进行单因素方差分析(One-way ANOVA),*P* 值设定为 0.05。用 LSD 多重比较进行显著性检验,并用一元线性回归分析植物全氮与土壤铵态氮和硝态氮、植物全磷与土壤全磷和速效磷之间的关系。以上所有分析在 SPSS17.0 软件中进行,采用 Origin 10.0 作图。

2 结果和分析

2.1 氮磷硅添加对土壤有机质、N、P 含量的影响

表 3 显示,氮磷硅添加对土壤有机质和全氮无显著影响;N 和 NSi 添加显著增加了土壤铵态氮的含量,而且 NSi 添加土壤铵态氮的含量显著高于相同浓度下 N 的单独添加 ($P<0.001$);P 添加、Si 添加和 PSi 添加对土壤铵态氮的含量没有显著的影响。N 和 NSi 添加显著增加了土壤硝态氮的含量,而且 NSi 添加土壤硝态氮的含量显著高于相同浓度下 N 的单独添加 ($P<0.0012$);低浓度的 Si 添加未影响土壤硝态氮的含量,中高浓度的 Si 添加显著增加了土壤硝态氮的含量,分别增加了 4.54% 和 6.8%;P 添加对土壤硝态氮含量的影响不显著;PSi 添加增加了土壤硝态氮的含量,PSi 三种浓度添加和中浓度硅添加之间土壤硝态氮含量变化不显著。

N 和 NSi 添加对土壤全磷含量影响不显著(表 3);P 和 PSi 添加显著增加了土壤全磷含量,PSi 添加所增加的土壤全磷量高于相同浓度下 P 和 Si 的单独添加;中低浓度的 Si 添加对土壤全磷含量无显著影响。N 单独添加对土壤速效磷含量无显著的影响,低浓度的 Si 单独添加也对土壤速效磷含量无显著的影响,中高浓度的 Si 单独添加显著增加了土壤速效磷的含量,P 单独添加和 PSi 同时添加显著增加了土壤速效磷的含量,土壤速效磷的含量随着添加 P 浓度的升高而升高;N 和 Si 同时添加显著增加了土壤速效磷的含量,而 NSi 的 3 种浓度和 Si2 处理之间土壤速效磷的含量差异不显著。

表 3 氮磷硅添加后土壤有机质、全氮、无机氮(铵态氮和硝态氮)、土壤全磷和速效磷含量的变化 (Mean±SE, $n=6$)

Table 3 Changes in the content of soil organic matter, total nitrogen, inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$), total phosphorus and available phosphorus with N, P, and Si addition

不同处理 Different treatment	土壤有机质/(g/kg) Soil organic matter	土壤氮 Soil nitrogen			土壤磷 Soil phosphorus	
		全氮/(g/kg) Soil total nitrogen	铵态氮/(mg/kg) $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮/(mg/kg) $\text{NO}_3^-\text{-N}$	全磷/(g/kg) Soil total phosphorus	速效磷/(mg/kg) Soil available phosphorus
CK	69.45 ± 1.3903a	3.712 ± 0.372a	8.635 ± 0.383a	13.23 ± 0.126a	0.934 ± 0.025a	19.20 ± 1.208a
N1	70.77 ± 1.5891a	3.677 ± 0.162a	15.60 ± 0.160b	21.62 ± 0.132d	0.918 ± 0.033a	18.30 ± 1.230a
N2	71.08 ± 1.9181a	3.724 ± 0.230a	21.81 ± 0.296d	29.90 ± 0.295f	0.871 ± 0.019a	20.16 ± 1.233a
N3	73.52 ± 1.3780a	3.713 ± 0.241a	29.75 ± 0.457f	45.90 ± 0.104h	0.912 ± 0.024a	20.46 ± 1.176a
P1	72.54 ± 1.6120a	3.681 ± 0.265a	8.677 ± 0.543a	13.02 ± 0.772a	1.104 ± 0.017c	50.99 ± 1.232d
P2	71.68 ± 2.0264a	3.702 ± 0.262a	8.635 ± 0.590a	12.83 ± 0.893a	1.217 ± 0.003d	99.50 ± 1.264f
P3	72.12 ± 2.0321a	3.697 ± 0.323a	8.526 ± 0.389a	12.20 ± 1.089a	1.375 ± 0.014e	124.2 ± 1.240h
Si1	68.94 ± 2.8473a	3.701 ± 0.049a	8.548 ± 0.672a	13.53 ± 0.740ab	0.999 ± 0.019ab	20.33 ± 1.233a
Si2	70.48 ± 3.1174a	3.717 ± 0.046a	8.640 ± 0.741a	13.87 ± 1.092bc	1.002 ± 0.015ab	23.23 ± 1.203b
Si3	71.83 ± 2.7690a	3.684 ± 0.216a	8.708 ± 0.700a	15.14 ± 1.322c	1.120 ± 0.013b	25.17 ± 1.203c
N1Si2	70.99 ± 2.2446a	3.704 ± 0.333a	17.27 ± 0.569c	26.30 ± 1.108e	0.969 ± 0.062ab	22.30 ± 1.375b
N2Si2	71.68 ± 2.0481a	3.691 ± 0.114a	25.54 ± 0.734e	38.70 ± 1.298g	0.981 ± 0.055ab	23.57 ± 1.270b
N3Si2	69.00 ± 3.6453a	3.726 ± 0.212a	35.09 ± 0.621g	56.89 ± 1.345i	0.992 ± 0.021ab	22.07 ± 1.233b
P1Si2	70.67 ± 3.1916a	3.679 ± 0.250a	8.583 ± 0.876a	13.92 ± 1.191bc	1.237 ± 0.069d	58.03 ± 4.352e
P2Si2	73.84 ± 2.8529a	3.718 ± 0.144a	8.651 ± 0.905a	14.11 ± 1.187bc	1.331 ± 0.065e	117.8 ± 7.240g
P3Si2	71.63 ± 2.6781a	3.693 ± 0.149a	8.719 ± 0.431a	13.76 ± 1.208bc	1.447 ± 0.007f	156.0 ± 6.291i

同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

2.2 氮磷硅添加对植物叶片 C、N、P 含量的影响

无论是单元素的 N、P 和 Si 添加还是双元素 NSi 和 PSi 的添加,植物叶片 C 含量无显著的差异(图 1)。N 添加显著增加了垂穗披碱草叶片全 N 的含量 ($P<0.003$),而且随着添加氮素浓度的升高而升高,叶片全 N 含量由 N1 处理的 21.24 g/kg 增加到 N3 的 30.99 g/kg;低浓度 Si (Si1 处理)添加对植物叶片全 N 含量无显著的影响,而中、高浓度 Si (Si2 和 Si3 处理)添加显著增加了植物叶片中全 N 含量 ($P<0.008$),分别增加了 5.95% 和 10.99%;NSi 添加显著增加了垂穗披碱草叶片全 N 的含量,其增加量显著高于单独的 N 添加和单独 Si 添加

之和;PSi 添加也显著增加了垂穗披碱草叶片全 N 的含量($P<0.009$)(图 1)。

P 添加显著增加了垂穗披碱草叶片全 P 含量($P<0.002$),而且随着添加磷素浓度的升高而升高,与对照相比, P1、P2 和 P3 处理垂穗披碱草叶片全 P 含量分别增加了 51.17%、111.96%和 202.01%;低浓度 Si(Si1 处理)对植物叶片全 P 含量无显著的影响,而中、高浓度 Si(Si2 和 Si3 处理)添加显著增加了植物叶片中全 P 含量($P<0.006$),分别增加了 8.40%和 15.79%;NSi 添加显著增加了垂穗披碱草叶片全 P 含量;PSi 添加增加了叶片全 P 含量,与对照相比, P1Si2、P2Si2 和 P3Si2 处理垂穗披碱草叶片全 P 含量分别增加了 71.40%、130.70%和 234.72%;增加量显著高于单独的 P 添加和单独 Si 添加之和(图 1)。

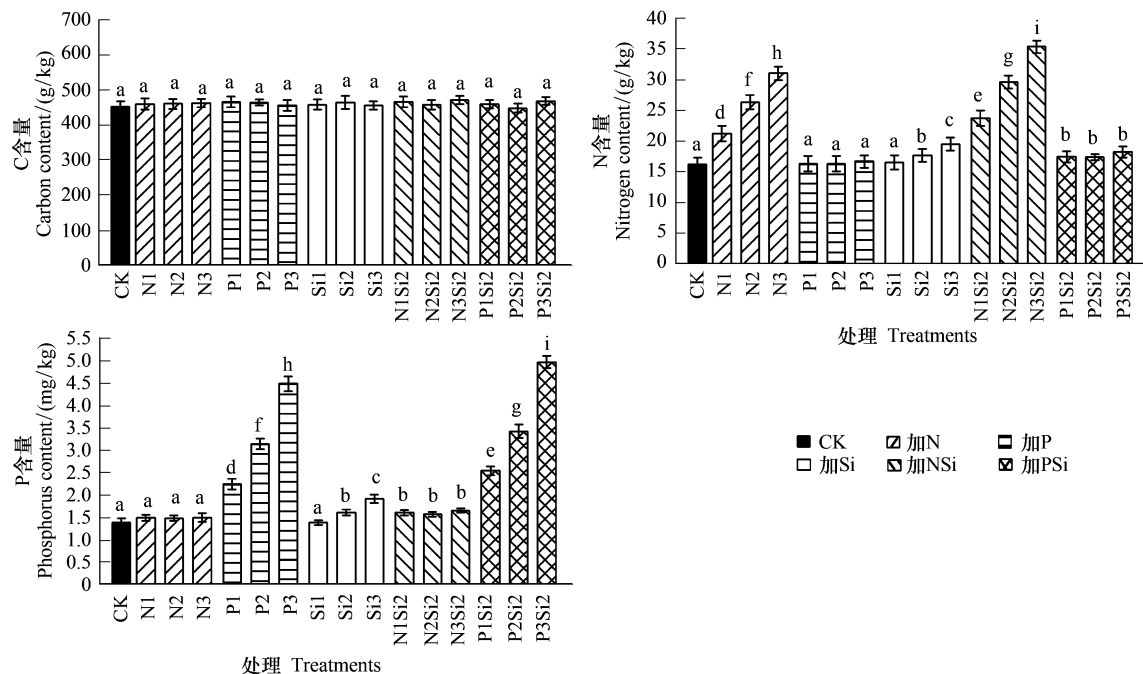


图 1 氮磷硅添加对垂穗披碱草叶片 C、N、P 含量的影响

Fig.1 Effects of nitrogen, phosphorus and silicon addition on C, N and P in leaf of *Elymus nutans*

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 氮磷硅添加后土壤 N、P 和植物叶片 N、P 含量之间的关系

氮磷硅添加后不同程度的增加了土壤的硝态氮和铵态氮以及植物叶片的全氮,植物叶片中全氮含量随着土壤中铵态氮($R^2=0.96$)(图 2)和硝态氮($R^2=0.91$)(图 3)的含量增加而增加($P<0.001$)。氮磷硅添加下植物叶片全磷随着土壤全磷($R^2=0.88$)(图 4)和速效磷($R^2=0.96$)(图 5)的含量的增加而增加。

3 讨论

氮添显著提高土壤中硝态氮和铵态氮的含量,而且硝态氮的含量显著高于铵态氮的含量(表 3)。这可能是由于施氮刺激了土壤微生物的活性^[17],加快了土壤有机氮的分解使其含量降低;同时,施氮后植物的快速生长消耗了土壤中大量的无机氮。另外,氮的添加使土壤中铵态氮能够迅速转化成硝态氮;同时,硝态氮在植物同化吸收和微生物固持时需要消耗能量还原成铵态氮,植物及微生物更偏向于吸收铵态氮^[17]。本研究中添加氮磷对土壤氮磷含量的影响与魏金明等人^[18]的研究结果一致。硅与氮混合添加可以增加了土壤中铵态氮的含量,硅单独、硅与氮或磷混合添加增加了土壤中硝态氮、全磷和速效磷的含量。有关硅添加对土壤营养元素影响的研究目前报道很少,深入的探索硅肥添加和土壤营养元素之间的关系,还需要大量的研究工作。

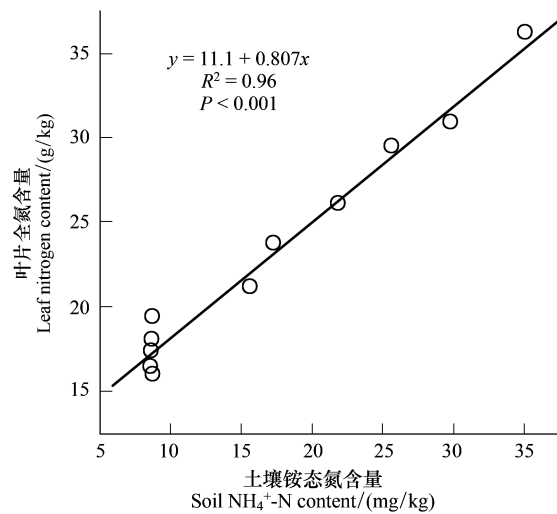


图2 植物叶片全氮含量与土壤铵态氮含量的关系

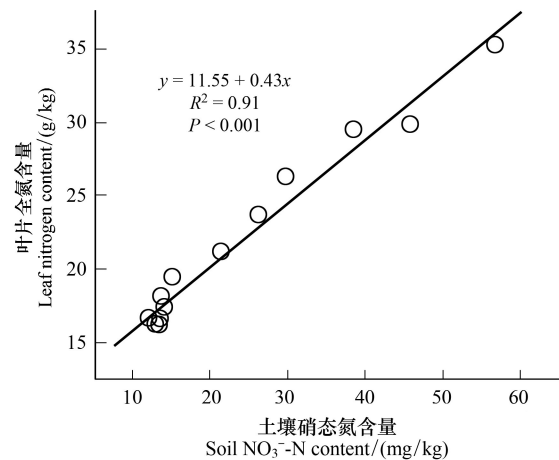
Fig.2 Relationships between leaf total nitrogen content and soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content

图3 植物叶片全氮含量与土壤硝态氮含量的关系

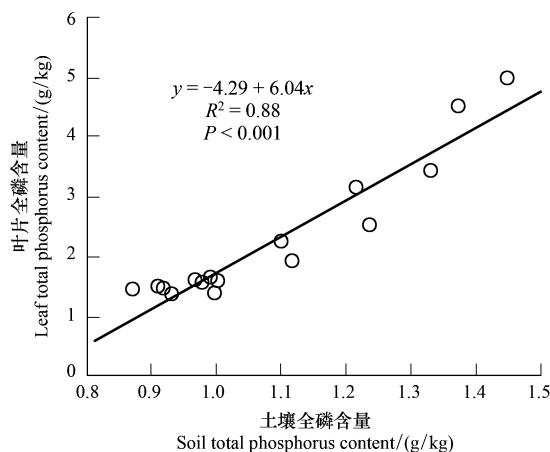
Fig.3 Relationships between leaf total nitrogen content and soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content

图4 植物叶片全磷与土壤全磷含量的关系

Fig.4 Relationships between leaf total phosphorus and soil total phosphorus content

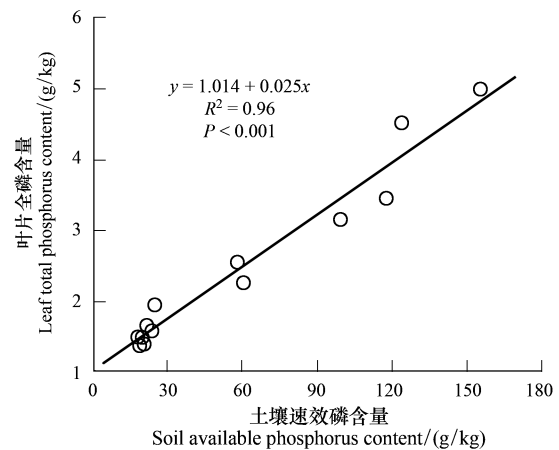


图5 植物叶片全磷含量与土壤速效磷含量的关系

Fig.5 Relationships between leaf total phosphorus and soil available phosphorus content

垂穗披碱草是高寒草甸重要的优良牧草。因其抗寒性强、适口性好、营养丰富,作为青藏高原草地天然植被修复、人工草地建植的优选草种。但垂穗披碱草人工草地建植后 2—3a 长势最好,之后随着种植年限的延长种群呈现逐步退化^[11],施肥可以延缓天然草地退化和提高人工草地的使用寿命^[12]。顾梦鹤等^[19]研究表明,施肥(氮 10.8 g/m^2 ,磷 27.6 g/m^2)使垂穗披碱草的生物量和竞争能力明显增加;王晓芳等^[12]研究表明,施肥(氮 9.0 g/m^2 ,磷 23.0 g/m^2)对垂穗披碱草的影响在不同生长时期也不同,分蘖期,施肥导致单株垂穗披碱草地上生物量减小、拔节期增加、收获期无显著影响。乔安海等^[20]研究表明氮肥能提高垂穗披碱草种子的产量和质量。研究表明氮添加显著提高了垂穗披碱草叶片中全氮的含量,磷添加显著提高了叶片中全磷的含量。

硅对高等植物矿质营养的吸收有重要影响,施硅后植株体内氮、磷含量和积累量均有不同程度的提高。陈进红等研究认为硅使杂交粳稻全株氮含量增加了 3.73% ^[2]。Detmann 等研究表明,施硅能提高水稻对氮的利用效率^[3]。刘慧霞等研究表明施硅能促进紫花苜蓿株高生长和分枝数的增加,从而促进地上生物量的积

累,最终增加紫花苜蓿的生物量^[16]。本研究发现硅单独添加、硅与氮或磷混合添加都能提高垂穗披碱草叶片全氮和全磷的含量(图2),中、高浓度 Si 添加使垂穗披碱草叶片中全 N 含量分别增加了 5.95% 和 10.99%,全 P 分别增加了 8.40% 和 15.79%。所以硅能促进植物对氮磷元素的吸收和利用。目前虽然不能证实硅是高寒草甸垂穗披碱草生长的必要营养元素,但至少证实硅是生长发育的有益元素,因此在高寒草甸人工和天然草地,适当的施入硅肥,可促进垂穗披碱草的生长发育。关于硅能否提高高寒草甸垂穗披碱草的生物量,是以后需要研究的内容。

土壤中硝态氮含量、铵态氮含量和垂穗披碱草叶片中全氮的含量随施氮量的增加而增加,说明植物叶片全氮含量和土壤硝态氮和铵态氮含量都直接关系,叶片氮含量与土壤硝态氮和铵态氮含量的相关系数超过 0.85。土壤中全氮含量(3.72 g/kg)高于我国土壤全氮含量(3.51 g/kg)而植物叶片中全氮含量(16.65 g/kg)低于我国草地植物全氮含量(28.6 g/kg),说明高寒草甸垂穗披碱草氮的吸收和利用效率很低,这可能与该地区温度低有关,也可能与植物所在的生活型和功能群有关^[21]。高寒草甸土壤和垂穗披碱草叶片全磷含量显著低于中国其它草地和世界平均水平,由此推测该区土壤全 P 含量低可能导致了植物叶片 P 含量低^[22]。垂穗披碱草叶片磷含量与土壤全磷和速效磷含量呈显著的正相关,相关系数超过了 0.91。这说明该区垂穗披碱草叶片中的 P 基本靠根系从土壤中吸收,另外也说明在该地区,P 也是植物生长的主要限制因子之一。

垂穗披碱草作为青藏高原天然和人工草地主要的物种,对氮磷添加特别敏感。氮磷添加不但能提高草地的产草量和使用寿命、延缓草地退化,而且还能提高其种子的产量和品质,因此当地牧民每年要使用大量的氮磷肥。而肥料的大量使用不但造成很多非点源污染,而且改变了植物的群落结构,造成生物多样性的降低。硅肥添加能提高土壤氮磷元素含量,促进植物对这些营养元素的吸收。因此,在使用氮磷肥的同时,适当加入些硅肥,不但能提高草地的产草量,而且也能降低土壤的非点源污染。

致谢: 试验过程中得到兰州大学高寒草甸与湿地生态系统定位研究站杜国祯教授以及李宏林、刘旭东、周小龙、张鹏飞、郭治和王静等同学的帮助,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Morikawa C K, Saigusa M. Mineral composition and accumulation of silicon in tissues of blueberry (*Vaccinium corymbosum* cv. Bluecrop) cuttings. *Plant and Soil*, 2004, 258(1): 1-8.
- [2] 陈进红, 毛国娟, 张国平, 郭恒德. 硅对杂交梗稻干物质与养分积累及产量的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2002, 28(1): 22-26.
- [3] Detmann K C, Araújo W L, Martins S C V, Sanglard L M V P, Reis J V, Detmann E, Rodrigues F A, Nunes-Nesi A, Fernie A R, DaMatta F M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytologist*, 2012, 196(3): 752-762.
- [4] Hossain M T, Mori R, Soga K, Wakabayashi K, Kamisaka S, Fujii S, Yamamoto R, Hoson T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *Journal of Plant Research*, 2002, 115(1): 23-27.
- [5] Pavlovic J, Samardzic J, Maksimović V, Timotijevic G, Stevic N, Laursen K H, Hansen T H, Husted S, Schjoerring J K, Liang Y C, Nikolic M. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytologist*, 2013, 198(4): 1096-1107.
- [6] 薛高峰, 孙焱鑫, 陈延华, 张贵龙, 廖上强. 叶面施硅对西芹养分吸收、产量及品质的影响. *核农学报*, 2012, 26(1): 176-181.
- [7] 纪亚君. 青海高寒草甸施氮肥增产效应浅析. *草业科学*, 2006, 23(3): 26-29.
- [8] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [9] Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1994, 91: 11-17.
- [10] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8): 392-397.
- [11] 杜国祯, 王刚. 甘南亚高山草甸人工草地的演替和质量变化. *植物学报*, 1995, 37(4): 306-313.

- [12] 王晓芬, 杜国祯, 马银山, 张作亮, 张世挺. 光照, 施肥及刈割对垂穗披碱草生长的影响. 生态学报, 2008, 28(12): 6212-6128.
- [13] Chu C J, Maestre F T, Xiao S, Weiner J, Wang Y S, Duan Z H, Wang G. Balance between facilitation and resource competition determines biomass-density relationships in plant populations. Ecology Letters, 2008, 11: 1189-1197.
- [14] Niu K C, Luo Y J, Choler P, Du G Z. The role of biomass allocation strategy in diversity loss due to fertilization. Basic and Applied Ecology, 2008, 9(5): 485-493.
- [15] Ren Z W, Li Q, Chu C J, Zhao L Q, Zhang J Q, Ai D X C, Yang Y B, Wang G. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community. Journal of Plant Ecology, 2010, 3(1): 25-31.
- [16] 刘慧霞, 郭正刚, 郭兴华, 周雪荣, 惠文森, 王康英. 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. 生态学报, 2009, 29(6): 3075-3080.
- [17] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? Geoderma, 2005, 124(1-2): 143-155.
- [18] 魏金明, 姜勇, 符明明, 张玉革, 徐柱文. 水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳、氮、磷及 pH 的影响. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1642-1646.
- [19] 顾梦鹤, 杜小光, 文淑均, 马涛, 陈敏, 任青吉, 杜国祯. 施肥和刈割对垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、中华羊茅 (*Festuca sinensis*) 和羊茅 (*Festuca ovina*) 种间竞争力的影响. 生态学报, 2008, 28(6): 2472-2479.
- [20] 乔安海, 韩建国, 巩爱岐, 李伟, 王贇文, 秦歌菊, 郭树栋, 吴精明, 赵殿智. 氮肥对垂穗披碱草种子产量和质量的影响. 草地学报, 2006, 14(1): 48-56.
- [21] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响. 生态学报, 2006, 26(3): 815-822.
- [22] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.