

青藏高原高寒草甸植物群落结构和功能 对氮、磷、钾添加的短期响应

杨月娟^{1,2}, 周华坤^{1*}, 叶鑫^{2,3}, 姚步青¹, 王文颖⁴, 赵新全¹, 张灏⁵

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4 青海师范大学, 西宁 810008; 5 山西农业大学, 山西太谷 030801)

摘要:对中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站的矮嵩草草甸水肥样地进行了氮、磷、钾及其组合的施肥处理,研究了施肥对植物群落结构和功能的影响。结果表明:(1)施肥使矮嵩草草甸植物群落物种丰富度减少,不同施肥处理下物种丰富度大小分别为:对照>钾>磷>氮>氮磷>磷钾>氮钾>氮磷钾。(2)在氮磷配合施肥处理下,矮嵩草草甸植物群落 Shannon-Wiener 指数显著高于对照,而其它施肥处理对 Shannon-Wiener 指数影响不显著。(3)在同一施肥处理下,禾草类和莎草类的重要值明显高于豆科和杂类草功能群,不同施肥处理使禾草、莎草、豆科植物的重要值增加,而杂类草重要值减少。(4)与对照相比,不同施肥(除钾外)处理可不同程度的增加植物群落的高度。(5)除钾、磷钾养分添加对矮嵩草草甸地上生物量的影响与对照差异不显著外,其它养分及其组合添加都极显著增加了群落地上生物量,且大小顺序依次为氮磷>氮磷钾>磷>氮钾>氮>磷钾>钾>对照。(6)施用不同种类的肥料后,矮嵩草草甸各功能群地上生物量的比例变化明显,禾草和莎草的比例均增加,杂类草的比例减少,而豆科植物无规律性。(7)熵值法综合评价短期施肥处理对矮嵩草草甸群落的影响表明,氮磷、氮磷钾配合施肥是青藏高原高寒草甸最佳施肥选择。

关键词:施肥;高寒草甸;生产力;物种多样性;熵值法

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

Short-term Responses of Plant Community Structure and Function to Nitrogen, Phosphorus and Potassium Additions in an Alpine Meadow of Qinghai-Xizang Plateau

YANG Yuejuan^{1,2}, ZHOU Huakun^{1*}, YE Xin^{2,3}, YAO Buqing¹,
WANG Wenyong⁴, ZHAO Xinquan¹, ZHANG Hao⁵

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4 Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 5 Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: Different fertilization approaches were used in the *Kobresia humilis* Meadow in Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station in order to study the impacts on plant community structure and function. The results showed that: (1) Fertilization reduced the species richness, ranked in the following order: controlled trial > potassium > phosphorus > nitrogen > nitrogen-phosphorus > phosphorus-potassium > nitro-

收稿日期: 2014-07-09; **修改稿收到日期:** 2014-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(31172247, 31201836); 青海省自然科学基金(2013-Z-916); 国家科技支撑课题专题(2011BAC09B06-02; 2014BAC05B03; 2012BAD13B01); 中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05070202); 青海省重点实验室发展专项资金(2013-Z-Y07; 2014-Z-Y01)

作者简介: 杨月娟(1988-), 女, 在读硕士研究生, 主要进行高寒草地气候变化生态学研究。E-mail: yangyuejuan198907@163.com

* 通信作者: 周华坤, 研究员, 主要从事高寒草地生态学研究。E-mail: 729492987@qq.com

gen-potassium> nitrogen-phosphorus-potassium. (2) The treatment, Shannon-Wiener index of nitrogen-phosphorus fertilization treatment was significantly higher than that of the controlled trial ($P<0.05$), while the other treatments had no significant effects on the Shannon-Wiener index. (3) Under the same fertilizer treatment, the important value of Gramineae, Cyperaceae and Leguminosae increased, but Forbs reduced; the important values of Gramineae and Cyperaceae were obviously higher than those of Leguminosae and Forbs. (4) Different fertilization (except potassium) treatments increased *K. humilis* meadow plant community height. (5) Potassium and phosphorus-potassium adding had no significant difference ($P>0.05$), while other nutrients and the combination of nutrients significantly increased *K. humilis* community aboveground biomass ($P<0.01$), and the order was that: nitrogen-phosphorus> nitrogen-phosphorus-potassium> phosphorus> nitrogen-potassium> nitrogen> phosphorus-potassium> potassium> controlled trial. (6) Under the different kinds of fertilizer, functional groups biomass ratio of *K. humilis* meadow changed significantly, Gramineae and Cyperaceae increased, Forbs reduced, and Leguminosae had no general rules. (7) Nitrogen-phosphorus and nitrogen-phosphorus-potassium were the best fertilization choices in this alpine *K. humilis* meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, when comprehensive evaluated using the Entropy method.

Key words: fertilizer; alpine meadow; productivity; species diversity; entropy method

高寒草甸由于其特殊地理和气候条件,生态系统脆弱^[1],近年来由于过度放牧及气候变暖等原因^[2-3],草地退化和鼠害频繁,生态系统稳定性降低^[4-5]。围栏封育、短期休牧等措施可以达到合理利用草地和防止草地退化的目的。但针对大面积退化草地的恢复重建,最迫切的任务是提高退化草地的土壤肥力,改善群落的种群结构^[6]。草地施肥是维持草地生态系统养分平衡的有效措施^[7],是目前加速退化草地恢复重建的关键技术措施之一^[8]。合理的草地施肥可以提高牧草的生物量和品质,有助于草地生产力的恢复和提高^[9-10]。近年来,中国牧草施肥研究及推广应用迅速发展,研究表明,氮、磷、钾及中微量元素肥料合理施用可以明显促进牧草产量和食草动物的生长发育^[11]。施肥对牧草产量的影响不仅与施肥量有关,还与肥料种类的选择、施肥时间、施肥方法有关,而且地区气候条件也会影响牧草产量^[12]。目前,高寒草甸生态系统的恢复与重建受到广泛关注:陈亚明等^[13]研究了氮磷添加对高寒草甸植物多样性和经济类群的影响,结果表明沿着施肥水平增加的梯度上,物种丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均显著降低,禾草地上生物量增加,而莎草类、豆科、杂类草和毒草地上生物量减少;张东杰等^[14]和王长庭等^[15]均以尿素为施肥材料,分别研究了不同施氮量对三江源区高寒草甸草场地上生物量和群落结构功能、土壤质量的影响,结果表明草地地上生物量和土壤有机碳含量随施肥梯度呈单峰曲线变化;而郑华平等^[16]和陈文业等^[17]分别对甘南沙化、退化草地进行了氮、磷、钾、有机肥施肥处理,结果表明施有机肥和

氮-磷-钾是加速高寒草甸退化草地恢复重建的重要措施。上述研究表明,通过合理施肥进行退化草地的恢复和治理,对保护高寒草甸生态环境、提高草地生产力、增加载畜量具有重要的现实意义^[18],但目前缺乏对高寒草甸施加不同肥料种类(氮、磷、钾、磷钾、氮钾、氮磷、氮磷钾)的综合研究,尚未综合评价不同施肥处理对高寒草甸生态系统的影响效应。

本研究通过对围栏封育的矮嵩草草甸采用不同的施肥处理,研究添加土壤速效养分对高寒草甸植物群落特征、群落结构和植物地上生物量的影响,采用样品排序的方法,综合评价不同施肥处理对矮嵩草草甸的综合影响效应,筛选出最佳的施肥种类。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统开放试验站进行。该站位于青海省海北藏族自治州门源回族自治县境内的风匣口,地处青藏高原东北隅祁连山东段北支冷龙岭南麓,大通河河谷西北部。处于 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45' \text{N}$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}33' \text{E}$ 之间。该地区气候具有明显的高原大陆性特点,无四季之分,仅有冷暖二季之别,冷季漫长寒冷而且干燥,暖季短暂凉爽而湿润,年温差较小而日温差较大,太阳辐射强烈^[19]。定位站约有种子植物 500 余种,其中以禾本科、菊科、龙胆科和毛茛科最多,其次为莎草科、蔷薇科和豆科,其中莎草科的嵩草属植物为该地区高寒草甸的优势种群^[20]。牧草营养丰富,具有高蛋白、高脂肪、高无氮浸出物、高热值含量与低纤维等四高一低的特点,草质柔软,适口性好,是发展草

表 1 每年每小区化肥施加量
Table 1 The amount of fertilizer applied of per plot per year

处理 Treatment	养分形态 Nutrient form	添加量 Addition($\text{g} \cdot 36\text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$)
N	尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	771.43
P	磷酸一钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1 464.39
K	硫酸钾 K_2SO_4	802.40
PK	磷酸一钙+硫酸钾 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{SO}_4$	1 464.39+802.40
NK	尿素+硫酸钾 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{K}_2\text{SO}_4$	771.43+802.40
NP	尿素+磷酸一钙 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	771.43+1 464.39
NPK	尿素+磷酸一钙+硫酸钾 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{SO}_4$	771.43+1 464.39+802.40
CK	—	—

地畜牧业的物质基础^[21]。土壤特征主要表现为发育较年轻,土层薄,有机质含量丰富,淋溶作用较弱等。pH 值多在 7 以上,土壤库内 N、P、K 储量丰富,土壤潜在肥力高,但营养物多以有机态存在,矿化过程微弱,所以养分有效率低,尤其是速效性 N、P 含量^[22]。

1.2 试验设计

在围栏样地中按单因素随机区组设计试验,试验采用国际养分网络(www. nutnet. umn. edu)的施肥处理设计^[23],3 个养分(氮(N)、磷(P)、钾(K))添加处理,每种养分设 2 个水平(添加和不添加),共 8 个处理(N、P、K、PK、NK、NP、NPK 和 CK(对照)),每个处理重复 6 次,共 48 个小区。每个小区面积为 6 m×6 m,各小区间有 2 m 的缓冲带,缓冲带不施肥,各区的四角用木桩作标记。为保证植物对肥料的有效利用,施肥时间选择在生长期中期的一个雨天或晴天的傍晚进行,雨水或次日形成的露水使得肥料迅速溶解进入土壤。施肥的日期分别为 2009 年 7 月 15 日、2010 年 7 月 5 日,施肥的方法是用手均匀地撒在地表^[24]。施肥量按照国际养分网络上认可的标准进行配比^[25],每年的施肥量经折算后见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 测定方法 2010 年 8 月中旬,在草地植被生长旺盛的时期对植物群落特征进行调查。在不同处理的样地内的每个小区随机选取 3 个样方,样方面积 25 cm×25 cm,记录每个样方内的植物种类、多度、株高、盖度及地上生物量等。分禾草类、莎草类、豆科类和杂类草,齐地面剪下后分装纸袋,当时称鲜重,带回实验室置入烘箱内,105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘 12 h 后称干重。

1.3.2 计算方法 重要值=(相对盖度+相对高度+相对多度)/3

物种丰富度指数采用物种数(S)和 Margalef 指数(Ma)^[26]计算

$$D_{\text{Ma}} = (S - 1) / \ln N$$

Shannon-Wiener 指数^[27] = $-\sum P_i \ln P_i$

式中,S 为物种总数;N 为物种总个体数;P_i 为物种 i 的重要值。

1.4 数据分析

采用 SAS 9.2 分别对物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、植被高度、地上生物量(鲜重、干重)进行单因素 8 水平设计一元定量资料差异性检验。采用 SAS 9.2 实现熵值法综合评价不同短期施肥处理对矮嵩草草甸群落的影响,筛选出最佳的施肥处理。

2 结果与分析

2.1 施肥对矮嵩草草甸物种丰富度及物种多样性的影响

物种丰富度可以反映群落的主要特征,施肥引起了植物群落多样性格局的变化^[28]。图 1 表明,施肥使矮嵩草草甸植物群落物种丰富度减少,不同施肥处理下物种丰富度大小分别为:CK>K>P>N>NP>PK>NK>NPK,除 P、K 施肥处理对矮嵩草草甸物种丰富度影响不显著外,在其它所有施肥处理中,群落物种丰富度显著低于对照(P<0.05),尤其是在 NK 和 NPK 施肥中,物种丰富度分别减少 36.81%和 44.71%。说明在 N 及其 N 素组合施肥时,群落中部分高大禾草的强烈生长抑制了矮小植物的生长,群落的物种数减少,施肥对植物群落物种丰富度的影响较大。

Shannon-Wiener 指数是植物群落结构的重要参数,它能客观的反映群落内物种组成的变化,是群落物种数及其个体数和分布均匀程度的综合指标^[29]。由图 2 可知,在 NP 施肥处理下,矮嵩草草

甸群落 Shannon-Wiener 指数显著高于对照 ($P < 0.05$), 而其它施肥处理对 Shannon-Wiener 指数影响不显著, 说明除 NP 施肥外, 其余施肥处理对群落各物种数目的分配无显著影响。

2.2 施肥对矮嵩草甸功能群重要值的影响

重要值能较充分地显示植物种群在群落中的地位和作用^[30], 在一定程度上反映了天然草原偏离顶级群落的程度^[31]。从表 2 可以看出, 在同一施肥处理下, 禾草类和莎草类的重要值明显高于豆科和杂类草功能群, 即该试验样地是以禾草和莎草为优势种。禾草、莎草和豆科植物在矮嵩草甸内属于竞争优势者, 具有较高的吸收土壤速效养分的能力, 不同施肥处理后, 土壤速效资源增加, 禾草、莎草和豆

科植物生长旺盛, 抑制了杂类草的正常生长。与各自对照相比, 不同施肥处理使禾草、莎草、豆科植物重要值增加情况分别为: 禾草重要值增幅在 NPK 处理(279.37%)最大, 而在 K 处理下增幅(30.16%)最小; 莎草重要值增幅在 NPK 处理(84.21%)最大, 而在 K 处理下增幅(19.30%)最小; 豆科重要值增幅在 P 处理(415.38%)最大, 而在 N 处理下增幅(30.77%)最小。而施肥后杂类草的重要值减少, 其中在 N 处理下降(-84.62%)最大, K 处理下降(-20.51%)最小。

2.3 施肥对矮嵩草甸植被高度的影响

从图 3 可以看出, 施肥处理引起了草地植被高度的显著变化 ($P < 0.05$), 与 CK 相比, 不同施肥(除 K 外)处理可不同程度地增加矮嵩草甸植物群落的高度: NPK(83.62%) > NP(60.98%) > P(23.00%) > NK(14.98%) > PK(10.80%) > N(0.35%) > K(-10.10%), 其中施加钾肥的植被高度小于对照, 可能是由于钾肥在高寒草甸这个富钾的地区并不是限制因子。施肥后草地的群落结构发生明显变化, 促进了植被生长和增加了群落高度(K 肥除外)。

2.4 施肥对矮嵩草甸地上生物量的影响

养分添加对植物群落地上生物量的影响表明(图 4), 除 K、PK 养分添加对矮嵩草甸地上生物量的影响与对照差异不显著 ($P > 0.05$) 外, 其它养

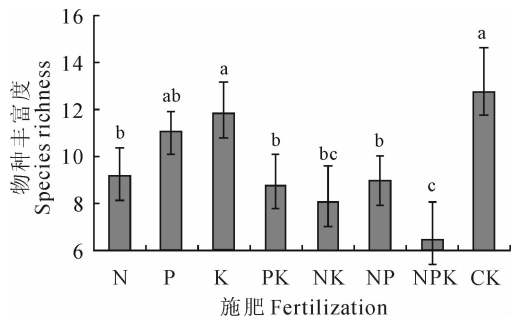


图 1 施肥对矮嵩草甸物种丰富度的影响
图中的不同字母表示不同处理间差异达显著水平; 下同
Fig. 1 Effects of fertilization on species richness of *K. humilis* meadow

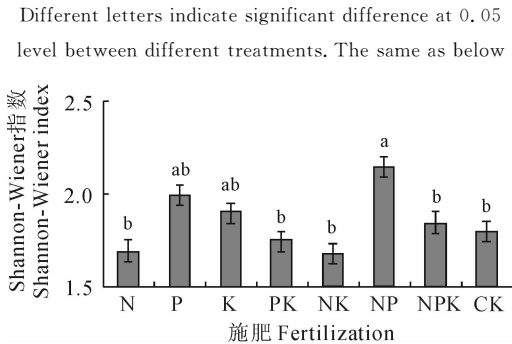


图 2 施肥对矮嵩草甸 Shannon-Wiener 指数的影响
Fig. 2 Effects of fertilization on Shannon-Wiener index of *K. humilis* meadow

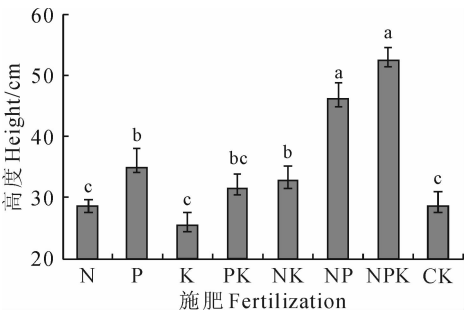


图 3 施肥对矮嵩草甸植被高度的影响
Fig. 3 Effects of fertilization on plants height of *K. humilis* meadow

表 2 不同施肥处理下矮嵩草甸功能群的重要值

Table 2 Important values in four functional groups of *K. humilis* meadow under different fertilizer treatments

功能群 Functional group	施肥处理 Fertilization treatment							
	N	P	K	PK	NK	NP	NPK	CK
禾草类 Gramineae	0.136	0.105	0.082	0.121	0.160	0.178	0.239	0.063
莎草类 Cyperaceae	0.088	0.074	0.068	0.081	0.093	0.098	0.105	0.057
豆科 Leguminosae	0.017	0.067	0.035	0.027	0.013	0.021	0.018	0.013
杂类草 Forbs	0.006	0.110	0.031	0.028	0.022	0.013	0.016	0.039

分及其组合添加都极显著增加了群落的地上生物量 ($P<0.01$),并且对生物量鲜重和干重的影响情况一致, $NP>NPK>P>NK>N>PK>K>CK$ 。添加 NP 和 NPK 对群落地上生物量的影响最显著,与

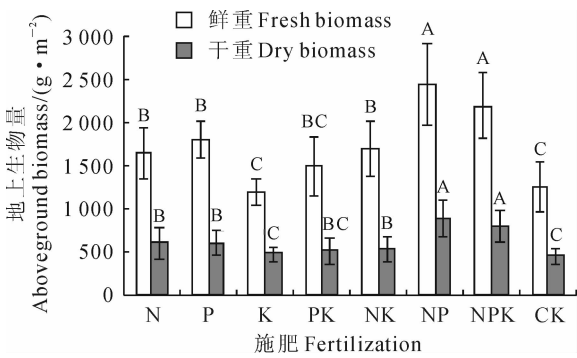


图4 施肥对矮嵩草草甸地上生物量的影响
图中的不同大写字母表示不同处理间差异达极显著水平
Fig. 4 Effects of fertilization on aboveground biomass of *K. humilis* meadow
Different capital letters indicate extremely significant difference at 0.01 level between different treatments

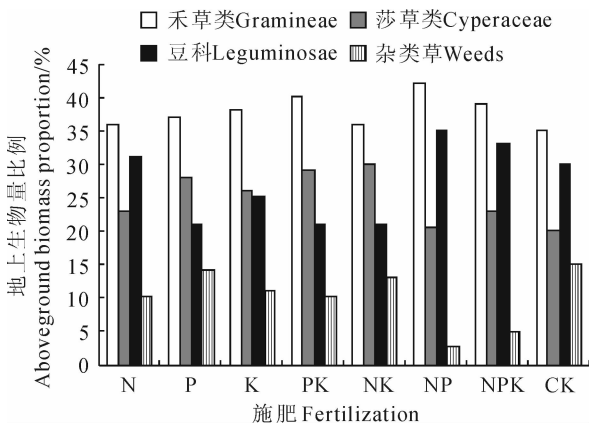


图5 施肥对矮嵩草草甸地上生物量比例的影响
Fig. 5 Effects of fertilization on aboveground biomass proportion of *K. humilis* meadow

表3 熵值法综合评价结果

Table 3 The result of comprehensive evaluation by entropy method

施肥 Fertilization	综合评价值 Comprehensive evaluation value	排序结果 Sorting result
N	0.118 75	4
P	0.114 30	5
K	0.103 44	7
PK	0.112 00	6
NK	0.137 93	3
NP	0.157 80	1
NPK	0.157 58	2
CK	0.098 20	8

对照相比,鲜重分别增加了 96.80%和 76.00%,干重分别增加了 102.22%和 77.78%。N 及其组合施肥时,植物群落的光合积累量显著提高,增进了 C-N 耦合效应,这说明高寒草地土壤 N 素缺乏最为严重,本研究亦验证了高寒地区 N 素的限制作用。

施肥主要是增加了草地土壤速效养分,改变了植物竞争力,施肥可以提高牧草产量^[32]。施用不同种类的肥料后,矮嵩草草甸各功能群地上生物量的比例变化明显,禾草和莎草的比例均增加,杂类草的比例减少(图 5)。与其对照相比,在施 NP 处理中,禾草类的比例增加最显著(20.00%),在施 NK 处理中,莎草类的比例增加最显著(50.00%),在施 NP 处理中,杂类草的比例减少最显著(83.33%)。豆科的地上生物量比例在 N、NP、NPK 处理中增加,在 P、K、PK、NK 处理中减少,没有显著的规律。

2.5 熵值法综合评价施肥处理对矮嵩草草甸群落的影响

在基于样品排序的综合评价方法中,熵值法是一种利用信息量的大小来确定指标权重并进行综合评价的方法^[33]。采用熵值法确定各指标(重要值、物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、植被高度、地上生物量(鲜重)、地上生物量(干重))的权重,然后进行综合评价分析。施肥是提高草地生产力的主要途径之一,草地施肥可以增加土壤速效养分,改善土壤营养状况。表 2 显示,综合评价的结果为: $NP>NPK>NK>N>P>PK>K>CK$,在 N 及其 N 素组合施肥时,综合评价值均大于其他施肥处理。这说明施 N 及其 N 肥组合消除了矮嵩草草甸 N 素的限制作用,对促进植被生长具有更为积极的作用。

3 讨 论

施肥是草地生态系统的恢复与重建的重要措施,到目前为止,大多数研究认为持续的增加土壤肥力或增加有效营养会降低植物群落的多样性^[34-36]。也有研究结果表明,较少的草地营养添加,改变了土壤肥力,但不会影响草地植物群落的多样性^[37]。而 Tilman 等^[38]认为群落多样性的变化与其生境本身的营养状况有关,即营养丰富的生境多样性随营养的增加而减少,营养缺乏的情况下多样性随肥力的增加而增加。造成施肥后群落多样性有不同响应的结果,原因可能是施肥群落处在不同的退化演替阶段造成的^[13]。我们认为,由于各物种内个体功能特征对环境变化有着很强的响应可塑性,施肥有可能增加许多物种种内的功能多样性,所以群落的总体

功能性并不一定会在施肥后迅速减小。在本研究中,由于施肥的年限较短,除施加 NP 处理外,Shannon-Wiener 指数在各施肥处理下没有显著差异,但物种丰富度有较好的响应,各施肥处理均使矮嵩草草甸群落物种丰富度减少。

施肥干扰是最广泛的土地利用^[39],施肥改变了植物群落内的光、土壤营养等资源的分布,施肥对植物生长和群落结构产生了深远的影响。在生态位理论框架中,物种在特定生境中的适合度决定于其生活史对策,而各物种的生活史对策主要决定于植物的个体表现特征,表现特征又决定于个体的生理、形态和功能特征,这些特征决定了植物的生长能力、竞争能力、存活能力等^[39-41]。本研究结果表明,不同施肥处理使禾草、莎草、豆科植物重要值增加,杂类草的重要值减少,施肥增强了优良牧草的优势地位,削弱了杂类草在群落中的作用。牛克昌等^[42]研究表明施肥使禾草类的生物量增加 2 倍之多,而杂类草的生物量反而明显减少。也有研究结果表明^[43],适当施肥后,植物群落高度明显增加,N 肥、P 肥和有机肥混合施肥效果最好,可使群落高度增加 76.75%,地上生物量增加 150.33%。在本研究中,

除施加 K 外,各施肥处理均使矮嵩草草甸植被高度增加;施加 K、PK 后,矮嵩草草甸地上生物量与对照差异不显著($P>0.05$),而其他施肥处理后,群落地上生物量均增加;与 CK 相比,施肥使禾草和莎草的地上生物量比例均增加,而杂类草的地上生物量比例减少。这说明施肥使植物个体增高增壮,使得植被盖度整体上增加,可以防止沙化草地进一步沙化,对沙化草地的恢复有重要的作用^[10]。

熵值法综合评价施肥处理对矮嵩草草甸群落的影响结果表明,施肥消除了青藏高原 N 素的限制作用,N 利用率高的禾草迅速生长,遮蔽了其它矮小物种,从而具有较强的获取地上光的能力。随着施肥年限的增加,地上生物量增加,种间竞争加剧,N 利用率高的物种优势越来越大,更多的物种被排除,对群落的物种多样性产生了显著影响。而本试验结果表明施 K 对矮嵩草草甸群落影响并不显著,可能是因为 K 在青藏高原高寒地区并不是限制因子。

总体而言,N 及其组合施肥增加了矮嵩草草甸群落生产力,NP、NPK 配合施肥是青藏高原高寒退化草甸的最佳施肥处理。

参考文献:

- [1] RONG Y P(戎郁萍), HAN J G(韩建国), WANG P(王 培). Effects of different range restorations on soil and vegetation of Russian wildrye (*Psathyrostachys juncea*) pasture[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2002, **11**(1): 17-23(in Chinese).
- [2] WANG W Y, WANG Q J, WANG H C. The effect of land management on plant community composition, species diversity, and productivity of alpine kobersia steppe meadow[J]. *Ecological Research*, 2006, **21**(2): 181-187.
- [3] WANG G, QIAN J, CHENG G, et al. Eco-environmental degradation and causal analysis in the source region of the Yellow River[J]. *Environmental Geology*, 2001, **40**(7): 884-890.
- [4] ZHOU H K(周华坤), ZHOU L(周 立), ZHAO X Q(赵新全), et al. Stability of alpine meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin* (中国科学通报), 2006, **51**(3): 320-327(in Chinese).
- [5] MAY R M. Stability and Complexity in Model Ecosystems, Population Biology Monographs[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1973: 21-38.
- [6] LI B Y(李本银), WANG J F(汪金舫), ZHAO SH J(赵世杰), et al. The influence of fertilizers on the soil fertility, population structure and yield of herbages grown in degraded grassland[J]. *Grassland of China* (中国草地), 2004, **26**(1): 14-17, 33(in Chinese).
- [7] GOUGH L, OSENBURG C W, GROSS K L, et al. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities[J]. *Oikos*, 2000, **89**(3): 428-439.
- [8] FENSHAM R J, HOLMAR J E, COX M J. Plant species responses along a grazing disturbance gradient in Australian grassland[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1999, **10**(1): 77-86.
- [9] FRIDLEY J D. Resource availability dominates and alters the relationship between species diversity and ecosystem productivity in experimental plant communities[J]. *Oecologia*, 2002, **132**(2): 271-277.
- [10] RAJANIEMI T K. Why does fertilization reduce plant species diversity? Testing three competition-based hypotheses[J]. *Journal of Ecology*, 2002, **90**(2): 316-324.
- [11] JI Y J(纪亚君). Primary study on fertilizer application to alpine rangeland in Qinghai, China[J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2002, **19**(5): 14-18(in Chinese).
- [12] LI X K(李小坤), LU J W(鲁剑巍), CHEN F(陈 防). Primary study on fertilizer application of forage[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2008, **17**(2): 136-142(in Chinese).
- [13] CHEN Y M(陈亚明), LI Z ZH(李自珍), DU G ZH(杜国祯). Effects of fertilization on plant diversity and economic herbage groups in alpine meadow[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(3): 424-429(in Chinese).
- [14] ZHANG D J(张东杰). Effect of fertilization on aboveground biomass of alpine meadow in region of three-river source[J]. *Chinese Qing-*

- hai *Journal of Animal and Veterinary Sciences* (青海畜牧兽医杂志), 2011, **41**(3): 17–19 (in Chinese).
- [15] WANG CH T (王长庭), WANG G X (王根绪), LIU W (刘 伟), *et al.* Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(10): 3 103–3 113 (in Chinese).
- [16] ZHENG H P (郑华平), CHEN Z X (陈子萱), WANG SH R (王生荣), *et al.* Effects of fertilizer on plant diversity and productivity of desertified alpine grassland at Maqu, Gansu[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2007, **16**(5): 34–39 (in Chinese).
- [17] CHEN W Y (陈文业), QI D CH (戚登臣), LI G Y (李广宇), *et al.* Effects of fertilization on grass community diversity and productivity of degraded alpine grassland at Maqu, in South of Gansu Province[J]. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2009, **14**(6): 31–36 (in Chinese).
- [18] ZHANG Z H (张自和), GUO ZH G (郭正刚), WU S Q (吴素琴). Problems facing to prataculture in western alpine region and its sustainable development[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2002, **11**(3): 29–33 (in Chinese).
- [19] LI Y N (李英年). Chinese academy of alpine meadow ecosystem research station climate overview[J]. *Dynamic Resource Network of Ecological Environment* (资源生态环境网络研究动态), 1998, **9**(3): 30–33 (in Chinese).
- [20] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 10–21.
- [21] XU SH X (徐世晓), ZHAO X Q (赵新全), *et al.* A simulative study on effects of climate warming on nutrient contents and *in vitro* digestibility of herbage grown in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2002, **44**(11): 1 357–1 364 (in Chinese).
- [22] 乐炎舟, 左克成, 张金霞, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 19–33.
- [23] SEAM M, SCHAEFFER R D. Pulse additions of soil carbon and nitrogen affect soil nitrogen dynamics in an arid Colorado Plateau shrub land[J]. *Ecosystem Ecology*, 2005, 145: 425–433.
- [24] YANG X X (杨晓霞), REN F (任 飞), *et al.* Responses of plant community biomass to Nitrogen and Phosphorus additions in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2014, **38**(2): 159–166 (in Chinese).
- [25] CLARK C M, CLELAND E E, COLLINS S L, *et al.* Environmental and plant community determinants of species loss following Nitrogen enrichment[J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(7): 596–607.
- [26] LI Y Y (李裕元), SHAO M A (邵明安). Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2 321–2 327 (in Chinese).
- [27] 马克平. 生物群落多样性的测度方法[C]//中国科学院生物多样性委员会. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141–165.
- [28] GOLDBERG D E, MILER T E. Effects of different resource addition on species diversity, in a annual plant community[J]. *Ecology*, 1990, 71: 213–225.
- [29] ZHAO ZH (赵 忠), WANG A L (王安禄), MA H SH (马海生), *et al.* Studies on dynamics monitor and sustainable development in eastern edge of Qinghai-Tibetan alpine grassland II Analysis of plant community structural features and grass species diversity[J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 2002, **19**(6): 9–13 (in Chinese).
- [30] ZHANG D Y (张大勇), JIANG X H (姜新华). A hypothesis for the origin and maintenance of within-community species diversity[J]. *Biodiversity Science* (生物多样性), 1997, **5**(3): 2–8 (in Chinese).
- [31] ZHAO CH ZH (赵成章), FAN SH Y (樊胜岳), YAN C Q (殷翠琴), *et al.* Study on vegetation community's structure of degraded grassland of noxious and miscellaneous grass type[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2004, **24**(4): 507–512 (in Chinese).
- [32] SUN Y (孙 彦), SHI D K (史德宽), YANG Q CH (杨青川). Studies the effects of the nitrogen, phosphate, potassium fertilizer and clipping frequency on the Yield of Russian Wildrye Grass[J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 1998, **6**(1): 11–19 (in Chinese).
- [33] 胡良平. 科研设计与统计分析[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2012: 474–477.
- [34] BRYAN L F. Gross species richness in a successional grassland; Effect of Nitrogen enrichment and plant litter[J]. *Ecology*, 1998, **79**(8): 2 593–2 602.
- [35] LI ZH H (李志华), NIE ZH X (聂朝相), CHEN B SH (陈宝书). Advance on nitrogen, phosphorus and kalium influence the quantity and quality of oat[J]. *Pratacultural Science* (草业科学), 1994, **11**(4): 24–26, 31 (in Chinese).
- [36] JIANG X L (江小蕾), ZHANG W G (张卫国), YANG ZH Y (杨振宇), *et al.* The influence of disturbance on community structure and plant diversity of alpine meadow[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2003, **23**(9): 1 479–1 485 (in Chinese).
- [37] GRIME J P. Biodiversity and ecosystem function; the debate deepens[J]. *Nature*, 1997, 277: 1 260–1 261.
- [38] TILMAN D, KNOPS J, WEDIN D. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J]. *Science*, 1997, 277: 1 300–1 302.
- [39] LAVOREL S, DIAZ S, CORNELISSEN, *et al.* Plant functional types: are we getting any close to the Holy Grail[J]. *Terrestrial Ecosystem in a Changing World*, 2007, **13**(2): 171–186.
- [40] HUSTON M A. Hidden treatments in ecological experiments; Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity[J]. *Oecologia*, 1997, **110**(4): 449–460.
- [41] SUDING K N, COLLINS S L, GOUGH L, *et al.* Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(12): 4 387–4 392.
- [42] 牛克昌. 青藏高原高寒草甸群落主要组分种繁殖特征对施肥和放牧的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [43] 马 涛. 青藏高原高寒草甸植物群落结构和功能对施肥和刘割干扰的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.