

氮磷钾不同施肥配方对退化高寒草原植物群落结构的影响*

杨路存^{1,2} 刘何春^{1,3} 李长斌^{1,3} 李 璠⁴ 徐文华^{1,2} 周国英^{1,2**}

(¹中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; ²中国科学院藏药研究重点实验室, 西宁 810001; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴青海省气象科学研究所, 西宁 810001)

摘要 以地处青海湖北岸三角城种羊场附近高寒退化的紫花针茅草原为对象, 研究了施肥对植物群落盖度、物种多样性和植物类群的影响。结果表明: 施肥后的第 2 年(2012 年)和第 3 年(2013 年)群落的总盖度显著高于施肥前(2011 年) ($P < 0.05$), 且随着施肥年限的增加, 群落的盖度也增加, 但不同处理增加的幅度不一致; 与不施肥相比, 不同的施肥处理在 2 年和第 3 年物种丰富度逐渐减小; 施肥后 Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 均匀度指数的变化无明显规律; 不同植物类群对施肥的响应亦不同, 施肥后第 2 年和第 3 年不同施肥处理间禾草类和杂类草生物量均显著增加 ($P < 0.05$), 而莎草类和豆科变化不明显。

关键词 高寒草原; 施肥; 盖度; 多样性; 地上生物量

中图分类号 S143 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)1-0025-08

Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on plant community structure in a degraded alpine steppe. YANG Lu-cun^{1,2}, LIU He-chun^{1,3}, LI Chang-bin^{1,3}, LI Fan⁴, XU Wen-hua^{1,2}, ZHOU Guo-ying^{1,2**} (¹Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; ²Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Institute of Qinghai Meteorological Science Research, Xing 810001, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 25–32.

Abstract: Effects of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizations on plant community coverage, plant diversity and economic herbage groups in a degraded alpine steppe on the northern shore of Qinghai Lake was examined during 2011–2013 in the present study. The three-year results showed that the total plant community coverage of fertilized treatments in the second (2012) and third year (2013) was significantly higher than that in the first year (2011). Meanwhile, plant community coverage also increased as the fertilization continued, but different fertilization treatments showed distinct responses in comparison with no fertilization treatment. All fertilization treatments reduced the species richness of community, and the species richness decreased as the fertilization continued. However, there was no consistent pattern in the change of Simpson index, Shannon index and Pielou evenness index after fertilization. Different economic groups responded distinctly to fertilization. The aboveground biomass of grass and forb species increased significantly ($P < 0.05$) in the second and third years after fertilization, while that of sedge and legume species had no obvious change after fertilization.

Key words: alpine grassland; fertilization; coverage; diversity; aboveground biomass.
DOI:10.13292/j.1000-4890.2015.0005

* 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB026105)、国家科技部基础性专项(2008FY110200)和国家自然科学基金项目(40801076)资助。

** 通讯作者 E-mail: zhougy@nwipb.cas.cn

收稿日期: 2014-05-15 接受日期: 2014-09-18

青海湖流域拥有丰富的草地资源,是青海省乃至青藏高原的重要牧区,境内有天然草地 $213.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占流域总面积的 72%,其中温性草原、高寒草原、高寒草甸、高寒沼泽草甸、轻度盐渍化草甸等草地类型是青海草地的主要类型,不仅具有极高的经济利用价值,也是维护青海湖流域生态安全的重要屏障(陈桂琛 2008)。近 30 年来,由于人为和自然因素的双重作用,青海湖流域出现了严重退化。目前青海湖流域退化草地面积已达草地总面积的 49% 以上,其中重度、中度退化草地占退化草地的 34.9% 以上(冯宗炜等 2004;俞文政等 2005),这不仅破坏了当地藏族赖以生息的草地畜牧业基础,也将对整个青藏高原地区产生不利的生态影响。导致青海湖草地退化的最根本原因是超载过牧和不合理利用。要解决草地退化问题,单纯大幅度地削减家畜数量的办法难以奏效,因为这样做很可能会减少牧民的收入而使其保护生态的积极性受到影响。在现阶段寻求草畜平衡的主要途径,应在提高草地系统第一性生产力上大做文章。大量的试验研究和生产实践证明,施肥是提高草地生产力的主要途径之一(陈亚明等 2004;李本银等 2004;邱波等, 2004;马涛等,2007;郑华平等,2007;王高峰等, 2010;韩潼等 2011)。草地施肥通过补充土壤营养物质,不仅能显著增加草地初级生产力,而且能改善草地植物的营养品质(纪亚君 2002)。在高寒草地施肥、封育和划破草皮 3 种改良措施中,施肥对草地可食牧草产量的增加最为显著(沈景林等,1999)。到目前为止,关于施肥对高寒草地的影响都集中于高寒草甸(沈振西等 2002;陈亚明等 2004;邱波等, 2004;仁青吉等 2004;马涛等 2007;韩潼等 2011)。本文于 2011 年开始在青海湖流域北岸开展了中度退化高寒草原施肥试验,主要探讨施肥对高寒草原群落结构的影响,这不仅具有重要的理论价值,而且对合理利用高寒草原具有现实意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

青海湖位于青藏高原东北部,是中国最大的高原内陆微咸水湖。位于 $36^{\circ}15'N-38^{\circ}20'N, 97^{\circ}50'E-101^{\circ}20'E$,四周为高山环绕的封闭式山间内陆盆地。全区有布哈河等 50 余条大小河流分布。湖区属典型的高原大陆性气候,具有寒冷期长,太阳辐射强,气温日较差较大,干旱少雨,降水比较集中等特点。据刚察县气象观测资料分析,多年均温 $-0.5^{\circ}C$,极端最高温 $25^{\circ}C$,极端最低温 $-31^{\circ}C$, $\geq 0^{\circ}C$ 年积温为 $1299^{\circ}C$,多年平均降水量 370.3 mm ,年蒸发量 607.4 mm ,平均风力 >8 级,最大冻土深度 2188 m ,土壤以栗钙土为主(刘小园 2004)。青海湖境内复杂的地貌类型及青海湖存在对植被特征及其分布有重要影响。流域的自然植被有寒温性针叶林、河谷灌丛、高寒灌丛、沙生灌丛、温性草原、高寒草原、高寒草甸、沼泽草甸、高寒流失坡植被等。本研究的研究区位于青海湖北岸三角城种羊场附近,是一片大约 5000 m^2 左右的中度退化的高寒草原,样地地形开阔,微地形差异小。施肥处理前试验样地土壤营养状况如表 1。

1.2 试验设计

选择地势平坦,植被分布均匀的中度退化紫花针茅高寒草原为研究对象,该草原设围栏保护,主要为冬季牧场。本试验采用“3414”施肥方案,即 3 因素(氮、磷、钾)、4 水平(0、1、2、3),14 个处理(表 1),每个处理重复 3 次。试验采用随机区组设计,3 次重复,共 42 个小区,小区面积 60 m^2 ($6 \text{ m} \times 10 \text{ m}$),小区间有 2 m 的缓冲带间隔,各小区施肥配比见表 2。做施肥处理前对试验区做基础调查,后将肥料水溶后喷施到小区。从 2011 年开始,每年 6 月进行施肥,然后于每年 8 月进行群落和生物量调查。

1.3 野外调查

野外植被调查时,每个小区中采用对角线随机

表 1 样地土壤理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of the soil in the sample plot

土壤深度 (cm)	pH	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0~10	8.41	36	2.57	0.55	17.52	22.61	2.86	145.54
10~20	8.45	29	2.06	0.53	17.08	18.76	2.33	90.79
20~30	8.54	20	1.46	0.48	15.77	13.34	2.11	69.73
30~40	8.62	15	1.05	0.47	15.14	10.11	1.40	61.18
40~50	8.74	12	0.80	0.46	15.38	8.10	1.77	46.22

表2 3414 施肥试验设计 (g · m⁻²)
Table 2 Schematic design of "3414" experiment

编号	处理	尿素	过磷酸钙	硫酸钾
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	40	30
3	N ₁ P ₂ K ₂	12.5	40	30
4	N ₂ P ₀ K ₂	25	0	30
5	N ₂ P ₁ K ₂	25	20	30
6	N ₂ P ₂ K ₂	25	40	30
7	N ₂ P ₃ K ₂	25	60	30
8	N ₂ P ₂ K ₀	25	40	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	25	40	15
10	N ₂ P ₂ K ₃	25	40	45
11	N ₃ P ₂ K ₂	37.5	40	30
12	N ₁ P ₁ K ₂	12.5	20	30
13	N ₁ P ₂ K ₁	12.5	40	15
14	N ₂ P ₁ K ₁	25	20	15

下标为养分施用量水平 0 水平为不施肥 1 水平为低施肥 2 水平为中施肥 3 水平为高施肥。

布设 1 m × 1 m 的样方,记录其上所有物种,为了防止边缘效应,限制样方离边界至少 50 cm;用目测法测量样方内每个植物种的盖度,直尺测量植株高度,每种植物测 10 个;地上生物量测定时,另取 25 cm × 25 cm 的样方框在每个小区任取 3 个重复小样方,齐地剪割,按功能群分类后装入信封,置于恒温箱(75 °C)烘干至恒重,称量;样地植物按牲畜适口性分为 4 个植物类群(沈振西,2002):禾草类包括紫花针茅、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)和扁穗冰草(*Agropyron cristatum*);莎草类包括青海苔草(*Carex qinghaiensis*);豆科类包括甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)和小叶黄芪(*Hedysarum polybotrys*);杂草类包括猪毛蒿(*Artemisia scparia*)、异叶青兰(*Dracocephalum heterophyllum*)、三幅柴胡(*Bupleurum triradiatum*)、多裂委陵菜(*Potentilla multifida*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)和楔叶委陵菜(*Potentilla cuneata*)等。

1.4 植物多样性测度

1.4.1 物种丰富度指数 物种丰富度与样方面积大小有关,但二者却没有确定的函数关系。一般用单位面积的物种数(即物种密度),或者用每平方米的物种数表示(高贤明等,1998)。本研究中物种丰富度指数用 1 m²样方内出现的物种数表示(杨利民等,2001),即:物种丰富度指数 = 出现在 1 m²样方内的物种数。

1.4.2 重要值计测 重要值 = (相对频度 + 相对盖度 + 相对植株平均高度) / 3。式中,相对频度 = (该种的频度 / 所有种的频度总和) × 100; 相对盖度

= (某物种的盖度 / 全部种的盖度之和) × 100; 相对植株平均高度 = (某物种植株平均高度 / 全部种植株平均高度之和) × 100。

1.4.3 多样性测定 采用最常用的 Simpson 指数、Shannon 指数和 Pielou 均匀度指数进行多样性的测度。其计算公式分别为:

$$\text{Simpson 指数} = 1 - \sum P_i^2$$

$$\text{Shannon 指数} = - \sum P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

式中, P_i 为 i 种的相对重要值, S 为种 i 所在样方的物种总数,即物种丰富度指数(杨利民等,2001;李新荣等,2000)。

1.5 数据处理

用 SPSS(16.0 版)对试验数据进行统计分析。以施肥作为固定因素,区组作为随机因素,用 SPSS 16.0-GLM 中 Univariate ANOVA 分析各处理因素对所测变量的影响。用多重比较中的最小显著差数法(LSD)或 Tamhane 检验法(方差不齐时)比较各处理间差异,检验施肥对物种丰富度、多样性指数以及对生物量的影响。检验显著水平设为 α = 0.05。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配施对植物群落特征的影响

2.1.1 氮磷钾配施对群落盖度的影响 由图 1 可以看出,施肥后的第 2 年(2012 年)和第 3 年(2013 年)群落的总盖度显著高于施肥前(2011 年)(P < 0.05),且随着施肥年限的增加,群落的盖度也是在增加,只是不同处理间增加的幅度不一致。施肥第

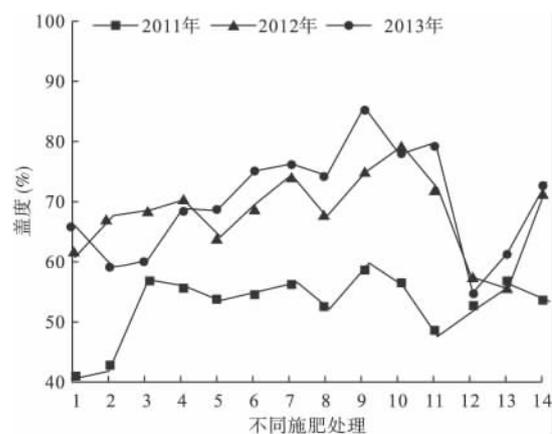


图 1 不同施肥年限不同施肥处理对群落总盖度的影响
Fig. 1 Effects of different fertilization treatments of different years on total community coverage

2年(图2) P_2K_2 施肥条件下,随着氮肥施用量的增加,盖度逐渐增大,以 $N_3P_2K_2$ 最高,较不施肥处理 ($N_0P_0K_0$) 分别提高 10.3%、11.9%、14.0% 和 18.6% ($P < 0.05$)。 N_2K_2 施肥条件下,随着磷肥施用量的增加,盖度逐渐增大,以 $N_2P_3K_2$ 最高,且 $N_2P_3K_2$ 与不施肥和 $N_2P_1K_2$ 间差异显著 ($P < 0.05$)。 N_2P_2 施肥条件下,随着钾肥施用量的增加,盖度逐渐增大,以 $N_2P_2K_3$ 的盖度最高,且它与不施肥、 $N_2P_2K_0$ 和 $N_2P_2K_2$ 之间的差异都显著 ($P < 0.05$) (图2)。施肥第3年(图3) P_2K_2 施肥条件下,随着氮肥施用量

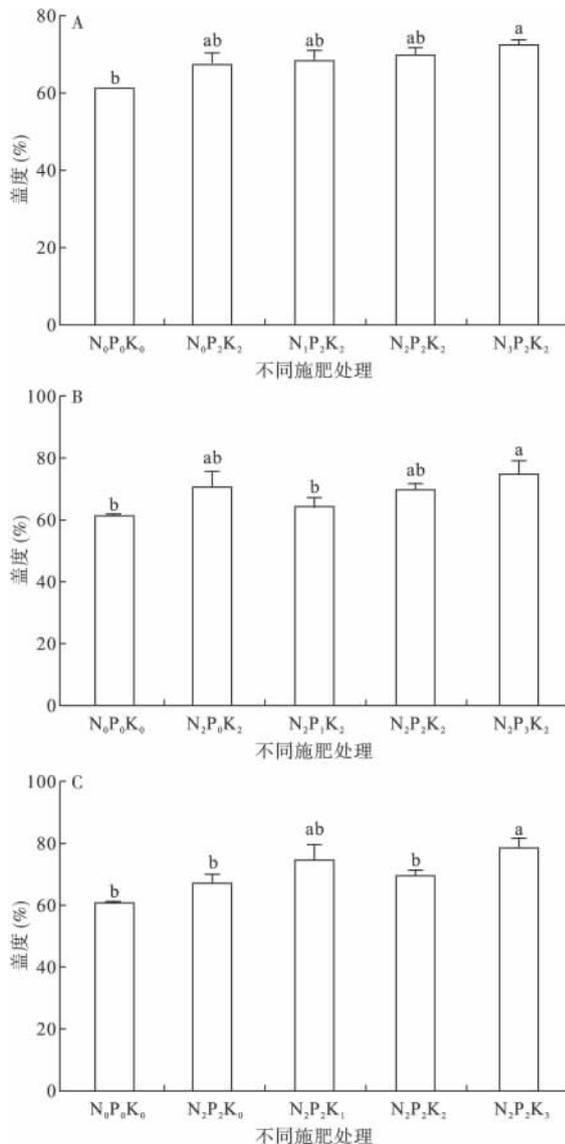


图2 施肥第2年不同施肥处理对盖度的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on total community coverage in second year of fertilization

A: P_2K_2 施肥条件下, N 的增加对盖度的影响; B: N_2K_2 施肥条件下, P 的增加对盖度的影响; C: N_2P_2 施肥条件下, K 的增加对盖度的影响。

的增加,盖度逐渐增大,以 $N_3P_2K_2$ 最高,且 $N_3P_2K_2$ 和 $N_2P_2K_2$ 水平与 $N_1P_2K_2$ 、 $N_0P_2K_2$ 和不施肥间差异显著 ($P < 0.05$)。 N_2K_2 施肥条件下,随着磷肥施用量的增加,盖度逐渐增大,以 $N_2P_3K_2$ 最高,且 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 与不施肥间差异显著 ($P < 0.05$)。 N_2P_2 施肥条件下,以 $N_2P_2K_1$ 的盖度为最高,且它与不施肥、 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_2K_2$ 间的差异显著 ($P < 0.05$) (图3)。

2.1.2 氮磷钾配施对群落多样性的影响 对施肥第2年(2012) 1 m^2 面积中不同施肥水平下物种丰富度进行 LSD 分析,虽然未施肥水平与各种施肥水平相比,物种丰富度差异不显著,但是各种施肥处理

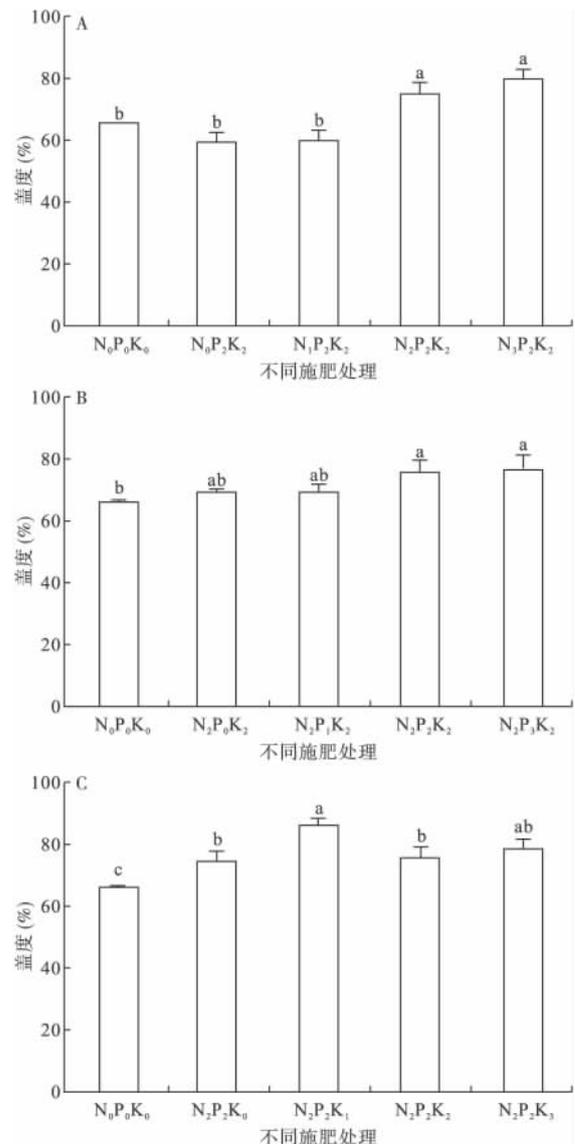


图3 施肥第3年不同施肥处理对盖度的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on total community coverage in third year of fertilization

A: P_2K_2 施肥条件下, N 的增加对盖度的影响; B: N_2K_2 施肥条件下, P 的增加对盖度的影响; C: N_2P_2 施肥条件下, K 的增加对盖度的影响。

(处理 11 和 14 除外) 均可使退化草地植物群落的物种丰富度减少。到施肥的第 3 年(2013), LSD 分析结果与 2012 年相似。此外, 2013 年与 2012 年相比, 种丰富度随着施肥年限的增加而减小(图 4)。

施肥对草地生态系统而言, 其作用主要是增加了土壤的有效资源, 改变了植物地上、地下的竞争强度, 进而引起植物群落多样性格局的变化。由表 3 可知, 在施肥第 2 年, K_2P_2 施肥条件下, 随着氮肥施用量的增加, Simpson 指数也在增加, 以 $N_3K_2P_2$ 最高, 但各处理间差异不显著。Shannon 指数随氮肥施量增加呈“V”型变化, Shannon 指数的最大值出现在氮 3 水平中, 最低值为氮 1 水平。Pielou 均匀度指数的变化与 Shannon 指数相似。在施肥第 3 年, 除 Simpson 指数外(Simpson 指数呈“V”型变化), 其余 2 个多样性指数的变化与 2012 年相似。不同年度之间相比, Simpson 指数和 Shannon 指数均在增大, 而 Pielou 均匀度指数则变小。

2.2 氮磷钾配施对植物类群的影响

不同植物类群对施肥的响应不同。表现在不同施肥年份不同施肥水平下禾草类、莎草类、豆科和杂类草 4 个类群 1 m^2 面积中地上生物量干重的不同。施肥后的第 2 年和第 3 年禾草类、杂类草和莎草类地上生物量(干重)比施肥前都有所增加, 而且禾草类和杂类草的增加较显著($P < 0.05$), 豆科有时增加, 有时减少, 无规律性(表 4)。在相同年份, 不同类群的生物量对不同施肥处理的响应也不同。由表 4 可知, 施肥第 2 年, 禾草类产量以处理 7($N_2P_3K_2$) 最高, 达到 $97.62\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 比最低产量处理 12($N_1P_1K_2$) 高出 $58.81\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$), 与处理 1

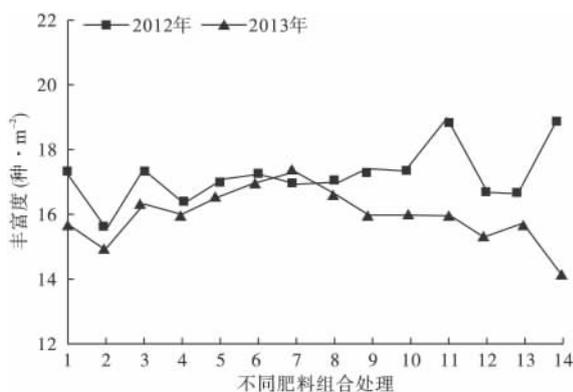


图 4 不同施肥年限不同施肥处理对群落物种丰富度的影响
Fig. 4 Effects of different fertilization treatments of different years on richness

($N_0P_0K_0$) 对照相比增产 44.61% ($P < 0.05$)。莎草类产量以处理 9($N_2P_2K_1$) 最高, 达到 $15.57\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 比最低产量处理 11($N_3P_2K_2$) 高出 $12.32\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$), 与处理 1($N_0P_0K_0$) 对照相比增产 68.13% ($P > 0.05$)。杂类草产量以处理 10($N_2P_2K_3$) 最高, 达到 $92.30\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 比最低产量处理 12($N_1P_1K_2$) 高出 $58.05\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$), 与处理 1($N_0P_0K_0$) 对照相比增产 4.5% ($P > 0.05$)。在施肥的第 2 年, (除 N_2K_2 施肥条件下, 禾草随着施磷量的增加生物量呈增加趋势, 且与对照差异显著($P < 0.05$) 外), P_2K_2 、 N_2K_2 和 N_2P_2 施肥条件下, 禾草、莎草、豆科以及杂类草均未呈现规律性的变化。

施肥第 3 年, 禾草类产量以处理 11($N_3P_2K_2$) 最高, 达到 $99.92\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 比最低产量处理 3($N_1P_2K_2$) 高出 $65.17\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$), 与处理 1($N_0P_0K_0$) 对照相比增产 41.96% ($P < 0.05$)。莎草类产量以处理 9($N_2P_2K_1$) 最高, 达到 $14.68\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 比最低产量处理 11($N_3P_2K_2$) 高出 $7.23\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$), 与处理 1($N_0P_0K_0$) 对照相比增产 61.48% ($P > 0.05$)。杂类草产量以处理 9($N_2P_2K_1$) 最高, 达到 $114.88\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 比最低产量处理 3($N_1P_2K_2$) 高出 $60.09\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$), 与处理 1($N_0P_0K_0$) 对照相比增产 72.07% ($P < 0.05$)。到了施肥第 3 年, 在 P_2K_2 、 N_2K_2 和 N_2P_2 施肥条件下, 随着氮肥、磷肥施用量的增加, 禾草的生物量都呈先减小后增加的趋势; 莎草的生物量随着氮肥的增加呈先增加后减小的趋势, 而随着

表 3 施肥水平对群落多样性的影响
Table 3 Effects of fertilization levels on community diversity

不同施肥处理	Simpson 指数		Shannon 指数		Pielou 均匀度指数	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013
1	0.898	0.923	2.551	2.749	0.920	0.917
2	0.903	0.916	2.531	2.720	0.912	0.908
3	0.909	0.921	2.630	2.722	0.909	0.924
4	0.906	0.925	2.537	2.780	0.937	0.928
5	0.912	0.920	2.638	2.728	0.931	0.910
6	0.915	0.929	2.697	2.847	0.916	0.921
7	0.913	0.932	2.662	2.912	0.921	0.916
8	0.909	0.887	2.590	2.523	0.934	0.828
9	0.908	0.919	2.586	2.686	0.913	0.929
10	0.911	0.898	2.621	2.539	0.925	0.847
11	0.923	0.924	2.780	2.768	0.928	0.924
12	0.911	0.921	2.625	2.707	0.926	0.936
13	0.894	0.923	2.440	2.728	0.861	0.943
14	0.913	0.920	2.666	2.725	0.922	0.909

表4 不同施肥年限不同施肥处理对植物类群地上生物量的影响($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

Table 4 Effects of different fertilization treatments of different years on aboveground biomass

不同处理	禾草类生物量			沙草类生物量			杂类草生物量			豆科		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
1	16.32 b ±1.20	67.50 b ±6.49	70.06 b ±5.70	6.35 a ±3.91	9.26 ab ±4.21	9.09 a ±2.41	36.98 a ±7.04	88.30 a ±8.43	66.76 b ±7.71	1.28	7.36	4.40
2	24.44 ab ±3.90	62.51 b ±9.10	51.43 bc ±4.60	3.88 ac ±1.08	7.52 b ±1.41	8.90 a ±0.46	34.36 a ±6.14	53.10 b ±6.59	55.73 b ±2.34	4.11	8.48	15.12
3	26.58 a ±2.03	42.10 b ±10.05	34.76 c ±7.26	8.14 a ±0.53	12.16 ab ±2.68	11.57 a ±1.63	31.14 a ±7.18	50.79 b ±4.59	54.79 b ±8.87	7.07	20.64	26.24
4	25.16 a ±2.40	68.84 ab ±9.54	68.71 b ±7.78	6.18 a ±0.63	7.36 b ±2.47	11.57 a ±3.42	25.45 a ±7.02	71.45 a ±4.69	62.42 b ±5.83	4.80	0.00	12.16
5	17.60 b ±3.75	80.20 ab ±11.5	64.12 bc ±13.54	3.70 a ±1.16	3.64 b ±2.11	8.30 a ±2.62	47.38 a ±10.30	64.16 ab ±7.27	93.21 ab ±16.41	4.77	0.00	11.36
6	22.56 ab ±3.59	95.75 ab ±13.27	57.64 bc ±6.29	8.93 a ±2.40	5.42 b ±3.27	7.72 a ±2.00	36.19 a ±2.61	89.67 a ±11.53	103.36 ab ±14.14	2.50	0.00	9.16
7	25.11 b ±1.34	97.62 a ±19.76	96.82 ab ±13.45	5.16 a ±0.48	6.15 b ±0.84	7.54 a ±2.79	32.59 a ±7.42	86.74 a ±16.10	106.22 ab ±12.59	4.36	20.40	0.00
8	23.73 ab ±1.31	71.41 ab ±13.62	57.81 b ±1.43	5.18 a ±1.37	11.48 ab ±4.15	8.80 a ±2.46	27.77 a ±4.48	81.24 ab ±16.87	109.62 ab ±13.00	7.95	7.84	3.79
9	21.99 ab ±0.40	75.47 ab ±11.93	84.41 ab ±14.89	6.30 a ±1.57	15.57 a ±1.21	14.68 a ±3.26	26.95 a ±1.62	86.62 a ±18.91	114.88 a ±15.97	0.00	0.00	22.24
10	16.34 b ±1.55	83.89 ab ±10.41	70.35 b ±3.22	4.68 a ±0.86	6.45 b ±4.00	11.96 a ±3.75	35.88 a ±1.91	92.30 a ±14.65	110.26 ab ±15.28	5.25	0.00	15.12
11	15.18 b ±0.95	84.50 ab ±11	99.93 a ±12.27	4.17 a ±0.84	3.25 b ±1.12	7.46 a ±1.81	36.85 a ±2.91	81.28 ab ±8.32	83.61 ab ±14.12	6.36	0.00	14.87
12	20.46 a ±4.01	63 38.81 b ±6.96	39.86 c ±10.09	5.17 a ±0.77	13.90 ab ±0.76	12.75 a ±3.02	31.34 a ±0.48	34.22 b ±3.12	57.19 b ±6.27	4.56	0.00	0.41
13	21.71 ab ±0.54	56.14 b ±5.35	52.66 bc ±3.05	7.65 a ±3.22	13.60 ab ±3.17	9.72 a ±2.27	31.01 a ±2.71	80.11 ab ±15.03	74.86 ab ±10.79	2.93	0.00	0.00
14	16.23 b ±3.19	71.32 ab ±16.43	57.19 bc ±10.92	5.03 a ±1.12	6.52 b ±1.66	13.5 a ±0.74	38.67 a ±1.45	66.22 ab ±8.52	98.76 ab ±12.17	6.24	7.04	3.65

同一列中不同的小写字母代表不同处理间的差异显著性($P < 0.05$)。由于豆科类植物在样方中时时有时无,所以无法进行统计分析。

磷肥施用量的增加呈现减少的趋势;杂类草的生物量除随着磷肥施用量的增加而增加之外,其余2个的规律不明显。

3 讨论

3.1 氮磷钾配施对群落盖度的影响

植被盖度及其变化是全球变化与陆地生态系统响应研究中最复杂和最具活力的研究内容,是衡量草地退化的有效指标(潘耀忠和李晓兵,2000)。本研究表明,施肥后使植物群落总盖度由原来的53.09%增加到2012年的68.32%和2013年的70.23%,分别提高了28.68%和32.29%,这一点与众多文献(高中超等,2007;李禄军等,2010;韩潼等,2011)的结论是一致的。此外,试验结果表明,高的氮肥和高的磷肥均能较好的提高群落的盖度。本试验以 $\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$ 、 $\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$ 和 $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$ 的处理为最高。

3.2 氮磷钾配施对群落多样性的影响

许多研究表明,施肥可降低植物种丰富度,本研究中,与不施肥相比,施肥处理下植物种的物种丰富度下降,这与前人的研究结论一致。同时,许多研究表明,对植物群落施肥常导致多样性减少(Foster et al.,1998;江小蕾等,2004) 陈亚明等(2004)研究认

为,施肥使高寒草甸物种丰富度、Simpson指数、Shannon指数和Pielou均匀度指数均显著降低。但也有学者研究认为,施肥增加了物种数量和多样性(程积民等,1996;程积民等,1997;沈景林等,1999;孙斌,2006)。造成2种不同结果的原因是施肥群落的退化演替阶段不同。在退化严重的草地,土壤养分的增加与生物多样性指数的增大呈正相关关系(李新荣等,2000)。土壤基质条件的改善有助于植物多样性的增加与恢复,但随着演替的进一步发展,物种多样性的增加可能导致种间及种内的竞争程度不同,有可能反过来抑制物种多样性的增加,因而导致植物多样性减少。本研究中,随着施肥年限的增加,群落物种丰富性和均匀度均降低,这与草地施肥后其群落向紫花针茅单优势种群落快速演替的实际相一致。此外,相同年限不同施肥处理间多样性指数没有明显的规律性,这可能与施肥时间较短有关。

3.3 氮磷钾配施对植物类群地上生物量的影响

施肥可有效改善质地贫瘠的草地营养,降低了物种对限制资源的竞争强度,从而提高草地生产力(Best et al.,2001)。因此,施肥是退化草地植被恢复以及提高草地生产力的最有效和首选措施之一。无论是在人工草地,还是在天然草场,采用施肥措

施 能够对退化草地植物生物量有明显的促进作用 (陈亚明等 2004; 邱波等 2004; 孙斌 2006; 郑华平等 2007; 韩潼等 2011)。本试验中, 施肥对紫花针茅退化草地植被生物量的形成有非常显著的促进作用, 这与许多文献(陈亚明等 2004; 李本银等 2004; 邱波等 2004; 郑华平等 2007; 王高峰等 2010; 韩潼等 2011) 的结论相一致。然而, 许多研究表明, 施肥后禾草类和莎草类生物量显著增加, 而杂类草和豆科生物量下降。本研究中, 禾草类、杂类草和莎草类生物量增加, 豆科无规律性, 形成这种差异的原因可能有以下几点: (1) 退化演替阶段不一致; (2) 所用的研究方法不一致(如本研究用“3414”施肥方案); (3) 研究对象不一致, 先前关于高寒草地的施肥研究都集中于高寒草甸, 很少有人研究退化的紫花针茅高寒草原。此外, 尽管不同的施肥处理都能提高草地的地上生物量, 但是由上述数据很难给出适合于青海湖地区紫花针茅退化草地的最佳施肥配比(如: 在施肥的第 2 年, 禾草类产量以处理 7 ($N_2P_3K_2$) 最高, 莎草类产量以处理 9 ($N_2P_2K_1$) 最高, 杂类草产量以处理 10 ($N_2P_2K_3$) 最高, 而在施肥的第 3 年, 禾草类产量以处理 11 ($N_3P_2K_2$) 最高, 莎草类和杂类草的产量以处理 9 ($N_2P_2K_1$) 最高)。针对这个问题, 我们将进行长期定位试验, 找出适合当地条件的最佳施肥配比、施肥量、施肥时期和施肥方式, 对因地制宜指导草地生产将有重要的理论和实践意义。

4 结 论

施肥后的第 2 年(2012 年) 和第 3 年(2013 年) 群落的总盖度显著高于施肥前(2011 年) ($P < 0.05$), 且随着施肥年限的增加, 群落的盖度也是在增加, 只是不同处理间增加的幅度不一致, 高的氮肥和高的磷肥均能较好的提高群落的盖度。本试验以 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 和 $N_2P_2K_1$ 的处理为最高。

随着施肥年限的增加, 群落物种丰富度和均匀度都降低。相同年限不同施肥处理间多样性指数没有明显的规律性。

施肥对紫花针茅退化草地植被生物量的形成有非常显著的促进作用, 施肥后的第 2 年和第 3 年禾草类、杂类草和莎草类地上生物量(干重) 比施肥前都有所增加, 而且禾草类和杂类草的增加较显著 ($P < 0.05$), 豆科无规律性。在相同年份, 不同植物类群的生物量对不同施肥处理的响应也不同。施肥第 2 年, 禾草类产量以处理 7 ($N_2P_3K_2$) 最高达到

97.62 $g \cdot m^{-2}$ 。莎草类产量以处理 9 ($N_2P_2K_1$) 最高达到 15.57 $g \cdot m^{-2}$ 。杂类草产量以处理 10 ($N_2P_2K_3$) 最高达到 92.30 $g \cdot m^{-2}$ 。施肥第 3 年, 禾草类产量以处理 11 ($N_3P_2K_2$) 最高达到 99.92 $g \cdot m^{-2}$ 。莎草类产量以处理 9 ($N_2P_2K_1$) 最高达到 14.68 $g \cdot m^{-2}$ 。杂类草产量以处理 9 ($N_2P_2K_1$) 最高达到 114.88 $g \cdot m^{-2}$ 。

参考文献

- 陈桂琛. 2008. 青海湖流域生态环境保护与修复. 西宁: 青海人民出版社.
- 陈亚明, 李自珍, 杜国祯. 2004. 施肥对高寒草甸植物多样性和经济类群的影响. 西北植物学报, 24(3): 424 - 429.
- 程积民, 贾恒义, 彭祥林. 1997. 施肥草地群落生物量结构的研究. 草业学报, 6(2): 22 - 27.
- 程积民, 贾恒义. 1996. 施肥草地植被群落结构和演替的研究. 水土保持研究, 3(4): 124 - 128.
- 冯宗炜, 冯兆忠. 2004. 青海湖流域主要生态环境问题及防治对策. 生态环境, 13(4): 467 - 469.
- 高贤明, 马克平. 1998. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: IX. 山地草甸 β 多样性. 生态学报, 18(1): 24 - 32.
- 高中超, 迟凤琴, 赵 秋. 2007. 施肥对退化草原植物群落产量及土壤理化性质的影响. 草原与草坪, (2): 60 - 62.
- 韩 潼, 牛得草, 张永超, 等. 2011. 施肥对玛曲县高寒草甸植物多样性及生产力的影响. 草业科学, 28(6): 926 - 930.
- 纪亚君. 2002. 青海高寒草地施肥的研究概况. 草业科学, 19(5): 14 - 18.
- 江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 等. 2004. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响. 西北植物学报, 23(9): 1479 - 1485.
- 李本银, 汪金筋, 赵世杰, 等. 2004. 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响. 中国草地, 26(1): 14 - 17.
- 李禄军, 于占源, 曾德慧, 等. 2010. 施肥对科尔沁沙质草地群落物种组成和多样性的影响. 草业学报, 19(2): 109 - 115.
- 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 2000. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学报, 24(3): 257 - 261.
- 刘小园. 2004. 青海湖流域水文特征. 水文, 24(2): 60 - 61.
- 马 涛, 武高林, 何彦龙, 等. 2007. 青藏高原东部高寒草甸群落生物量和补偿能力对施肥与刈割的响应. 生态学报, 27(6): 2288 - 2293.
- 潘耀忠, 李晓兵. 2000. 中国土地覆盖综合分类研究: 基于

- NOAA/AVHRR 和 Holdridge PE. 第四纪研究, **20**(3): 270-281.
- 邱波, 罗燕江. 2004. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, **40**(3): 56-59.
- 仁青吉, 罗燕江, 王海洋, 等. 2004. 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, **13**(2): 43-49.
- 沈景林, 胡文良. 1999. 高寒地区退化草地改良试验研究. 草业学报, **8**(1): 9-14.
- 沈振西, 陈佐忠, 周兴民, 等. 2002. 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, **10**(1): 7-17.
- 孙斌. 2006. 三种改良措施对高寒退化草地植被的影响. 甘肃农业大学学报, **40**(6): 797-801.
- 王高峰, 安沙舟. 2010. 施肥对退化草甸草地土壤肥力和牧草群落结构及产量的影响. 现代农业科技, (9): 278-279.
- 杨利民, 韩梅, 李建东. 2001. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化. 植物生态学报, **25**(1): 110-114.
- 俞文政, 常庆瑞, 岳庆玲, 等. 2005. 青海湖流域草地类型变化及其结构演替研究. 中国农学通报, **21**(4): 306-309.
- 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 2007. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响. 草业学报, **16**(5): 34-39.
- Best EP, Jacobs F. 2001. Production, nutrient availability, and elemental balances of two meadows affected by different fertilization and water table regimes in the Netherlands. *Plant Ecology*, **155**: 61-73.
- Foster BL, Gross KL. 1998. Species richness in a successional grassland: Effects of nitrogen enrichment and plant litter. *Ecology*, **71**: 2593-2602.
-
- 作者简介 杨路存,女,1981年生,博士,助理研究员,研究方向为生态学。E-mail: yanglucun@nwipb.cas.cn
责任编辑 王伟
-