

牦牛放牧率和放牧季节对小嵩草高寒草甸土壤养分的影响*

董全民^{1,2**} 赵新全¹ 马玉寿² 李青云² 王启基¹ 施建军²

(¹ 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810002; ² 青海省畜牧兽医科学院, 西宁 810003)

摘要 经过两年牦牛放牧试验表明,夏季草场不同土壤层有机质、有机碳、全磷、全氮和速效磷的含量及 0~20 cm 土壤层营养因子的平均含量与放牧率呈线性回归关系,速效氮含量与放牧率呈二次回归关系;冬季草场不同土壤层有机质、有机碳和全氮与放牧率呈线性回归关系,全磷、速效磷和速效氮的含量及 0~20 cm 土壤层营养因子的平均含量与放牧率呈二次回归关系。随着放牧率的逐渐增加,夏季草场不同土壤深度速效氮含量也逐渐减小,当放牧率达到 1.07、1.08 和 1.22 头·hm⁻²时,0~5、5~10、10~20 cm 土壤速效氮含量依次达到最小;冬季草场不同土壤层全磷、速效磷和速效氮含量逐渐增加,当放牧率达到 0.81、0.78 和 1.00 头·hm⁻²,1.03、1.09 和 1.03 头·hm⁻²,1.36、1.35 和 1.30 头·hm⁻²时,0~5、5~10、10~20 cm 土壤层全磷、速效磷和速效氮含量分别依次达到最大。在夏季草场,0~20 cm 土壤层速效氮平均含量达到最小放牧率是 1.07 头·hm⁻²;冬季草场 0~20 cm 土壤层全磷、速效磷和速效氮含量达到最大放牧率分别是 0.90、0.83 和 1.21 头·hm⁻²。

关键词 牦牛放牧率,冬季草场,夏季草场,小嵩草高寒草甸,土壤养分

中图分类号 S812 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2005)07-0729-07

Effects of stocking rate and grazing time of yaks on soil nutrient contents in Kobresia parva alpine meadow. DONG Quanmin^{1,2}, ZHAO Xinquan¹, MA Yushou², LI Qingyun², WANG Qiji¹, SHI Jianjun² (¹ Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810002, China; ² Qinghai Academy of Animal and Veterinary Science, Xining 810003, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 729 ~ 735.

The results of grazing trial about yaks for two years showed that in summer, contents of different soil stratum and average contents of 0~20cm stratum for organic matter (OM), organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and available phosphorus (AP) were negatively correlated with stocking rate with a linear regressive relationship, while it was quadratic regression between contents of available nitrogen (AN) and stocking rate. In winter, contents of different soil stratum and average contents of 0~20cm stratum for OM, OC, TN were negatively correlated with stocking rate linearly, while those of TP, AP and AN were quadratically correlated with stocking rate. In summer pasture, with the increase of stocking rate, contents of AN for different stratum decreased with depth. When stocking rate was 1.07, 1.08 and 1.22 heads·hm⁻² respectively, contents of AN for 0~5 cm, 5~10 cm and 10~20 cm in sequence reached the minimum value. In winter pasture, contents of TP, AP and AN for 0~5 cm, 5~10 cm and 10~20 cm, respectively reached the maximum value when stocking rate was 0.81, 0.78 and 1.00 heads·hm⁻², 1.03, 1.09 and 1.03 heads·hm⁻², and 1.36, 1.35 and 1.30 heads·hm⁻², respectively. In addition, in summer pasture, average contents of AN for 0~20 cm soil stratum reached the minimum value when stocking rate was 1.07 heads·hm⁻², while contents of TP, AP and AN were the maximum at 0.90, 0.83 and 1.21 heads·hm⁻² respectively in winter pasture.

Key words stocking rate for yaks, summer pasture, winter pasture, *Kobresia parva* alpine meadow, soil nutrient contents.

1 引言

土壤-植物-动物构成一个相互作用、相互影响、相互制约、协调发展的草地生态系统。草地放牧率的变化会引起植被和土壤的变化,土壤变化也会引起植被的变化,而植被的演替也会引起土壤性状的变化。土壤最本质的特征是具有肥力,而土壤养分

是组成肥力的重要因素之一。同时,土壤营养元素的形式、分布以及它们的相对含量等特征是生物功能发挥正常的保证。青藏高原是中国主要的畜牧业基地,高寒草甸是其主要的草地类型。由于青藏高

*青海省“九五”攻关项目(96-N-112)和国家“十五”攻关资助项目(2001BA606A-02)。

**通讯作者

收稿日期:2004-04-12 改回日期:2004-06-28

原地理位置特殊、气候条件复杂,从而造成高寒草甸生态系统的脆弱性和抗干扰能力差的特点。植被一旦遭受破坏,靠其自然恢复不仅周期长,而且极为困难。另外,高寒草甸放牧生态系统中的植物组成、草地生产力等受放牧的影响均已发生变化^[9,21],特别是近几年来,由于家畜和人口的急剧增加,草场超载过牧,加之不合理的放牧率和放牧体系以及鼠虫害危害等,导致高寒草甸草场严重退化、沙化,“黑土型”退化草地面积逐渐扩大,草地生态环境日趋恶化^[3],严重影响了草地畜牧业的可持续发展和当地牧民生活水平的提高。正因为如此,高寒草甸生态系统由于放牧不合理等原因引起的草地退化问题,已越来越引起人们的广泛关注。国内外许多学者对放牧率在水分动态监测^[9,21]、植被群落结构的变化^[3,4,6~8,16,25,26,32]、牧草繁衍对土壤理化性质的影响^[12,19,20,31]、放牧强度对草地土壤营养含量的影响^[5,12,13]等方面做了大量研究,但放牧率和放牧季节对土壤营养因子效应的报道还不多见,而且这些结论都是利用绵羊获得的有关牦牛放牧率对高寒草甸的土壤营养因子含量的影响还未见报道。因此,研究高寒草甸“土壤-植物-动物”系统中土壤养分库各营养因子对不同放牧率的响应,将有助于正确高寒草甸生态系统的质量与草地畜牧业生产的关系,确定合理的放牧率,为青藏高原小嵩草(*Kobresia parva*)高寒草甸退化草场的利用、保护和治理提供科学依据。

2 研究地区与方法

2.1 自然概况

试验地选在青海省达日县窝赛乡,位于 99°47'38" N, 33°37'21" E,海拔在 4 000 m 以上,气候寒冷,年平均气温是 -1.2℃,最冷月 1 月的平均气温为 -12.9℃,最热月 7 月的平均气温为 9.1℃,0℃的积温为 1 081℃,5℃的积温为 714.9℃,生长季为 4 个月左右,无绝对无霜期。年平均降水量是 569 mm,多集中在 5~9 月份,年蒸发量 1 119.07 mm,雨热同季,有利于牧草生长。土壤为高山草甸土,草地为已发生退化的小嵩草高寒草甸,它与高寒草甸群落相联,其基本成土过程是生草过程,并以剖面上部植物根系絮结形成致密草皮为其主要特征。

2.2 方法

2.2.1 试验设计 试验时间为 1998 年 6 月 28 日~2000 年 5 月 30 日。夏季放牧从 6 月 1 日~10 月

31 日,然后转入冬季草场放牧至第二年 5 月 31 日,周而复始。试验分 4 个处理,分别是轻度放牧(牧草利用率为 30%)、中度放牧(牧草利用率为 50%)、重度放牧(牧草利用率为 70%)和对照(牧草利用率为 0)。每个处理有 4 头 2.5 岁、体重为 100 ±5 kg 阉割过的公牦牛进行实验,所有牦牛在实验前投药驱虫。根据草场地上生物量及其冬季牧草营养损失率、牦牛理论采食量和草场面积确定放牧率(表 1)。

表 1 放牧试验设计

Tab. 1 Design of grazing trial

放牧处理	试验用牛 (头)	草地面积(hm ²)		放牧率(头·hm ⁻²)	
		夏季	冬季	夏季	冬季
轻度放牧(LG)	4	4.50	5.19	0.89	0.77
中度放牧(MG)	4	2.75	3.09	1.45	1.29
重度放牧(HG)	4	1.92	2.21	2.08	1.81
对照(CK)	0	1.0	1.0	0	0

在每个处理的围栏内按对角线选定 3 个具有代表性的固定样点,每年 8 月底在每个处理的每个固定样点上各取 5 个重复土样(0.25 m ×0.25 m),共计 15 个样方,采样深度为 0~5、5~10、10~20 cm,在 100℃的恒温箱烘干至恒重,测量不同土壤深度的含水量;放牧实验结束时,取 5 个重复土样,采样深度也为 0~5、5~10、10~20 cm,供分析用。

2.2.2 分析方法 土壤有机质用重铬酸钾法测定。土壤全氮用重铬酸钾-硫酸消化法测定。土壤速效氮用蒸馏法测定。土壤全磷用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮-钼锑抗比色。土壤速效磷用 NaHCO₃ 法测定。

2.2.3 数据分析 用 Excel 和 SPSS 软件定量计算。进行数据的统计、分析和多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同土壤层营养因子养分含量对牦牛放牧率的响应

从图 1 可知,随着放牧率的增加,不论是冬季还是夏季草场,不同土壤层有机质、有机碳和全氮的含量呈减小趋势,速效氮的含量呈抛物线变化,而全磷和速效磷的含量在夏季草场呈减小趋势,在冬季草场呈抛物线变化。另外,随着放牧率的提高,以有机质、有机碳变化最为明显,其次为全氮;土壤养分含量随放牧率增加而发生明显变化的层次为 0~5 cm,其次为 5~10 cm,最后为 10~20 cm。方差分析表明,放牧率对不同土壤层各营养因子含量有明显的影响(表 2)。不论是冬季还是夏季草场,放牧率对不同土壤层全磷、速效磷和速效氮含量的影响极显著,对夏季草场有机质和有机碳的影响显著,而冬

季草场极显著;对全氮含量的影响在夏季草场极显著,在冬季草场显著。这一结果与李永宏^[12]、李香真^[13]和关世英^[5]等在内蒙古典型草原上用以绵羊为试验动物的结论不尽相同。关世英等^[5]的试验结果表明,随着放牧强度的增加,不同土壤层有机质、全氮、全磷、速效磷和速效氮的含量均呈下降趋势;

李香真等^[13]认为对照区 0~10 cm 土壤层有机碳含量显著高于各放牧处理,而放牧处理间差异不显著;李永宏等^[12]通过对内蒙古典型草原生态系统中不同生物功能类群及土壤因素间的互作和协同变化的研究表明,随着放牧强度的增加,土壤容重和硬度增加,而土壤持水量和养分因素含量下降。

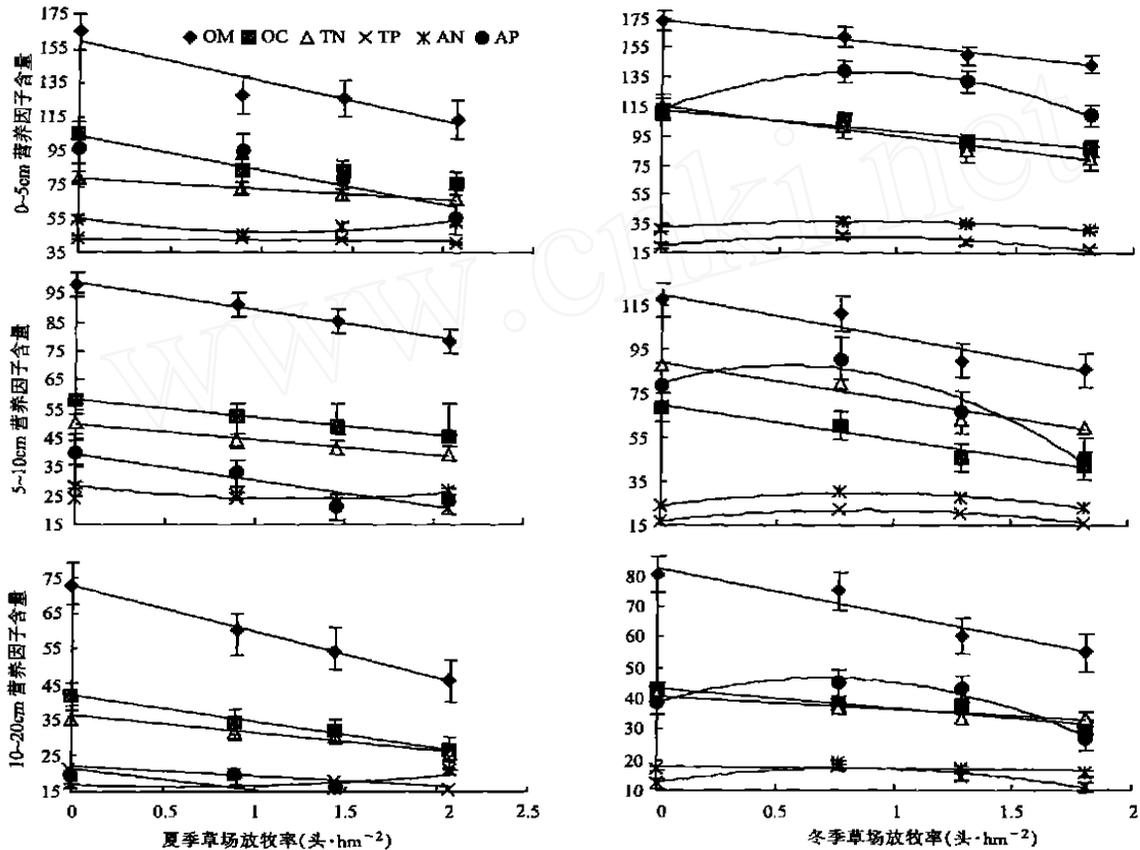


图1 不同草场不同土壤层各营养因子养分含量对放牧率的响应

Fig.1 Responses of contents of soil nutrient factors to stocking rates in different soil stratum in pasture

注:为了图显得清楚,有机质、有机碳的值为实测值,全氮、全磷、速效氮的值=实测值 $\times 10$;速效磷的值=实测值 $\times 100$,下同。

表2 放牧率对土壤营养因子养分含量的影响

Tab.2 Effects of stocking rates on contents of soil nutrient factors

土壤营养因子	平方和(SS)		变异系数(df)		F值		显著性检验	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
有机质(OM)	3012.515	1644.615	3	3	7.43326	98.8300	*	**
有机碳(OC)	614.6376	813.676	3	3	6.16038	13.1061	*	**
全氮(TN)	18.38857	10.9802	3	3	40.77734	7.94012	**	*
全磷(TP)	0.393371	1.3726	3	3	10.03849	35.6758	**	**
速效氮(AN)	5.51855	0.5819	3	3	22.66081	14.4241	**	**
速效磷(AP)	0.13369	0.1483	3	3	30.80808	6.5984	**	**

*有机质、有机碳、全氮、全磷的单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮为 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$,速效磷为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下同。

3.2 土壤因子平均养分含量对牦牛放牧率的响应

随放牧率的提高,夏季草场土壤中有机质、有机碳、全氮、全磷和速效磷的平均含量呈明显降低的趋势,速效氮含量呈“抛物线”型;在冬季草场,土壤中有机质、有机碳、全氮的含量也呈下降趋势,而全氮、

全磷和速效磷呈“抛物线”变化(图2)。与各土壤层营养因子含量的变化一样,土壤因子平均含量变化最明显的是有机质、有机碳和全氮,其次是全磷,最后是速效氮和速效磷。

土壤性质的变化比较植物的变化滞后,由于这

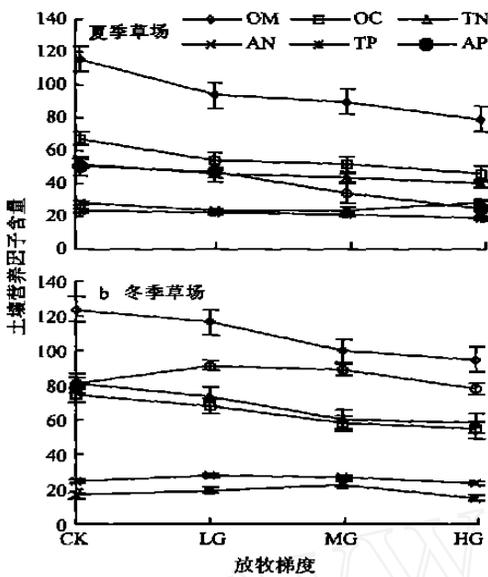


图2 不同草场 0~20 cm 土壤层各营养因子平均含量对放牧率的响应

Fig.2 Responses of average contents of soil nutrient factors to stocking rates in the stratum of 0~20 cm in pasture

部分库容量大,且受到的影响是间接的,因此研究放牧率对土壤营养因子的影响,在短时间内并不能研究清楚各营养因子与放牧率之间的确切变化规律。本试验中全磷、速效磷以及速效氮的变化规律与许多学者的结论不一致^[5,12,13],这可能是由于试验时间不够长,土壤各营养因子含量随放牧率的变化不能反映其真实变化规律;或者是由于试验区气候寒冷,土体内有机磷、有机氮的净矿化作用、土壤磷素

和氮素的微生物和非生物固定作用都比较弱,导致土壤磷素和氮素,特别是速效磷和速效氮的含量比较低^[1,2,10,15,22~24,28],导致高寒草甸土壤营养因子对牦牛放牧率的响应与其它草地类型不一致,还是其它原因,尚需进一步的研究和探讨,以探明土壤各营养因子随放牧率变化的机理及其规律。土壤速效性养分主要来源于有机质的矿化,其含量受有机质本身 N/C、温度、湿度等诸多因素的影响,易变性强,因此在高寒草甸生态系统中,放牧率对各土壤因子含量的影响与植物的根系、土壤动物和微生物之间的效应关系,尚需系统、深入地进一步研究和探讨^[14,17,27,29,30]。

3.3 放牧率与土壤各营养因子之间的关系

3.3.1 放牧率与不同土壤层土壤营养因子之间的关系 建立简单的数学模型,得出土壤各营养因子与放牧率之间的回归关系为:

$$Y = ax^2 + bx + c$$

式中, Y 代表土壤各营养因子的含量, x 为放牧率,其中 a、b 和 c 为常数,反映草地的土壤营养状况,它们的值越大,草地的土壤营养状况越好。

在夏季草场,不同土壤层有机质、有机碳、全氮、全磷以及速效磷的含量与牦牛放牧率成线性回归关系,而速效氮与放牧率成为二次回归关系;在冬季草场,有机质、有机碳和全氮的含量与放牧率是线性回归关系,而全磷、速效磷和速效氮与放牧率成二次回归关系(表3)。夏季草场机质、有机碳、全氮、全磷

表3 不同土壤深度上放牧率与土壤各营养因子的含量之间的回归方程

Tab.3 Regression equations between stocking rates and soil nutrient factors in different soil stratum

营养因子	土层深度 (cm)	回归方程 $y = ax^2 + bx + c (a \neq 0)$						相关系数 R 或 R ²		显著性检验	
		参数 a		参数 b		参数 c		SP	WP	SP	WP
		SP	WP	SP	WP	SP	WP	SP	WP	SP	WP
有机质(OM)	0~5	0	0	-19.2	19.49	188.5	190.2	-0.9066	-0.9951	*	**
	5~10	0	0	-60.4	-13.7	104.09	125.59	-0.9991	-0.9366	**	*
	10~20	0	0	-8.51	-13.36	79.493	92.475	-0.9762	-0.9943	**	**
有机碳(OC)	0~5	0	0	-7.53	-14.64	95.57	120.14	-0.9429	-0.9486	*	*
	5~10	0	0	-4.14	-9.077	61.745	74.2	-0.9960	-0.9461	**	*
	10~20	0	0	-4.98	-7.408	46.27	49.65	-0.9818	-0.9973	**	**
全氮(TN)	0~5	0	0	-0.52	-1.734	7.43	13.155	-0.9846	-0.9825	**	**
	5~10	0	0	-0.22	-1.311	4.9483	9.805	-0.5857	-0.9658	ns	**
	10~20	0	0	-0.32	-0.553	3.9134	4.755	-0.9737	-0.9718	**	**
全磷(TP)	0~	0	-0.949	-0.18	1.5432	2.917	1.9896	-0.8052	0.8652(R ²)	ns	*
	5~10	0	-0.559	-0.12	1.1525	2.4867	1.6819	-0.9229	0.8713(R ²)	*	*
	10~20	0	-0.403	-0.18	1.0919	2.345	1.263	-0.9978	0.7065(R ²)	**	ns
速效氮(AN)	0~5	0.7747	-0.687	-1.67	1.1749	3.3897	3.198	0.7888(R ²)	0.8881(R ²)	*	*
	5~10	0.3182	-0.647	-0.78	1.3322	2.8637	2.4049	0.8216(R ²)	0.7673(R ²)	*	ns
	10~20	0.1815	-0.155	-0.44	0.401	1.7378	1.7121	0.6815(R ²)	0.6840(R ²)	ns	ns
速效磷(AP)	0~5	0	-0.339	-0.243	0.5887	0.9976	1.1314	-0.8991	0.8884(R ²)	*	*
	5~10	0	-0.270	-0.092	0.5900	0.3944	0.8007	-0.9204	0.8486(R ²)	*	*
	10~20	0	-0.156	-0.057	0.4214	0.213	0.3866	-0.8782	0.771(R ²)	ns	ns

和速效磷以及冬季草场有机质、有机碳、全氮含量的变化与关世英等^[5]、李香真等^[13]、李永宏等^[12]的研究结果一致,但夏季草场速效氮以及冬季草场速效氮、全磷和速效磷含量的变化与他们的结论不一致^[5,12,13]。

由回归方程可知,随放牧率逐渐增加,夏季草场不同土壤深度速效氮的含量也逐渐减小,当放牧率 X 分别达到 1.07、1.08 和 1.22 头·hm⁻²时,0~5、5~10、10~20 cm 土壤速效氮含量依此达到最小;若放牧率继续增强,各土壤层速效氮的含量依此开始增加。这是因为随着放牧率的增加,牦牛对植物体的采食更加频繁,而植物体对强放牧率胁迫具有采食后的快速再生、补偿和超补偿能力,并在采食后进行营养繁殖或有性繁殖,速效氮的消耗量超过有机氮的矿化供给量,导致速效氮的含量减小,但随着放牧率的继续增加,植物体对强放牧率胁迫的调节作用减弱,有机氮的矿化供给量超过了速效氮的消耗量。另外,一方面因为土壤速效性养分主要来源于有机质的矿质化,其含量受有机质本身 N/C、温度、湿度等诸多因素的影响,易变性强,另一方面也可能是随着放牧率的逐渐增强,植物有机体、土壤动物、土壤微生物等分别通过光和作用、豆科牧草的固氮作用、分解动植物残体和牲畜粪便以及分解和转化有机质和矿物质的重要作用,通过自我调节对逆境的“胁迫反应”(资源亏损胁迫)^[30],或是其它原因,有待于做进一步研究。

在冬季草场,随着当放牧率的逐渐增加,不同土壤层全磷、速效磷和速效氮的含量逐渐增加,当放牧率 X 分别达到 0.81、0.78 和 1.00 头·hm⁻²,1.03、1.09 和 1.03 头·hm⁻²,1.36、1.35 和 1.30 头·hm⁻²时,0~5、5~10、10~20 cm 土壤层全磷、速效磷和速效氮的含量分别依此达到最大;若放牧率继续增加,各土壤层速效氮和速效磷的含量依此开始减小,而且 10~20cm 土壤层全磷、速效磷和速效氮

的含量开始减小的放牧率均接近中度放牧(1.29 头·hm⁻²),因此本试验结果也支持“中度干扰理论”^[31],既中度放牧干扰能维持高全磷、速效磷和速效氮的含量。因为冬季草场在夏秋季节不放牧,而只在冬春季节放牧,因此 8 月份所测土壤营养和植被特征的差异只能间接反应冬春季节牦牛对草地的利用情况。放牧率越高,地上现存量越小,也即返还于放牧生态系统中的物质和能量就减少;同时,土壤容重、硬度、孔隙度、毛管持水量等与土壤压实作用有关的物理指标均下降^[9,12],这将影响土壤 N、P、K 的矿化速度和植物有机体对营养物的质吸收效率以及土壤通气及营养状、土壤微生物数量^[10,15,19,28]。一方面,随着放牧率的提高,牧草的利用率增加,地上现存量减小,第二年牧草返青后,由于牧草的自我调节,牧草快速生长,补偿和超补偿能力增强,并进行营养繁殖或有性繁殖(资源胁迫)^[11],土壤速效氮、速效磷被逐渐消耗;另一方面,放牧率越低,地上现存量越多,土壤有机质的分解和植物有机体的加入过程均比较强,植物的吸收量又相对少,土壤速效氮、速效磷含量增加^[12];随着放牧率逐渐接近中度放牧时,植物有机体、土壤动物、土壤微生物等分别通过光合作用、豆科牧草的固氮作用、分解动植物残体和牲畜粪便以及分解和转化有机质和矿物质的重要作用,通过自我调节对逆境的“胁迫反应”(资源亏损胁迫)^[11],土壤全磷、速效磷和速效氮的含量达到最大;但随着放牧率继续提高,植物体的补偿和超补偿性生长作用增强^[11,18],以补偿冬季牦牛对牧草的过度采食,土壤营养被大量消耗(特别是土壤的有效成分),导致土壤速效磷和速效氮的含量下降。

3.3.2 放牧率与土壤营养因子平均含量之间的关系 夏季和冬季草场土壤因子平均含量与放牧率之间的回归关系与不同土壤层各因子含量之间的关系一致(表 4)。在夏季草场,土壤速效氮含量达到最小的放牧率是 1.07 头·hm⁻²;冬季草场土壤全磷、

表 4 放牧率与 0~20 cm 土壤各营养因子平均含量之间的回归方程

Tab. 4 Regression equations between stocking rates and average contents of soil nutrient factors in 0~20 cm stratum

土壤营养因子	回归方程 $y = ax^2 + bx + c$ (a > 0)						相关系数 R 或 R ²		显著性检验	
	参数 a		参数 b		参数 c		SP	WP	SP	WP
	SP	WP	SP	WP	SP	WP				
有机质	0	0	-11.61	-17.03	124.17	125.24	-0.9724	-0.9730	**	**
有机碳	0	0	-6.753	-12.14	71.865	75.142	-0.9519	-0.9860	*	**
全氮	0	0	-0.397	-1.397	5.54	8.175	-0.9829	-0.9766	**	**
全磷	0	-0.669	-0.17	1.2018	2.56	1.5824	-0.9812	0.7172(R ²)	**	ns
速效氮	0.4227	-0.461	-0.909	0.7809	3.685	2.8329	0.997(R ²)	0.8997(R ²)	**	*
速效磷	0	-0.157	-0.311	0.3803	0.535	0.8086	-0.9474	0.8915(R ²)	*	*

速效磷和速效氮的含量最大的放牧率分别是 0.90、0.83 和 1.21 头·hm⁻²。可见夏季草场土壤速效氮对放牧率比冬季草场更敏感,而且冬季草场土壤全磷、速效磷的耐牧性比速效氮差。这可能是因为在青藏高原高小嵩草高寒草甸土壤中磷素比氮素更缺乏,再加上试验区气候寒冷,土体内有机机磷、有机氮的净矿化作用、土壤微生物和非生物对磷素和氮素的固定作用都比较弱,导致土壤磷素和氮素,特别是速效磷的含量比较低。另外,土壤全磷属土壤较为稳定的一类指标,它的含量主要取决于土壤母质的类型及质地,但它的含量也与土壤有机磷的净矿化作用、土壤磷素的微生物和非生物固定作用有关。在适宜的水热条件下(35℃,相对持水量为 70%),可发生土壤有机磷的净矿化作用,而且其净矿化作用随土壤类型而异,且表层大于下层^[1,28]。微生物是土壤磷的消耗者和供应者,也是磷素转化的主要因素,在自然条件下,这两种变化过程(磷的固定和磷的释放)在土体内同时存在,但在不同的土壤条件下,两种变化过程的相对速率不同,结果出现微生物磷素的净固定或净释放过程,其速率也有相应的变化^[2,22,24]。而土壤磷素的非生物固定作用与微生物固定作用和净矿化作用同时存在,其固定的数量、强度和速率与土壤性质、成份和环境条件有关^[23,28]。因此,磷的净矿化作用、微生物和非生物固定作用会影响土壤的供磷能力和植物的营养状况,土壤有效磷含量是限制小嵩草(*Kobresia parva*)高寒草甸植物生长的瓶颈。

4 结论

4.1 随着放牧率的增加,以有机质和有机碳变化最为明显,其次为速效氮和速效磷,最后为全磷和全氮;土壤养分含量随放牧率发生明显变化的层次为 0~5 cm,其次为 5~10 cm,最后为 10~20 cm。

4.2 夏季草场不同土壤层有机质、有机碳、全磷、全氮和速效磷的含量及 0~20 cm 土壤层营养因子的平均含量与放牧率呈线性回归关系,速效氮的含量与放牧率呈二次回归关系;冬季草场不同土壤层有机质、有机碳和全氮与放牧率呈线性回归关系,全磷、速效磷和速效氮含量及 0~20 cm 土壤层营养因子的平均含量与放牧率呈二次回归关系。

4.3 在冬季草场,当放牧率分别达到 0.81、0.78 和 1.00 头·hm⁻²,1.03、1.09 和 1.03 头·hm⁻²,1.36、1.35 和 1.30 头·hm⁻²时,0~5、5~10、10~20 cm

土壤层全磷、速效磷和速效氮的含量分别依此达到最大;若放牧率继续增加,各土壤层速效氮和速效磷的含量依此开始减小,而且 10~20 cm 土壤层全磷、速效磷和速效氮的含量开始减小的放牧率均接近中度放牧(1.29 头·hm⁻²)。

4.4 在夏季草场,当放牧率 X 分别达到 1.07、1.08 和 1.22 头·hm⁻²时,0~5、5~10、10~20 cm 土壤速效氮含量依此达到最小;若放牧率继续增加,各土壤层速效氮的含量依此开始增加。

4.5 夏季草场土壤速效氮含量达到最小的放牧率是 1.07 头·hm⁻²;冬季草场土壤全磷、速效磷和速效氮的含量最大的放牧率分别是 0.90、0.83 和 1.21 头·hm⁻²。

4.6 小嵩草高寒草甸草场的氮素和磷素,特别是速效氮和速效磷比较缺乏;夏季草场土壤速效氮对放牧率比冬季草场更敏感,而且冬季草场土壤全磷、速效磷的耐牧性比速效氮差。

致谢 本文系硕士论文“高寒草甸草场牦牛优化放牧方案的研究”的部分内容,在论文的制作和修改中,承蒙胡自治导师的指导,特此感谢!

参考文献

- [1] 王启兰,李家藻. 1995. 高寒草甸植被不同土壤真菌生物量的季节动态[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社,169~178.
- [2] 王启兰,杨涛. 1995. 高寒草甸土壤氮素代谢作用强度的研究[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社,179~182.
- [3] 王启基,周立,王发刚. 1995. 放牧强度对冬春草场植物群落结构的效应分析[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社,353~364.
- [4] 王炜,刘钟龄,郝敦元,等. 1996. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究. 退化草原的基本特征与恢复演替动力[J]. 植物生态学报,20(5):449~459.
- [5] 关世英,齐沛钦,康师安,等. 1997. 不同牧压强度对草原土壤养分含量的影响初析[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 草原生态系统研究(第5集)[C]. 北京:科学出版社,17~22.
- [6] 刘颖,王德利,王旭,等. 2002. 放牧强度对羊草草地植被特征的影响[J]. 草业学报,11(2):22~28.
- [7] 安渊,李博,杨持,等. 2002. 不同放牧率对大针茅种群结构的影响[J]. 植物生态学报,26(2):163~169.
- [8] 江小蕾,张卫国,杨振宇,等. 2003. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响[J]. 西北植物学报,23(9):1479~1485.
- [9] 红梅,陈有君,李艳龙,等. 2001. 不同放牧强度对土壤含水量及地上生物量的影响[J]. 内蒙古农业科技,(土肥专辑):25~26.
- [10] 张金霞,曹广民,赵静玫,等. 1995. 高寒草甸生态系统中矮嵩草草甸的氮、磷、钾动态[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态

- 系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社, 11~18.
- [11] 张荣, 杜国祯. 1998. 放牧草地群落的冗余与补偿[J]. 草业学报, 7(4): 13~19.
- [12] 李永宏, 钟文勤, 康乐, 等. 1997. 草原生态系统中不同生物功能类群及土壤因素间的互作和协同变化[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 草原生态系统研究(第5集)[C]. 北京:科学出版社, 1~11.
- [13] 李香真, 陈佐忠. 1998. 不同放牧率对草原植物与土壤C、N、P含量的影响[J]. 草地学报, 6(2): 90~97.
- [14] 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 2003. 有机质、全氮和可矿化氮在反应土壤供氮能力反面的意义[J]. 土壤学报, 40(2): 231~237.
- [15] 杜伊光, 李家藻, 师治贤, 等. 1995. 高寒草甸生态系统土壤微生物反硝化作用引起氮素损失的研究[A]. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社, 189~195.
- [16] 汪诗平, 李永宏, 王艳芬, 等. 2001. 不同放牧率对内蒙古冷蒿草原植物多样性的影响[J]. 植物学报, 43(1): 89~96.
- [17] 岳东霞, 李文龙, 李自珍. 2004. 甘南高寒湿地草地放牧系统的AHP决策分析及生态恢复对策[J]. 西北植物学报, 24(2): 248~253.
- [18] 赵钢. 1999. 草地畜牧业可持续发展刍议[J]. 内蒙古草业, 2: 1~6.
- [19] 贾树海, 王春枝, 孙振涛, 等. 1999. 放牧强度和时期对内蒙古草原土壤压实效应的研究[J]. 草地学报, 7(3): 217~222.
- [20] 贾树海, 李绍良, 陈有君, 等. 1997. 草场退化与恢复改良过程中土壤物理性质和水分状况初探[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社, 111~117.
- [21] 贾树海, 崔学明, 李绍良, 等. 1997. 牧压梯度上土壤物理性质的变化[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社, 12~16.
- [22] 曹广民, 张金霞, 鲍新奎, 等. 1999. 高寒草甸生态系统的磷素循环[J]. 生态学报, 19(4): 514~518.
- [23] 曹广民, 鲍新奎, 赵宝莲. 1991. 高山土壤的磷素微波物固定作用[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社, 237~246.
- [24] 曹广民, 鲍新奎, 张金霞, 等. 1995. 高寒草甸生态系统植物库磷素贮量及其循环特征[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第4集)[C]. 北京:科学出版社, 27~34.
- [25] 董全民, 马玉寿, 李青云, 等. 2004. 牦牛强度对高寒草甸植物群落结构的影响[J]. 草业科学, 2: 48~53.
- [26] 董全民, 马玉寿, 李青云, 等. 2004. 牦牛放牧率对小嵩草(*Koeleria parva*)高寒草甸地上、地下生物量的影响[J]. 四川草原, (2): 20~27.
- [27] 鲁彩艳, 陈欣. 2003. 不同施肥处理土壤及不同C/N比有机物料中有机N的矿化进程[J]. 土壤通报, 34(4): 267~270.
- [28] 鲍新奎, 曹广民, 赵宝莲. 1991. 高山土壤的磷素非生物固定作用[A]. 中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站. 高寒草甸生态系统(第3集)[C]. 北京:科学出版社, 247~256.
- [29] Cao Guangmin, Tang Yanghong, Mo Wenhong, et al. 2004. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 36: 237~243.
- [30] David M, Jeanne C. 2002. Restoration of riparian meadows degraded by livestock grazing: above- and belowground responses [J]. *Plant Ecol.*, 163: 77~91.
- [31] Ditommaso A, Aarssen LW. 1987. Resource manipulations in natural vegetation: a review [J]. *Vegetation*, 84: 9~29.
- [32] Foster BL, Gross KL. 1998. Species richness in a successional grassland: effects of nitrogen enrichment and plant litter [J]. *Ecology*, 71: 2593~2602.
- [33] Guerif J. 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength [J]. *Soil Till. Res.*, 16: 167~178.

作者简介 董全民,男,1972年生,助理研究员,博士生。主要从事草地生态及青藏高原“黑土型”退化草地的恢复与重建工作。
责任编辑 王伟