

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0142

张文鹏,司晓林,王文银,高天鹏,徐当会.氮硅添加对高寒草甸生物量和多样性的影响——以青藏高原为例.草业科学,2016,33(1):38-45.

Zhang W P, Si X L, Wang W Y, Gao T P, Xu D H. Effects of short-term nitrogen and silicon addition on above-ground biomass and biodiversity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Pratacultural Science, 2016, 33(1): 38-45.

氮硅添加对高寒草甸生物量和多样性的影响

——以青藏高原为例

张文鹏¹, 司晓林¹, 王文银¹, 高天鹏², 徐当会¹

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

2. 兰州城市学院城市生态与环境生物技术中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:草地施肥多集中于添加氮肥与磷肥,很少涉及硅肥。硅作为对植物有益的一种元素,能提高植物对环境的抗性,促进植物的生长。本研究以青藏高原高寒草甸为研究对象,通过添加不同组合的氮肥和硅肥,研究群落地上生物量和生物多样性的变化。结果表明,氮肥和硅肥的添加均能提高群落的地上生物量,然而硅肥提高群落地上生物量的幅度远低于氮肥;在添加氮肥导致群落物种多样性下降的同时,添加硅肥可以缓解群落多样性下降的趋势;硅肥的生物学功能在群落水平上存在着最佳浓度效应。同时,我们推测硅肥在维持群落中杂草的存活率上发挥着积极的作用,并通过比较不同硅肥处理时,杂草生物量所占群落生物量比重的变化,支持了上述推测。

关键词:地上生物量;Shannon-Winner 指数;相关性分析

中图分类号:S812;Q945.79

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2016)1-0038-08*

Effects of short-term nitrogen and silicon addition on above-ground biomass and biodiversity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China

Zhang Wen-peng¹, Si Xiao-lin¹, Wang Wen-yin¹, Gao Tian-peng², Xu Dang-hui¹

(1.State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystems, School of Life Sciences,

Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2.Centre of Urban Ecology and Environmental Biotechnology, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The nitrogen and phosphate is widely fertilized to meadow, but few silicon is involved. Silicon, a beneficial element, has been proved to encourage plant to grow well by enhancing the resistance to various environmental stresses. A field experiment was carried out to investigate the effects of different levels of nitrogen and silicon addition on above-ground biomass and biodiversity of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. This study indicated that nitrogen fertilizer and silicon fertilizer improved the above-ground biomass of plant community. However, the increase from silicon fertilizer for above-ground plant biomass was far lower than that from nitrogen fertilizer. Nitrogen fertilizer led to declines in species diversity, while silicon fertilizer alleviated the decreasing trend of species diversity. The biological function of silicon fertilizer had an optimal

* 收稿日期:2015-03-11 接受日期:2015-05-05

基金项目:草地农业生态系统国家重点实验室开放基金项目、国家自然科学基金项目(31370423);兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金项目(Lzujbky-2013-95)

第一作者:张文鹏(1990-),男,河南修武人,硕士,研究方向为植物生态化学计量学。E-mail:295637395@qq.com

通信作者:徐当会(1976-),女,甘肃正宁人,副教授,博士,研究方向为植物生理生态。E-mail:dhxu@lzu.edu.cn

concentration effect at the plant community level. Meanwhile, we hypothesized that silicon fertilizer plays a positive role in maintaining the survival rate of weeds, and the results of this study supported this speculation, in which the proportion of the weed biomass to plant community biomass varied with different silicon fertilizer levels.

Key words: above-ground biomass; Shannon-Winner; correlation analysis

Corresponding author: Xu Dang-hui E-mail: dhxu@lzu.edu.cn

青藏高原东缘高寒草甸属于青藏高原向黄土高原和内陆盆地的过渡地带,生物资源丰富,不仅具有较高的经济利用价值,而且也是维护黄河和长江源头地区生态安全的重要屏障。长期以来,青藏高原原高寒草甸的施肥主要集中于添加氮肥,这一方面是由于氮是植物生长的必需元素,对草地施加氮肥后可以明显地增加土壤速效养分,改善土壤营养状况,补充牧草生长的营养消耗,促进牧草的分蘖和分枝,增加光合强度,提高草地的地上生物量^[1],更好地满足牧民日益增加的放牧要求;另一方面,氮肥使群落的物种分布呈现出空间上的单一状态,个体较高的禾本科植物的数量优势逐渐扩大,个体较低的杂草数量逐渐减少,导致群落的生物多样性急剧下降,对该区域生态系统的稳定性造成较大的威胁。由于氮肥所具有的双重性,因此,长期以来对于草原施氮一直存在着较高的争议。

硅虽然是地壳中含量仅次于氧的第二大元素,但极大数目的硅通过与其它物质结合形成难溶性的氧化性硅酸,并不被植物利用^[2]。与此同时,研究表明硅还是一个对植物生长极其有益的元素,不仅能够活化土壤的有机质,促进植株根部对氮、磷等矿质元素的吸收,而且还能够增加植物对环境胁迫的抗性,例如:增强植物对害虫与疾病的抵抗能力,降低金属毒性,维持植物体内的营养平衡,增强植物的耐寒性与耐旱性等^[3]。并且,硅作为一种新型的农业肥料,已在美国、日本、韩国等国家和部分地区得到了广泛的应用。

考虑到硅的生物学功能,再加上甘肃甘南地区温度低,雨水多,地面径流和渗漏量大,水溶性的硅酸易流失和向土体深层渗漏,造成植物根系所在的土壤表层中有效硅的需求与补给长期处于失衡的状态。因而,在施加氮肥的前提下,施加适量的硅肥,很可能会成为研究如何减缓生物多样性下降的突破口。

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°39' N,101°53' E,海拔 3 650 m,年平均气温为 2.2 ℃,年降水量为 672 mm^[4],属于高寒半湿润半干旱气候。年日照时数约 2 580 h,年平均霜期大于 270 d。主体土壤类型为亚高山草甸土。植被属于高寒草甸类。植被类型以莎草科的嵩草(*Kobresia myosuroides*),禾本科的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、胡氏剪股颖(*Agrostis hugoniana*),草地早熟禾(*Poa pratensis*),菊科的瑞苓草(*Saussurea nigrescens*)和毛茛科的钝叶银莲花(*Anemone obtusiloba*)为优势种并伴以其它杂草。

1.2 试验方法

试验地四周应用围栏保护以防止牛羊的踩踏和取食,并减少扰动对试验结果可靠性的影响。试验采用完全随机区组设计。在 2014 年 5 月 18 日,试验地内选取 96 个 2 m×2 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。于 5 月生长季初期进行施肥试验。施肥组合如表 1 所示,其中氮肥的添加量参考仁青吉等^[4]以及马涛等^[5]的研究结果,硅肥的添加量结合 2012 年与 2013 年的施肥实践并参考宾振钧等^[6]的方法。

表 1 施肥组合
Table 1 The combination of fertilizer

NH ₄ NO ₃ / g·m ⁻²	H ₂ SiO ₃ /g·m ⁻²			
	0 (Si ₀)	4 (Si ₁)	8 (Si ₂)	12 (Si ₃)
0(N ₀)	N ₀ Si ₀	N ₀ Si ₁	N ₀ Si ₂	N ₀ Si ₃
30(N ₁)	N ₁ Si ₀	N ₁ Si ₁	N ₁ Si ₂	N ₁ Si ₃
60(N ₂)	N ₂ Si ₀	N ₂ Si ₁	N ₂ Si ₂	N ₂ Si ₃
120(N ₃)	N ₃ Si ₀	N ₃ Si ₁	N ₃ Si ₂	N ₃ Si ₃

1.3 测定指标和方法

于每年的 9 月底采用大面积巢式样方进行草地群落多样性调查,调查方法为样方法。在每个样区随机选取样方,距样区边缘 50 cm 以避免边缘效应。样方面积为 50 cm×50 cm。取样时计测每个种的高度、多度。采用齐地面刈割的方式获取群落地上生物量,带

回实验室,在 80 ℃、12 h 条件下烘至恒重。以 Shannon-Winner 指数作为衡量群落多样性的指标。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 整理和计算数据,用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析,采用 Origin 9.0 作图。对不同施肥处理下,群落地上生物量、Shannon-Winner 指数以及杂草生物量在群落中所占的比重进行有重复性双因素方差分析,用 LSD 作为简单效应分析的检验方法,得到各组数据的平均值、标准误和标准差,以及不同处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对群落 Shannon-Winner 指数的影响

氮肥和硅肥不仅单独添加时,会对群落的 Shannon-Winner 指数产生显著影响,而且两者间还存在交互作用(表 2)。氮肥的添加降低了群落的 Shannon-Winner 指数,而硅肥却能提高群落的 Shannon-Winner 指数,并且在不同氮肥施加量的分组里,硅肥对群落 Shannon-Winner 指数的影响也不尽相同(图 1)。在 N_0 (不添加氮肥)处理时,硅肥的添加对群落 Shannon-Winner 指数几乎没有影响,在有氮肥添加的情况下,硅肥的添加均提高了群落的 Shannon-Winner 指数,其中, N_1 (氮肥添加量为 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)处理时,仅 Si_2 (硅肥添加量为 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)显著高于其它 Si 处理($P<0.05$); N_2 (氮肥添加量为 $60\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)处理时, Si_2 与 Si_3 (硅肥添加量为 $12\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)均显著高于其它硅处理($P<0.05$); N_3 (氮肥添加量为 $120\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)处理时,不仅 Si_2 与 Si_3 达到显著水平,而且 Si_2 还达到了极显著水平($P<0.01$)。

2.2 不同施肥处理对群落地上生物量的影响

本研究中,无论是单独的氮肥处理,还是硅肥处理,都能够提高群落生产力(表 3、图 2),这一点与不同施肥组合对群落 Shannon-Winner 指数的影响不一致,因为在添加氮肥的情况下,群落的 Shannon-Winner 指数是下降的。然而,从不同施氮肥的分组内硅肥在群落地上部分干重上所表现出的最大差异性可以看出,硅肥对群落地上部分干重的影响随着氮肥添加量的增大而表现出的差异逐渐明显(表 3),这一点和硅肥对群落 Shannon-Winner 指数的影响一致。此外,虽然在不同的氮肥分组里, Si_2 浓度的硅肥处理,均能显著提高群落地上生物量($P<0.05$),但是并不像氮肥那样明显。氮肥处理的最大差值: N_3Si_0 处理的地上生物量(163.93 g)几乎是 N_0Si_0 地上生物量(108.45 g)的 1.5 倍;而硅肥处理的最大差值: N_3Si_2 处理的地上生物量(172.02 g)仅比 N_3Si_0 处理的地上生物量(146.25 g)多 25.77 g 。与此同时,在不同的添加氮肥分组里,均是 Si_2 处理时(硅肥添加量为 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)群落地上生物量达到最大值,这一点和硅对群落 Shannon-Winner 指数的影响大体一致。

2.3 不同施肥处理条件下,群落 Shannon-Winner 指数与地上生物量的相关性分析

为了更准确了解添加硅肥后,群落 Shannon-Winner 指数与地上生物量的相关性关系,以不同的氮肥处理作为分组条件,研究添加不同的硅肥时,群落的 Shannon-Winner 指数与地上生物量的回归关系(图 3)。结果发现,在 4 种氮肥处理的分组里,硅肥的添加使群落 Shannon-Winner 指数与地上生物量的呈现正相关关系。有文献表明^[5],在对青藏高原亚高寒草甸

表 2 不同施肥处理情况下群落 Shannon-Winner 指数的双因素方差分析结果
Table 2 Two-factor variance analysis for Shannon-Winner index under different fertilization treatments

源 Source	III 平方和 Type III Sum of Squares	df	均方 Mean Square	F	Sig.
校正模型 Corrected Model	0.677	15	0.045	25.713	0.000
截距 Intercept	442.918	1	442.918	252 439.346	0.000
N	0.582	3	0.194	110.487	0.000
Si	0.061	3	0.020	11.558	0.000
N×Si	0.034	9	0.004	2.174	0.041
误差 Error	0.084	48	0.002		
总计 Total	443.679	64			
校正的总计 Corrected Total	0.761	63			

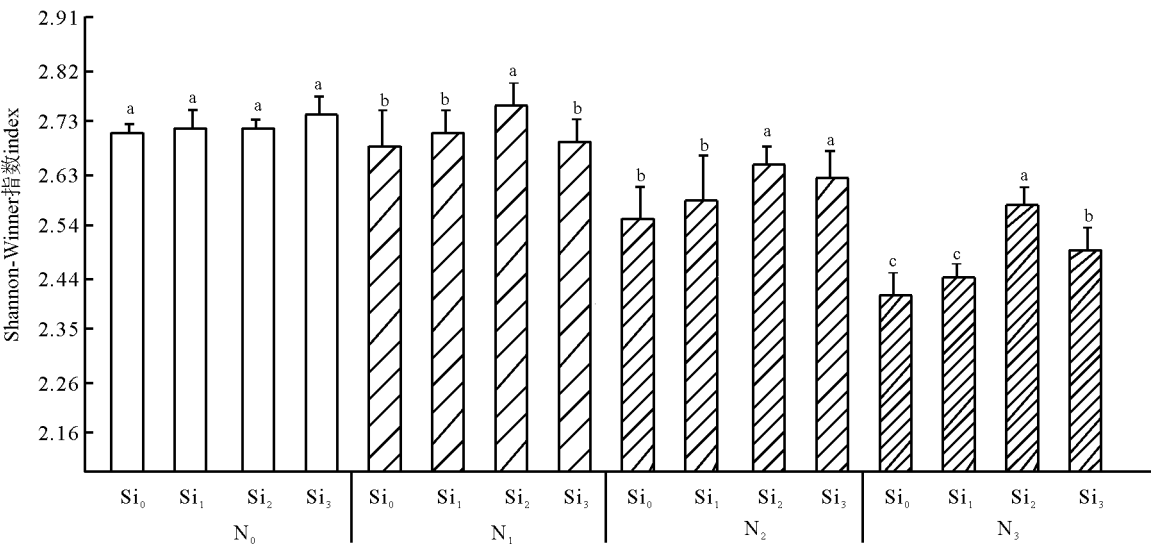


图 1 氮硅和硅肥混合添加后群落的 Shannon-Winner 指数

Fig.1 Shannon-Winner of community under nitrogen fertilizer and silicon fertilizer mixed addition

注:在氮肥和硅肥对群落的 Shannon-Winner 指数存在交互作用影响的前提下,采用 LSD 法对不同处理作简单效应分析,同一氮处理不同硅处理间字母相同表示差异不显著($P>0.05$),字母相邻表示差异显著($P<0.05$),字母相隔表示差异极显著($P<0.01$)。其中 N_0 为施氮量 0, N_1 为 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, N_2 为 $60\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, N_3 为 $120\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, Si_0 为施硅量 0, Si_1 为 $4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, Si_2 为 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, Si_3 为 $12\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。下图同。

Note: Under the premise nitrogen fertilizer and silicon fertilizer have an interaction influence on Shannon-Winner index of community, take simple effect analysis for different processing using LSD method further, within the same N, the same lower case letter mean no significant difference at 0.05 level, the adjacent lower case letter mean significant difference at 0.05 level, and the alternate lower case letter mean significant difference at 0.01 level. The same below.

表 3 不同施肥处理情况下群落地上生物量(干重)的双因素方差分析结果
Table 3 Two-factor variance analysis for the aboveground biomass(dry weight) of community under different fertilization treatments

源 Source	III 平方和 Type III Sum of Squares	df	均方 Mean Square	F	Sig.
校正模型 Corrected Model	41 995.012	15	2 799.667	66.016	0.000
截距 Intercept	1 281 834.383	1	1 281 834.383	30 225.513	0.000
N	39 553.112	3	13 184.371	310.886	0.000
Si	1 560.001	3	520.000	12.262	0.000
N×Si	881.900	9	97.989	2.311	0.030
误差 Error	2 035.633	48	42.409		
总计 Total	1 325 865.028	64			
校正的总计 Corrected Total	44 030.645	63			

不施肥以及施加低浓度的氮肥时(氮肥添加量为 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),Shannon-Winner 指数与植物量之间呈对数递增关系,所以并不能下定论说,在施加低浓度氮肥的条件下,同时添加硅肥,产生的 Shannon-Winner 指数与生物量之间的递增关系是由于硅肥的添加造成的。唯一能肯定的是,硅肥的添加对低氮浓度下,Shannon-Winner 指数与生物量之间的关系没造成过大的影响。然而,在添加中浓度的氮肥时(氮肥添加量为 $60\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),Shannon-Winner 指数与植物量之间呈对数

递减关系,以及在高浓度的氮肥处理时(氮肥添加量为 $120\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),Shannon-Winner 指数与植物量之间无相关关系,这种由氮肥添加造成的关系在添加硅肥后发生了极大的改变,所以可以肯定在中高浓度氮肥处理的情况下,硅肥的添加对 Shannon-Winner 指数和生物量之间的关系确实造成了很大的影响。较高的生物多样性能够提高生态系统的稳定性,同时草地上高的生物量更符合畜牧的需求,硅肥的应用使两者形成了共赢的局面,有效解决了施氮肥造成的生物量增加,

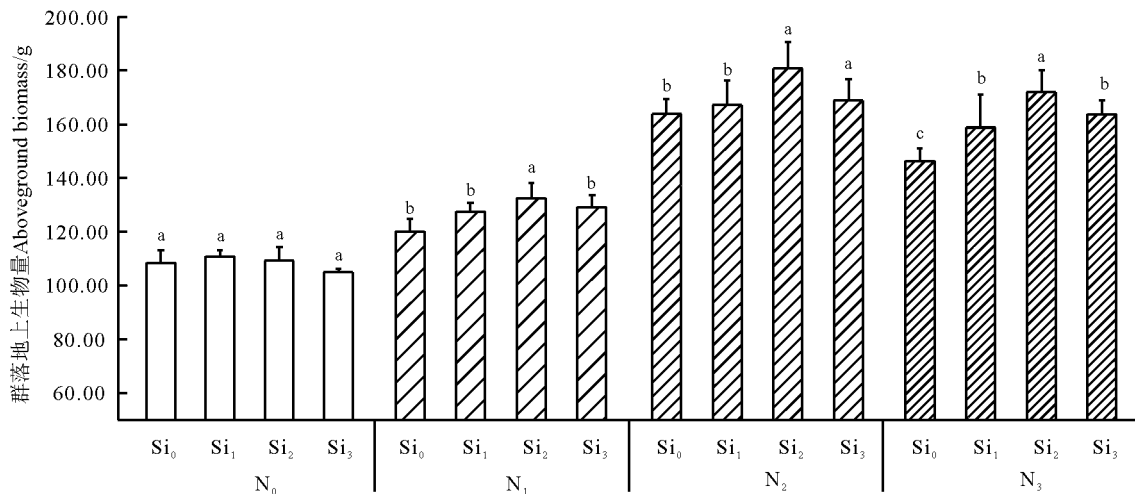


图 2 氮硅和硅肥混合添加后群落的地上生物量

Fig.2 Dry weight of community under nitrogen fertilizer and silicon fertilizer mixed add

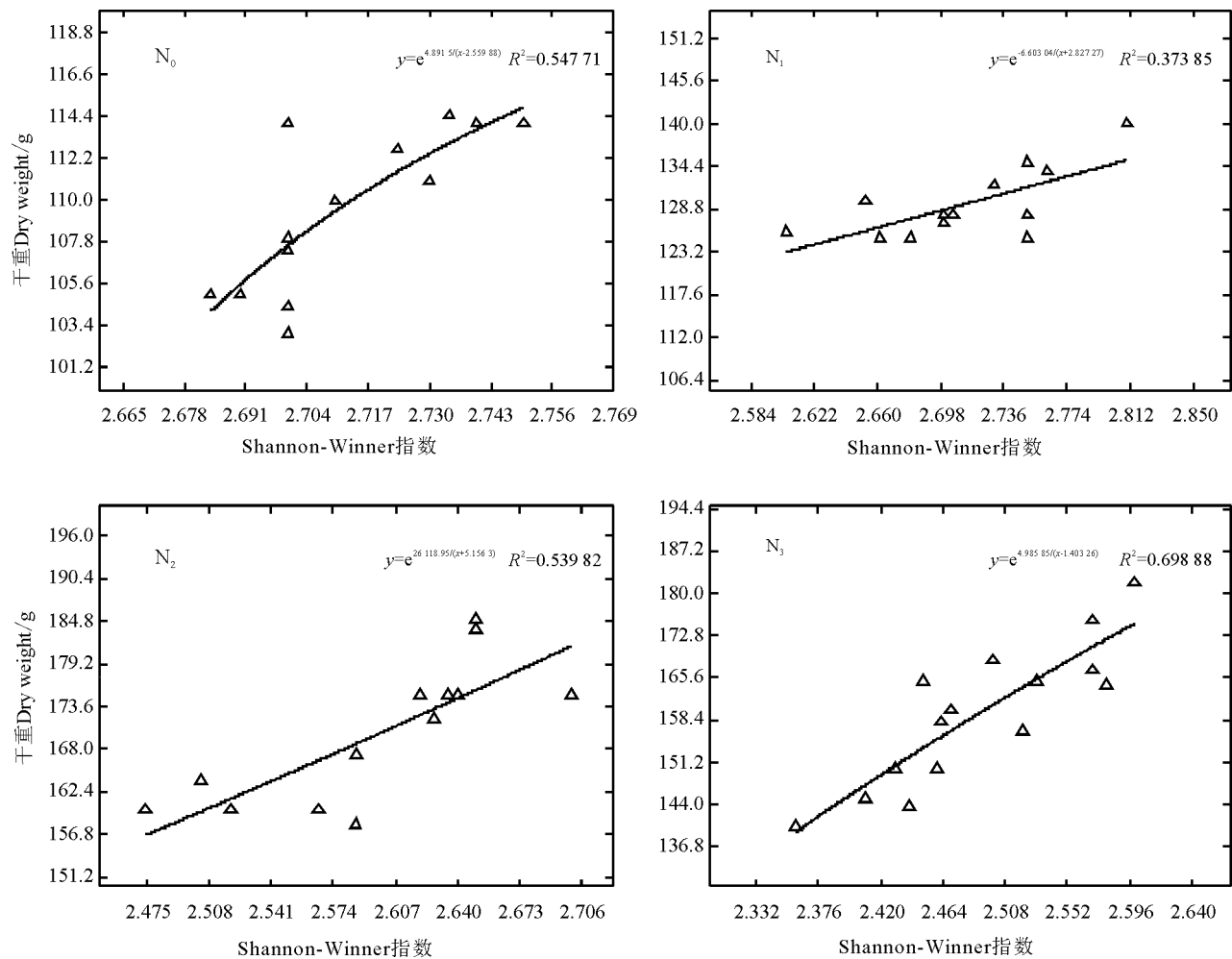


图 3 不同氮肥施用量下群落 Shannon-Winner 指数和地上生物量的相关性

Fig.3 Correlation analysis between Shannon-Winner index of community and above-ground biomass under different nitrogen fertilizer rate

生物多样性却下降的窘境。

2.4 不同施肥处理条件下,杂草生物量所占地上总生物的比重

试验中将群落干重分为杂草与非杂草两部分,其中非杂草部分指的是禾本科和莎草科里的物种,其余的物种归为杂草部分。这样分类的原因,一方面是因为禾本科与莎草科植株的整体高度明显比其它科属的植株高,另一方面,禾本科与莎草科在添加外源氮肥的情况下,成为群落中较为明显的优势科,其生物量占群落总生物量的很大一部分。在不同氮肥添加量的分组

里,4 种硅肥处理对杂草生物量所占地上总生物量比重的影响大致一致:先上升,后下降,Si₂ 时(硅肥添加量为 8 g · m⁻²)最大(图 4)。其中,在 N₀ 处理时(未添加氮肥),硅肥对杂草所占比重的影响基本上可以忽略不计;在 N₁(氮肥添加量为 30 g · m⁻²)和 N₂(氮肥添加量为 60 g · m⁻²)处理时,硅肥的添加对杂草所占比重的影响逐渐明显,其中,在 Si₂ 时显著高于其余 Si 处理($P<0.05$);在 N₃(氮肥添加量为 120 g · m⁻²)处理时,除 Si₃ 达到显著性水平外, Si₂ 还达到了极显著的水平($P<0.01$)。

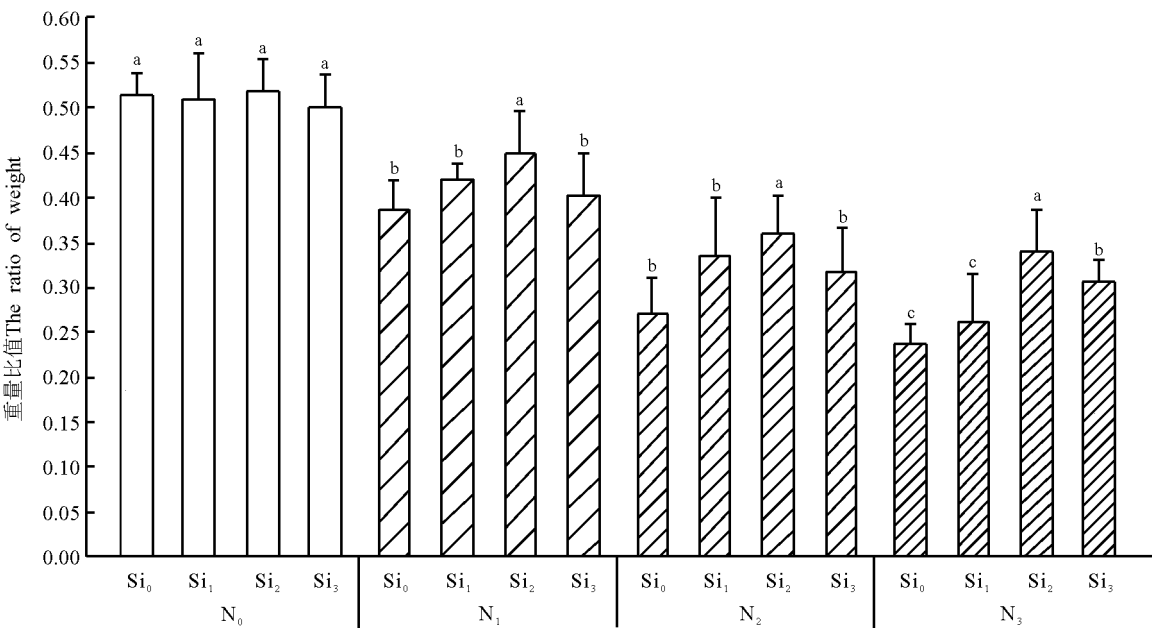


图 4 不同氮肥施加量下杂草生物量占地上总生物比重的变化
Fig.4 Proportion of weed biomass to total biomass under different fertlizer treatments

3 讨论与结论

物种多样性和地上生产力是描述群落结构和衡量群落生态系统功能的重要参数,两者间的关系也是群落生态学研究热点问题^[7]。Redmann^[8]在对北美高原的研究表明,部分地上生产力和草地物种数目之间呈负相关;Tilman 等^[9]认为,物种多样性和生产力呈正相关,尽管有学者认为其取样过程有可能会导 致一种统计上的虚假;而 McNaughton^[10]在对坦桑尼亚和肯尼亚草地的研究则表明了地上生物量与多样性之间缺乏明显的依赖性。目前,对于物种多样性和地上生产力之间的关系的结果,普遍认为是由于时间尺度和空间尺度上的差异引起的,然而,在一定程度上又不得不承认,这种由空间尺度带来的差异代表的只是研究问题的角度不同,最直接的原因

还是当时群落所处环境的差异。例如 Guo 和 Berry^[11]在对沙漠自然群落的取样结果分析就表明除了空间尺度会对物种多样性与生产力的关系产生影响外,群落所处的生境条件也是必须要考虑的关键因素。

此外,在长期对青藏高原亚高寒草甸的施肥研究中表明,在添加外源氮肥的情况下,物种多样性与地面生产力之间呈负相关^[12]。这也与本研究结果一致,随着外源氮肥的增加,群落的地上生物量逐渐上升,物种多样性逐渐下降^[13]。对于氮肥的添加导致物种多样性丧失的解释有许多,其中受到广泛关注的是光竞争假说,这个假说认为,随着生产力的提高,竞争主要从地下竞争转为地上竞争,进而光竞争能力强的物种(主要指禾本科和莎草科)引起植被下层光合有效辐射降低,导致一些小物种或小个体的死亡,最终导致物种多样性的丧失。然而,在添加硅时,物种多样性和地上生

物量呈现了正相关性,并且这种正相关性在同时添加高氮肥的情况下尤为显著。因此,本研究推测硅可能在维持矮小植物的存活率上起到了积极的作用。

为了进一步验证这个推测,以氮肥不同的施加量作为分组的条件,研究了硅肥对杂草生物量所占群落总生物量比重的影响。从研究结果中不难发现,在添加外源氮肥的前提下,硅肥对杂草的生长起到了积极影响,并且这种影响程度与氮肥的施加量有一定的正相关性,也就是说,在中高氮肥处理的前提下,硅肥通过维持矮小植物的存活率来提高矮小植株的地上生物量,进而增加群落的地上生物量,这点与氮肥增加地上生物量的方式刚好相反。添加氮肥能明显地增加亚高寒草甸群落禾本科牧草的地上生物量及草甸的地上生产力,提高禾本科牧草在群落总地上生物量的比重,这一点在马玉寿等^[14]以及沈振西等^[15]的研究中都已得到证实。而 Eneji 等^[16]对硅的研究表明硅可能通过增加植株的抗性,激活土壤有机质(氮,磷等)的方式,对草地的地上生物量产生积极的影响^[17],本研究也从另一角度肯定了 Eneji 的观点,因为在中高氮肥处理时,植被下层的矮小植株受到了一定程度的光胁迫。

以光竞争假说作为考虑问题的出发点,硅可能会通过以下方式来提高矮小植株的存活率,一是增加植被上层的透光性,二是提高矮小植株在光胁迫下的抗性。硅是禾本科和莎草科植株生长的必需元素,并且在禾本科和莎草科植株体内含量较高^[18]。植物体内的硅有一部分会在茎秆细胞壁上沉淀形成硅化细胞^[19],增加茎秆的机械强度,提高植物抗倒伏能力。因此,在高寒草甸的群落中添加外源硅时,就有可能增

加植被上层的透光性,提高植被下层的光强;另一方面,植物体内那部分以可溶性状态存在的不定性硅可作为信号分子,参与调控逆境条件下与光合作用相关的酶,提高群落中矮小植物的光合能力^[3];此外,Kaufman 等^[20]还对硅增强植物光合能力提出过“窗户假说”,即在叶片角质层下方沉淀的硅酸就像“窗户”一样,通过增加光的通透性来增强植物对光的利用能力。

值得注意的是,硅在提高物种多样性,改善群落生态系统功能方面 also 存在着最适浓度。本研究结果发现,无论是 Shannon-Winner 指数还是地上生物量,在 4 个氮处理的分组里,都是在中浓度的硅(Si_2)处理时达到最大值。关于硅促进植物生长存在最佳浓度的现象,Hossain 等^[21]在硅对水稻(*Oryza sativa*)和其它禾本科植株生长的盆栽研究中也表述(最佳浓度 $5 \sim 10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),只是其中涉及的机理尚未研究清楚。本研究则是在群落上提出了硅的最佳浓度现象,而这应该是多种策略权衡的结果。

对于野外草地施肥试验,在考虑时间尺度时,这种由生境的突变造成的物种多样性和生产力的关系改变也许只是阶段性的现象^[22],因此为了更准确地了解硅肥对青藏高原亚高寒草甸群落物种多样性和生产力的关系影响,仍需要进行长期的试验,甚至在今后的试验中,还需适当地调整硅肥与氮肥的施加量,以便达到更好的观测结果。此外,若要进一步地探讨硅肥增加矮小植株存活率的机理,仍需要大量的室内工作,例如检测施肥前后优势种以及部分杂草体内的氮、磷、硅含量的变化,以及土壤肥力的变化等等。

参考文献 (References)

- [1] 曹广民,吴琴,李东,胡启武,李月梅,王溪.土壤—牧草氮素供需状况变化对高寒草甸植被演替与草地退化的影响.生态学报,2004,23(6):25-28.
- Cao G M, Wu Q, Li D, Hu Q W, Li Y M, Wang X. Effects of nitrogen supply and demand status of soil and herbage system on vegetation succession and grassland degradation in alpine meadow. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 25-28. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Ma J F, Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants. Cellular and Molecular Life Sciences, 2008, 65(19): 3049-3057.
- [4] 仁青吉,罗燕江,王海洋,刘金梅.青藏高原典型高寒草甸退化草地的恢复——施肥刈割对草地质量的影响.草业学报,2004,13(2):43-49.
- Ren Q J, Luo Y J, Wang H Y, Liu J M. The recovery of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan——Response of the grassland quality on mowing and fertilizing. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(2): 43-49. (in Chinese)
- [5] 马涛,童云峰,刘锦霞,武高林,刘振恒.不同施肥处理高寒草甸植物群落物种多样性与生产力的关系.草原与草坪,2008(4):34-38.

- Ma T, Tong Y F, Liu J X, Wu G L, Liu Z H. Effects of Different fertilizer treatment on above-ground biomass and biodiversity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Grassland and Turf*, 2008(4): 34-38. (in Chinese)
- [6] 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(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. (in Chinese)
- [7] Hillebrand H, Matthiessen B. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1405-1419.
- [8] Redmann R E. Production ecology of grassland Plant communities in West North Dakota. *Ecology Monographs*, 1975, 45(1): 83-106.
- [9] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustain ability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379: 718-720.
- [10] McNaughton S J. Serengeti grassland ecology: the role of composite environmental factors and contingency in community organization. *Ecological Monographs*, 1983, 53(3): 291-320.
- [11] Guo Q F, Berry W. Species richness and biomass: Dissection of the hump-shaped relationships. *Ecology*, 1998, 79(7): 2555-2559.
- [12] Rajaniemi T K. Why does fertilization reduce plant species diversity? Testing three competition-based hypotheses. *Journal of Ecology*, 2002, 90(2): 316-324.
- [13] 张仁懿, 史小明, 李文金, 郭睿, 王刚. 亚高寒草甸物种内稳性与生物量变化模式. *草业科学*, 2015, 32(10): 1539-1547.
- Zhang R Y, Shi X M, Li W J, Guo R, Wang G. Response of species homeostasis and biomass on a sub-alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10): 1539-1547. (in Chinese)
- [14] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 施建军, 董全民. 施氮量与施氮时间对小嵩草草甸草地的影响. *草业科学*, 2003, 20(3): 47-50.
- Ma Y S, Lang B N, Li Q Y, Shi J J, Dong Q M. Effect of fertilizing nitrogen and time on alpine *Kobresia humilis* community. *Pratacultural Science*, 2003, 20(3): 47-50. (in Chinese)
- [15] 沈振西, 陈佐忠, 周兴民, 周华坤. 高施氮量对高寒矮嵩草甸主要类群和多样性及质量的影响. *草地学报*, 2002, 10(1): 7-17.
- Shen Z X, Chen Z Z, Zhou X M, Zhou H K. Responses of plant groups, diversity and meadow quality to high-rate N fertilization on alpine *Kobresia humilis* community. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(1): 7-17. (in Chinese)
- [16] Eneji A E, Inanaga S, Muranaka S, Li J, Hattori T, An P, Tsuji W. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(2): 355-365.
- [17] 薛高峰, 孙淼鑫, 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.
- Xue G F, Sun Y X, Chen Y H, Zhang G L, Liao S Q. Influences of spraying different forms of silicon on nutrient absorption yield and quality of celery (*Apium graveolens* L. var. *dulce* (Mill.) DC.). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(1): 176-181. (in Chinese)
- [18] Sangster A G, Hodson M J. *Phytoliths: applications in earth sciences and human history*. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2001: 343-355.
- [19] Schoelynck J, Bal K, Backx H, Okruszko T, Meire P, Struyf E. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: A strategic choice between silica, lignin and cellulose. *New Phytologist*, 2010, 186(2): 385-391.
- [20] Kaufman P B, Takeoka Y, Carlson T J, Bigelow W C, Jones J D, Moore P H, Ghosheh N S. Studies on silica deposition in sugarcane (*Saccharum* spp.) using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray analysis, neutron activation analysis and light microscopy. *Phytomorphology*, 1979, 29(2): 185-193.
- [21] 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: 23-27.
- [22] Connolly J, Wayne P, Bazzaz F A. Interspecific competition in plants: How well do current methods answer fundamental questions. *American Naturalist*, 2001, 157(2): 107-125.

(责任编辑 王芳)