

DOI: 10.5846/stxb201801050029

柴锦隆, 徐长林, 张德罡, 肖红, 潘涛涛, 鱼小军. 模拟践踏和降水对高寒草甸土壤养分和酶活性的影响. 生态学报, 2019, 39(1): - .
Chai J L, Xu C L, Zhang D G, Xiao H, Pan T T, Yu X J. Effects of simulated trampling and rainfall on soil nutrients and enzyme activity in an alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

模拟践踏和降水对高寒草甸土壤养分和酶活性的影响

柴锦隆, 徐长林, 张德罡, 肖红, 潘涛涛, 鱼小军*

甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续研究中心, 兰州 730070

摘要:为明晰牦牛和藏羊践踏对高寒草甸的分异影响,通过 2 年模拟践踏和降水双因子控制试验,研究了践踏和降水对高寒草甸土壤养分和酶活性的影响。研究表明,践踏处理提高了 0—20 cm 土层土壤速效氮和速效钾含量,降低了 0—20 cm 全磷、脲酶和 0—10 cm 速效磷、碱性磷酸酶和有机质含量,且适度践踏促进了全氮的矿化。随降水强度的增加,0—30 cm 土层土壤全氮和 0—20 cm 全磷和脲酶活性呈单峰曲线的变化态势,在水平下达到峰值;降水显著降低了 0—30 cm 土层土壤速效氮、磷、钾和 0—10 cm 土层土壤全钾含量,对土壤有机质含量无显著影响($P>0.05$)。同一放牧强度下,藏羊践踏区的土壤养分和酶活性优于牦牛践踏区,但差异不显著($P>0.05$)。综合可得,家畜的践踏作用促进了土壤氮和钾的矿化,抑制了磷的累积且加速了表层土壤有机质的耗竭,降低了土壤脲酶和碱性磷酸酶活性;适度降水提高了土壤全氮、全磷含量及酶活性,降水过多则相反。适度的家畜践踏与降水相耦合下草地土壤的养分循环和酶活性要优于重度践踏和不践踏小区。在对草地的适度放牧利用前提下,应注重土壤含水量和放牧畜种对草地的影响。草地干旱或土壤含水量过高时,应适当减少放牧畜种中牦牛比例增加藏羊比例,以期使草地得到健康可持续发展。

关键词:模拟践踏;模拟降水;土壤化学性质;土壤酶活性

Effects of simulated trampling and rainfall on soil nutrients and enzyme activity in an alpine meadow

CHAI Jinlong, XU Changlin, ZHANG Degang, XIAO Hong, PAN Taotao, YU Xiaojun*

Pratacultural College, Gansu Agricultural University; Key Laboratory of Grassland Ecosystem of Ministry of Education; Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province; Sino-U.S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Gansu Lanzhou 730070, China

Abstract: The aim of this study was to clarify the effects of yak and Tibetan sheep trampling on the grassland in Qinghai—Tibetan Plateau. The effects of simulated trampling and rainfall on soil nutrients and enzyme activity in an alpine meadow were studied through two years of two—factor control experiments. The results showed that simulated trampling increased soil available nitrogen and available potassium but decreased soil total phosphorus and urease in the 0—20 cm soil layer, and decreased available phosphorus, alkaline phosphatase activity, and organic matter content in the 0—10 cm soil layer. Moderate trampling promoted the mineralization of soil total nitrogen. The soil nitrogen content in the 0—30 cm layer and total phosphorus content and urease activity in the 0—20 cm layer each showed a trend of a single peak curve with increased rainfall, reaching its peak at the average level of rainfall. Precipitation significantly reduced available nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the 0—30 cm soil layer and total potassium in the 0—10 cm soil layer, but had no significant effect on soil organic matter content ($P > 0.05$). Under the same grazing intensity, the soil nutrients and enzyme activity of soil with Tibetan sheep were better than those with yak, but the difference was not significant ($P > 0.05$). Overall, livestock trampling promoted the mineralization of soil nitrogen and potassium, inhibited the accumulation of

基金项目:国家自然科学基金项目(31760695,31360570)

收稿日期:2018-01-05; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxj@gsau.edu.cn

phosphorus, and accelerated the depletion of soil organic matter in the topsoil, while reducing soil urease and alkaline phosphatase activities. Moderate rainfall increased total nitrogen and total phosphorus contents and enzyme activity, while excessive rainfall had the opposite effect. Soil nutrient cycling and enzyme activity under the coupling of moderate trampling and precipitation were better than those of severe trampling and no trampling. As part of appropriate grazing and utilization of grassland, the influences of soil moisture and livestock species should be taken seriously. When grassland is under drought or soil water content is too high, the proportion of yak in grazing livestock should be reduced to increase the proportion of Tibetan sheep, so as to make the grassland achieve healthy and sustainable development.

Key Words: simulated trampling; simulated rainfall; soil chemical properties; soil enzyme activity

近年来,在全球气候暖干化的大背景下,由于过度追求生产导致的超载过牧是造成青藏高原高寒草甸严重的主要驱动力,草地退化严重威胁着草地畜牧业生产和生态文明建设进程^[1-2]。气候变暖导致水资源短缺,降雨量减小,蒸发量增加,草地干旱化程度加剧^[3]。草地植物生产力主要受降水的制约,而这种制约作用在很大程度上是通过土壤水分供给来实现的,土壤中的水分显著影响着草地植物的生长和繁殖^[4-6]。干旱半干旱地区降水是限制草地生态系统生长发育的主要因子,同一年份不同月份间以及年际间降水的不均一性对草地植被和土壤的影响也不尽相同。且不同水分含量下,草地植被和土壤对放牧作用的响应规律也不一致^[7]。放牧是草地最直接的利用方式,放牧干扰通过改变土壤的理化性质,增加草地生态系统的异质性,造成草地生物群落、物种结构和生物多样性的变化,进而对生态系统的结构和功能产生影响^[8-9]。放牧过程中家畜对草地生态系统的影响是践踏、采食和排泄三者共同作用的结果,而相较于采食和排泄,家畜的践踏具有作用时间长、直接作用于草地组分多和效果持久的特点^[10-11]。因此,有必要将践踏从放牧行为中剥离出,研究其单因素影响对草地土壤的作用机制。

土壤养分是草地植物生长的来源,植物生长季从地下汲取养分来维持自身生长发育^[12]。而土壤酶活性的大小能敏感表征土壤中物质代谢的活跃程度,反映了土壤中养分的转化能力,是土壤肥力的重要指标^[13]。放牧家畜对草地土壤养分和酶活性的影响是一个复杂的过程,对其研究并没有一致结论^[14]。国内外学者就放牧对土壤养分和酶活性的影响做了大量研究,而其研究结果多为对自然放牧即三因素共同作用的探索^[15-16]。家畜通过采食吸收消化牧草营养,加速了土壤养分的周转;与此同时,家畜的排泄物通过微生物的分解将部分养分归还于土壤,引起土壤化学性质的变化^[17-18],而家畜践踏在放牧行为中的作用至关重要,就践踏单因素对草地土壤化学性质和酶活性影响的研究鲜见报道^[19-20]。高寒草甸是青藏高原天然草地分布范围最广的草地类型,其土壤养分和酶活性对践踏的响应研究还处于空白。所以,本研究通过模拟青藏高原主要畜种—牦牛、藏羊践踏和模拟不同年际间降水量的差异即缺水、平水和丰水,探讨不同践踏强度和不同降水量对草地土壤养分和酶活性的影响,明晰牦牛和藏羊践踏对草地土壤养分和酶活性的分异影响机制,为未退化草地的可持续发展管理与利用、退化草地的修复以及基于草地保护的高寒草甸放牧家畜畜种优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究样地布设在甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙乡甘肃农业大学天祝高山草原试验站内(37°40'N, 102°32'E)。该区海拔 2960 m,属高原大陆性季风气候,气候寒冷潮湿,年均温 -0.1℃,月平均最低温 -18.3℃(1月),最高温 12.7℃(7月),≥0℃的年积温为 1380℃;年均降水量 416 mm,多集中于 7—9月;年蒸发量为 1592 mm,年蒸发约是降水量的 3.8 倍。天然植被为寒温潮湿类高寒草甸,该地区水热同期,无绝对无霜期,仅分冷、热两季。土壤为亚高山草甸土,厚度 120 cm 左右,pH 为 7.0—8.2。试验地周边为暖季牧场,草地利用率约 80%—95%。所选样地为冷季放牧草地,实际利用率约 80%,建群种为矮生嵩草(*Kobresia*

humilis)。优势种为阴山扁蓿豆(*Medicago ruthenica* var. *inschanica*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、西北针茅(*Stipa sareptana*)。

1.2 试验设计

采用双因子裂区设计,以践踏为主因子,降水为副因子。以不同降水处理为主区,不同践踏处理为副区,主副区完全随机排列,主副因子处理各3次重复。主区面积22 m²,主区间距0.7 m,副区间距0.5 m,每个践踏小区面积1 m×2 m。

主区处理:根据天祝地区近年来6—9月的平均降水量,分别设置缺水(LR, Lower level of rainfall, 40 mm/月)、平水(AR, Average level of rainfall, 70 mm/月)、丰水(HR, High level of rainfall, 110 mm/月)3个不同水分梯度,以缺水处理模拟生长季干旱情况,丰水处理模拟生长季降水丰沛,平水处理模拟该区近年来生长季降水的均值。这样在试验中就能设置出3个不同水分梯度的试验小区。模拟降水试验于2015和2016年6月20日—8月30日进行,使用喷壶于8:00前或18:00后每3 d进行一次模拟降水,每次施入月平均降水量的1/10。模拟降水采用活动遮雨棚在大气降水来临前覆盖试验小区,使降雨沿遮雨棚前沿流出,无降雨时卷起遮雨棚。

副区处理:模拟践踏通过人穿安装有畜蹄子的自制模拟践踏器来实现。模拟践踏器用4岁牦牛和2岁藏羊的后踢与胶底鞋制作而成,以模拟轮牧牦牛和藏羊对草地的践踏作用。每个牦牛践踏器安装1只蹄子、藏羊践踏器安装3只蹄子。模拟牦牛践踏的人体重为(60±2) kg,模拟藏羊践踏的人体重为(45±2) kg。这就同(180±2) kg的牦牛和(45±2) kg的藏羊对草地的真实践踏水平相一致。再根据夏季轮牧试验,每天8 h牦牛、藏羊行走和采食步数的统计结果,分别换算出牦牛轻度践踏(YLT, Yak Light Trampling)、牦牛中度践踏(YMT, Yak Moderate Trampling)、牦牛重度践踏(YHT, Yak Heavy Trampling)和藏羊轻度践踏(TSLT, Tibetan Sheep Light Trampling)、藏羊中度践踏(TSMT, Tibetan Sheep Moderate Trampling)、藏羊重度践踏(TSHT, Tibetan Sheep Heavy Trampling)的践踏步数分别为:13.5、23.5、33.5步/m²和18、30、40步/m²,将不践踏小区设置为对照(CK)^[21]。模拟践踏试验分3次进行,分别为2015和2016年6月21日—30日(第一期)、7月21日—30日(第二期)、8月21日—30日(第三期),每次践踏持续时间为10 d,两次践踏间隔时间为20 d^[10]。

1.3 样品采集与分析

于2016年9月下旬,即两个生长季的模拟践踏和降水处理后进行取样。用直径为4 cm的土钻在每小区内采集0—10、10—20 cm和20—30 cm的土样,六钻土合为一个土样。挑出石块和植物根系,自然风干后分别过1.0 mm和0.25 mm筛,用于土壤酶活性和养分的测定。每践踏小区每土层采集土样3次重复,同一处理9次重复。

土样测定指标包括:土壤全氮(半微量凯氏定氮法)、全磷(H₂SO₄—HClO₄消煮—钼锑抗比色法)、全钾(NaOH熔融—火焰光度法)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷(0.5 mol/L NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法)、速效钾(NH₄OAc浸提—火焰光度法)、有机质(重铬酸钾—外加热法);脲酶活性(苯酚钠—次氯酸钠比色法)、碱性磷酸酶活性(磷酸苯二钠比色法)^[22-23]。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据整理和作图。在SPSS 19.0中用双因素方差分析(general linear model, GLM)来分析践踏、降水以及二者的交互作用对土壤养分和酶活性的影响。*F*值达显著水平时用Duncan法进行多重比较。所有数据均为平均数±标准误。

2 结果与分析

2.1 模拟践踏和降水对土壤氮含量的影响

*F*检验表明,践踏极显著影响0—20 cm土层土壤的全氮和速效氮含量,降水极显著影响0—30 cm土层土壤全氮和速效氮含量(*P*<0.01)(表1)。且践踏和降水对0—20 cm土层速效氮含量有交互作用。与家畜践

踏相比较,降水对土壤氮素的影响更显著。

表 1 践踏和降水交互作用下土壤养分的方差分析

Table 1 The variance analysis of soil nutrient for the interaction of trampling and rainfall

变异来源 Variation	自由度 Degrees of freedom	F 值					
		全氮 Total nitrogen			速效氮 Available nitrogen		
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
践踏 Trampling	6	13.41 **	5.73 **	0.19	54.99 **	9.69 **	1.4
降水 Rainfall	2	14.92 **	18.24 **	18.51 **	83.17 **	89.87 **	340.44 **
践踏×降水 Trampling×Rainfall	12	0.76	0.89	0.14	9.49 **	4.71 **	0.34
变异来源 Variation	自由度 Degrees of freedom	全磷 Total phosphorus			速效磷 Available phosphorus		
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
		践踏 Trampling	6	22.17 **	26.27 **	0.51	8.98 **
降水 Rainfall	2	15.67 **	10.41 **	0.05	71.05 **	36.16 **	33.83 **
践踏×降水 Trampling×Rainfall	12	4.76 **	0.52	0.37	0.79	1.24	1.55
变异来源 Variation	自由度 Degrees of freedom	全钾 Total potassium			速效钾 Available potassium		
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
		践踏 Trampling	6	0.32	0.15	0.71	25.53 **
降水 Rainfall	2	5.94 **	2.38	1.97	48.68 **	75.26 **	8.49 **
践踏×降水 Trampling×rainfall	12	0.86	0.88	1.07	0.60	0.23	0.34
变异来源 Variation	自由度 Degrees of freedom	有机质 The organic matter					
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm		
		践踏 Trampling	6	14.85 **	1.78	2.42	
降水 Rainfall	2	3.15	2.13	0.16			
践踏×降水 Trampling×rainfall	12	0.72	1.20	0.15			

** 表示在 0.01 水平上差异显著

2.1.1 模拟践踏和降水下的土壤全氮变化

同一降水量下,0—10 cm 土层各践踏处理的土壤全氮含量均随践踏强度的增加而减小(表 2),且牦牛和藏羊重度践踏的全氮显著小于其轻度践踏($P<0.05$)。与 CK 相比,牦牛和藏羊轻度践踏的全氮均大于 CK,但差异不显著($P>0.05$)。同一践踏强度不同降水量下,随着降水量的增加,土壤全氮呈先增加后降低的变化规律,即在平水条件下达最大值。0—10 cm 土层,同一放牧强度下,牦牛践踏区的全氮均小于藏羊践踏区,但均无显著差异($P>0.05$)。

10—20 cm 土层,土壤全氮随践踏强度的增加而呈递减趋势。缺水和丰水处理下,藏羊重度践踏的全氮显著小于其轻度践踏和 CK($P<0.05$),其他各践踏处理间的全氮差异不显著($P>0.05$)。同一践踏强度不同降水下,藏羊重度、牦牛轻度和中度践踏处理下平水的土壤全氮含量显著高于缺水处理($P<0.05$)。同一放牧强度下,牦牛践踏和藏羊践踏后的全氮含量无一致变化规律。

践踏对 20—30 cm 土层的全氮含量均无显著影响。平水处理下,牦牛和藏羊轻度践踏的全氮显著大于缺水和丰水处理;缺水处理下,藏羊重度践踏的全氮含量显著小于平水和丰水处理($P<0.05$);其他各处理间均无显著差异($P>0.05$)。

2.1.2 模拟践踏和降水下的土壤速效氮变化

0—10 cm 土层,缺水处理下,牦牛和藏羊各践踏强度间的速效氮含量差异不显著,但牦牛中度和重度践

踏的速效氮显著小于 CK ($P < 0.05$) (表 3)。平水和丰水处理下藏羊重度践踏的速效氮均显著小于其轻度践踏 ($P < 0.05$)。同一践踏强度不同降水量下,随降水强度的增加,除牦牛中度践踏各降水强度下的速效氮差异不显著外,其余各践踏水平均呈现速效氮含量随降水增加而显著降低的变化趋势 ($P < 0.05$)。同一放牧强度下,牦牛践踏区速效氮含量均小于藏羊践踏区,但差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 2 不同践踏和降水强度下的全氮含量/(g/kg)

Table 2 The total nitrogen content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	7.15±0.01ABb	7.91±0.12Aa	7.24±0.01ABa	6.71±0.03BCa	7.29±0.10ABb	6.74±0.73BCa	6.15±0.25Cb
	AR	7.89±0.21ABCa	8.29±0.32ABa	7.71±0.16BCa	7.32±0.17CDa	8.59±0.32Aa	7.20±0.13CDa	6.97±0.13Da
	HR	7.06±0.21Bb	7.89±0.03Aa	7.35±0.19ABa	6.80±0.32Ba	7.73±0.18Ab	7.11±0.13Ba	6.78±0.08Ba
10—20 cm	LR	6.28±0.21ABa	6.46±0.06Aa	5.78±0.07BCa	5.56±0.06Cb	5.83±0.34BCb	5.79±0.10BCb	5.64±0.07Cb
	AR	6.85±0.46Aa	6.89±0.21Aa	6.79±0.69Aa	6.17±0.04Aa	7.01±0.04Aa	7.02±0.43Aa	5.83±0.03Aab
	HR	7.12±0.20Aa	6.68±0.06ABa	6.61±0.03BCa	6.13±0.05CDa	6.55±0.27BCDab	6.38±0.12BCDab	6.08±0.15Da
20—30 cm	LR	5.88±0.20Aa	5.61±0.15Ab	5.60±0.24Aa	5.56±0.10Ab	5.58±0.22Ab	5.58±0.38Aa	5.44±0.33Aa
	AR	6.31±0.17Aa	6.27±0.23Aa	6.31±0.23Aa	6.32±0.13Aa	6.25±0.20Aa	6.30±0.22Aa	6.15±0.18Aa
	HR	6.09±0.19Aa	6.15±0.14Aab	6.17±0.23Aa	6.18±0.13Aa	6.19±0.12Aab	6.17±0.25Aa	6.12±0.31Aa

注:同行不同大写字母表示不同践踏强度间差异显著 ($P < 0.05$);同列不同小写字母表示不同水分处理间差异显著 ($P < 0.05$)。CK:对照, Check; TSLT:藏羊轻度践踏, Tibetan Sheep Light Trampling; TSMT:藏羊中度践踏, Tibetan Sheep Moderate Trampling; TSHT:藏羊重度践踏, Tibetan Sheep Heavy Trampling; YLT:牦牛轻度践踏, Yak Light Trampling; YMT:牦牛中度践踏, Yak Moderate Trampling; YHT:牦牛重度践踏, Yak Heavy Trampling; LR:缺水, Lower level of rainfall; AR:平水, Average level of rainfall; HR:丰水, High level of rainfall

表 3 不同践踏和降水强度下的速效氮含量/(mg/kg)

Table 3 The available nitrogen content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	20.25±0.36Aa	20.58±0.9Aa	20.20±0.40Aa	19.37±0.51ABa	19.8±0.09ABa	18.38±0.44Ba	18.47±0.18Ba
	AR	18.19±0.42ABb	18.57±0.37Aab	17.90±0.38ABb	17.12±0.27BCb	17.7±0.46ABCb	17.27±0.28BCa	16.72±0.02Cb
	HR	17.49±0.25ABCb	18.34±0.45Ab	17.34±0.23BCb	16.85±0.24BCb	17.7±0.36ABb	17.38±0.16BCa	16.68±0.14Cb
10—20 cm	LR	16.30±0.31Aa	16.68±0.52Aa	16.25±0.07Aa	16.3±0.31Aa	16.31±0.76Aa	15.8±0.68Aa	16.15±0.19Aa
	AR	14.74±0.18Ab	14.9±0.50Aa	14.42±0.47ABb	14.52±0.61ABb	15.44±0.27Aa	15.45±0.39Aa	13.30±0.01Bc
	HR	14.27±0.63Ab	14.87±0.55Aa	14.57±0.11Ab	13.79±0.27Ab	15.01±0.28Aa	14.7±0.4Aa	14.49±0.27Ab
20—30 cm	LR	11.68±0.31ABa	11.37±0.52Ba	12.72±0.27Aa	11.5±0.34ABa	11.38±0.3Ba	11.16±0.39Ba	11.41±0.52Ba
	AR	9.96±0.09Ab	9.78±0.64Aa	9.30±0.31Ac	9.30±0.51Ab	10.37±0.34Aa	10.33±0.31Aa	9.89±0.73Aa
	HR	10.07±0.37Ab	10.3±0.43Aa	10.32±0.17Ab	10.93±0.07Aa	10.99±0.53Aa	10.45±0.34Aa	10.28±0.31Aa

10—20 cm 土层,平水处理下牦牛重度践踏的速效氮含量显著小于其轻度、中度践踏和 CK ($P < 0.05$)。同一践踏强度下,随降水量的增加,土壤速效氮呈降低趋势。

20—30 cm 土层,践踏对土壤速效氮含量均无显著影响 ($P > 0.05$)。同一践踏强度不同降水量下,土壤速效氮含量在缺水条件下达最大值。

家畜的践踏影响了草地土壤 0—20 cm 土层氮含量,降水影响着 0—30 cm 土层氮含量。随践踏强度的增加土壤全氮含量呈递减趋势、而速效氮呈递增趋势;全氮含量随降水强度的增加呈先增后减的变化趋势,速效氮呈递减趋势。家畜的践踏促进了氮素的矿化,降水量过大则加速了草地土壤速效养分的流失。

2.2 模拟践踏和降水对土壤磷含量的影响

家畜的践踏极显著影响 0—20 cm 土层土壤全磷和 0—10 cm 速效磷含量 ($P < 0.01$);模拟降水对 0—20 cm 土层全磷和 0—30 cm 速效磷含量产生影响。践踏和降水对 0—10 cm 土层全磷有交互作用(表 1)。

2.2.1 模拟践踏和降水下的土壤全磷变化

两个生长季模拟践踏下 0—20 cm 土层的草地土壤全磷含量随践踏强度的增加均呈降低趋势(表 4)。除 0—10 cm 丰水条件下牦牛践踏处理外,其他各水分处理下,牦牛和藏羊重度践踏的全磷显著小于轻度践踏 ($P<0.05$)。同一践踏强度不同降水下的土壤全磷含量无显著变化规律。模拟践踏和降水对 20—30 cm 土层全磷含量无显著影响 ($P>0.05$)。

表 4 不同践踏和降水强度下的全磷含量/(g/kg)

Table 4 The total phosphorus content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	0.878±0.005Aa	0.851±0.013ABb	0.862±0.002Aa	0.801±0.005CDa	0.827±0.017BCa	0.82±0.004CDa	0.797±0.002Da
	AR	0.920±0.023Aa	0.924±0.020Aa	0.807±0.004Cb	0.78±0.009Ca	0.857±0.002Ba	0.854±0.019Ba	0.796±0.006Ca
	HR	0.820±0.017ABb	0.836±0.014Ab	0.831±0.016Aab	0.781±0.001Ba	0.824±0.014ABa	0.806±0.019ABa	0.784±0.008Ba
10—20 cm	LR	0.792±0.004ABb	0.803±0.005Aa	0.771±0.005BCa	0.718±0.015Da	0.782±0.012ABCa	0.761±0.007Ca	0.716±0.009Da
	AR	0.817±0.008Aa	0.793±0.016ABa	0.782±0.024Ba	0.724±0.005Da	0.782±0.014ABa	0.768±0.012BCa	0.736±0.01CDa
	HR	0.779±0.005ABb	0.789±0.014Aa	0.748±0.011BCa	0.711±0.01DEa	0.75±0.003BCa	0.74±0.012CDa	0.703±0.01Ea
20—30 cm	LR	0.692±0.002Aa	0.708±0.004Aa	0.686±0.019Aa	0.713±0.013Aa	0.691±0.01Aa	0.707±0.015Aa	0.699±0.013Aa
	AR	0.702±0.028Aa	0.708±0.026Aa	0.691±0.01Aa	0.691±0.019Aa	0.705±0.017Aa	0.717±0.013Aa	0.69±0.021Aa
	HR	0.691±0.008Aa	0.677±0.02Aa	0.691±0.017Aa	0.71±0.018Aa	0.701±0.008Aa	0.708±0.019Aa	0.705±0.025Aa

2.2.2 模拟践踏和降水下的土壤速效磷变化

同一降水条件下,随践踏强度的增加 0—20 cm 土层速效磷含量呈递减趋势(表 5)。0—10 cm 土层,平水处理下藏羊重度践踏的速效磷显著小于藏羊轻度践踏。丰水处理下,牦牛和藏羊重度践踏的速效磷均显著小于其轻度践踏 ($P<0.05$)。同一践踏强度不同降水下,除牦牛中度各水分处理间的速效磷无显著差异外;其他各践踏处理下缺水的速效磷均显著大于丰水处理 ($P<0.05$)。

表 5 不同践踏和降水强度下的速效磷含量/(mg/kg)

Table 5 The available phosphorus content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	20.25±0.36Aa	20.58±0.9Aa	20.20±0.40Aa	19.37±0.51ABa	19.8±0.09ABa	18.38±0.44Ba	18.47±0.18Ba
	AR	18.19±0.42ABb	18.57±0.37Aab	17.90±0.38ABb	17.12±0.27BCb	17.7±0.46ABCb	17.27±0.28BCa	16.72±0.02Cb
	HR	17.49±0.25ABCb	18.34±0.45Ab	17.34±0.23BCb	16.85±0.24BCb	17.7±0.36ABb	17.38±0.16BCa	16.68±0.14Cb
10—20 cm	LR	16.30±0.31Aa	16.68±0.52Aa	16.25±0.07Aa	16.3±0.31Aa	16.31±0.76Aa	15.8±0.68Aa	16.15±0.19Aa
	AR	14.74±0.18Ab	14.9±0.50Aa	14.42±0.47ABb	14.52±0.61ABb	15.44±0.27Aa	15.45±0.39Aa	13.30±0.01Bc
	HR	14.27±0.63Ab	14.87±0.55Aa	14.57±0.11Ab	13.79±0.27Ab	15.01±0.28Aa	14.7±0.4Aa	14.49±0.27Ab
20—30 cm	LR	11.68±0.31ABa	11.37±0.52Ba	12.72±0.27Aa	11.5±0.34ABa	11.38±0.3Ba	11.16±0.39Ba	11.41±0.52Ba
	AR	9.96±0.09Ab	9.78±0.64Aa	9.30±0.31Ac	9.30±0.51Ab	10.37±0.34Aa	10.33±0.31Aa	9.89±0.73Aa
	HR	10.07±0.37Ab	10.3±0.43Aa	10.32±0.17Ab	10.93±0.07Aa	10.99±0.53Aa	10.45±0.34Aa	10.28±0.31Aa

10—20 cm 土层,同一降水强度不同践踏处理下,平水牦牛重度践踏的速效磷显著小于其轻度和中度践踏 ($P<0.05$),其他同一水分不同践踏下的速效磷含量均无显著差异 ($P>0.05$)。同一践踏强度不同降水下,CK、藏羊中度和重度及牦牛重度践踏的速效磷含量均为缺水显著大于丰水处理 ($P<0.05$)。

20—30 cm 土层,缺水下藏羊中度践踏的速效磷显著大于藏羊轻度和牦牛 3 践踏强度。平水和丰水处理下土壤速效磷含量差异均不显著 ($P>0.05$)。同一践踏强度下,随降水强度的增加土壤速效磷呈先减小后有反弹的变化规律。

草地土壤磷含量随践踏强度的增加而减小;速效磷含量随降水量的增加而减小,全磷含量对降水作用无

规律性响应。高强度的践踏和降水加速了草地土壤磷素转换,抑制了磷素的累积。

2.3 模拟践踏和降水对土壤钾含量的影响

F 检验表明,践踏极显著作用于 0—20 cm 土层土壤速效钾含量(表 1),而对全钾含量无显著影响。降水作用极显著影响 0—10 cm 土层土壤全钾和 0—30 cm 土层速效钾($P<0.01$)。

2.3.1 模拟践踏和降水下的土壤全钾变化

0—20 cm 土层,同一降水处理下,随着模拟践踏强度的增加,土壤全钾含量差异均不显著($P>0.05$)(表 6)。同一放牧强度下,牦牛践踏和藏羊践踏的土壤全钾含量也均无显著性差异($P>0.05$)。0—10 cm 土层,同一践踏强度不同降水量下,藏羊中度、重度和牦牛轻度践踏下缺水的全钾含量显著高于丰水处理($P<0.05$)。10—20 cm 土层,平水下藏羊轻度和中度践踏的全钾含量显著高于缺水和丰水处理($P<0.05$)。

表 6 不同践踏和降水强度下的全钾含量/(g/kg)

Table 6 The total potassium content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	20.26±0.62Aa	20.12±0.34Aa	21.06±0.08Aa	21.18±0.32Aa	21.21±0.2Aa	20.44±0.4Aa	19.97±0.38Aa
	AR	20.5±1.49Aa	20.25±0.74Aa	18.89±0.07Ab	20.02±0.83Aab	18.24±1.18Ab	19.52±1.12Aa	19.4±1.06Aa
	HR	19.64±1.22Aa	18.52±0.25Aa	19.11±0.11Ab	19.18±0.28Ab	19.00±0.3Aab	19.04±0.75Aa	20.27±1.42Aa
10—20 cm	LR	20.22±0.45Aa	20.1±0.27Ab	19.01±1Ab	20.39±0.08Aa	20.31±0.38Aa	20.18±0.08Aa	19.22±0.55Aa
	AR	19.89±1.05Aa	20.75±0.09Aa	21.71±0.8Aa	20.36±1.33Aa	20.75±1.43Aa	20.32±1.41Aa	20.6±0.76Aa
	HR	20.88±0.88Aa	18.9±0.13Ac	19.6±0.1Aab	19.21±0.71Aa	19.97±0.87Aa	19.32±0.35Aa	20.54±0.85Aa
20—30 cm	LR	20.05±0.31ABa	20.81±0.4Ab	20.23±0.66ABa	18.29±0.37Ca	20.16±0.17ABa	20.97±0.09Aa	19.28±0.29BCa
	AR	20.35±1Aa	22.31±0.16Aa	20.58±0.72Aa	20.09±1.39Aa	20.25±1.99Aa	20.57±1.54Aa	20.61±0.72Aa
	HR	20.97±0.61Aa	18.59±0.07Ac	19.03±0.07Aa	20.07±1.13Aa	20.24±0.7Aa	20.23±1.12Aa	19.79±0.64Aa

20—30 cm 土层,缺水处理下,藏羊重度践踏的全钾显著小于其轻度和中度践踏,牦牛中度践踏显著高于牦牛重度践踏($P<0.05$)。平水和丰水处理下的全钾含量对践踏无显著响应($P>0.05$)。同一践踏强度不同降水条件下,除降水影响藏羊轻度践踏全钾含量外,其余各践踏下不同降水对其全钾含量影响不显著($P>0.05$)。

2.3.2 模拟践踏和降水下的土壤速效钾变化

同一降水下随着践踏强度的增加,土壤速效钾含量呈递增趋势(表 7)。0—10 cm 土层,缺水条件下,牦牛和藏羊重度践踏的土壤速效钾含量显著大于 CK,且随践踏强度的增加,藏羊践踏的速效钾呈显著增加趋势即 $TSHT>TSMT>TSLT$ ($P<0.05$)。平水和丰水的 CK 与藏羊轻度践踏无显著差异,但均显著小于其他践踏处理($P<0.05$)。同一践踏强度不同降水下,随降水强度的增加土壤速效钾含量呈递减趋势,且各践踏下丰水处理的速效钾显著小于缺水处理($P<0.05$)。同一放牧强度下,平水处理的藏羊轻度和中度践踏、丰水处理下的藏羊轻度和重度践踏的土壤速效钾显著小于同践踏强度下的牦牛处理($P<0.05$)。

10—20 cm 土层,缺水和平水处理下藏羊重度、牦牛中度和重度践踏的土壤速效钾显著大于 CK,且牦牛和藏羊重度践踏的速效钾含量显著大于轻度践踏($P<0.05$)。丰水处理下,藏羊轻度践踏的速效钾含量与 CK 间无显著差异,二者均小于其他各践踏强度($P<0.05$)。同一践踏强度下,丰水处理的速效钾含量显著小于缺水和平水处理($P<0.05$)。

20—30m 土层,模拟家畜践踏和降水对土壤速效钾含量均无显著影响($P>0.05$)。

家畜践踏对土壤全钾含量无显著影响,但促进了 0—20 cm 土层土壤速效钾的累积;随降水量的增加,草地土壤全钾和速效钾含量均呈递减趋势。践踏作用促进了草地土壤钾素的矿化。

2.4 模拟践踏和降水对土壤有机质含量的影响

F 检验表明,家畜践踏只影响 0—10 cm 土层土壤有机质含量,且降水对高寒草甸土壤有机质含量无显著

影响($P>0.05$) (表 1)。

表 7 不同践踏和降水强度下的速效钾含量/(mg/kg)

Table 7 The available potassium content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	372.55±15.64Ca	385.94±21.96BCa	403.09±4.23BCa	462.01±21.92Aa	418.75±6.37ABCa	435.06±6.67ABa	468.33±24.43Aa
	AR	359.01±5.09Ca	358.59±18.83Cab	391.07±4.79Ba	445.61±0.85Aa	387.54±3.04Bab	421.17±8.06Aa	448.7±10.11Aa
	HR	300.40±9.26Cb	313.48±8.94Cb	359.75±6.81Bb	369.66±6.73Bb	353.81±17.23Bb	379.30±13.58Bb	414.94±11.52Ab
10—20 cm	LR	258.54±5.29Da	270.75±14.97CDa	288.51±7.43BCDa	316.58±7.08ABa	286.41±3.54BCDa	296.17±5.46ABCa	321.71±15.86Aa
	AR	256.54±9.31Da	270.80±17.16CDa	296.08±5.70ABCa	309.61±11.0ABa	282.32±12.59BCDa	304.17±2.47ABCa	317.91±7.19Aa
	HR	203.45±3.40Cb	215.22±3.43Cb	239.15±5.67Bb	254.82±3.39ABb	238.97±6.42Bb	256.99±8.83ABb	270.38±11.18Ab
20—30 cm	LR	229.32±17.16Aa	224.24±13.38Aa	245.86±6.98Aa	244.75±6.09Aa	241.75±7.75Aa	230.03±16.23Aa	248.31±14.27Aa
	AR	219.35±10.31Aa	222.29±1.58Aa	227.62±10.14Aab	223.15±17.22Aa	225.24±9.01Aa	227.59±7.16Aa	221.48±13.83Aa
	AH	213.87±11.11Aa	218.15±10.09Aa	214.66±6.30Ab	209.47±0.03Aa	207.18±16.88Aa	213.51±10.97Aa	211.44±12.53Aa

随着践踏强度的增加,0—10 cm 土层各水分处理下,藏羊和牦牛重度践踏的土壤有机质含量显著小于其轻度和中度践踏($P<0.05$),但后两者间差异不显著($P>0.05$) (表 8)。同一放牧压下,牦牛践踏的土壤有机质含量与藏羊践踏间均无显著性差异($P>0.05$)。同一践踏强度不同降水条件下,模拟降雨对土壤有机质含量的影响也均不显著($P>0.05$)。

表 8 不同践踏和降水强度下的有机质含量/(%)

Table 8 The soil organic matter content of different trampling and rainfall intensity

土层 Soil layers	降水量 Rainfall	CK	TSLT	TSMT	TSHT	YLT	YMT	YHT
0—10 cm	LR	12.69±0.26Aa	13.50±0.47Aa	13.51±0.76Aa	10.96±0.08Bb	12.71±0.28Aa	13.56±0.45Aa	11.37±0.12Ba
	AR	13.28±0.33ABa	13.46±0.76Aa	13.82±0.57Aa	11.87±0.18Ca	13.63±0.51Aa	13.86±0.25Aa	11.97±0.12BCa
	HR	12.62±0.28BCa	13.34±0.45ABa	13.57±0.31Aa	12.05±0.13CDa	13.55±0.15Aa	12.9±0.17ABCa	11.70±0.31Da
10—20 cm	LR	9.17±0.61Ba	10.19±0.51ABa	10.76±0.28ABa	9.73±0.29ABa	10.45±0.14ABa	10.79±0.14Aa	9.97±0.47ABa
	AR	9.52±0.47Aa	10.16±0.60Aa	10.52±0.12Aa	10.39±0.44Aa	9.96±0.42Aa	10.75±0.31Aa	10.13±0.32Aa
	HR	9.90±0.38Aa	10.16±0.22Aa	9.39±0.42Aa	9.96±0.19Aa	9.93±0.15Aa	9.76±0.32Ab	9.71±0.29Aa
20—30 cm	LR	7.65±0.07Aa	7.54±0.17Aa	7.33±0.36Aa	7.28±0.22Aa	7.44±0.17Aa	7.49±0.45Aa	7.44±0.44Aa
	AR	7.05±0.17Aa	7.21±0.11Aa	7.03±0.14Aa	6.95±0.09Aa	6.98±0.29Aa	7.33±0.19Aa	6.98±0.4Aa
	HR	6.93±0.18Aa	7.06±0.22Aa	6.99±0.12Aa	7.05±0.15Aa	7.11±0.17Aa	6.98±0.34Aa	6.98±0.15Aa

10—20 cm 土层,缺水处理下,牦牛中度践踏的有机质含量显著大于 CK,其他践踏处理间的土壤有机质差异不显著($P>0.05$)。平水和丰水处理的土壤有机质含量对模拟践踏的响应均不显著($P>0.05$)。同一放牧压下,牦牛和藏羊践踏处理间的有机质含量均不显著,且模拟降水对有机质含量的影响也不显著($P>0.05$)。

20—30 cm 土层,践踏和降水对土壤有机质均无显著影响($P>0.05$)。

随践踏强度的增加,0—10 cm 土层土壤有机质呈减小趋势,降水对有机质无显著影响;即家畜的践踏加速了表层土壤有机质的耗竭。

2.5 模拟践踏和降水对土壤酶活性的影响

2.5.1 模拟践踏和降水对土壤脲酶活性的影响

践踏作用对 0—10 cm 土层土壤脲酶活性的影响达极显著水平($P<0.01$),对 10—20 cm 土层达显著水平($P<0.05$);降水极显著影响着 0—20 cm 土层土壤脲酶活性($P<0.01$) (表 9)。

同一降水不同践踏强度下,0—20 cm 土层土壤脲酶活性随践踏强度的增加呈降低趋势(图 1),牦牛和藏羊的重度践踏显著降低了土壤脲酶活性($P<0.05$)。同一践踏强度下,随降水强度的增加土壤脲酶活性呈先

增加后降低的变化趋势,在平水处理下达最大值。同一放牧强度下,牦牛践踏对土壤脲酶活性的影响与同践踏强度下的藏羊践踏均无显著差异。且践踏和降水对 20—30 cm 土层土壤脲酶活性影响均不显著 ($P > 0.05$)。

表 9 践踏和降水交互作用下土壤酶的方差分析

Table 9 The variance analysis of soil enzymes for the interaction of trampling and rainfall

变异来源 Variation	DF	F 值					
		脲酶 Urease			碱性磷酸酶 Alkaline Phosphatase		
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
践踏 Trampling	6	11.373 **	3.241 *	1.036	5.791 **	2.269	0.23
降水 Rainfall	2	32.604 **	6.584 **	1.26	14.604 **	5.198 *	5.254 *
践踏×降水 Trampling×rainfall	12	0.972	0.795	0.389	0.468	0.222	0.068

** 表示达到极显著水平 ($P < 0.01$), * 表示达到显著水平 ($P < 0.05$)

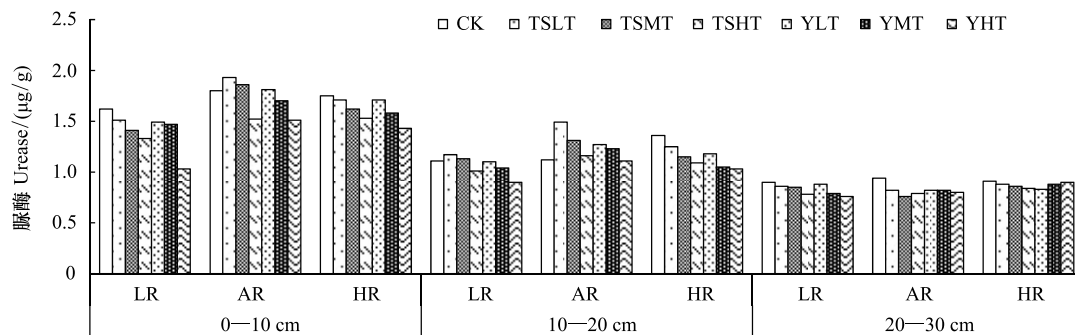


图 1 践踏和降水双因素作用下的脲酶活性

Fig.1 The activity of urease under the action of trampling and rainfall

CK: 对照, Check; TSLT: 藏羊轻度践踏, Tibetan Sheep Light Trampling; TSMT: 藏羊中度践踏, Tibetan Sheep Moderate Trampling; TSHT: 藏羊重度践踏, Tibetan Sheep Heavy Trampling; YLT: 牦牛轻度践踏, Yak Light Trampling; YMT: 牦牛中度践踏, Yak Moderate Trampling; YHT: 牦牛重度践踏, Yak Heavy Trampling; LR: 缺水, Lower level of rainfall; AR: 平水, Average level of rainfall; HR: 丰水, High level of rainfall

2.5.2 模拟践踏和降水对土壤碱性磷酸酶活性的影响

F 检验表明,践踏和降水对 0—10 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性的影响达极显著水平 ($P < 0.01$) (表 9),降水对 10—30 cm 土层碱性磷酸酶活性的影响达显著水平 ($P < 0.05$)。且二者对碱性磷酸酶不存在交互作用。

同一降水不同践踏强度下,0—10 cm 土层丰水处理下,重度践踏显著降低了土壤碱性磷酸酶活性 ($P < 0.05$),缺水和平水各践踏处理的碱性磷酸酶活性均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 2)。同一践踏强度不同降水下的碱性磷酸酶活性呈 LR < AR < HR 的变化规律,以丰水条件下的酶活性最高。同一放牧强度下,牦牛和藏羊同一践踏强度间的碱性磷酸酶活性无显著差异 ($P > 0.05$)。模拟践踏和降水对 10—30 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性影响未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

草地土壤脲酶和碱性磷酸酶活性随家畜践踏的增加而降低。脲酶活性随降水量的增加呈单峰曲线的变化规律,在平水条件下达最大值;碱性磷酸酶活性随降水量的增加呈正相关变化。

3 讨论

土壤是草地生态系统的重要组成部分,是牧草赖以生存的基质,为生态系统中动植物和微生物生长发育、新成代谢提供必要的环境条件^[24]。土壤化学特性是土壤生态系统的重要特征,土壤化学特性包括土壤中各类营养元素的含量,其中最重要的是土壤氮、磷、钾和土壤有机质含量,是土壤肥力的重要表征^[25]。土壤养分客观反映了土壤的活力和营养元素供给状况,是衡量土壤质量的重要指标。本研究表明,家畜践踏促进了氮和钾的矿化,抑制了磷的累积;而高强度的降水增加了土壤速效养分淋溶作用,加速了土壤养分的流失。这可

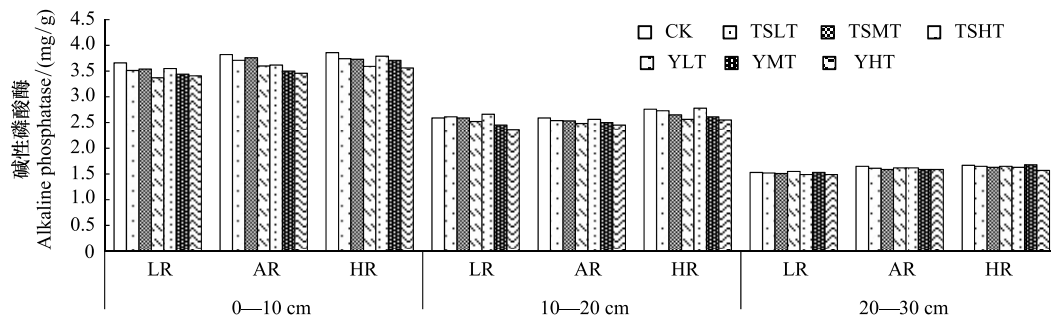


图2 践踏和降水双因素作用下的碱性磷酸酶活性

Fig.2 The activity of alkaline phosphatase under the action of trampling and rainfall

能是由于连续高强度的践踏减缓了草地植被的再生能力,降低了植被盖度,地表裸露程度加大,加之风蚀和降水造成全氮和全磷的流失和分解加速。同时植物地上和地下生物量的降低,使得对土壤速效氮和速效钾的转化利用减小,且降水强度的增大加速了土壤速效养分的淋溶,促进了土壤氮和钾素的累积^[26];另外地上结构的破坏加速了地下根系对养分的竞争^[16]。践踏促进了植物对磷的利用来合成组织结构,并加速氮的分解,减缓对速效钾的利用,使速效养分向根系周围及浅层富集,造成土壤表层速效氮和钾含量的增加。而本研究中土壤全钾对家畜的模拟践踏无明显响应,可能是由于该区土壤钾含量充裕,不作为限制植物生长的因素。本研究中,0—10 cm 土壤有机质随践踏强度的增加而减小,这与赵帅等^[27]和侯扶江等^[28]的研究结果一致。而 Reeder^[29]认为放牧增加了土壤有机质含量,王艳芬等^[30]认为放牧对草地土壤有机质含量无显著影响。这可能是由于研究区草地生态系统的异质性或草地放牧利用程度的不同所致;合理放牧管理技术的运用,增加了草地生物量,使得对土壤有机碳的回馈作用增加^[31-32],且家畜的践踏会加速凋落物分解,可以加大凋落物 C 的回馈,使得土壤有机质含量呈增大趋势^[33]。围封草地的短期放牧利用对认识碳的积累与分解具有局限性,不能对较大时间尺度上的土壤碳储量进行解释^[30]。

土壤生物学特性包括土壤微生物和酶活性,其中土壤酶源自于土壤中动植物和微生物的分泌物及其残体的分解,参与多种生物化学过程和物质循环,并直接参与土壤营养元素的有效化过程^[34]。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^[35]。本试验研究表明,随践踏强度的增加,0—20 cm 土层土壤脲酶和碱性磷酸酶含量呈递减趋势。土壤酶活性受土壤理化性质和微生物数量的影响;随践踏强度的增加,土壤紧实度加大,通气透水性降低,草地土壤中动植物生长受到抑制,土壤微生物活性降低^[36-38]。此外,土壤酶活性和土壤养分含量存在显著相关性^[39],随践踏作用的增强,土壤养分流失加剧间接造成土壤酶活性的降低。本研究结果表明,随降水量的增加土壤酶活性呈单峰曲线的变化规律,在平水条件下达最大值。土壤水分含量较充足时,微生物和地下动植物生长活跃,土壤酶活性增加;但土壤含水量过高会降低土壤酶活性,是由于土壤较湿润时,家畜践踏对其压实效应更明显,降低了地下部分的生物活性,好氧微生物数量减小,脲酶活性降低^[40]。有研究^[10,41]表明,模拟践踏对植物光合作用和土壤物理性质的影响较显著。而本研究中同一践踏强度下牦牛和藏羊践踏后草地土壤化学性质和土壤酶活性均无显著差异,可能是此研究结果仅为两个生长季模拟践踏对土壤化学性质和土壤酶活性的影响,而长期践踏处理对草地土壤养分和酶的影响机制有待进一步研究。

尽管 2 年的短期模拟牦牛和藏羊践踏下的高寒草甸土壤化学性质和酶活性间无显著差异,考虑到对土壤物理性质和产草量等的分异影响,在高寒草甸放牧管理中,从草地生态系统健康考虑,可适当减少牦牛的数量,增加相应数量的藏羊^[42]。总体而言,轻度和中度践踏区的土壤化学性质和酶活性优于重度践踏区,适度降水有利于土壤养分和酶的循环。鉴于草地的生态效益和经济效益,建议对青藏高原高寒草甸进行适度放牧,干旱和降雨丰沛期更应避免对草地的过度放牧利用。

4 结论

放牧家畜的践踏具有促进高寒草甸土壤氮和钾的矿化、抑制磷的累积、加速表层土壤有机质耗竭和降低酶活性的作用。土壤水分含量过高能够抑制土壤速效养分的累积,但适度有助于提高草地土壤酶活性。与家畜的践踏作用相比,降水对草地养分的影响更为深刻。结合草地生产和放牧管理利用,建议在干旱年份适当减少放牧地家畜头数或减少草地轮牧天数以期实现草地的可持续利用。

参考文献 (References):

- [1] 刘晓东, 张敏锋, 惠晓英, 康兴成. 青藏高原当代气候变化特征及其对温室效应的响应. 地理科学, 1998, 18(2): 113-121.
- [2] 鱼小军, 柴锦隆, 徐长林, 师尚礼, 肖红, 马隆喜, 曹国顺. 覆膜种植对甘南高寒区苜蓿生长和杂草数量的影响. 中国农业科学, 2016, 49(4): 791-801.
- [3] Yang K, Ye B S, Zhou D G, Wu B Y, Foken T, Qin J, Zhou Z Y. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau. Climatic Change, 2011, 109(3/4): 517-534.
- [4] Yao T D, Thompson L G, Mosbrugger V, Zhang F, Ma Y M, Luo T X, Xu B Q, Yang X X, Joswiak D R, Wang W C, Joswiak M E, Devkota L P, Tayal S, Jilani R, Fayziev R. Third Pole Environment (TPE). Environmental Development, 2012, 3: 52-64.
- [5] 王常顺, 孟凡栋, 李新娥, 姜丽丽, 白玲, 汪诗平. 青藏高原草地生态系统对气候变化的响应. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1587-1595.
- [6] 朱昊, 柯梅, 李学森, 任玉平, 侯钰荣, 魏鹏, 贞静. 放牧对蒿类荒漠草地植物群落和土壤理化性质的影响. 草原与草坪, 2017, 37(4): 68-73.
- [7] Hiltbrunner D, Schulze S, Hagedorn F, Schmidt M W I, Zimmermann S. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. Geoderma, 2012, 170: 369-377.
- [8] 江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 王刚. 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, 2003, 23(9): 1479-1485.
- [9] 张静妮, 赖欣, 李刚, 赵建宁, 张永生, 杨殿林. 贝加尔针茅草原植物多样性及土壤养分对放牧干扰的响应. 草地学报, 2010, 18(2): 177-182.
- [10] 柴锦隆, 徐长林, 杨海磊, 张建新, 肖红, 潘涛涛, 王艳, 鱼小军. 模拟践踏和降水对高寒草甸土壤物理特性和微生物数量的影响. 草业学报, 2017, 26(2): 30-42.
- [11] 林慧龙. 环县典型草原放牧家畜践踏的模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [12] 王天乐, 卫智军, 刘文亭, 白玉婷, 张爽, 丁莉君, 肖嘉圃, 吕世杰. 不同放牧强度下荒漠草原土壤养分和植被特征变化研究. 草地学报, 2017, 25(4): 711-716.
- [13] 徐志超, 宋彦涛, 乌云娜, 霍光伟, 王晓蒙, 道日娜. 放牧影响下克氏针茅草原不同物候期土壤酶活性与微生物生物量的变化. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2022-2028.
- [14] 安慧, 徐坤. 放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响. 草业学报, 2013, 22(4): 35-42.
- [15] 刘秀梅. 不同放牧强度对荒漠草原土壤特性和地上生物量的影响. 草食家畜, 2017, 38(3): 45-48.
- [16] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 毛培胜. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响. 中国草地, 2001, 23(4): 41-47.
- [17] Evans R W, Krzic M, Broersma K, Thompson D J. Long-term grazing effects on grassland soil properties in southern British Columbia. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(4): 685-693.
- [18] Dunne T, Western D, Dietrich W E. Effects of cattle trampling on vegetation, infiltration, and erosion in a tropical rangeland. Journal of Arid Environments, 2011, 75(1): 58-69.
- [19] Abdel-Magid A H, Trlica M J, Hart R H. Soil and vegetation responses to simulated trampling. Journal of Range Management, 1987, 40(4): 303-306.
- [20] 林慧龙, 任继周. 环县典型草原放牧家畜践踏的模拟研究. 草地学报, 2008, 16(1): 97-99.
- [21] 杨海磊. 天祝高寒草甸牦牛和藏羊蹄压与践踏强度的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [22] 南京农业大学. 土壤农化分析(第二版). 北京: 农业出版社, 1981.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [24] Zak J C, Willig M R, Moorhead D L, Wildman H G. Functional diversity of microbial communities: A quantitative approach. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(9): 1101-1108.
- [25] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
- [26] 李文, 曹文侠, 李小龙, 徐长林, 师尚礼. 放牧管理模式对高寒草甸草原土壤养分特征的影响. 草原与草坪, 2016, 36(2): 8-13, 20-20.

- [27] 赵帅, 张静妮, 赖欣, 杨殿林, 赵建宁. 放牧与围封对呼伦贝尔针茅草原土壤酶活性及理化性质的影响. 中国草地学报, 2011, 33(1): 71-76.
- [28] 侯扶江, 任继周. 甘肃马鹿冬季放牧践踏作用及其对土壤理化性质影响的评价. 生态学报, 2003, 23(3): 486-495.
- [29] Reeder J D, Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution*. 2002, 116(3): 457-463.
- [30] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.
- [31] Wienhold B J, Hendrickson J R, Karn J F. Pasture management influences on soil properties in the northern Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(1): 27-31.
- [32] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 施建军, 王彦龙, 盛丽. 放牧强度对高寒人工草地土壤有机质和有机碳的影响. 青海畜牧兽医杂志, 2007, 37(1): 6-8.
- [33] 张健文. 牦牛和藏羊放牧及模拟践踏对天祝高寒草甸凋落物化学计量特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [34] 尹伟, 胡玉昆, 柳妍妍, 公延明, 张伟, 刘伟, 阿德列提·艾列吾塔力甫. 巴音布鲁克不同建植期人工草地土壤生物学特性研究. 草业学报, 2010, 19(5): 218-226.
- [35] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 马玉寿. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269.
- [36] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 马玉寿, 齐文娟. 江河源区不同建植期人工草地土壤养分及微生物量磷和磷酸酶活性研究. 草业学报, 2007, 16(6): 1-6.
- [37] 林慧龙, 王苗苗, 李学玲, 王钊齐. 在模拟降水和践踏处理复合作用下长芒草典型草原土壤可蚀性研究. 草业学报, 2010, 19(3): 76-87.
- [38] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 856-864.
- [39] 焦婷, 常根柱, 周学辉, 候彦会, 杨红善, 苗小林, 刘荣堂. 温性荒漠化草原不同放牧强度下土壤酶与肥力的关系. 草地学报, 2009, 17(5): 581-587.
- [40] 程冬冬, 赵贵哲, 刘亚青, 郝率群. 土壤温度、土壤含水量对高分子缓释肥养分释放及土壤酶活性的影响. 水土保持学报, 2013, 27(6): 216-220, 225-225.
- [41] 肖红, 徐长林, 张德罡, 张建文, 杨海磊, 柴锦隆, 潘涛涛, 王艳, 鱼小军. 阴山扁蓿豆光合特性对模拟牦牛、藏羊践踏和降水的短期响应. 草业学报, 2017, 26(2): 43-52.
- [42] 鱼小军. 牦牛粪维系青藏高原高寒草地健康的作用机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.