

# 小嵩草高寒草甸土壤营养因子及水分含量 对牦牛放牧率的响应

## I 夏季草场土壤营养因子及水分含量的变化\*

董全民<sup>1,2</sup>, 赵新全<sup>1</sup>, 李青云<sup>2</sup>, 马玉寿<sup>2</sup>, 王启基<sup>1</sup>, 施建军<sup>2</sup>, 李有福<sup>3</sup>

(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 ;

3 青海省果洛州草原站, 青海大武镇 814000)

**摘要** 两年的牦牛放牧试验结果表明 随放牧率的增加, 夏季草场各土壤层有机质、有机碳、全氮和全磷的含量呈下降趋势, 它们的含量与放牧率呈显著的线性回归关系, 速效氮的含量与放牧率呈二次回归关系, 各土壤营养因子平均含量与放牧率也有类似的关系。而且当放牧率分别达到 1.07 heads/hm<sup>2</sup>、1.08 heads/hm<sup>2</sup> 和 1.22 heads/hm<sup>2</sup> 时, 0~5 cm、5~10 cm、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, 而速效氮的平均含量达到最小的放牧率是 1.08 heads/hm<sup>2</sup>。在相同放牧率下, 有机质和有机碳的含量在各土壤层之间差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 全磷差异显著 ( $P < 0.05$ ), 全氮和速效氮差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 而且放牧率和土壤深度的交互作用对土壤各营养因子含量的影响极显著 ( $P < 0.01$ )。放牧率对各土壤层的含水量有显著的影响 ( $P < 0.05$ ), 不同年度间同一土壤层含水量的差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

**关键词** 牦牛放牧率 小嵩草高寒草甸 夏季草场 土壤营养因子 养分含量 土壤水分含量

中图分类号 Q948.118

文献标识码 A

## Responses of contents of soil nutrient factors and water to stocking rates for yaks in Kobresia parva alpine meadow

### I responses to contents of soil nutrient factors and

### water to stocking rates in summer pasture

DONG Q uan-m in<sup>1,2</sup>, ZHAO X in-quan<sup>1</sup>, L I Q ing-yun<sup>2</sup>, MA Y u-shou<sup>2</sup>,

WANG Q i-ji<sup>1</sup>, SH I J ian-jun<sup>2</sup>, L I Y ou-fu<sup>3</sup>

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810002, China; 2 Qinghai Academy of Animal and Veterinary Science, Xining 810003, China; 3 Grassland Station of Guoluo Prefecture in Qinghai Province, Dawu Township, Qinghai 814000, China)

**Abstract** Effects of stocking rates on contents of soil nutrient and water in summer pasture of alpine meadow had been studied for two years. The result showed that contents of organic matter, organic C, total N and total P decreased in the same stratum with the increase of stocking rates, and there was a significant linear regression relationship between their contents and stocking rates, the second degree polynomial regression between stocking rates and contents of available N, and then average nutrient contents of every nutrient factors (0~20 cm soil layer) had a similar response with contents of every stratum. And the con-

\* 收稿日期 2004-04-20 修改稿收到日期 2004-06-30

基金项目 青海省“九·五”攻关项目(编号 96-N-112) 国家“十·五”攻关项目(编号 2001BA606A-05)

作者简介 董全民(1972-),男,甘肃天水人,助理研究员,在读博士研究生。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。

tents of 0~ 5 cm, 5~ 10 cm, 10~ 20 cm soil layer for available N reached to the minimum values successively when stocking rates equaled to 1.64, 1.73 and 1.97 heads/hm<sup>2</sup> respectively, and stocking rate was 1.67 heads/hm<sup>2</sup> average contents of available N reaching to the peak value, and then contents of available N began increasing continually. Contents of organic matter, organic C were extremely significant difference in different stratum s under the same stocking rates ( $P < 0.01$ ), significant difference for total P ( $P < 0.05$ ) and no significant difference for total N and available N ( $P > 0.05$ ), and the interactions of stocking rates and grazing time had an extremely significant effect on contents of every nutrient factor in different soil stratum ( $P < 0.01$ ). Besides, effect of stocking rates on water contents of every stratum was significant ( $P < 0.05$ ), the yearly change was not significant ( $P > 0.05$ ).

**Key words** :stocking rate for yaks ;*Kobresia parva* alpine meadow ; summer pasture ; soil nutrient factor ; soil nutrient contents ; soil water contents

草地生态系统中植被与土壤之间构成一个相互作用、相互影响、相互制约、协调发展的统一体。土壤退化会引起植被的变化,而植被的演替也会引起土壤性状的改变。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(Nutrient element)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。研究植物营养元素的供应、吸收、分配及在植物新陈代谢过程中的功能,对植物的生长发育、演化、生物产量的形成,植物与环境资源、消费者与生产者之间的营养平衡都有重要的意义。

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<sup>[1,2]</sup>,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,导致草地严重退化、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<sup>[3]</sup>。

本实验旨在对不同放牧率下高寒草甸土壤养分含量的研究,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。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验地概况

试验地选在青海省达日县窝赛乡,位于北纬 99°47'38",东经 33°37'21",海拔在 4 000 m 以上,气候寒冷,年平均气温- 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。年平均降雨量 569 mm,多集中在 5 月~ 9 月,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(*Kobresia parva*)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。

### 1.2 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 日至 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、牦牛的理论采食量和草场面积确定放牧率(表 1)。

表 1 放牧率试验设计

Table 1 Design of grazing trial

处理 Treatment	试验用牛(头) The number of trial yaks	草地面积 A rea of every plot (hm <sup>2</sup> )	放牧率(头/hm <sup>2</sup> ) Stocking rates(heads/hm <sup>2</sup> )
轻度 Light grazing	4	4.5	0.89
中度 Moderate grazing	4	2.75	1.45
重度 Heavy grazing	4	1.92	2.08
对照 Control	0	1.0	0

### 1.3 样品的采取和分析方法

**1.3.1 土样的采取** 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 cm, 5~ 10 cm, 10~ 20 cm, 在 100 °C 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 cm, 5~ 10 cm, 10~ 20

cm, 供分析用.

**1.3.2 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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮-钼锑抗比色定量; 土壤速效磷用 NaHCO<sub>3</sub> 法测定.

### 1.4 数据分析

用 Excel 2000 和 SPSS(11.0) 软件在计算机上进行数据的统计、分析和多重比较.

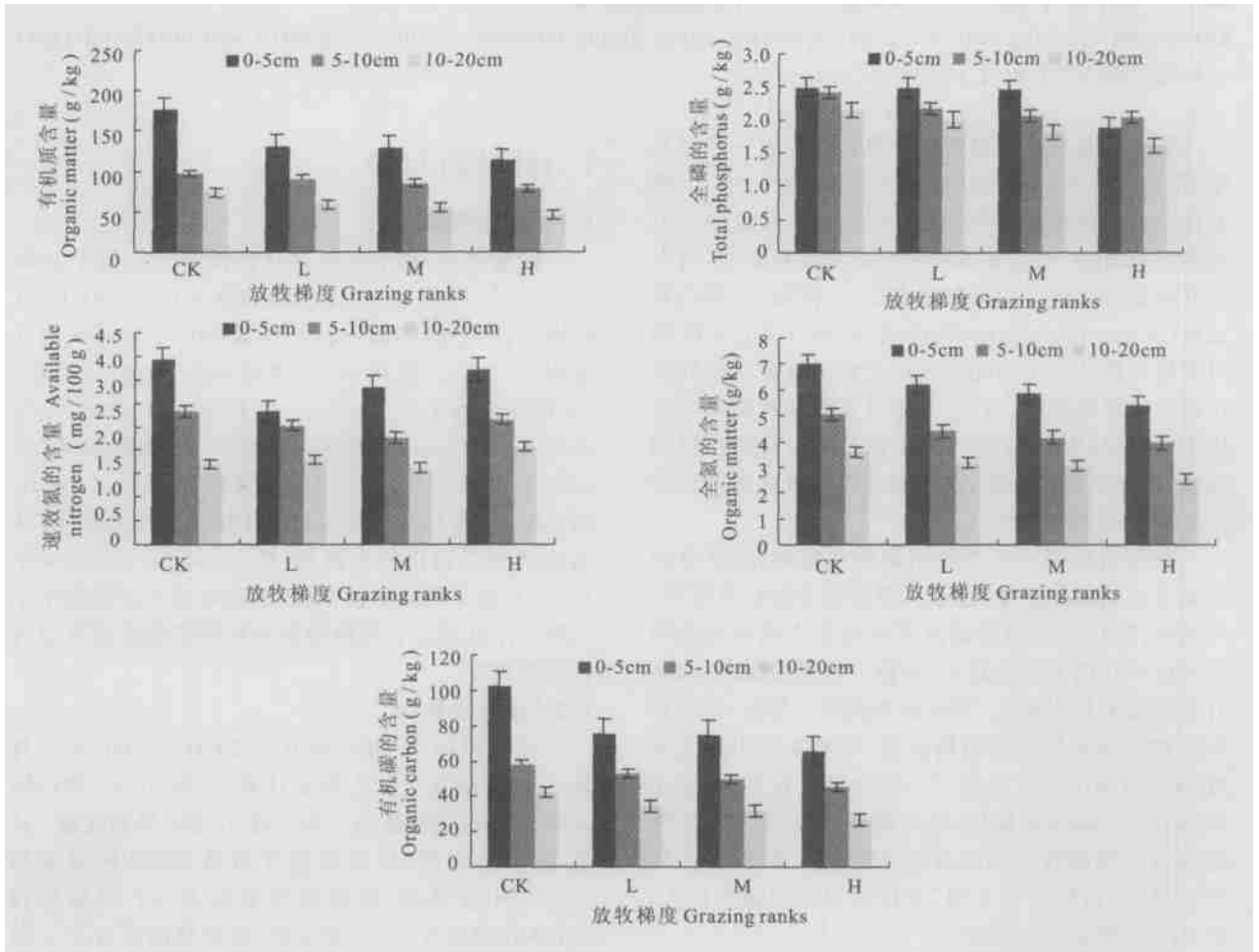


图 1 不同土壤层各土壤因子含量随放牧率的变化

Fig 1 Changes of soil nutrient factors' contents for different soil stratum s with stocking rates

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤层养分含量的响应

从图 1 可以看出, 相同处理各土壤养分因子的含量随土壤深度的增加而呈下降趋势, 这与放牧率无关, 是土壤各营养因子自然分布的结果(图 1, 表 2) 相同土壤层随放牧率的提高, 有机质、有机碳、全氮和全磷含量随放牧率的增加呈明显降低趋势, 速

效氮的变化出现了“高-低-高”的变化趋势. 另外, 随着放牧率的提高, 以有机质和有机碳变化最为明显, 其次为全氮和速效氮, 最后是全磷. 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, 这和关世英、王启基、李香真等的结论相似<sup>[4,7,8]</sup>.

方差分析表明, 在相同土壤层上, 放牧率对土壤有机质、有机碳的影响显著( $P < 0.05$ ), 对全磷、全氮和速效氮含量的影响极显著( $P < 0.01$ ). 在相同

放牧率下,土壤有机质和有机碳的含量在不同土壤层之间差异极显著( $P < 0.01$ ),全氮和速效氮的含量差异不显著( $P > 0.05$ ),全磷的含量差异显著( $P < 0.05$ ),但放牧率和土壤层深度的交互作用对全氮含量的影响显著( $P < 0.05$ ),而对其它土壤营养因子含量的影响极显著( $P < 0.01$ )(表3)。进一步做新复极差分析,在各土壤层中,对照组有机质的含量显著地高于其它各放牧处理( $P < 0.05$ ),在0~5 cm和5~10 cm土壤层中,对照组有机质的含量显著地高于其它各放牧处理( $P < 0.05$ ),10~20 cm土壤层中,轻度放牧组显著地低于对照、中度和重度放牧组( $P < 0.05$ );对照组各土壤层全氮和全磷含量极显著地高于其它各放牧处理( $P < 0.01$ );但速效氮

在0~5 cm和5~10 cm土壤层中,轻度放牧组极显著地低于其它放牧组( $P < 0.01$ ),在10~20 cm深度上,重度放牧组极显著地高于其它各放牧处理( $P < 0.01$ )。在相同放牧率下,0~5 cm土壤层中有机质和有机碳含量极显著地高于5~10 cm和10~20 cm( $P < 0.01$ ),而0~5 cm有机质的含量极显著地高于5~10 cm( $P < 0.01$ );全氮和速效氮的含量在不同土壤层中差异不显著( $P > 0.05$ )。轻度放牧、中度放牧和对照组0~5 cm和5~10 cm全磷含量显著高于10~20 cm,重度放牧5~10 cm高于0~5 cm和10~20 cm,而且在不同放牧处理和土壤层中,速效磷的含量均很小(在 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下)(表2)。

表2 不同放牧率下各土壤层营养因子含量的变化

Table 2 Changes of contents of soil nutrient factors on the different soil stratum s under stocking rates

土壤营养因子 Soil nutrient factors	放牧梯度 Grazing ranks	土壤层深度 The depth of soil stratum s (cm)		
		0~5 cm ( $\bar{X}_1 \pm S_1$ )	5~10 cm ( $\bar{X}_2 \pm S_2$ )	10~20 cm ( $\bar{X}_3 \pm S_3$ )
有机质 Organic matter ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CK	156.8 ± 49.7 <sup>Aa</sup>	97.7 ± 30 <sup>Ba</sup>	72.9 ± 25.0 <sup>Ca</sup>
	LG	130.7 ± 32.7 <sup>Aa</sup>	90.9 ± 21.98 <sup>Bb</sup>	59.8 ± 8.7 <sup>Cb</sup>
	MG	118.9 ± 30.1 <sup>Ab</sup>	85.3 ± 22.2 <sup>Bb</sup>	55.1 ± 21.1 <sup>Cb</sup>
	HG	103.4 ± 39.0 <sup>b</sup>	78.1 ± 26.3 <sup>Bb</sup>	45.8 ± 21.2 <sup>Cb</sup>
有机碳 Organic carbon ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CK	90.6 ± 28.8 <sup>Aa</sup>	56.2 ± 9.9 <sup>Ba</sup>	42.3 ± 9.8 <sup>Ca</sup>
	LG	75.8 ± 18.9 <sup>Ab</sup>	52.7 ± 12.8 <sup>Bb</sup>	34.5 ± 5.1 <sup>Cb</sup>
	MG	68.9 ± 17.5 <sup>Ab</sup>	49.5 ± 1.1 <sup>Bb</sup>	31.9 ± 9.9 <sup>Cb</sup>
	HG	59.9 ± 22.6 <sup>Ab</sup>	45.3 ± 15.2 <sup>Bb</sup>	26.6 ± 9.1 <sup>Cc</sup>
全氮 Total nitrogen ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CK	7.0 ± 2.6 <sup>Bc</sup>	5.1 ± 1.1 <sup>Ac</sup>	3.6 ± 1.3 <sup>Cc</sup>
	LG	6.2 ± 2.1 <sup>Ab</sup>	4.4 ± 1.9 <sup>Ab</sup>	3.2 ± 1.2 <sup>Ab</sup>
	MG	5.9 ± 1.61 <sup>Ab</sup>	3.9 ± 1.7 <sup>Ab</sup>	3.0 ± 1.2 <sup>Ab</sup>
	HG	5.4 ± 2.0 <sup>Ab</sup>	4.2 ± 1.1 <sup>Ab</sup>	2.6 ± 1.8 <sup>Ab</sup>
全磷 Total phosphorus ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CK	2.5 ± 1.0 <sup>Aa</sup>	2.4 ± 1.12 <sup>Aa</sup>	2.2 ± 0.8 <sup>Aa</sup>
	LG	2.5 ± 0.9 <sup>Aa</sup>	2.4 ± 0.9 <sup>Aa</sup>	2.0 ± 0.2 <sup>Aa</sup>
	MG	2.5 ± 0.96 <sup>Aa</sup>	2.2 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	1.8 ± 1.0 <sup>Aa</sup>
	HG	1.9 ± 1.0 <sup>Bb</sup>	2.1 ± 1.1 <sup>Ba</sup>	1.6 ± 1.0 <sup>Bb</sup>
有效氮 A available nitrogen ( $\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$ )	CK	3.9 ± 1.3 <sup>Aa</sup>	2.8 ± 1.10 <sup>Aa</sup>	1.7 ± 0.9 <sup>Aa</sup>
	LG	2.8 ± 1.5 <sup>Ba</sup>	2.3 ± 1.0 <sup>Ba</sup>	1.8 ± 0.6 <sup>Ba</sup>
	MG	3.35 ± 1.06 <sup>Ab</sup>	2.5 ± 1.2 <sup>Ab</sup>	1.6 ± 0.9 <sup>Ab</sup>
	HG	3.7 ± 1.6 <sup>Aa</sup>	2.6 ± 1.1 <sup>Aa</sup>	2.1 ± 0.9 <sup>Aa</sup>
速效磷 A available phosphorus ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	CK	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	LG	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	MG	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	HG	< 0.1	< 0.1	< 0.1
碳氮 C/N	CK	12.9 ± 3.9 <sup>Aa</sup>	11.74 ± 2.9 <sup>Aa</sup>	11.08 ± 2.8 <sup>Ba</sup>
	LG	12.16 ± 2.6 <sup>Aa</sup>	12.0 ± 3.0 <sup>Aa</sup>	10.8 ± 2.5 <sup>Ba</sup>
	MG	12.7 ± 2.7 <sup>Aa</sup>	12.5 ± 2.6 <sup>Aa</sup>	10.4 ± 3.2 <sup>Bb</sup>
	HG	11.1 ± 1.9 <sup>Ab</sup>	10.9 ± 1.9 <sup>Ab</sup>	10.2 ± 2.1 <sup>Bb</sup>

注 OM、OC、TN、TP、AN 和 AP 分别代有机质、有机碳、全氮、全磷、有效氮和有效磷。在相同的放牧率或土壤层中,大写字母不同者为差异极显著,小写字母不同者为差异显著。

Notes: OM, OC, TN, TP, AN and AP represent organic matter, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen and available phosphorus respectively. Under the same stocking rate and soil stratum, the different capitals indicate extremely significant difference; the different small letters show significant difference.

从表 2 看,土壤有机质的 C/N 比值的范围变化为 0~5 cm 为 11.09~12.90, 5~10 cm 为 10.89~12.52, 10~20 cm 为 10.2~11.74, C/N 的比值也随土壤深度的增大而减小。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤层中,速效氮在重度放牧组的含量低于对照组,但高于轻度和中度放牧组;在 10~20 cm 的土壤层上,重度放牧组的含量高于其它处理组,这可能与该区植物中 C/N 较低,矿化速度较慢而植物吸收相对较多有关<sup>[28]</sup>。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<sup>[8]</sup>。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过程,其速率也有相应的变化<sup>[9]</sup>。而土壤磷素的非生物固定作用与微生物固定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、成分和环境条件有关<sup>[10,11]</sup>。试验区寒冷的气候会影响磷净矿化作用、微生物和非生物固定作用,进而影响土壤的供磷能力和植物的营养状况。因此,磷素和含量(特别是有效磷的含量)可能是限制青藏高原高小嵩草(*Kobresia parva*)高寒草甸植物生长的瓶颈<sup>[13]</sup>。

表 3 放牧率和土壤深度对土壤各营养因子养分含量的影响

Table 3 Effects stocking rates and the depth on content soil nutrient factors

土壤营养因子 Soil nutrient factors	影响因子 Impact factors	平方和 SS	变异系数 df	F 值 F-value	显著性检验 Significance
有机质 Organic matter	土壤深度 Depth of soil (D s)	110 33 78	2	40 838 1	**
	放牧率 Stocking rates (S r)	3 012 515	3	7 433 26	*
	D s × S r	2 810 550 2	6	23 712 1	**
有机碳 Organic carbon	土壤深度 Depth of soil (D s)	3 214 563	2	48 378 4	**
	放牧率 Stocking rates (S r)	614 637 6	3	6 160 38	*
	D s × S r	2 199 772 6	6	15 093 4	**
全氮 Total nitrogen	土壤深度 Depth of soil (D s)	1 306 731	2	1 931 817	N s
	放牧率 Stocking rates (S r)	18 388 57	3	40 777 34	**
	D s × S r	9 352 9	6	13 901 2	*
全磷 Total phosphorus	土壤深度 Depth of soil (D s)	0 397 58	2	6 763 925	*
	放牧率 Stocking rates (S r)	0 393 371	3	10 038 49	**
	D s × S r	0 717 559	6	21 091 2	**
速效氮 A available nitrogen	土壤深度 Depth of soil (D s)	0 260 829	2	0 714 029	N s
	放牧率 Stocking rates (S r)	5 518 55	3	22 660 81	**
	D s × S r	4 730 585	6	19 011 7	**

在不同土壤层中,对照组土壤有机质和有机碳的含量显著地高于轻度、中牧和重度放牧组,这与关世英等人在内蒙古羊草草原上用绵羊做的试验结果一致<sup>[4,7,8]</sup>;而轻度、中度和重度放牧组之间差异极显著,这与他们的试验结果又不一致<sup>[4,7,8]</sup>。试验区气候寒冷,土体内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都比较弱,导致土壤磷素,特别是速效磷的含量比较低,但随着放牧率的提高,牦牛对植物体的采食更加频繁,而植物体对高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,同时可食牧草对毒杂草的抑制作用也相对减弱,使毒杂草表现出更高的适合度而竞争更多的土壤营养,因此表现为土壤磷素对放牧率反映较为敏感<sup>[11,13]</sup>。另外,随着放牧率的提高,土壤有机质和有机碳的含量呈现出下降趋势,且对照组土壤有机质和有机碳的含量显著地高于轻度、中度和重度放牧组,这可能是对照组中 C/N 较高,土壤有机质的分解和植物有机体的加入过程均比较强烈,植物的吸收量又相对少,而其它 3 个处理组中 C/N 较低,土壤有机质的分解和植

物有机体的加入过程均比较弱,植物的吸收量又相对多的原因<sup>[14,15]</sup>。放牧对氮素的影响应从短期和长期效应两方面来评价。在短期内,适度放牧可加速氮循环,草地生态系统中总氮量变化不大<sup>[16,17]</sup>,但随着放牧率的提高和放牧时间的持续,草地植被群落发生变化,从而导致全氮和速效氮的含量变化<sup>[18]</sup>。因此全氮和速效氮的含量对放牧率比较敏感,但对

土壤深度不是很敏感(表 2)。

## 2.2 土壤各营养因子平均养分的响应

随着放牧率的提高,土壤有机质、有机碳、全磷和全氮平均含量随放牧率的增加呈明显降低趋势,而速效氮含量的变化均出现了“高-低-高”的变化趋势,对照组和轻度放牧组速效氮的含量高于中度和重度放牧组(图 2)。

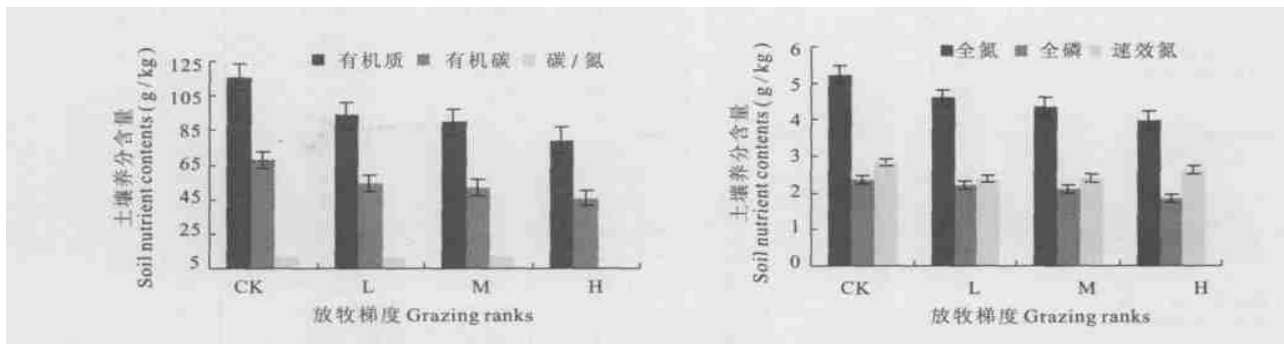


图 2 不同放牧率下土壤营养因子平均营养状况的变化

Fig. 2 Average nutrient status of soil factors on the different stocking rates

土壤性质的变化比较植物的变化滞后,由于这部分库容量大,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关系。本试验中全氮和速效氮的变化规律与一些学者的结论不一致<sup>[4,7,8]</sup>。李香真等对内蒙古草原的研究结果表明,氮素是限制植物和微生物生长的重要因素<sup>[7,18]</sup>;王启兰、张金霞等认为,高寒草甸土壤的氨化作用和反硝化作用很强,引起氮素损失,限制了土壤肥力的提高<sup>[16,17]</sup>。本实验中相同土壤层营养因子对放牧率的响应敏感,但不同土壤层全氮和速效氮对放牧率的反应不是很敏感。这可能是由于试验时间不够长,放牧率的变化在短期内不足以引起其营养成分的变化,因此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而变化的机理及其规律。

## 2.3 放牧率与不同土壤因子之间的关系

选用如下二次曲线模型,描述土壤各营养因子与放牧率之间的回归关系:

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

$Y$  代表土壤各营养因子的含量,  $x$  为放牧率,其

中  $a(a \neq 0)$ 、 $b$  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。具体回归计算结果见表 4。

### 2.3.1 放牧率与各土壤层营养因子含量之间的关系

回归方程表明,土壤有机质、有机碳、全氮、全磷的  $a$  值为零,其回归方程成为线性关系,只有速效氮的回归方程成为二次曲线性关系(表 4)。随着当放牧率的逐渐增强,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 heads/hm<sup>2</sup>、1.08 heads/hm<sup>2</sup> 和 1.22 heads/hm<sup>2</sup> 时,0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 土壤速效氮含量依次达到最小。若放牧率继续增强,各土壤层速效氮的含量依次开始增加。这一方面是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,土壤速效氮的含量减小到草地出现进一步退化时,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)<sup>[12]</sup>,或是其它原因,有待于做进一步研究。特别是在草地生态系统

中,放牧率对各土壤因子含量的影响与植物的根系、地进一步研究和探讨<sup>[19-22]</sup>。土壤动物和微生物之间的效应关系,尚需系统、深入

表 4 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

Table 4 Regression equations between stocking rates and soil nutrient factors on the different soil surface stratum s

土壤营养因子 Soil nutrient factors	土壤深度 Depth of soil stratum s (cm)	回归方程( $Y = ax^2 + bx + c$ ) Regression equations			相关系数 $R$ 或 $R^2$ Correlative coefficients	显著性检验 Significance
		$a$	$b$	$c$		
有机质 Organic matter	0~ 5	0	- 19.225	188.5	- 0.9066	*
	5~ 10	0	- 60.434	104.09	- 0.9991	**
	10~ 20	0	- 8.5133	79.4931	- 0.9762	**
有机碳 Organic carbon	0~ 5	0	- 7.537	95.57	- 0.9429	*
	5~ 10	0	- 4.14	61.745	- 0.9960	*
	10~ 20	0	- 4.976	46.27	- 0.9818	**
全氮(g/kg) Total nitrogen	0~ 5	0	- 0.5227	7.43	- 0.9846	**
	5~ 10	0	- 0.2203	4.9483	- 0.5857	ns
	10~ 20	0	- 0.3247	3.9134	- 0.9737	**
全磷(g/kg) Total phosphorus	0~ 5	0	- 0.184	2.917	- 0.8052	ns
	5~ 10	0	- 0.1243	2.4867	- 0.9229	*
	10~ 20	0	- 0.1803	2.345	- 0.9978	**
速效氮(mg/100g) A vailable nitrogen	0~ 5	0.7747	- 1.67	3.3897	0.7888( $R^2$ )	*
	5~ 10	0.3182	- 0.78	2.8637	0.8216( $R^2$ )	*
	10~ 20	0.1815	- 0.44	1.7378	0.6815( $R^2$ )	ns

注  $a, b, c$  为参数,表 6 同。  
Note  $a, b$  and  $c$  represent the parameter. Table 6 was the same

2.3.2 放牧率与土壤各因子平均含量之间的关系  
放牧率与土壤各因子平均含量之间的回归关系与土壤各因子平均含量之间的关系一致,只是  $a$  ( $a < 0$ )、 $b$  和  $c$  的值不同而已(表 5)。随着当放牧率的逐渐增强,不同土壤深度速效氮的含量也逐渐减小,当放牧率  $x$  达到 1.08 heads/hm<sup>2</sup>,土壤速效氮含量达

到最小。若放牧率继续增强,土壤速效氮的含量开始增加。土壤速效氮含量达到最小的放牧率位于轻度放牧(0.89 heads/hm<sup>2</sup>)和中度放牧(1.45 heads/hm<sup>2</sup>)之间,因此中、轻度放牧应该是青藏高原小嵩草高寒草甸的适宜放牧率<sup>[2,23-25]</sup>。

表 5 放牧率与土壤各因子平均含量之间的回归方程

Table 5 Regression equations between stocking rates and average contents of soil nutrient factors

土壤营养因子 Nutrient factors of soil	回归方程( $Y = ax^2 + bx + c$ ) Regression equations			相关系数 $R$ 或 $R^2$ Correlative coefficients	显著性检验 Significance
	$a$	$b$	$c$		
有机质 Organic matter	0	- 11.613	124.17	- 0.9724	**
有机碳 Organic carbon	0	- 6.753	71.865	- 0.9519	*
全氮 Total nitrogen	0	- 0.397	5.54	- 0.9829	**
全磷 Total phosphorus	0	- 0.17	2.56	- 0.9812	**
速效氮 A vailable nitrogen	0.4227	- 0.909	3.685	0.9973( $R^2$ )	**

2.4 土壤水分的响应

表 6 不同放牧率下各土壤层含水量的方差分析

Table 6 ANOVA of the soil water contents on stocking rates

土壤深度 The depth of soil(cm)	影响因子 Impact factor	平方和 SS	变异系数 df	F-值 F-value	显著性检验 Significance
0~ 5	放牧率 Stocking rates	18.6015	3	11.188	*
	时间 Time	1.8336	1	3.327	ns
5~ 10	放牧率 Stocking rates	194.6911	3	10.656	*
	时间 Time	5.052	1	0.8356	ns
10~ 20	放牧率 Stocking rates	16.112	3	3.699	*
	时间 Time	0.6272	1	0.432	ns

由图 3 可以看出,随着放牧率的增加,5~ 10 cm 和 10~ 20 cm 土壤水分含量的变化呈现出“低-高-低”的变化趋势,且轻度放牧组高于其它处理组。0~ 5 cm 则出现“S”型变化,中度放牧组高于其它处理

组.方差分析表明,放牧率对同一土壤层含水量的影响显著( $P < 0.05$ ),但不同年度间土壤含水量不存在显著差异( $P > 0.05$ )(表6).这是因为在土壤表面(0~5 cm),随放牧率的增加(从零牧到轻度放牧),土壤容重和坚实度都相对增大,导致毛管持水量下降,土壤总孔隙度减小,从而使水分含量也略有下降.随着放牧继续增加,地上生物量相对减少,蒸发时水分向上传导的速度减慢,而蒸发量又减小,导致土壤含水量增加.但放牧率进一步提高,土壤容重和坚实度进一步增大,导致毛管持水量下降,土壤总孔隙度继续减小,而蒸发量相对减小,含水量出现下降趋势.5~10 cm和10~20 cm土壤含水量的变化相似,从零牧到轻度放牧,对这两层土壤容重和毛管持水量影响不大,而蒸发量相对减小,因此土壤含水量呈升高趋势.随着放牧继续增加,土壤容重和毛管持水量下降,土壤总孔隙度减小,而且由于表层水分的蒸发与蒸腾,土壤势值增高,下层水分不断向上补充,导致下层含水量下降<sup>[21,26,27]</sup>.

### 3 结 论

(1) 在各土壤层上,有机质、有机碳、全氮和全磷的含量随放牧率的加强而呈明显降低的趋势,且它们的含量与放牧率呈负相关关系.速效氮的变化出现了“高-低-高”的变化趋势,它与放牧率呈二次回归关系.而且各土壤营养因子平均含量的变化与各层的变化相似.

(2) 放牧率相同时,有机质和有机碳的含量在土壤各层之间差异极显著( $P < 0.01$ ),全磷差异显著( $P < 0.05$ ),全氮和速效氮差异不显著( $P > 0.05$ ).放牧率和土壤深度的交互作用对土壤各营养

因子含量的影响极显著( $P < 0.01$ ).

(3) 放牧率对各土壤层的含水量有显著影响( $P < 0.05$ ),不同年度间同一土壤层含水量的差异不显著( $P > 0.05$ ).

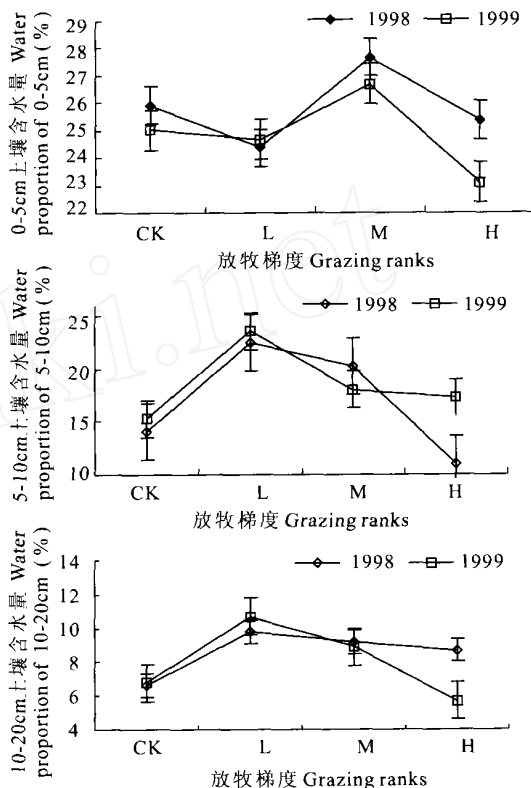


图3 不同土壤层土壤水分含量的变化

Fig 3 Changes of soil water' proportion for different soil stratum s with stocking rates

致谢 本文系作者硕士论文“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] DONG Q M (董全民), LI Q Y (李青云), MA Y SH (马玉寿), LI F J (李发吉), LI Y F (李有福). Effects of stocking intensity on above-ground biomass and vegetation structure in summer alpine meadow [J]. *Qinghai Prataculture* (青海草业), 2002, 11(2): 8-10 (in Chinese).
- [2] DONG Q M (董全民), LI Q Y (李青云), SHI J J (施建军), MA Y SH (马玉寿), WANG Q J (王启基). Effects of stocking rates on aboveground biomass and yaks growth in alpine meadow [J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences* (青海畜牧兽医杂志), 2002, 32(3): 5-7 (in Chinese).
- [3] MA Y S (马玉寿), LANG B N (郎百宁), WANG Q J (王启基). Review and prospect of the study on "Black Soil" deterioration grassland [J]. *Prataculture Science* (草业科学), 1999, 16(2): 5-83 (in Chinese).
- [4] GUAN SH Y (关世英), QIP Q (齐沛钦), KANG SH A (康师安), CHANG J B (常进宝). Effects of the steppe soil nutrient contents under different grazing intensities [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1997, 5: 17-22 (in Chinese).
- [5] WANG Q J (王启基), ZHOU X M (周兴民), ZHOU L (周立), SHEN ZH X (沈振西), ZHANG Y Q (张堰青), ZHANG Y SH (张跃生), LI Y N (李英年). The effect analysis of control measure on the accumulation and shift of N, P, K control in alpine regressive pasture [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1995, 4: 281-292 (in Chinese).



- [6] WANG Q J(王启基), ZHOU X M(周兴民), SHEN ZH X(沈振西), DENG Z F(邓自发). The controls of N, P, K and its correlative analysis for main plant population in resumption ecosystem [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1995, 4: 321- 330 (in Chinese).
- [7] LI X ZH(李香真), CHEN Z ZH(陈佐忠). Influences of stocking rates on C,N,P contents in plant-soil system [J]. *Acta Agraria Sinica* (草地学报), 1998, 6(2): 90- 97 (in Chinese).
- [8] LI Y H(李永宏), ZHONG W Q(钟文勤), KANG L(康乐), LIU Y J(刘永江), LIAO Y N(廖仰南), GUAN S Y(关世英), JIA S H(贾树海). Interaction and co-changes of different biological categories and soil properties under grazing influence in steppe ecosystem [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1997, 5: 1- 11 (in Chinese).
- [9] BAO X K(鲍新奎), ZHAO B L(赵宝莲), CAO G M(曹广民). Net mineralization of organic phosphorus in alpine soil [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1991 3: 227- 236 (in Chinese).
- [10] CAO G M(曹广民), BAO X K(鲍新奎), ZHAO B L(赵宝莲). Phosphorus microbial immobilization of alpine soil [J]. *Alpine Meadow Ecosystem*. (高寒草甸生态系统), 1991, 3: 237- 246 (in Chinese).
- [11] BAO X K(鲍新奎), CAO G M(曹广民), ZHAO B L(赵宝莲). Nonbiological fixation of organic phosphorus in alpine soil [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1991 3: 247- 256 (in Chinese).
- [12] ZHANG R(张荣), DU G Z(杜国祯). Redundance and compensation of grazed grassland communities [J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 1998, 7(4): 13- 19 (in Chinese).
- [13] MA Y SH(马玉寿), LANG B N(郎百宁), LI Q Y(李青云), SHI J J(施建军), DONG Q M(董全民). Study on rehabilitating and re-building technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow River source region [J]. *Prataculture Science* (草业科学), 2002, 19(9): 1- 5 (in Chinese).
- [14] ZHANG J X(张金鑫), CAO G M(曹广民), ZHAO J M(赵静玫), WANG Z M(王在模). The N, P, K dynamics of Kobresia humilis meadow in alpine meadow ecosystem [J]. *Alpine Meadow Ecosystem*. (高寒草甸生态系统), 1995, 4: 11- 18 (in Chinese).
- [15] CAO G M(曹广民), ZHANG J X(张金鑫), BAO X K(鲍新奎). The phosphorus cycling in an alpine meadow ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, 19(4): 514- 518 (in Chinese).
- [16] WANG Q L(王启兰), YANG T(杨涛). Study on the nitrogen metabolic activity in alpine meadow soil [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1995, 4: 179- 182 (in Chinese).
- [17] DU Y G(杜伊光), LI J Z(李家藻), SHI ZH X(师治贤), YANG T(杨涛). Studies on the denitrification of soil microorganism caused the nitrogen loss in alpine meadow ecosystem [J]. *Alpine Meadow Ecosystem* (高寒草甸生态系统), 1995, 4: 189- 195 (in Chinese).
- [18] LI X ZH(李香真), CHEN Z ZH(陈佐忠). Nitrogen loss and management in grassed grassland [J]. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 1997, 2(3): 241- 250 (in Chinese).
- [19] CAO G M, TANG Y H, MO W H, WANG Y S, LI Y N, ZHAO X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, (6): 237- 273.
- [20] DAVI D M, JEANNE C. Restoration of riparian meadows degraded by livestock grazing: above- and below ground responses [J]. *Plant Ecology*, 2002, 163: 77- 91.
- [21] JIA S H H(贾树海), WANG CH ZH(王春枝), SUN ZH T(孙振涛), LI S H L(李绍良), CHEN Y J(陈有君), JIN C W(靳存旺). Study on grassland dark sandy chestnut compaction by grazing intensity and grazing season [J]. *Acta Agraria Sinica* (草地学报), 1999, 7(3): 217- 222 (in Chinese).
- [22] YUE D X(岳东霞), LI W L(李文龙), LI Z ZH(李自珍). Analysis of AHP strategic decision for grazing management system and ecological restoration in the alpine wetland at Gannan in Gansu [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), 2004, 24(2): 248- 253 (in Chinese).
- [23] DONG Q M(董全民), MA Y SH(马玉寿), LI Q Y(李青云). Effect of stocking intensity on growth of yak [J]. *Acta Agraria Sinica* (草地学报), 2003, 11(3): 256- 260 (in Chinese).
- [24] DONG Q M(董全民), LI Q Y(李青云), SHI J J(施建军), MA Y SH(马玉寿). Effect of stocking rate on productivity of yak grazing on alpine meadow [J]. *Grassland and Turf*. (草原与草坪), 2003, (3): 49- 52 (in Chinese).
- [25] DONG Q M(董全民), MA Y SH(马玉寿), LI Q Y(李青云), SHI J J(施建军), WANG Q J(王启基). Effect of stocking rates for yaks on vegetation in alpine meadow warm-season pasture [J]. *Prataculture Science* (草业科学), 2004, (2): 48- 53 (in Chinese).
- [26] HONG M(红梅), CHEN Y J(陈有君), LI Y L(李艳龙), LI J G(李建国). Effects of grazing intensity on soil water contents and aboveground biomass [J]. *Inner Mongolian Agricultural Science and Technology* (Special of soil and fertilizer)(内蒙古农业科技)(土肥专辑), 2001: 25- 26 (in Chinese).
- [27] GE Y, CHANG J, FU C X, CHEN G Y S. Effect of soil water status on the physioecological traits and the ecological replacement of two endangered species, *Changium snyderioides* and *Chuamm inshen violaceum* [J]. *Bot Bull Acad Sin*, 2003, 44: 291- 296.
- [28] LU C Y(鲁彩艳), CHEN X(陈欣). Mineralization process of soil organic nitrogen in different fertilizer systems and organic materials with different C/N ratios [J]. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2003, 34(4): 267- 270 (in Chinese).