

# 氮硅添加对高寒草甸垂穗披碱草叶片全氮含量及净光合速率的影响

司晓林 王文银 高小刚 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** 该文以青藏高原高寒草甸优势种垂穗披碱草(*Elymus nutans*)为研究对象, 探究不同水平氮肥与硅肥混合添加后对其叶片全氮含量和净光合速率的影响, 以期对高寒草甸牧场施肥提供一定的理论依据。研究发现: 氮、硅单独添加时, 均可提高垂穗披碱草叶片全氮含量以及净光合速率; 氮、硅配施处理对叶片全氮含量和净光合速率均存在显著的交互作用; 低( $N_1$ )、中( $N_2$ )、高( $N_3$ ) 3种不同浓度的氮肥处理下, 低硅( $Si_1$ )添加对垂穗披碱草叶片全氮含量以及净光合速率没有显著的促进作用, 而添加中浓度硅肥( $Si_2$ )可显著提高垂穗披碱草叶片全氮含量; 低、中浓度施氮水平下, 中浓度硅肥可显著促进垂穗披碱草光合作用; 叶片全氮含量和净光合速率最大平均值均出现在中浓度氮、硅肥配施下, 与不施肥相比分别提高了119.99%和85.70%; 就该试验而言, 施加氮肥的同时, 适当添加一些硅肥能够更好地提高垂穗披碱草叶片全氮含量和净光合速率, 且硅的添加量为 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时效果较好。

**关键词** 垂穗披碱草; 氮硅配施; 交互作用; 叶片全氮含量; 净光合速率

**引用格式:** 司晓林, 王文银, 高小刚, 徐当会 (2016). 氮硅添加对高寒草甸垂穗披碱草叶片全氮含量及净光合速率的影响. 植物生态学报, 40, 1238–1244. doi: 10.17521/cjpe.2015.0398

## Effects of nitrogen and silicon application on leaf nitrogen content and net photosynthetic rate of *Elymus nutans* in alpine meadow

SI Xiao-Lin, WANG Wen-Yin, GAO Xiao-Gang, and XU Dang-Hui\*

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

### Abstract

**Aims** *Elymus nutans* is one of the dominant plant species in alpine meadow. Purpose of this research was to study the effects of nitrogen and silicon application on leaf nitrogen content and net photosynthetic rate in this species to provide scientific basis for fertilization practice in alpine meadow.

**Method** Four levels nitrogen combined with four levels silicon was applied to *E. nutans* plants in the alpine meadow. Leaf nitrogen content and net photosynthetic rate of *E. nutans* were measured.

**Important findings** The results showed that there was a significant improvement in leaf nitrogen content and net photosynthetic rate of the *E. nutans* with nitrogen or silicon application alone; However, there was a significant interaction between nitrogen and silicon treatments on leaf nitrogen content and net photosynthetic rate; Combining with the three different levels nitrogen, low level silicon ( $Si_1$ ) application did not increase leaf nitrogen content and net photosynthetic rate, but middle level silicon ( $Si_2$ ) could significantly increase the leaf nitrogen content; Combining with the low ( $N_1$ ) or middle ( $N_2$ ) level nitrogen, middle level silicon ( $Si_2$ ) application could significantly increase the net photosynthetic rate; Compared with that control without fertilization, the middle level nitrogen combined with the same level silicon treatment had the highest average of leaf nitrogen content and net photosynthetic rate, which increased by 119.99% and 85.70%, respectively. This study indicated application of nitrogen combined with silicon application enhanced leaf nitrogen content and net photosynthetic rate of *E. nutans*, and  $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  silicon application had the best result among other treatments.

**Key words** *Elymus nutans*; nitrogen and silicon application; interaction; leaf nitrogen content; net photosynthetic rate

**Citation:** Si XL, Wang WY, Gao XG, Xu DH (2016). Effects of nitrogen and silicon application on leaf nitrogen content and net

收稿日期Received: 2015-11-04 接受日期Accepted: 2016-09-21

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: dhxu@lzu.edu.cn)

photosynthetic rate of *Elymus nutans* in alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1238–1244. doi: 10.17521/cjpe.2015.0398

氮是植物需求量最大的一种矿质营养元素,是影响植物正常生长发育的重要营养因子,是植物体内叶绿素、蛋白质、核酸和部分激素的重要组成部分(Gendy *et al.*, 2015)。植物叶片大约75%的氮素存在于叶绿体中(Cechin & Terezinha, 2004),氮含量与叶绿素含量相关,从而间接影响植株的光合作用(Bojović & Stojanović, 2005),进而影响其干物质的积累,最终导致单株植物体干质量的变化。

硅是大多数高等植物中重要的矿质营养元素之一(Hossain *et al.*, 2002),研究表明,硅影响植株的分蘖数目、叶绿素含量以及根系生长状况(Tamai & Ma, 2008),显著提高姜(*Zingiber officinale*)的生物量(张国芹等, 2008),可保护干旱胁迫下玉米(*Zea mays*)叶绿素的正常代谢(李清芳等, 2007),促进水稻(*Oryza sativa*)(Chen *et al.*, 2001)、高粱(*Sorghum bicolor*)(Hattor *et al.*, 2005)的光合作用。

垂穗披碱草(*Elymus nutans*)是多年生疏丛型禾草,是青藏高原高寒草甸优势种之一,也是重要的优良牧草,并且对氮肥添加特别敏感(王晓芬等, 2008),但过多的施用氮肥会造成空气及地下水的污染(Choudhury & Kennedy, 2014)。硅肥能够促进土壤中氮的活化,同时避免氮肥使用过多造成的环境污染问题。对垂穗披碱草的研究以前多集中于施氮肥、刈割、浇水对其生长及种间竞争力的影响(顾梦鹤等, 2008)。对单独添加硅肥和氮硅配施对垂穗披碱草叶片全氮含量及光合速率的研究较少。本文通过在天然高寒草甸添加氮肥、硅肥,探究其对垂穗披碱草叶片全氮含量、净光合速率的影响以及是否存在交互作用,进而为高寒草甸施氮肥、硅肥提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 样地概况

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33.65° N, 101.88° E,海拔3 650 m,年平均气温2.2 °C,年降水量672 mm,降水集中在7–8月,属于高寒半湿润半干旱气候。年日照时间约2 580 h,平均年有霜期大于270天。植被

类型属于高寒草甸类,优势物种为禾本科的垂穗披碱草、草地早熟禾(*Poa pratensis*),莎草科的嵩草(*Kobresia myosuroides*),豆科的披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)和毛茛科的草玉梅(*Anemone rivularis*)。

### 1.2 试验设计

试验样地四周用围栏加以保护,防止牛羊踩踏与取食,以减少扰动对试验结果可靠性的影响。试验地内选取96个2 m × 2 m的样方,各样方间隔1 m,样方四角用白色PVC管进行标记。根据以往试验资料(宾振钧等, 2014),本次试验施肥梯度组合如表1,每个梯度6个重复,96个样方完全随机排列。氮肥选用NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>,硅肥选用H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>,5月中旬施肥,将氮肥、硅肥溶于水后均匀喷洒于样地,对照只喷洒等量的水。8月上旬对相应指标进行测定。

表1 氮、硅施肥组合

Table 1 The combination of nitrogen and silicon application

硅肥 H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g·m <sup>-2</sup> )	氮肥 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (g·m <sup>-2</sup> )			
	0 (N <sub>0</sub> )	30 (N <sub>1</sub> )	60 (N <sub>2</sub> )	90 (N <sub>3</sub> )
0 (Si <sub>0</sub> )	N <sub>0</sub> Si <sub>0</sub>	N <sub>1</sub> Si <sub>0</sub>	N <sub>2</sub> Si <sub>0</sub>	N <sub>3</sub> Si <sub>0</sub>
4 (Si <sub>1</sub> )	N <sub>0</sub> Si <sub>1</sub>	N <sub>1</sub> Si <sub>1</sub>	N <sub>2</sub> Si <sub>1</sub>	N <sub>3</sub> Si <sub>1</sub>
8 (Si <sub>2</sub> )	N <sub>0</sub> Si <sub>2</sub>	N <sub>1</sub> Si <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>	N <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>
12 (Si <sub>3</sub> )	N <sub>0</sub> Si <sub>3</sub>	N <sub>1</sub> Si <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> Si <sub>3</sub>	N <sub>3</sub> Si <sub>3</sub>

### 1.3 指标测定

采集每个样方内垂穗披碱草的叶片,装袋,70 °C烘干至恒质量并研磨过筛。全氮测定采用HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消煮法,用SmartChen 200化学分析仪(AMS, Rome, ITA)进行全氮分析。使用LI-6400便携式光合作用测定仪(LI-COR, Lincoln, USA)在11:00左右对垂穗披碱草旗叶进行净光合速率的测定,每个处理选取6个叶片。测量过程中使用人工红蓝光源,光合有效辐射(PAR)为1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub>流速设定为500 μmol·s<sup>-1</sup>。测量时,叶片对人工光源有一定的响应时间,需等至光合作用稳定后进行记录。

### 1.4 统计分析

采用Microsoft Excel 2010对数据进行整理和计算,用SPSS 17对数据进行统计分析,对氮、硅单独添加下的叶片净光合速率、全氮进行单因素方差分析,对氮硅配施处理下的叶片净光合速率、全氮进

行双因素方差分析,用LSD多重比较进行显著性检验, $p$ 值均设定为0.05,采用Origin 10.0作图。

2 结果和分析

2.1 氮硅添加对垂穗披碱草叶片全氮含量的影响

图1显示,单独添加氮肥时,随着氮肥施用量逐渐增加,叶片氮含量呈现先增加后减少的趋势,并且在 $N_2$ 处理下达到最大值( $27.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ),与不施氮肥相比,叶片氮含量提高了91.31%;单独添加硅肥时, $Si_2$ 与 $Si_3$ 处理下叶片全氮含量与不施用硅肥相比存在显著性差异,分别提高了4.65%和2.86%。

氮、硅配施对垂穗披碱草叶片全氮含量的影响存在交互作用( $p < 0.05$ ) (表2)。图2所示,当氮肥施用量为 $N_1$ 时,添加4种不同浓度的硅肥, $Si_2$ 处理下叶片全氮含量平均值为 $24.56\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,显著高于其他3组处理,且分别比 $Si_0$ 、 $Si_1$ 、 $Si_3$ 提高了16.26%、16.39%、7.82%;当氮肥施用量为 $N_2$ 时,添加 $Si_2$ 和

$Si_3$ 均能显著提高垂穗披碱草叶片全氮含量,其中 $Si_2$ 处理下叶片全氮含量最大为 $31.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,且与其他3组相比均存在显著性差异,与不施硅相比使叶片全含量提高了14.99%;当氮肥施用量为 $N_3$ 时, $Si_2$ 添加与其他处理相比存在显著性差异,使叶片全氮含量提高了12.80%。

低硅添加对叶片全氮含量均没有影响; $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  3种不同施氮水平下,添加硅肥为 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $Si_2$ )时,叶片全氮含量均为最高且达到显著水平。施肥处理叶片全氮含量最大平均值出现在 $N_2Si_2$ 处理下,为 $31.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,比不施肥处理( $N_0Si_0$ )提高了119.99%。

2.2 氮硅添加对垂穗披碱草净光合速率的影响

图3显示,单独添加氮肥或硅肥,随着施用量的增加,垂穗披碱草叶片净光合速率均呈现先增大后减小的趋势,并且都在中度施肥处理下( $N_2$ 和 $Si_2$ )达到最大值,与不施肥相比,净光合速率分别提高了61.24%、22.53%。

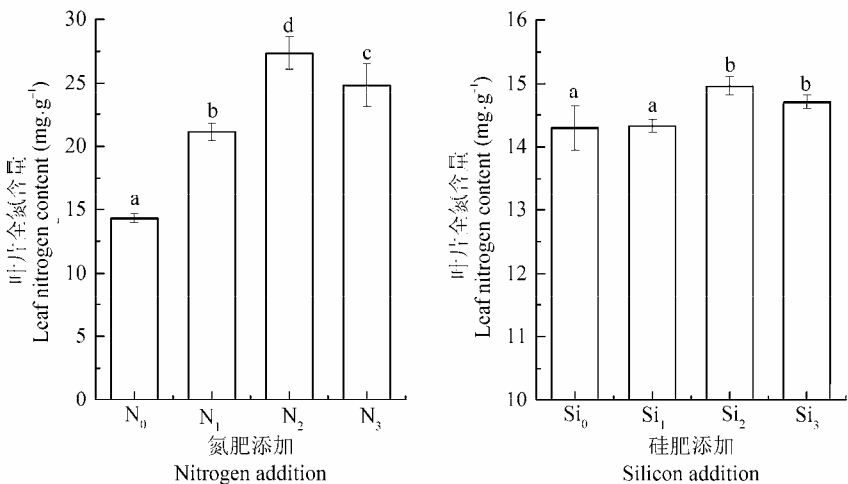


图1 氮硅单独添加对垂穗披碱草叶片全氮含量的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。 $N_0$ – $N_3$ 、 $Si_0$ – $Si_3$ 同表1。

Fig. 1 Effect of leaf nitrogen content of *Elymus nutans* with nitrogen and silicon added separately (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ).  $N_0$ – $N_3$ ,  $Si_0$ – $Si_3$  see Table 1.

表2 不同浓度氮硅添加下对垂穗披碱草叶片全氮含量交互作用的分析结果

Table 2 Analysis of interaction between different levels of nitrogen combined with silicon for leaf nitrogen content of *Elymus nutans*

来源 Source	第三类平方和 Type III sum of squares	d.f.	平均值平方 Mean square	F	显著性 Sig.
修正的模型 Corrected Model	1 961.255 <sup>a</sup>	15	130.750	155.011	0.000
截距 Intercept	33 723.940	1	33 723.940	39 981.400	0.000
N	1 860.226	3	620.075	735.130	0.000
Si	81.426	3	27.142	32.178	0.000
N $\times$ Si	19.603	9	2.178	2.582	0.016
错误 Error	40.488	48	0.843		
总计 Total	35 725.682	64			
校正后总数 Corrected total	2 001.742	63			

a,  $R^2 = 0.980$  (调整的 $R^2 = 0.973$ )。

a,  $R^2 = 0.980$  (adjusted  $R^2 = 0.973$ )。

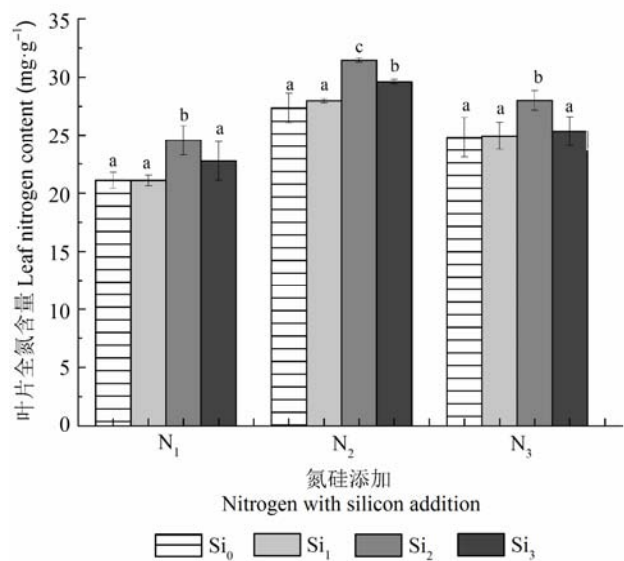


图2 氮硅配施对垂穗披碱草叶片全氮含量的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示同一施氮水平下不同浓度的硅肥处理间差异显著( $p < 0.05$ )。N<sub>1</sub>–N<sub>3</sub>、Si<sub>0</sub>–Si<sub>3</sub>同表1。

Fig. 2 Effect of leaf nitrogen content of *Elymus nutans* with nitrogen combined with silicon application (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters indicate significant differences between different silicon treatments with the same nitrogen application ( $p < 0.05$ ). N<sub>1</sub>–N<sub>3</sub>, Si<sub>0</sub>–Si<sub>3</sub> see Table 1.

不仅氮肥、硅肥单独添加会对垂穗披碱草的净光合速率造成显著性差异,同时两者间还存在极显著( $p < 0.01$ )的交互作用(表3)。当氮肥施用量为N<sub>1</sub>时,仅Si<sub>2</sub>处理下叶片净光合速率出现显著提高,与Si<sub>0</sub>、Si<sub>1</sub>、Si<sub>3</sub>相比分别使叶片净光合速率提高了16.56%、18.23%、0.42%;当氮肥施用量为N<sub>2</sub>时,添加Si<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>处理对于净光合速率有相同的促进作用,其中最大值出现在Si<sub>2</sub>处理中为56.23  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (图4)。当氮肥施用量为N<sub>3</sub>时,硅肥添加对垂穗披碱草的净光合速率不再有影响。

N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>不同施氮水平下,低硅添加对净光

合速率没有影响。N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>不同施氮水平下,叶片净光合速率均在中浓度硅处理下达到最大值,并且显著高于不施硅肥处理,与不施硅肥相比,净光合速率分别提高了22.53%、16.56%、15.17%。净光合速率最大值出现在N<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>处理中,比不施肥处理(N<sub>0</sub>Si<sub>0</sub>)提高了85.70%。

2.3 不同施肥处理条件下,叶片全氮含量与净光合速率的相关性分析

为了更清楚地了解不同施氮后水平下添加硅肥处理,净光合速率与叶片氮含量的关系,探究硅肥对净光合速率的影响是否由于提高叶片全氮含量,我们以不同的施氮量为分组标准,对其进行相关性分析。如图5所示,随着施氮量的增加, $R^2$ 数值呈现出先增加后减少的趋势,在中低浓度施氮处理下添加硅肥,净光合速率与叶片全氮含量存在较好的线性关系,并随着叶片全氮含量增加而增加;当氮肥施用量过高时,二者之间的线性关系变差。

3 讨论

氮肥通常被认为是限制植物生长的关键性因子,人工施用以及豆科植物的固氮作用是生态系统中氮肥的主要来源,氮肥一直是需求量最大的化肥。氮肥对植物生长和光合方面的影响是研究的热点问题,赵俊晔和于振文(2006)认为适量施氮显著促进小麦(*Triticum aestivum*)植株氮素积累量,提高籽粒产量和蛋白质含量。本文研究表明添加4种不同浓度的氮肥后,垂穗披碱草的叶片氮含量均有所增加,这与赵俊晔和于振文(2006)的研究结果一致。同时,本次试验结果还表明施用4种不同浓度氮肥后,垂穗披碱草叶片的净光合速率得到大幅度提高。适量施氮可以提高一些植物叶绿素的含量(Yao & Liu,

表3 不同浓度氮硅添加下对叶片净光合速率的交互作用分析结果

Table 3 Analysis of interaction in different levels of nitrogen combined with silicon for net photosynthetic rate of *Elymus nutans*

来源 Source	第三类平方和 Type III sum of squares	d.f.	平均值平方 Mean square	F	显著性 Sig.
修正的模型 Corrected Model	3 196.442 <sup>a</sup>	15	213.096	60.984	0.000
截距 Intercept	114 412.392	1	114 412.392	32 742.537	0.000
N	2 787.497	3	929.166	265.909	0.000
Si	306.681	3	102.227	29.225	0.000
N × Si	102.263	9	11.363	3.252	0.004
错误 Error	167.727	48	3.494		
总计 Total	117 776.560	64			
校正后总数 Corrected total	3 363.168	63			

a,  $R^2 = 0.950$  (调整的 $R^2 = 0.935$ )。

a,  $R^2 = 0.950$  (adjusted  $R^2 = 0.935$ )。



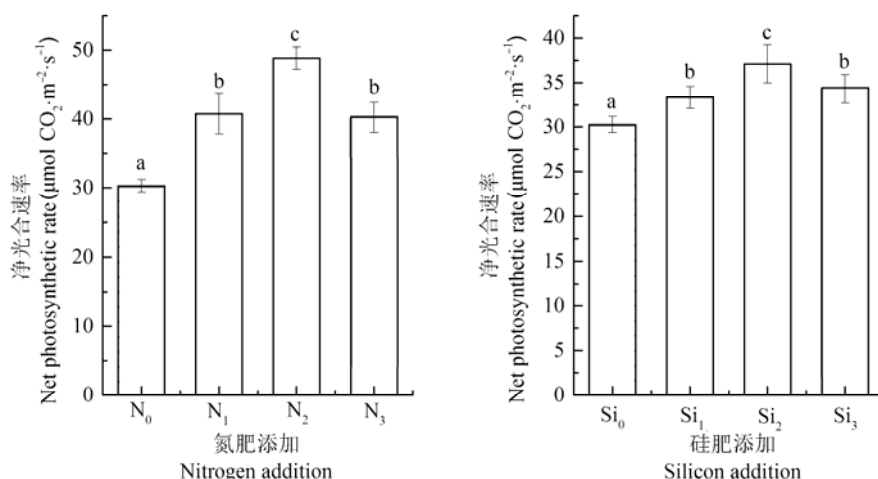


图3 氮硅单独添加对垂穗披碱草叶片净光合速率的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。N₀–N₃、Si₀–Si₃同表1。

**Fig. 3** Effect of net photosynthetic rate of *Elymus nutans* with nitrogen and silicon added separately (mean ± SD). Different lower-case letters indicate significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ). N₀–N₃, Si₀–Si₃ see Table 1.

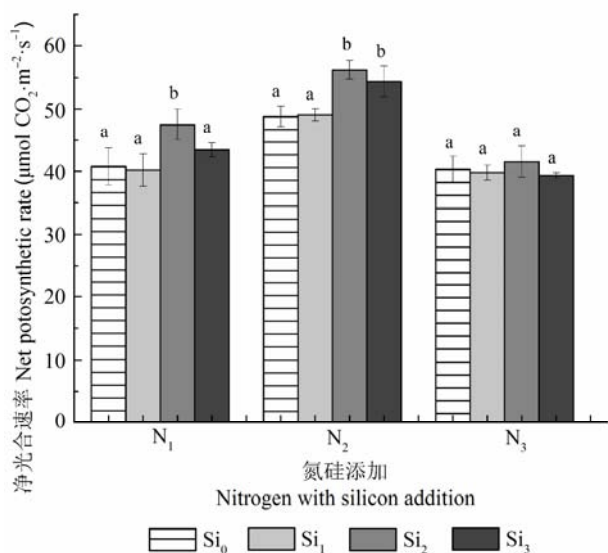


图4 氮硅配施对垂穗披碱草净光合速率的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示同一施氮水平下不同浓度的硅肥处理间差异显著( $p < 0.05$ )。N₁–N₃、Si₀–Si₃同表1。

**Fig. 4** Effect of net photosynthetic rate of *Elymus nutans* with nitrogen combined with Silicon treatments (mean ± SD). Different lower case letters indicate significant differences between different silicon treatments with the same nitrogen addition ( $p < 0.05$ ). N₁–N₃, Si₀–Si₃ see Table 1.

2006), 而叶绿素含量与植物的光合速率显著正相关(Gendy *et al.*, 2015), 从而进一步促进植物的光合作用。当氮肥施用量为N₂ (实际纯氮施用量为21 g·m⁻²)的情况下, 叶片氮含量和净光合速率分别提高了91.26%和61.24%。

Tamai和Ma (2008)认为硅能大幅度地提高水稻

产量, 增强抗倒伏性以及抗病性; Seo和Ola (1983)研究表明硅可提高植物的光合活性, 改善叶片对光的吸收状况, 缺硅情况下, 会导致水稻小穗数减少, 败育率增加; 张国芹等(2008)认为硅可以保护干旱胁迫下光合系统酶活性, 同时清除自由基来提高玉米净光合速率。本研究表明施硅肥后, 垂穗披碱草叶片净光合速率有显著提高, 可能是因为硅促改善了叶片着生姿态, 提高了垂穗披碱草的抗倒伏性, 从而进一步改善了其生长状态, 增强了其在群落中对光照资源的竞争能力; 另一方面, 施硅可使叶表皮细胞硅质化提高透光性, 同时提高光合系统酶活性来促进植物的光合作用; 另外, 同一施氮水平下, 硅添加提高了垂穗披碱草的叶片氮含量, 从而进一步提高了叶片净光合速率, 这与Detmann (2012)等对施硅肥对水稻的影响结果一致。

试验发现N₁、N₂、N₃三种不同施氮水平下施加硅肥, 二者之间存在显著的交互作用; 并且添加硅肥为8 g·m⁻² (Si₂)时, 叶片氮含量均为最高且达到显著水平。硅单独添加、与中低浓度的氮肥配施对净光合速率的影响都能达到显著水平; 当施氮量过高时净光合速率有下降的趋势, 并且添加硅肥后数值也不再增加。可能是因为氮素过剩导致植物茎秆徒长, 叶片披散, 相互遮阴影响其光合作用; 也可能是因为过量施用氮肥造成土壤溶液浓度过高, 渗透阻力增大, 导致作物根系吸水困难; 还可能是因为过多的氮肥改变了土壤pH值及土壤微生物的活动,

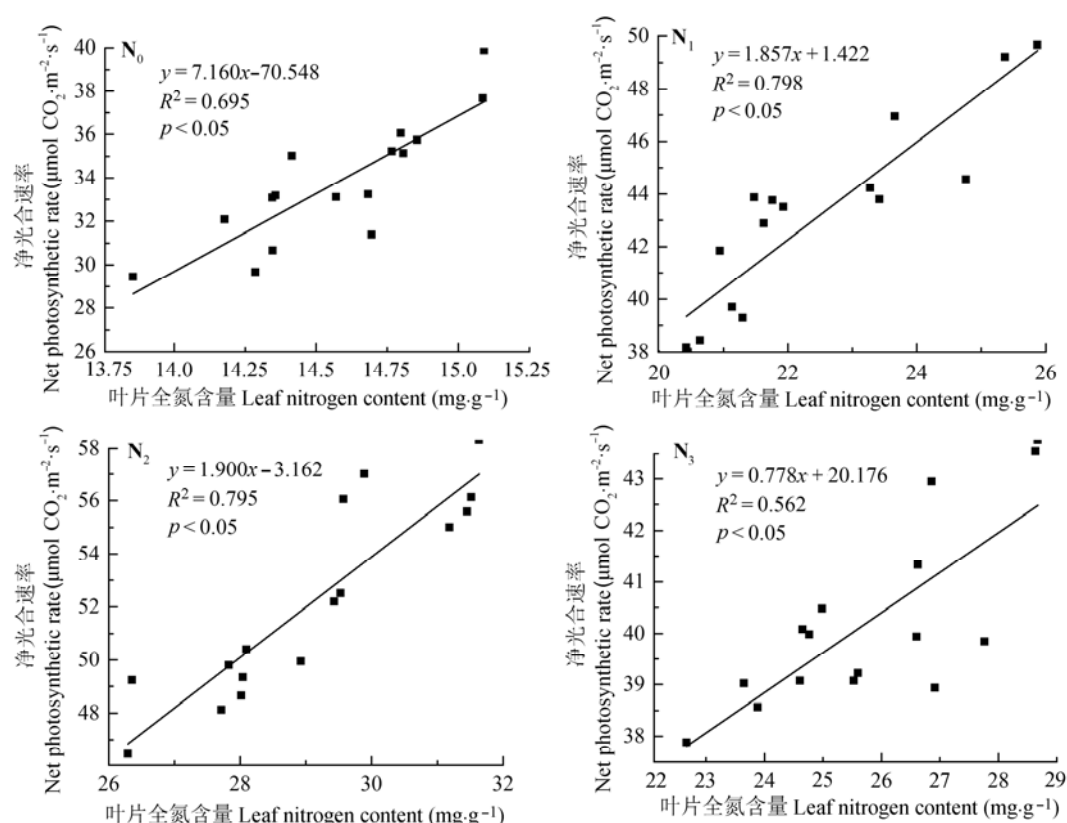


图5 不同施氮量下添加硅肥, 叶片氮含量和净光合速率的相关性分析。N<sub>0</sub>–N<sub>3</sub>同表1。

**Fig. 5** Relationships between leaf nitrogen content and net photosynthetic rate in different nitrogen application with silicon addition. N<sub>0</sub>–N<sub>3</sub> see Table 1.

造成了对垂穗披碱草生长不利的环境。

随着施氮量的增加, 硅肥添加后, 叶片全氮含量与净光合速率的正相关性出现先增加后降低的趋势; 施氮量为N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>时, 二者呈现出较为明显的正相关性, 即对垂穗披碱草进行N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>处理时, 添加硅肥可提高叶片全氮含量进而促进其光合作用, 并且净光合速率随着叶片全氮含量增加而增加。

垂穗披碱草因产量高、再生性好、营养价值高成为青藏高原草地天然植被修复、人工草地建植的优选草种。垂穗披碱草对氮添加较为敏感, 施用氮肥能够提高其产量, 促进生殖枝的形成, 降低其种子败育率, 但大量施用氮肥会改变土壤营养成分的组成比例, 氮肥投入量超过了最高产量施氮量会导致产量不再增加甚至有所下降, 同时氮肥在土壤中的残留量会显著增加, 造成环境污染。我们在实际施肥时必须考虑到其负面效果, 硅氮同时添加不仅能够提高该植物叶片中的氮含量及其净光合速率, 而且避免了环境污染, 以及施氮过多造成的经济浪费等问题, 且硅肥的添加量为8 g·m<sup>-2</sup>时效果较好。

**基金项目** 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (Lzujbky-2016-93(862600)) 和国家自然科学基金 (30900171、31160118和31460162)。

**致谢** 感谢兰州大学理论生态所的老师 and 同学在试验中给予的指导与帮助。

## 参考文献

- Bin ZJ, Wang JJ, Zhang WP, Xu DH, Cheng XH, Li KJ, Cao DH (2014). Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 231–237. (in Chinese with English abstract) [宾振钧, 王静静, 张文鹏, 徐当会, 程雪寒, 李柯杰, 曹德昊 (2014). 氮肥添加对青藏高原高寒草甸6个群落优势种生态化学计量学特征的影响. *植物生态学报*, 38, 231–237.]
- Bojović B, Stojanović J (2005). Chlorophyll and carotenoid content in wheat cultivars as a function of mineral nutrition. *Archives of Biological Sciences*, 57, 283–290.
- Cechin I, Terezinha FF (2004). Effect of nitrogen supply on growth and photosynthesis of sunflower plants grown in the greenhouse. *Plant Science*, 166, 1379–1385.

- Chen W, Yao XQ, Cai KZ, Chen JN (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 142, 67–76.
- Choudhury ATMA, Kennedy IR (2014). Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environmental pollution problem. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 1625–1639.
- Detmann KC, Araújo WL, Martins SCV, Sanglard LMVP, Reis JV, Detmann E, Rodrigues FA, Nunes-Nesi A, Fernie AR, Damatta FM (2012). 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*, 196, 752–762.
- Gendy AGEI, Gohary AEEL, Omer EA, Hendawya SF, Hussein MS, Petrovab V, Stancheva I (2015). Effect of nitrogen and potassium fertilizer on herbage and oil yield of chervil plant (*Anthriscus cerefolium* L.). *Industrial Crops and Products*, 69, 167–174.
- Gu MH, Du XG, Wen SJ, Ma T, Chen M, Ren QJ, Du GZ (2008). Effect of fertilization and clipping intensities on interspecific competition between *Elymus nutans*, *Festuca sinensis* and *Festuca ovina*. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 2472–2479. (in Chinese with English abstract) [顾梦鹤, 杜小光, 文淑均, 马涛, 陈敏, 任青吉, 杜国祯 (2008). 施肥和刈割对垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)和羊茅(*Festuca ovina*)中间竞争力的影响. 生态学报, 28, 2472–2479.]
- Hattori T, Inanaga S, Araki H, Ping A, Morita S, Luxová M, Lux A (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 123, 459–466.
- Hossain MT, Mori R, Soga K, Wakabayashi K, Kamisaka S, Fujii S, Yamamoto R, Hoson T (2002). Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other *Poaceae* seedlings. *Journal of Plant Research*, 115, 23–27.
- Li QF, Ma CC, Shang QL (2007). Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 531–536. (in Chinese with English abstract) [李清芳, 马成仓, 尚启亮 (2007). 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响. 应用生态学报, 18, 531–536.]
- Seo SW, Ola Y (1983). Effect of supplying of silicon and potassium during reproductive stage on the form and function of hulls. *Japanese Journal of Crop Science*, 52, 73–79.
- Tamai K, Ma JF (2008). Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant. *Plant and Soil*, 307, 21–27.
- Wang XF, Du GZ, Ma YS, Zhang ZL, Zhang ST (2008). The impacts of shading, fertilization and cutting on growth of *Elymus nutans*. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 6212–6218. (in Chinese with English abstract) [王晓芬, 杜国祯, 马银山, 张作亮, 张世挺 (2008). 光照, 施肥及刈割对垂穗披碱草生长的影响. 生态学报, 28, 6212–6218.]
- Yao XQ, Liu Q (2006). Changes in morphological, photosynthetic and physiological responses of mono maple seedlings to enhanced UV-B and to nitrogen addition. *Plant Growth Regulation*, 50, 165–177.
- Zhang GQ, Xu K, Wang XC, Zhang XY, Dong CX (2008). Effects of silicon on exchange characteristics of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in ginger leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 1702–1707. (in Chinese with English abstract) [张国芹, 徐坤, 王兴翠, 张晓艳, 董灿兴 (2008). 硅对生姜叶片水、二氧化碳交换特性的影响. 应用生态学报, 19, 1702–1707.]
- Zhao JY, Yu ZW (2006). Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 815–822. (in Chinese with English abstract) [赵俊晔, 于振文 (2006). 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, 26, 815–822.]

责任编辑: 安黎哲 责任编辑: 李 敏



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览