

放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响

王启兰, 曹广民, 王长庭

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

摘要: 观测了放牧对高寒小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响, 结果表明: 随着放牧压力的增大, 植被盖度、地上生物量、土壤有机质、全氮、硝态氮、全磷、有效磷、土壤水分明显下降, 而地下生物量、土壤容重、pH 及根土比呈现增大趋势, 不同放牧处理间植物群落特征及土壤理化特性显示出明显的差异 ($P < 0.05$); 纤维素分解酶、多酚氧化酶、脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均随放牧压力增大而下降, 只有过氧化氢酶以轻牧最高, 各处理间上述土壤酶活性差异程度不同; 随着土壤深度的增加, 土壤水分含量、地下生物量、根土比、土壤有机质及氮、磷养分等明显下降, 而土壤容重和 pH 逐渐增大, 且不同层次之间存在显著的差异 ($P < 0.05$); 除过氧化氢酶和多酚氧化酶外, 其它土壤酶活性随土壤深度的加深显著减小。

关键词: 小嵩草草甸; 放牧; 土壤酶活性; 土壤环境因素

中图分类号: S154.2; S155.2⁺92

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)05-0856-09

The impact of grazing on the activities of soil enzymes and soil environmental factors in alpine *Kobresia pygmaea* meadow

WANG Qi-lan, CAO Guang-min, WANG Chang-ting

(Northwest Institute of Plateau Biology CAS, Xining 810008, China)

Abstract: In order to determine the impacts of grazing on the soil enzyme activities and other environmental factors in alpine *Kobresia pygmaea* meadow, we investigated the activities of cellulase, polyphenol oxidase, urease, protease, alkali phosphatase, invertase and catalase, and the soil environmental factors. The results showed as follows: The vegetation coverage, above-ground biomass, soil organic matter, total nitrogen, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, total phosphorous, available phosphorous, water content decreased, while the underground biomass, bulk density, pH and root/soil ratio increased with grazing intensity. The activities of most soil enzymes decreased with grazing intensity, while the catalase was higher in lightly grazing treatment than other treatments. The soil water content, underground biomass, root/soil ratio, soil organic matter and soil nitrogen and phosphorus decreased, while bulk density and pH increased with soil depth ($P < 0.05$). Except for catalase and polyphenol oxidase, the activities of the other soil enzymes decreased obviously with soil depth. The analysis of variance indicated that the characters of plant community, soil physical and chemical properties showed significant differences ($P < 0.05$), while only certain soil enzyme activities showed differences among different grazing intensity treatments.

Key words: *Kobresia pygmaea* meadow; grazing; enzyme activity; environmental factors

土壤酶是土壤中一切生物化学过程的主要参与者, 是生态系统物质循环和能量流动等过程中最活

跃的生物活性物质。土壤酶主要来源于动植物的分泌及其残体以及微生物的分泌等^[1], 其活性大小表

收稿日期: 2006-07-28

修改稿收到日期: 2007-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(40471133); 中国科学院资源环境领域野外台站基金; 中国科学院西北高原生物研究所知识创新工程重点研究领域(cjc020144)项目资助。

作者简介: 王启兰(1964—), 女, 青海湟中人, 副研究员, 主要从事土壤微生物生态学研究。E-mail: wql@nwipb.ac.cn.

征了土壤中物质代谢的旺盛程度,是土壤肥力的重要指标。土壤酶活性不仅与土壤生产力有密切的关系,还与植物群落的演替、植物的种类组成和植物多样性有关^[2]。放牧是影响草地植物多样性和生产力,引起生态系统稳定性及其服务功能衰退的最主要人类活动之一^[3]。研究表明适度放牧能够增加牧草产量^[4,5],有利于草地植物多样性的增加^[6,7]。但过牧或持续不合理的草地利用一方面使地表植被盖度和物种多样性明显下降^[8],物种和群落组成发生改变^[9]。另一方面由于动物的采食践踏,使土壤结构遭到破坏,加之土壤有机物的投入减少,会对土壤酶及微生物活性造成严重影响^[10],引起土壤生物学特性的改变和活性的下降^[11]。

高山嵩草(*Kobresia*)草甸是青藏高原分布范围最广、面积最大、饲用价值较高的高寒草地类型。自20世纪80年代以来,由于长期超载过牧和不合理开发利用,使生态环境急剧恶化,水土流失加重,原生植被退化,草地生产力下降,土壤生态系统的服务功能严重受损乃至逐渐丧失^[12]。由于土壤酶活性与土壤类型、植被特征(植物群落生物量、植被盖度、植物多样性等)、土壤微生物数量及酶类本身的性质有关^[13-16],所以进行高寒嵩草草甸不同放牧强度下土壤酶活性及环境因子的研究,对揭示高寒嵩草草甸土壤物理化学性状的变化、土壤生态系统的退化机理以及草地合理利用有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

本研究于2005年在中国科学院海北高寒草甸生态系统开放实验站区进行。该区位于青藏高原东北隅的祁连山南坡谷地,北纬37°29′~37°45′,东经101°12′~101°23′,海拔2900~3500 m,属高原大陆性气候,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,暖季短暂而凉爽,冷季寒冷而漫长。年平均气温-1.7℃,年降水量约426~860 mm,80%的降水集中于植物生长季的5~9月,蒸发量1160.3 mm,无绝对无霜期。主要土壤类型为高山草甸土、高山灌丛草甸土和沼泽土,土壤有机质及全量养分丰富而速效养分贫乏。植被类型为青藏高原典型的地带性植被,主要有高寒草甸(Alpine meadow)、高寒灌丛(Alpine shrub)和沼泽化草甸(Swamp meadow)。植物群落结构简单,生长期短,生产力较低。

1.2 样地设置

在作为冬季草场的典型小嵩草草甸设置4种放

牧压力试验:对照(CK)、轻牧(L)(Light grazing)、中牧(M)(Medium grazing)和重牧(H)(Heavy grazing)。各样地面积为20公顷,土壤均为高山草甸土,其牧压(即每公顷的牧羊数)和草地植物生长特征等基本状况如下。

对照(CK):牧压为3,草地均一,植物长势好,地表下无草层,坡度25°。

轻牧(L):牧压为5,草地较均一,植物长势较好,地表下可有草层,坡度15°。

中牧(M):牧压为7,地表有零星秃斑,地表下草层小于15 cm,坡度15°。

重牧(H):牧压为9,地表秃斑较多,地表下形成10~30 cm的草层,坡度15°。

1.3 样品采集及测定方法

采用对角线法在草盛期设置5个50 cm×50 cm的样方,用标准收获法测定其地上初级生产量;用土柱法测定地下生物量(从剪去地上植物的上述样方,挖出25 cm×25 cm×40 cm的土柱,按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm切开,分别筛出草根,洗净并挑去死根,80℃烘至恒重);同时在5个样方分别采集0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm土壤样品,风干过0.5 mm筛,剔除草根。用比色法测定其土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、纤维素酶、过氧化氢酶、蛋白酶及多酚氧化酶的活性^[1,17-18];用TOC-5000A型有机质分析仪测定土壤有机质含量;土壤养分含量测定按参考文献[19]中的方法进行;用烘干法测定土壤水分含量;环刀法测定土壤容重;容量瓶法测定根土比;电极法测土壤pH。

2 结果与分析

2.1 放牧对植物群落组成的影响

在不同放牧压力下,草场植物群落的组成种类变化不明显,均由30多种植物组成,但随着放牧强度的增大,优良牧草比例下降,杂草类群比例增高,一些喜光和采食性较差的杂类草开始迁入。对照样地有36种植物,主要以小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)和早熟禾(*Poa alpigena*)为主,伴有黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、异叶米口袋(*Amblytropis diversifolia*)等;轻牧样地有30种植物,以小嵩草、垂穗披碱草、异针茅、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)为主,伴有紫羊茅(*Festuca rubra*)、摩岭草(*Morina chinensis*)等;中牧样地有35种植物,以小嵩草、异针茅、紫羊茅、美丽风毛菊为主,伴有急弯棘豆(*Oxytropis deflexa*)、柔软紫

菀 (*Aster flaccidus*) 等;重牧样地有 33 种植物,以小嵩草、异针茅、异叶米口袋、美丽风毛菊为主,伴有矮火绒 (*Leontopodium nanum*)、麻花苳 (*Gentiana straminea*) 等。由对照 轻牧 中牧 重牧,牲畜喜食的垂穗披碱草的相对生物量依次为 5.72%、5.18%、5.09%、1.09%,异针茅依次为 11.54%、10.99%、9.39%、5.85%,矮嵩草依次为 2.67%、2.54%、1.47%、1.31%,均呈现逐渐降低的趋势;而牲畜采食性差的美丽风毛菊依次为 5.08%、12.67%、15.08%、19.31%,矮火绒依次为 1.13%、2.24%、3.74%、5.08%,呈现出逐渐升高的趋势,同时杂类草比例明显升高。由于不同植物种群被采食的程度及其耐牧性的差异,使植物种群在不同放牧压力下

分布格局发生了明显的变化,呈现出禾草类群比例明显下降,部分耐牧性强的莎草类群比例稍有增高,如小嵩草的相对生物量由对照 轻牧 中牧 重牧依次为 21.33%、14.48%、15.40%、21.91%。

2.2 放牧对土壤理化性状的影响

由表 1 可见,随着放牧压力的增大,土壤含水量呈明显下降趋势,其平均值依次为 27.80%、25.82%、23.745% 和 22.72%;土壤水分含量在 0—10 cm 层,重牧显著低于其它 3 个处理,10—20 cm 层,4 个处理间均有显著的差异,20—40 cm 层,对照 > 轻牧 > 中牧和重牧,中牧和重牧间无明显差异;随着土壤深度的增加,各处理的土壤含水量逐渐降低,不同层次间显示出明显的差异。

表 1 不同放牧压力下土壤的物理性状

Table 1 Soil physical properties as affected by different grazing intensities

处理 Treatment	土壤深度 (cm) Depth	土壤水分 (%) Water content	土壤容重 (g/cm^3) Bulk density	根土比 Roots/ Soil ratio
对照 CK	0—10	30.96 \pm 0.37 a	0.75 \pm 0.02 c	0.59 \pm 0.04 c
	10—20	27.37 \pm 0.28 b	0.92 \pm 0.06 b	0.22 \pm 0.03 e
	20—40	25.08 \pm 0.35 c	1.08 \pm 0.08 ab	0.09 \pm 0.01 g
轻牧 L	0—10	30.41 \pm 0.27 a	0.59 \pm 0.05 d	0.61 \pm 0.08 bc
	10—20	25.60 \pm 0.26 c	0.94 \pm 0.04 b	0.24 \pm 0.04 e
	20—40	21.44 \pm 0.19 de	1.14 \pm 0.06 a	0.09 \pm 0.02 g
中牧 M	0—10	29.91 \pm 0.43 a	0.58 \pm 0.03 d	0.74 \pm 0.01 b
	10—20	22.58 \pm 0.24 d	1.07 \pm 0.03 ab	0.37 \pm 0.03 d
	20—40	18.75 \pm 0.17 e	1.26 \pm 0.04 a	0.12 \pm 0.03 f
重牧 H	0—10	25.96 \pm 0.31 c	0.65 \pm 0.05 cd	1.54 \pm 0.14 a
	10—20	21.87 \pm 0.29 de	0.98 \pm 0.04 b	0.21 \pm 0.07 e
	20—40	19.44 \pm 0.18 e	1.14 \pm 0.04 a	0.14 \pm 0.02 f

处理 Treatment	土壤深度 (cm) Depth	盖度 (%) Coverage	地上生物量 (g/m^2) Above-ground biomass	地下生物量 (g/m^2) Underground biomass
对照 CK	0—10	146.32 \pm 7.34 a	402.72 \pm 38.75 b	2283.20 \pm 41.59 c
	10—20			276.54 \pm 11.36 f
	20—40			135.10 \pm 6.06 g
轻牧 L	0—10	139.52 \pm 9.96 b	425.72 \pm 24.05 a	3336.11 \pm 42.95 b
	10—20			619.39 \pm 111.85 d
	20—40			156.42 \pm 6.08 g
中牧 M	0—10	136.45 \pm 6.97 b	403.28 \pm 14.73 b	3380.46 \pm 363.52 b
	10—20			503.39 \pm 104.90 d
	20—40			160.96 \pm 9.98 g
重牧 H	0—10	106.27 \pm 4.45 c	246.06 \pm 21.19 c	3770.43 \pm 154.98 a
	10—20			374.56 \pm 47.33 e
	20—40			175.71 \pm 12.06 g

注 (Note): 表中不同字母表示差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$), 下同。The different letter indicate significantly difference at 5% level ($P < 0.05$), the same symbol was used for other tables.

在放牧压力下,土壤容重平均以中牧最高(0.97),重牧和对照次之(0.92),轻牧最小(0.89),除重牧和对照间无明显差异外,其余处理间均存在显著的差异。土壤容重在0—10 cm层,对照和重牧显著高于轻牧和中牧,在10—20 cm和20—40 cm层,由对照—轻牧—中牧,土壤容重逐渐升高,重牧有所降低,但不同处理间差异不明显。随着土壤深度的增加,土壤容重明显增大,不同层次之间均差异明显。

随着牧压的增大,土壤平均根土比呈增大趋势,依次为对照(0.30) < 轻牧(0.31) < 中牧(0.41) < 重牧(0.63),其中对照和轻牧显著低于中牧,重牧明显高于其它处理。在0—10 cm层,中牧和重牧与其它处理间存在显著差异,对照和轻牧间差异不明显;10—20 cm层,中牧显著高于其它处理,其余3个处理间差异不显著;20—40 cm层,对照和轻牧显著低于中牧和重牧。随着土壤深度的加深,根土比明显减小,不同层次间表现出明显的差异。

植物的垂直高度及盖度随着放牧压力的增大明显下降,对照的盖度显著高于其它处理,重牧显著低于其它处理,轻牧和中牧间差异不显著。地上生物量为轻牧显著高于其它3个处理,重牧显著低于其它处理,对照和中牧居中,且二者间无明显差异。地下生物量在0—10 cm层,以重牧显著高于其它处理,对照显著低于其它处理,轻牧和中牧居中,二者间无显著差异;在10—20 cm层以轻牧和中牧显著高于其它处理,对照显著低于其它处理,重牧居中;20—40 cm层各处理间无显著差异;随土壤深度的增加,地下生物量迅速降低,各层次之间呈现出明显的差异。由于牲畜的反复践踏啃食,中牧及重牧样区,在地表出现了不同程度的秃斑,地表以下草根枯死形成不同厚度的草筏层。

随着牧压的增大,土壤pH逐渐升高,中牧和重牧显著高于对照和轻牧;0—10 cm层各处理间无显著的差异,10—20 cm层中牧和重牧显著高于对照和轻牧,20—40 cm层以重牧最高,中牧次之,对照和轻牧最低;随土壤深度的加深,pH升高,除重牧有明显的层次差异外,其它处理的不同层次间差异不明显(表2)。

随着牧压的增大,土壤全氮含量依次为对照 > 轻牧 > 中牧 > 重牧;在0—10 cm层重牧显著低于其它处理,10—20 cm层对照显著高于中牧,20—40 cm层对照显著高于其它处理,其余间差异不显著;随土壤深度增加,全氮含量明显下降,各层次间存在显

著的差异。土壤平均铵态氮含量依次为中牧 > 重牧 > 轻牧 > 对照;表层土壤以中牧最高,重牧次之,轻牧居第3,对照最低,各处理间差异显著;10—20 cm层为对照显著低于其它处理,20—40 cm层重牧显著高于其它处理。不同层次间铵态氮含量虽显示出一定程度的差异,但其变化无一定规律。随着牧压的增大,硝态氮含量呈明显下降的趋势;0—10 cm和10—20 cm层以对照和轻牧显著高于中牧和重牧,20—40 cm层以重牧显著低于其它处理;随土壤深度增加,硝态氮含量降低,各层次间差异程度不同。

在放牧压力下,土壤有机质依次为轻牧 > 对照 > 重牧 > 中牧;在0—10 cm层对照和轻牧显著高于中牧和重牧,10—20 cm层轻牧显著高于其它处理,20—40 cm层各处理间无显著差异;随土壤深度的增加,各处理的土壤有机质迅速降低,不同层次间显示出明显的差异。

随着牧压的增大,土壤全磷含量呈下降的趋势,且3层均表现为对照显著高于其它处理,而轻牧、中牧和重牧间差异不明显;速效磷含量随牧压增大而降低,0—10 cm层除对照和轻牧间差异不显著外,其它处理间均差异明显,10—20 cm层对照和轻牧显著高于中牧和重牧,20—40 cm层各处理间无显著差异;随土壤深度的加深,全磷和速效磷含量逐渐降低,各层次间均存在不同程度的差异。

全钾及速效钾含量在不同放牧处理下差异不显著,其变化没有一定的规律性,这可能与高寒草甸土壤钾素储量丰富^[20]有关;随土壤深度的增加,大多层次全钾变化不明显,速效钾呈显著下降的趋势。

2.3 不同放牧强度小嵩草草甸的土壤酶活性

纤维素酶是表征土壤碳素循环速度的重要指标;多酚氧化酶将土壤中多元酚氧化为醌,促进土壤的腐殖化进程;土壤脲酶和蛋白酶则直接参与土壤含N有机化合物的转化,其活性强度常用来表征土壤氮素供应强度^[11];磷酸酶是促进有机磷化合物分解的酶类,能增加土壤中磷素和易溶性营养物质;蔗糖酶促进糖类的水解,加速土壤碳素循环;过氧化氢酶表征土壤腐殖化强度和有机质积累程度。

由表3可见,随着牧压的增大,土壤纤维素酶活性呈下降趋势,在0—10 cm和10—20 cm层,呈现出重牧显著低于其它处理,20—40 cm层各处理间差异不显著。多酚氧化酶活性随牧压增大而减小,0—10 cm层对照显著高于其它处理,10—20 cm层轻牧显著高于其它处理,20—40 cm层重牧显著低于其它处

表 2 不同放牧压力下土壤的化学性状
Table 2 Soil chemical properties as affected by different grazing intensities

处理 Treatment	土壤深度 Depth (cm)	pH	全氮 Total-N (g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
对照	0—10	7.75 ± 0.01 cd	8.3 ± 0.3 a	7.35 ± 0.84 e	8.03 ± 1.02 a	144.81 ± 4.86 a	0.93 ± 0.02 a	9.74 ± 0.22 a	19.5 ± 0.4 bc	298.02 ± 6.43 b
CK	10—20	8.03 ± 0.01 c	5.1 ± 0.3 c	5.38 ± 0.32 f	7.47 ± 0.93 b	81.12 ± 3.14 d	0.88 ± 0.01 ab	6.88 ± 0.21 d	18.9 ± 0.3 c	160.70 ± 5.64 cd
	20—40	8.21 ± 0.01 bc	3.9 ± 0.2 d	—	—	57.16 ± 2.65 e	0.75 ± 0.01 b	—	18.7 ± 0.3 c	—
轻牧	0—10	8.15 ± 0.01 bc	8.3 ± 0.4 a	9.44 ± 3.14 d	7.74 ± 1.93 ab	138.23 ± 5.09 ab	0.74 ± 0.02 b	9.30 ± 0.33 ab	20.8 ± 0.6 ab	361.57 ± 36.58 a
L	10—20	8.08 ± 0.00 c	4.5 ± 0.3 cd	11.62 ± 3.19 c	7.14 ± 1.86 b	98.13 ± 4.47 c	0.64 ± 0.03 c	7.07 ± 0.36 cd	21.4 ± 0.8 a	189.11 ± 16.22 c
	20—40	8.21 ± 0.03 bc	2.8 ± 0.3 e	10.16 ± 3.04 cd	5.32 ± 0.91 e	60.58 ± 4.53 e	0.59 ± 0.03 cd	3.58 ± 0.58 f	19.8 ± 0.7 b	155.03 ± 6.94 d
中牧	0—10	8.17 ± 0.01 bc	8.9 ± 0.4 a	15.98 ± 4.14 a	6.66 ± 1.02 c	122.11 ± 6.95 b	0.77 ± 0.01 b	8.88 ± 0.68 b	20.4 ± 0.6 b	344.67 ± 5.84 a
M	10—20	8.27 ± 0.01 b	3.8 ± 0.3 d	10.41 ± 2.67 cd	6.15 ± 0.82 cd	75.82 ± 4.24 de	0.59 ± 0.02 cd	4.55 ± 0.67 e	20.3 ± 0.5 b	181.47 ± 7.64 c
	20—40	8.29 ± 0.01 b	2.0 ± 0.3 e	11.42 ± 2.95 c	5.20 ± 1.32 e	53.70 ± 4.22 e	0.51 ± 0.04 d	3.36 ± 0.58 f	18.9 ± 0.6 c	147.92 ± 6.79 d
重牧	0—10	8.10 ± 0.02 c	7.5 ± 0.4 b	11.75 ± 2.46 c	6.17 ± 1.36 cd	113.78 ± 5.37 bc	0.71 ± 0.02 bc	7.69 ± 0.87 c	21.1 ± 0.7 a	361.44 ± 23.51 a
H	10—20	8.29 ± 0.00 b	4.3 ± 0.2 cd	12.45 ± 3.28 bc	6.08 ± 1.12 d	87.78 ± 4.35 cd	0.62 ± 0.02 c	4.63 ± 0.60 e	21.4 ± 0.5 a	184.98 ± 12.36 c
	20—40	8.38 ± 0.00 a	2.4 ± 0.2 e	13.19 ± 1.73 b	4.29 ± 1.31 f	57.06 ± 4.41 e	0.57 ± 0.03 cd	2.99 ± 0.38 fg	19.9 ± 0.5 b	135.67 ± 2.58 d

表 3 不同牧压下小嵩草草甸的土壤酶活性
Table 3 Soil enzyme activities as affected by different grazing intensities in *K. pygmaea* meadow

处理 Treatment	土壤深度 Depth (cm)	纤维素酶 Cellulase (Glucose mg/g, DS)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase (Purpurogallin mg/g, DS)	脲酶 Urease (NH ₄ ⁺ -N mg/g, DS)	蛋白酶 Protease (Tyr mg/g, DS)	碱性磷酸酶 Alkali phosphatase (Phenol mg/g, DS)	蔗糖酶 Invertase (Glucose mg/g, DS)	过氧化氢酶 Catalase (H ₂ O ₂ μg/(g·h), DS)
对照	0—10	2.21 ± 0.02 a	0.68 ± 0.01 a	1.21 ± 0.05 a	1.38 ± 0.01 a	1.28 ± 0.04 a	0.79 ± 0.17 a	76.53 ± 0.88 b
CK	10—20	1.54 ± 0.05 b	0.53 ± 0.03 b	0.84 ± 0.08 b	1.04 ± 0.01 ab	0.60 ± 0.03 b	0.64 ± 0.07 b	76.07 ± 0.33 b
	20—40	1.29 ± 0.03 bc	0.30 ± 0.01 c	0.37 ± 0.04 c	0.83 ± 0.0 c	0.26 ± 0.03 c	0.35 ± 0.05 cd	77.07 ± 0.33 b
	0—10	2.31 ± 0.02 a	0.50 ± 0.02 b	1.22 ± 0.09 a	0.97 ± 0.0 b	1.37 ± 0.02 a	0.72 ± 0.0 a	95.27 ± 0.33 a
轻牧 L	10—20	1.51 ± 0.02 b	0.62 ± 0.02 a	0.65 ± 0.06 bc	0.87 ± 0.0 bc	0.55 ± 0.02 b	0.61 ± 0.02 b	95.04 ± 0.38 a
	20—40	0.77 ± 0.01 c	0.27 ± 0.04 c	0.44 ± 0.05 c	0.82 ± 0.0 c	0.19 ± 0.02 c	0.52 ± 0.01 bc	96.13 ± 0.31 a
	0—10	2.16 ± 0.05 a	0.43 ± 0.04 bc	1.19 ± 0.03 a	0.96 ± 0.0 b	1.25 ± 0.02 a	0.79 ± 0.05 a	67.62 ± 0.58 bc
中牧 M	10—20	1.49 ± 0.02 b	0.52 ± 0.04 b	0.65 ± 0.02 bc	0.82 ± 0.01 c	0.52 ± 0.01 b	0.43 ± 0.04 c	67.27 ± 0.23 bc
	20—40	0.89 ± 0.02 c	0.28 ± 0.03 c	0.34 ± 0.01 c	0.78 ± 0.01 cd	0.18 ± 0.01 c	0.35 ± 0.03 cd	55.93 ± 0.21 c
	0—10	1.65 ± 0.04 b	0.41 ± 0.04 bc	1.10 ± 0.06 ab	0.92 ± 0.0 b	1.21 ± 0.02 a	0.55 ± 0.05 bc	75.87 ± 0.33 b
重牧 H	10—20	1.04 ± 0.02 c	0.44 ± 0.03 bc	0.60 ± 0.03 bc	0.80 ± 0.0 c	0.53 ± 0.00 b	0.42 ± 0.02 c	75.01 ± 0.0 b
	20—40	1.13 ± 0.02 c	0.14 ± 0.02 d	0.33 ± 0.02 c	0.77 ± 0.0 cd	0.17 ± 0.01 c	0.38 ± 0.01 cd	76.73 ± 0.31 b

理。脲酶活性总体呈对照 > 轻牧 > 中牧 > 重牧,但不同处理的相同层次间均无显著的差异。蛋白酶活性总体表现为对照显著高于其它处理,表层以对照最高,土层越深,处理间的差异越小,20—40 cm 层各处理间无显著的差异。碱性磷酸酶活性随牧压增大有所下降趋势,但各处理间无显著差别。蔗糖酶活性在表层为重牧显著低于其它处理,10—20 cm 层为对照和轻牧显著高于中牧和重牧,20—40 cm 层次为轻牧显著高于其它处理。过氧化氢酶活性在3层土壤内均以轻牧显著高于其它处理。随着土层的加深,大多数土壤酶活性呈现逐渐降低的趋势,不同层次间显示出不同程度的差异性,只有个别酶类表现出不同的变化规律。如多酚氧化酶在对照样地随着土壤深度的增加,酶活性下降,在轻牧、中牧和重牧样地表现出 10—20 cm > 0—10 cm > 20—40 cm 的变化趋势;重牧样地的纤维素酶活性表现出 0—10 cm > 20—40 cm > 10—20 cm; 4 个处理中,过氧化氢酶活性在不同层次之间差异均不显著。

3 讨论

放牧作为一种典型的人为干扰,不仅可以直接改变地表覆被状况、草地的形态特征、生产力及草种结构,进而影响草地景观,还可以影响许多生态过程、养分的循环及草场演替方式^[21]。放牧管理不当是草原退化的主要人为因素,家畜践踏损伤牧草会改变草地植物的竞争格局,加速群落内种群的更新,引起群落结构与功能的变化^[22]。超载过牧会导致土壤质量下降,草场退化,生物多样性降低^[23-24]。

在本实验不同放牧强度的影响下,群落中植物种群的地位和作用发生了显著的变化,其中对放牧最敏感的禾草类如垂穗披碱草,作为牲畜喜食的植物,在牲畜啃食践踏及其它植物竞争作用下,在中等放牧压力时其群落中的重要值[重要值 = (相对生物量 + 相对频度 + 相对高度 + 相对盖度) / 4]迅速减小。有些草质柔软、营养丰富的双子叶植物如鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*) 和蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*) 等,牲畜喜食但不耐践踏,在放牧压力下不能充分生长发育,盖度和丰富度都降低,而适口性差的杂类草,其生物量显著增高^[25-26],认为适度的干扰可以增加群落的多样性,过牧抑制了优势种的竞争能力,使得弱势物种的入侵和定居成为可能,不具可食性的毒杂草在群落中所占的比例增加^[27]。草群结构趋向于简单化^[28]。地上生物量在轻度放牧时最高,说明适度放牧能够增加牧草产量^[4-5],有

利于草场植物多样性的增加^[6-7,12],但过牧等不合理的草场利用能够减少植被覆盖度和物种多样性,改变物种和群落组成,是导致高寒草场退化的根本原因^[25-27]。

随牧压的增大,地表的裸露程度增大,地表蒸发随之增大,土壤水分不易保持,呈逐渐下降的趋势。另外牲畜践踏改变了土壤的紧实度,使土壤孔隙度和水稳性团聚体减少,引起透水性、透气性和水导率下降^[29]。土壤的干燥抑制了土壤微生物的生命活动及酶的活性,使地下死根不能被及时分解,在土壤表层形成 10—30 cm 的“草毡层”,这又阻隔了大气降水的下渗,加剧了下层土壤水分的匮乏。同时随放牧强度的增大,草毡层增厚,使放牧样地表层土壤的容重低于对照样地,而根土比高于对照样地。由于牲畜的践踏持续存在于整个放牧期间,除牧草外还直接作用于土壤,牲畜践踏对土壤的压力是链轨拖拉机的 2.7—5.3 倍^[30],在次表层至深层,土壤容重随牧压逐渐升高,这与贾树海^[31]和 Hiernaux^[32]的研究结果相一致。所以与采食相比,家畜的践踏有时间长、直接作用效果持久的特点,对草地的影响可能更为深刻。重牧样地由于过厚的草毡层在牲畜不断的践踏下与下层土壤分离,使土壤结构遭到破坏,其土壤容重有所降低。放牧减少了地上凋落物的现存量,地下部分以“草毡”形式存在而不能有效分解,土壤有机质低下,土壤养分因不能及时补充而造成草地严重退化。

小嵩草草甸分布在山地阳坡,土壤氮素绝大部分以有机态存在,虽土壤库有机氮贮量丰富,可速效氮供不应求,尤其以硝态氮最明显。放牧干扰对高寒草场土壤氮素的影响依放牧强度而定,放牧强度越大,流入家畜体内的氮量增加,归还量减少,加速了整个草场氮素的失调过程,引起草场生产力下降^[28]。

高寒草甸土磷素主要以非有效态的矿质磷存在,有机及无机磷含量低,磷的有效率甚微,仅为 0.03%—0.09%^[20]。随放牧强度增加,不仅放牧作用本身增加了磷素营养输出,使地上部分归还量降低,而且牛羊啃食加重,牧草生长又受土壤水分、有效氮、速效磷等土壤环境因子的限制,使土壤有机质含量及土壤有效养分含量明显下降,造成了土壤和植被的双重退化。由于受土壤母质特性的影响,高寒草甸土壤钾素贮量丰富,绝大部分以无机态存在,加之土壤有机质中钾素以离子态存在,比较容易释放,因此钾素供应的绝对量和有效率均较大,植物生

长发育过程中,钾的供应都比较充足。

土壤酶是土壤中的生物催化剂,直接参与土壤营养元素的有效化过程,土壤酶活性大小可表征生化反应的方向和强度,对维持土壤生态系统的稳定起着重要的作用^[1,11]。土地利用方式的改变对土壤酶活性的影响相当明显^[33]。

放牧引起的土壤结构的破坏,使影响土壤酶活性的环境因素发生了变化,另外放牧导致的土壤有机质投入的减少,不仅影响了酶作用底物的供给水平,还引起了土壤中有机质分解微生物强度的减弱和酶活性的降低,如氨化作用强度、纤维素酶活性、木聚糖酶活性、蛋白酶活性等,而动物排泄物的投入和土壤的板结会导致硝化作用强度的增强^[34]。Kandeler 等认为^[35],土壤酶的功能多样性与土壤功能的多样性紧密相关,土壤生态系统退化都伴随着不同土壤酶活性的下降。本实验中大多数酶活性随着放牧压力的增加而减小,说明放牧已使土壤的物理结构受损,营养物质过分损耗,生态系统的稳定性遭到破坏,造成了土壤环境的严重退化和土壤生化作用强度降低。因此,合理的放牧制度对维系土壤生态系统的平衡和草场的可持续发展具有重要意义。

4 结论

1) 随着放牧压力的增大,植被盖度、地上生物量、土壤有机质、全氮、硝态氮、全磷、有效磷、土壤水分含量及多数酶的活性呈现下降的趋势,而地下生物量、土壤容重、pH 及根土比呈现升高的趋势,不同处理间植物群落特征及土壤理化特性显示出明显的差异。

2) 纤维素分解酶、多酚氧化酶、脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均随放牧压力增大而下降,只有过氧化氢酶以轻牧最高,各处理间上述土壤酶活性差异程度不同。

3) 随着土壤深度的增加,土壤水分含量、地下生物量、根土比、土壤有机质及氮、磷养分等明显下降,而土壤容重和 pH 逐渐增大,在不同层次之间上述诸因子显示出明显的差异性。

4) 过氧化氢酶在不同土壤深度差异甚微,多酚氧化酶的最高值大多出现在次表层,其它土壤酶活性随土壤深度的加深而显著减小。

参考文献:

[1] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

- Guan S Y. Soil enzyme and its research ways[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [2] 杨万勤,钟章成,韩玉萍. 缙云山森林土壤酶活性的分布特征、季节动态及与四川大头茶的关系研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1999, 24(3): 318-324.
- Yang W Q, Zhong Z C, Han Y P. The distributing character, seasonal dynamics of soil enzyme activity and its relationship with tea of Sichuan datou in Jinyun forest[J]. J. Southwest Norm. Univ. (Nat. Sci. ed.), 1999, 24(3): 318-324.
- [3] Richard D B, Angela C J, David L J *et al.* Soil microbial community patterns related to the history and intensity of grazing in sub-montane ecosystems[J]. Soil Biol. Biochem., 2001, 33: 1653-1644.
- [4] Howitt R E. How economic incentives for growers can benefit diversity[J]. California Agric., 1995, 49(6): 28-33.
- [5] Milchunas D G, Sala O E, Lauenroth W L. A generalized model of the effects of grazing by large herbivores on grassland community structure[J]. Am. Natural., 1988, 132: 87-105.
- [6] 张堰青. 不同放牧强度下高寒灌丛群落特征和演替规律的数量研究[J]. 植物生态学和地植物学学报, 1990, 14(4): 358-364.
- Zhang Y Q. The quantity research on community character and succession rule under different grazing intensity[J]. Plant Ecol. Geobot. Sin., 1990, 14(4): 358-364.
- [7] 袁建立,江小蕾,黄文冰,等. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响[J]. 草业学报, 2004, 13(3): 16-21.
- Yuan J L, Jiang X L, Huang W B *et al.* Impact of grazing season and grazing intensity on plant diversity in alpine grassland[J]. Acta Pratacult. Sin., 2004, 13(3): 16-21.
- [8] Brady W W, Stromberg M R, Aldon E F *et al.* Response of a semidesert grassland to 16 years of rest from grazing[J]. J. Range Manag., 1989, 42: 284-288.
- [9] Laycock W A. Implications of grazing versus no grazing on today's rangelands[A]. Vavra M, Laycock W A, Pieper R D (eds.). Ecological implications of livestock herbivory in the west society for range management[M]. Denver: Colorado, 1994. 250-280.
- [10] 杨海君,肖启明,谭周进,等. 放牧对张家界索溪峪景区土壤酶活性及微生物作用强度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 913-917.
- Yang H J, Xiao Q M, Tan Z J *et al.* Effect of grazing on soil microbial and enzyme activities in Zhangjiajie Suoxiyu Scene[J]. J. Agror Environ. Sci., 2006, 25(4): 913-917.
- [11] Su Y Z, Li Y L, Cui J Y *et al.* Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China[J]. Catena, 2005, 59: 267-278.
- [12] 李希来. 青藏高原“黑土滩”形成的自然因素与生物学机制[J]. 草业科学, 2002, 19(1): 20-22.
- Li X L. Natural factors and formative mechanism of “black beach” formed on grassland in Qinghai-Tibetan plateau[J]. Pratacult. Sci., 2002, 19(1): 20-22.
- [13] Goffman P M, McDowell W H, Myerse J C *et al.* Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests[J]. Soil Biol. Biochem., 2001, 33: 1339-1348.

- [14] Bandick A K, Dick P. Field management effects on soil enzyme activities[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 1471-1479.
- [15] 安韶山,黄懿梅,李壁成,刘梦云. 用典范相关分析研究宁南宽谷丘陵区不同土地利用方式土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 704-709.
An S S, Huang Y M, Li B C, Liu M Y. The relation between soil enzyme activities and soil properties of different land use way in Loess Hilly region by canonical correlation analysis[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(5): 704-709.
- [16] 杨万勤,钟章成,陶建平. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系[J]. *林业科学*, 2001, 37(4): 124-128.
Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P. Study on relationship between soil enzyme activities and plant species diversity in forest ecosystem of MT. Jinyun[J]. *Sci. Silv. Sin.*, 2001, 37(4): 124-128.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 260-275.
Microbiology Laboratory of the Soil Science Institute of CAS. Research way of soil microbiology [M]. Beijing: Science Press, 1985. 260-270.
- [18] 郑洪元,张德生. 土壤动态生物化学研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 173-265.
Zheng H Y, Zhang D S. Soil dynamic biochemistry research way [M]. Beijing: Science Press, 1982. 173-265.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海科学技术出版社, 1983. 62-107.
The Soil Science Institute of CAS. Soil physics and chemistry analysis [M]. Shanghai: Science and Technique Press, 1983. 62-107.
- [20] 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[A]. 夏武平. 高寒草甸生态系统[C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982. 19-23.
Le Y Z, Zuo K C, Zhang J X *et al.* Agrotipe and basic properties of the research station of Haibei alpine meadow ecosystem[A]. Xia W P (eds.). *Alpine meadow ecosystem* [C]. Lanzhou: Gansu People Press, 1982. 19-23.
- [21] 李永宏,汪诗平. 放牧对草原植物的影响[J]. *中国草地*, 1999(3): 11-19.
Li Y H, Wang S P. Response of plant and plant community to different stocking rates[J]. *Grassl. China*, 1999, (3): 11-19.
- [22] 侯扶江,常生华,于应文,等. 放牧家畜的践踏作用研究评述[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 784-789.
Hou F J, Chang S H, Yu Y W *et al.* A review on trampling by grazed livestock[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2004, 24(4): 784-789.
- [23] Crist P J, Thomas W K, John O. Assessing land use impacts on biodiversity using an expert system tool[J]. *Landscape Ecol.*, 2000, 15: 47-62.
- [24] Cooperrider A. Conservation of biodiversity on western rangelands [A]. Van Wieren S E. *Grazing and conservation management kluwer, dordrecht, the Netherlands* [C]. South Texas: Development and Implementation, 1991.
- [25] 刘伟,王启基,王溪,等. 高寒草甸“黑土型”退化草地的成因和生态过程[J]. *草地学报*, 1999, 7(4): 300-307.
Liu W, Wang Q J, Wang X *et al.* Ecological process of forming “Black-Soil-Type” degraded grassland[J]. *Acta Agres. Sin.*, 1999, 7(4): 300-307.
- [26] 王启基,周立. 放牧强度对冬春草场植物群落结构及功能的效应分析[A]. 高寒草甸生态系统[C]. 北京: 科学出版社, 1995, 353-364.
Wang Q J, Zhou L. Effect analysis about grazing intensity on the structure and function of plant community in winter and spring grassland[A]. *Alpine Meadow ecosystem* [C]. Beijing: Science Press, 1995. 353-364.
- [27] 袁建立,江小蕾,黄水冰,等. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响[J]. *草业学报*, 2004, 13(3): 16-21.
Yuan J L, Jiang X L, Huang S B *et al.* Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in Alpine Meadow[J]. *Acta Pratacult. Sin.*, 2004, 13(3): 16-21.
- [28] 周兴民,张松林. 矮嵩草草甸在封育条件下群落结构和生物量变化的初步观察[A]. 高原生物学集刊[C]. 北京: 科学出版社, 1986. 1-7.
Zhou X M, Zhang S L. Observation the community structure and biomass change of *Kobresia Humilis* meadow under fencing closure condition [A]. *Plateau biology collection* [C]. Beijing: Science Press, 1986. 1-7.
- [29] Greenwood P B, Mcnamara R M. An analysis of the physical condition of two intensively grazed Southland soils[J]. *Proc. New Zealand Grassl. Assoc.*, 1992, 54: 71-75.
- [30] Ren J Z. *Pastoral agriculture ecology* [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995. 51-84.
- [31] 贾树海,王春枝,孙振涛,等. 放牧强度和时期对内蒙古草原土壤压实效应研究[J]. *草地学报*, 1999, 7(3): 217-222.
Jia S H, Wang C Z, Sun Z T *et al.* Study on grassland dark sandy chestnut compaction by grazing intensity and grazing season[J]. *Acta Agres. Sin.* 1999, 7(3): 217-222.
- [32] Hiernaux P, Biielders C L, Valentin C, Fernandez Rivera S. Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands[J]. *J. Arid Environ.*, 1999, 41(3): 231-245.
- [33] 杨万勤,王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(5): 564-570.
Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology[J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2002, 8(5): 564-570.
- [34] 谭周进,肖启明,杨海君,等. 旅游对张家界国家森林公园土壤酶及微生物作用强度的影响[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 133-138.
Tan Z J, Xiao Q M, Yang H J *et al.* Studies on the effect of recreational activities on soil enzyme and microbial activities in Zhangjiajie national forest park[J]. *J. Nat. Res.*, 2006, 21(1): 133-138.
- [35] Kandler E, Luxhoi J, Tschermo M *et al.* Xylanase, invertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 1171-1179.