

# 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

侯扶江<sup>1</sup>, 任继周<sup>2</sup>

(1. 兰州大学草地农业科技学院甘肃草原生态研究所; 2. 中国农业科学院草原生态研究所, 兰州 730020)

**摘要:** 确定了草地上路径的密度、宽度、深度和土壤容重等 5 项放牧家畜践踏作用的观测指标, 用该 5 个指标构建了 2 个践踏综合指数, 定量了甘肃马鹿冬季放牧的相对践踏强度, 其可信度和可行性较高。定义了放牧践踏强度, 根据冬季牧场载畜量和践踏综合指数确定了甘肃马鹿的绝对践踏强度和放牧强度。草地生长季土壤水分随践踏增强而减少, 对放牧践踏的敏感性随着生长季推移逐渐降低。0~40cm 土层全氮和速效氮含量, 以及 0~20cm 土层速效磷、全盐和有机质含量, 随践踏强度增加而减少, 0~20cm 土层全磷呈逐渐增多趋势。0~40cm 土层水分和速效氮含量对践踏的敏感性随土层加深而上升, 0~30cm 土层全氮含量对家畜践踏的敏感性高于 0~10cm 土层, 0~10cm 土层速效磷含量对践踏的敏感性高于 10~20cm 土层。土壤子系统对放牧践踏作用的耐受性表现为土壤理化性状之间相互关系的稳定性。冬季牧场践踏强度梯度上, 土壤质量综合指数的变化存在拐点, 对应着草地从稍形过牧到明显过牧和短花针茅在群落中的次优势种地位。

**关键词:** 甘肃马鹿; 放牧; 践踏强度; 践踏综合指数; 耐受阈值

## Evaluation on trampling of grazed Gansu wapiti (*Cervus elaphus kansuensis* Pocock) and its effects on soil property in winter grazing land

HOU Fu-Jiang<sup>1</sup>, REN Ji-Zhou<sup>2</sup> (1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Gansu Grassland Ecological Research Institute; 2. Grassland Ecological Institute, Chinese Academy of Agricultural Science; Lanzhou 730020, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 486~495.

**Abstract:** Animal trampling plays more important role than defoliation and excrement in grassland, but there were few studies on trampling and no quantitative index of trampling intensity available. Five characteristics of the path trampled by grazed Gansu wapiti in winter grazing land were quantitatively identified as the measuring indices of trampling intensity. Density, width and depth of path and soil bulk density in path decreased, and number of plant in path increased as grazing pressure reduced. Soil bulk density and density of path was more susceptible than width of path to grazing. On the base of the above 5 indices, two comprehensive indices of trampling intensity i. e. Comprehensive Trampling Index 1 and Comprehensive Trampling Index 2 were established and they were used to quantify trampling intensity of grazing. Trampling intensity of grazing was defined as the accumulated weight of grazed animal which live

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目(39630250); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90102011)资助

**收稿日期:** 2002-04-05; **修订日期:** 2002-09-09

**作者简介:** 侯扶江, (1971~), 男, 河南扶沟人, 博士, 副教授, 主要从事草地健康管理研究和教学。

**Foundation item:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 39630250, No. 90102011)

**Received date** 2002-04-05 **Accepted date:** 2002-09-09

**Biography:** Hou Fujiang, Ph.D. Associate professor, interesting in grassland science.

body weight was multiplied by their grazing time in the definite area of grassland. The absolute trampling intensity and grazing intensity in different sites of winter grazing land were quantified on the basis of both livestock carrying capacity and Comprehensive Trampling Index.

The soil water content at early stage in winter grazing land was more susceptible to trampling than at middle stage of herbage growing season and was the least susceptible in late stage. Total nitrogen and available nitrogen in 0~40 cm soil profile reduced with the increased trampling intensity in winter grazing land as well as the contents of available phosphorus, total salt and organic matter in 0~20 cm soil profile while total phosphorus in 0~20cm soil profile increased. The susceptibility of soil water and available nitrogen to trampling increased with the depth of soil layers in 0~40cm soil profile. Total nitrogen in 0~30cm soil layers was more susceptible to trampling than that in 0~10cm soil layer. And there was higher susceptibility of available phosphorus to trampling in 0~10cm soil layer than that in 10~20cm soil layer. Soil in winter grazing land had certain tolerance to trampling of grazed animal and the performance was not stability of single property of soil instead of the stability of interrelationship between these properties of soil. Along the gradient of trampling intensity in winter grazing land, both comprehensive index of soil quality and soil suitability had the same key point which showed the tolerance threshold of soil system to trampling and the transformation of slight overgrazing to severe overgrazing; the correlative vegetative characteristic was the subdominant position of *Stipa breviflora* in plant community.

Comprehensive Trampling Index 2 was more reasonable index of grassland management because it indicated the changes of grassland conditions more accurately. With both higher susceptibility and easier measurement, density of path was more suitable for farmers to inspect their grazing land. The third site which was 600m far from the pen in winter grazing land had the approximately average trampling intensity and grazing intensity so that the routine supervision and management of winter grazing land could be simply and representatively conducted at its site. The results suggested that information of trampling at 0~20cm soil layers was insufficient for indicating soil property under grazing though which were usually determined in grassland study. In different range of trampling intensity, comprehensive characteristics of soil could keep stable trend and thereby result in the stability of different community in grazed grassland.

**Key words:** Gansu wapiti; grazing; trampling intensity; Comprehensive Index of Trampling; tolerance threshold

文章编号:1000-0933(2003)03-0486-10 中图分类号:S825.4+3;S154.1 文献标识码:A

放牧践踏与采食、排泄物是家畜作用于草地的 3 种重要途径。其中,家畜践踏持续存在于整个放牧期间,作用是累加的,踏倒的牧草甚至可达整个草地的 23%,对土壤的压力是链轨拖拉机的 2.7~5.3 倍<sup>[1]</sup>。家畜的采食时间至多占放牧期的 60%~70%<sup>[2]</sup>,牧草可通过再生长削弱其影响。草地一年中约 4%~20% 和 1%~5% 的面积分别被尿和粪覆盖,家畜排泄物在尿斑和粪斑处对草地有一定作用,但对整个牧场影响较小<sup>[3]</sup>。相对而言,家畜践踏对草地的作用可能更为长远和深刻,重牧尤其如此。

以往研究关注家畜的采食和排泄物作用,分别用植被高度、生物量等和尿斑、粪斑等直观指标定量<sup>[4~6]</sup>,对放牧践踏的研究相对不足。家畜践踏降低土壤水势、物种丰富度和多样性<sup>[7]</sup>,影响土壤腐殖质和 N 积累<sup>[8]</sup>,增加土壤紧实度<sup>[9~11]</sup>,提高种子覆土率,促进实生苗成活,提高植被盖度<sup>[12,13]</sup>。但在阴坡,践踏作用对土壤有效水和物种多样性影响不大<sup>[7]</sup>,短期放牧践踏对土壤强度没有明显作用<sup>[12]</sup>。在这些研究中,践踏强度多测定土壤紧实度<sup>[9,11,13]</sup>,也有以家畜的不同践踏次数计测<sup>[14,15]</sup>,尚无直观的定量指标。

放牧草地上的路径是家畜长期践踏的直接产物,是植被消退的遗迹。草地上路径的密度、宽度、深度以及路径上植物数量与土壤容重是践踏强度的定量表现,路径越多、越宽、越深,土壤容重越大,路径上植物数量越多,说明家畜践踏越严重。本研究的目的一是用这 5 个单项指标构建家畜践踏的定量指标,二是利

用定量的践踏指标分析家畜践踏对土壤理化性质的影响。我国 90% 以上的草地已经退化,中度和重度退化草地超过一半<sup>[16]</sup>。建立践踏指标、定量践踏强度对于我国草地监测和退化草地改良具有重要的实践意义。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于肃南鹿场,东距甘肃省肃南裕固族自治县城红湾寺 21km,地处祁连山北麓中段,地理坐标 38.8°N 和 99.6°E 附近,海拔 2700m,土壤为山地栗钙土。年均气温 3.6℃,四季不分明,只有冷暖两季之分。降水集中在 6~7 月份,年均降水量 300.0mm,年均蒸发量 1784.6mm。草地 4 月下旬~5 月上旬开始返青,6 月下旬~7 月上旬进入生长旺盛期,9 月中上旬开始枯黄。在草原综合顺序分类法中属寒温微干山地草原类<sup>[1]</sup>。

1.2 样地设置

冬季牧场地形开阔平坦,整体坡度<3°,面积 160 hm<sup>2</sup>,1991 年设置围栏,甘肃马鹿每年 11 月下旬~翌年 2 月放牧。结合鹿场多年生产记录,冬季牧场平均放牧强度 3243.2(kg·d)/hm<sup>2</sup>,植被组成以毒草醉马草为优势种或亚优势种(表 1),显示该牧场属重牧退化草地。1999 年 7 月,询问当地牧民,调查植被和土壤状况,确认马鹿冬季放牧采食主要路线。以牧场进出口作为牧压最强地段,沿马鹿冬季放牧采食的主要路线向牧场深处牧压逐渐降低<sup>[17]</sup>,由近及远间隔 300m 设一样地,沿牧压梯度共设 6 个样地(表 1),每样地 1hm<sup>2</sup>。

1.3 放牧践踏调查与践踏综合指数

1.3.1 放牧践踏调查 在每个样地,将 2m 标杆随机抛出 10 次,记录标尺覆盖的路径数目,路径密度(Number of path, NP)=路径数目/m。每样地随机记录 20 个路径的深度(Depth of Path, DP)和宽度(Width of path, WP),以及 1m 路径内的植株数量(Plant Number in path, PN)。路径内 0~40cm 土壤容重(Soil bulk density, SBD)用环刀法测定。

路径密度、深度、宽度、路径内植物数量和土壤容重单独使用也可以评价放牧的践踏作用。但实践中,单一指标评价容易产生误差。为此,在上述 5 个单项指标的基础上,构建践踏综合指数(Comprehensive trampling index, CTI),最大限度地减少失误。CTI 越大放牧家畜的践踏强度越高。

1.3.2 践踏综合指数 1(CTI<sub>1</sub>) 分两步。第 1 步,参数标准化。计算各单项指标的相对值(Relative value, RX), $RX_i = X_i / X_{\max}$ , $X_i$  和  $X_{\max}$  分别为样地  $i(i = 1, 2, \dots, 6)$  的参数值和牧压梯度上该指标的最大值。只有  $PN_{\min} = PN_1$ ,其它指标均为  $X_{\max} = X_1$ ,为与其它参数一致, $RPN_i' = 1 + PN_1 - PN_i$ , $RPN_i'$  与  $PN_i$  线性相关极显著( $r = -1$ )。

第 2 步,  $CTI_1 = (RNP + RWP + RDP + RSBD + RPN') / 5$ 。CTI<sub>1</sub> 计算方法简单、客观,但计算结果易受极大值或极小值影响。譬如土壤容重在牧压梯度上变异较小,其相对值比同一样地其它参数的相对值高 1~8 倍,左右着 CTI<sub>1</sub> 值大小。为弥补 CTI<sub>1</sub> 之不足,并适度地强调某一参素的作用,引入践踏综合指数 2(CTI<sub>2</sub>)。

1.3.3 践踏综合指数 2(CTI<sub>2</sub>) 借鉴 Nemoro 土壤质量计算公式<sup>[18]</sup>,分 3 步计算 CTI<sub>2</sub>:

第 1 步 序数数据分级。确定高( $G_{\max}$ )、中( $G_{\text{mid}}$ )、低( $G_{\min}$ )3 个值,之间等距离(Distance, D)分 4 级以简化运算(表 2)。分级原则,一是标准化参数尽可能地保留原始数据所包含的信息,二是提高牧压梯度上

表 1 样地及其群落类型

Table 1 Site and community type		
样地号 Site No.	距牧场出入口的距离 Distance from door(m)	群落类型 Community
1	0	醉马草( <i>Achnatherum inebrians</i> )-银灰旋花( <i>Convolvulus ammannii</i> )群落
2	300	冰草( <i>Agropyron cristatum</i> )+醉马草+赖草( <i>Leymus secalinus</i> )-银灰旋花群落
3	600	赖草+醉马草+短花针茅( <i>Stipa breviflora</i> )-冷蒿( <i>Artemisia frigida</i> )群落
4	900	赖草+醉马草+短花针茅-冷蒿群落
5	1200	短花针茅+醉马草-冷蒿群落
6	1500	短花针茅+赖草群落

数变化的灵敏性。

第2步,参数标准化。依据分级标准(表2), $X_i \leq G_{\min}$ ,  $RX_i = X_i/G_{\min}$ ;  $G_{\min} < X_i \leq G_{\text{mid}}$ ,  $RX_i = 1 + (X_i - G_{\min})/D$ ;  $G_{\text{mid}} < X_i \leq G_{\max}$ ,  $RX_i = 2 + (X_i - G_{\text{mid}})/D$ ;  $X_i > G_{\max}$ ,  $RX_i = 3 + (X_i - G_{\max})/D$ 。在牧压梯度上, $PN$ 随牧压减弱而增加,参数标准化采用以下方法:  $PN_i \leq G_{\min}$ ,  $RPN_i = 3 + (G_{\min} - PN_i)/D$ ;  $G_{\min} < PN_i \leq G_{\text{mid}}$ ,  $RPN_i = 2 + (G_{\text{mid}} - PN_i)/D$ ;  $G_{\text{mid}} < PN_i \leq G_{\max}$ ,  $RPN_i = 1 + (G_{\max} - PN_i)/D$ ;  $PN_i > G_{\max}$ ,  $RPN_i = G_{\max}/PN_i$ 。标准化后的评价指数越大,说明放牧践踏越严重。

第3步,依据标准化参数计算 $CTI_2$ 。 $CTI_2 = [(n-1)/n] \times [(RX_{\text{mean}}^2 + RX_{\text{max}}^2)/2]^{1/2}$ ,  $RX_{\text{mean}}$ 和 $RX_{\text{max}}$ 分别是某一样地各标准化参数的平均值和最大值。 $RX_{\text{max}}$ 可以突出放牧践踏最敏感指标对 $CTI_2$ 的贡献。该模型是一个开放体系,  $(n-1)/n$ ,表明参评因子( $n$ )越多,值越接近1,越能反映实际情况,可信度越高。

1.3.4 践踏综合指数评价 两种数据标准化方法得到的标准化数据与原始数据线性相关极显著( $R^2 \geq 0.999$ ),其中 $PN$ 为负相关,其余为正相关,说明标准化数据较为完整地保留了原始数据的信息。 $CTI_1$ 和 $CTI_2$ 与各单项指标的相关性,除 $CTI_1$ 与 $SBD$ 、 $CTI_2$ 与 $WP$ 在0.05水平显著外,其余均在0.01水平极显著相关,说明牧压梯度上各单项指标的特征在 $CTI_1$ 和 $CTI_2$ 中也得到简单、准确的体现。可见, $CTI_1$ 和 $CTI_2$ 是描述家畜放牧践踏作用的适宜指标。

1.4 土壤取样测定和土壤综合性状

1.4.1 土壤取样测定 每个样地蛇行法土钻取样15个<sup>[19]</sup>,0~40cm土层每10cm分层取样。土壤样品过1mm筛后风干备用,称重法测土壤水分。采用《中华人民共和国国家标准》测定土壤全氮(Total nitrogen, TN)(半微量凯氏法)、有效磷(Available phosphorus, AP)、总磷(Total phosphorus, TP)、总盐(Total salt, TS)和有机质(Soil organic matter, SOM),蒸馏法测定速效氮(Available nitrogen, AN)<sup>[20]</sup>。土壤水分在牧草生长初期(5月上旬)、生长中期(7月下旬)和生长末期(10月中旬)测定,其余指标在生长旺盛期采样测定。0~40cm土层,土壤水分、TN、AN每隔10cm分4层测定,其余分测0~10cm和10~20cm两层。

1.4.2 土壤综合性状 土壤综合性状反映土壤要素之间的相互关系,用土壤质量指数和土壤适宜度指数表示。

土壤质量指数(Index of soil quality, ISQ) 用修订的Nemoro公式计算<sup>[18]</sup>,参评指标均为与牧草生长关系密切者,其中TP和AP两者之间、TN和AN之间各选其一以避免重复,数据标准化方法基本同 $CTI_2$ 。各土壤要素的分级标准参照国家第二次土壤普查<sup>[18]</sup>,结合祁连山地土壤状况<sup>[21]</sup>和本研究作适当调整(表3)。土壤要素 $S_i \leq S_{\min}$ 时,其质量指数 $P_i = S_i/S_{\min}$ ;  $S_{\min} < S_i \leq S_{\text{mid}}$ ,  $P_i = 1 + (S_i - S_{\min})/(S_{\text{mid}} - S_{\min})$ ;  $S_{\text{mid}} < S_i \leq S_{\max}$ ,  $P_i = 2 + (S_i - S_{\text{mid}})/(S_{\max} - S_{\text{mid}})$ ;  $S_i > S_{\max}$ ,  $P_i = 3$ 。  $ISQ = [(n-1)/n] \times [(P_{\text{mean}2} + P_{\text{min}2})/2]^{1/2}$ ,  $P_{\min}$ 代替 $P_{\max}$ ,以突出土壤属性中最差因子对土壤综合质量的影响,体现生态学最小因子定律。

土壤适宜度指数(Index of soil suitability, ISS) 反映土壤满足植物需求的程度,用各样地土壤状况与对照样地土壤状况的贴进度表征<sup>[22]</sup>。为了简化运算,把冬季牧场牧压最轻的第6样地(1500m)的土壤适宜度指数设为1,参照李自珍等人的生态位适宜度

公式计算其它5个样地的 $ISS$ <sup>[22]</sup>:  $ISS_n = (\sum (X_n/X_6))/7$ ,  $X_n$ 和 $X_6$ 分别是样地 $n$ 和样地6土壤理化性质 $X$ 的测定值,即所测定的7项土壤理化指标。

土壤适宜度指数相对客观;土壤质量综合指标因其分级标准参照第2次全国土壤普查和甘肃

表2 放牧践踏指标的分级标准  
Table 2 Classificatory criteria of trampling indices

	$G_{\min}$	$G_{\text{mid}}$	$G_{\max}$	距离 $D$
$NP$ (N/m)	0.4	0.8	1.2	0.4
$WP$ (cm)	14.0	26.0	38.0	12.0
$DP$ (cm)	0.6	1.2	1.8	0.6
$SBD$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.86	0.96	1.06	0.10
$PN$ (N/m)	7.0	14.0	21.0	7.0

表3 土壤因子分级标准  
Table 3 Classificatory criteria of factors to assess soil quality

土壤性状 Soil characteristics	$S_{\max}$	$S_{\text{mid}}$	$S_{\min}$
土壤水分 Soil water (kg/kg)	0.30	0.15	0.10
SOM (%)	20.00	10.00	6.00
TS (%)	0.40	0.20	0.15
AP (mg/kg)	70.00	35.00	20.00
TN (%)	0.75	0.50	0.25

省土壤普查资料,所以具有相对广泛的可比性。

2 结果与分析

2.1 牧压梯度上的放牧践踏作用

单项指标  $NP$ 、 $WP$ 、 $DP$  和  $SBD$  以及  $CTI_1$  和  $CTI_2$  两个综合指标随牧压减弱逐渐下降,  $PN$  逐渐增加(表 4)。7 项指标与样地距牧场出入口的距离显著相关( $WP$  在 0.05 水平,其余在 0.01 水平),表明它们与牧压有着简单而密切的关系。所有参数在第 1 样地和第 2 样地之间上升( $PN$ )或下降幅度最大,说明家畜践踏在牧场出入口附近最严重,随样地到牧场出入口距离的延长,践踏强度迅速降低。践踏综合指数( $X$ )与距离( $Y$ )拟合方程的斜率( $CTI_1: Y = 0.93e^{-0.0008X}$ ,  $R_2 = 0.982$ ;  $CTI_2: Y = 4.43e^{-0.001X}$ ,  $R^2 = 0.995$ )和牧压梯度上两个践踏综合指数的变异系数( $CTI_1: C.V. = 32.75\%$ ;  $CTI_2: C.V. = 42.40\%$ ),  $CTI_2$  均高于  $CTI_1$ ,说明  $CTI_2$  对放牧践踏的敏感性高于  $CTI_1$ 。

表 4 甘肃马鹿对冬季牧场的践踏作用

Table 4 Trampling of Gansu wapiti in winter grazing land						
样地号 Site No.	1	2	3	4	5	6
$NP$ (N/m)	1.30±0.17 <sup>A</sup>	0.70±0.21 <sup>Ba</sup>	0.50±0.21 <sup>Ba</sup>	0.45±0.18 <sup>Bab</sup>	0.35±0.08 <sup>Bb</sup>	0.10±0.05 <sup>C</sup>
$WP$ (cm)	39.6±5.4 <sup>A</sup>	20.6±2.3 <sup>Ba</sup>	16.8±1.6 <sup>Bab</sup>	16.7±2.1 <sup>Bb</sup>	13.0±1.4 <sup>Bc</sup>	13.4±1.2 <sup>Bc</sup>
$DP$ (cm)	2.37±0.45 <sup>Aa</sup>	1.56±0.27 <sup>Ab</sup>	1.04±0.19 <sup>Ac</sup>	0.95±0.12 <sup>Acd</sup>	0.76±0.17 <sup>Ad</sup>	0.38±0.11 <sup>B</sup>
$SBD$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.16±0.06 <sup>Aa</sup>	1.16±0.05 <sup>Aa</sup>	1.02±0.03 <sup>B</sup>	0.87±0.04 <sup>Cb</sup>	0.89±0.04 <sup>Cb</sup>	0.85±0.04 <sup>Cb</sup>
$PN$ (N/m)	3.3±1.1 <sup>A</sup>	9.4±2.1 <sup>Ba</sup>	11.5±1.8 <sup>Bab</sup>	14.1±1.8 <sup>Bb</sup>	22.0±4.3 <sup>Cc</sup>	21.5±4.8 <sup>Cc</sup>
$CTI_1$	1.00	0.69	0.55	0.49	0.37	0.30
$CTI_2$	4.29	3.28	2.55	1.96	1.34	1.00

每一行大写字母不同者,差异在 0.01 水平显著;大写字母相同,但小写字母不同者,差异在 0.05 水平显著;小写字母有相同者,差异不显著。The different capital in a row indicates the significant difference at 0.01 level; the different lowercase with the same capital in a row indicates the significant difference at 0.05 level; the same lowercase in a row indicates no significant difference

5 个单项指标在牧压梯度上具有较为稳定的变化趋势(表 4),其变异系数显示其对放牧践踏的敏感性。原始数据的变异系数所反映的敏感性排序为: $NP > DP > PN > WP > SBD$ ;  $CTI_1$  的标准化数据显示的排序为: $NP > PN > DP > WP > SBD$ ;  $CTI_2$  的标准化数据反映的敏感性依次为: $SBD > NP > DP > PN > WP$ (表 5)。3 种排序结果共同之处在于,  $NP$  是响应放牧践踏的较敏感指标,  $WP$  是较不敏感指标;显著差异在于  $SBD$  的排序位置。土壤物理性质决定了  $SBD$  不会变化太大<sup>[23]</sup>,由于  $CTI_1$  的标准化数据保持了  $SBD$  固有的变化幅度,一定程度上掩盖了该指标对放牧践踏的敏感性,尤其当土壤含水量较大时<sup>[2]</sup>。  $CTI_2$  的标准化数据与原始数据相比,除  $PN$  的变异系数略有下降,其余参数的变异系数保持不变( $NP$  和  $DP$ )或增加( $WP$  和  $SBD$ )(表 5),整体上参数对放牧践踏的敏感性有不同程度提高。其中  $SBD$  的变异系数增加 3.2 倍,本质上揭示了牧压梯度上  $SBD$  变化所蕴涵的放牧践踏及其动态特征,说明  $CTI_2$  对原始数据的分级标准和标准化方法可行。

家畜对草地的践踏作用存在于整个放牧过程,是家畜体重和践踏时间的累积过程,因此践踏强度用单位面积草地上畜群体重与放牧时间的乘积表示。践踏强度是放牧强度的重要组成部分,后者用放牧家畜活体重而非代谢体重表示时,可视作践踏强度。整个牧场放牧期内的家畜重量依据相对践踏强度分配到各个样地,得到各样地的绝对践踏强度,同理求得各样地的放牧强度(表 6)。各样地的践踏强度和放牧强度( $Y$ )与样地到牧场出入口的距离( $X$ )可用指数方程拟合:践踏强度,

表 5 放牧践踏的单因素评价指数

Table 5 Index of single factor to assess the trampling intensity					
项目 Item	$NP$	$WP$	$DP$	$SBD$	$PN$
原始数据的变异系数 C.V. of original data (%)	51.0	33.6	44.7	12.3	40.8
$CTI_1$ 标准化数据的变异系数 C.V. of standardized data of $CTI_1$ (%)	51.0	33.6	44.7	12.3	47.7
$CTI_2$ 标准化数据的变异系数 C.V. of standardized data of $CTI_2$ (%)	51.0	36.9	44.7	51.5	37.1



$Y=20.84e^{-0.0013X}$ ,  $R^2=0.995$ ; 放牧强度,  $Y=5548.5e^{-0.0010X}$ ,  $R^2=0.995$ 。表明放牧践踏强度和放牧强度在牧场出入口附近较重,而在远离牧场出入口的地段变化较小。

用 5 个放牧践踏单项指标和 7 项土壤理化指标分别对 6 个样地作聚类分析(图 1),虽然聚合顺序略有不同,但结果相似,冬季牧场聚合为 3 类: {1}、{2,3,4}和{5,6},群落优势种分别为醉马草、冰草和赖草、短花针茅。反映出草地路径特征和土壤理化性质之间具有内在联系,短花针茅对践踏的耐受性较醉马草和赖草低。

2.2 放牧践踏对土壤理化性质的影响

牧草生长的 3 个时期,0~40cm 土层平均水分含量与  $CTI_1$  和  $CTI_2$  显著负相关(图 2),均随践踏强度增加而逐渐减少。拟合方程斜率的绝对值依次为:5 月上旬>7 月下旬>10 月中旬(图 2),显示出草地土壤水分对放牧践踏的敏感性在生长初期最大,随着草地生长,敏感性逐渐下降,生长末期最小,可能由于生长后期降水量增加减弱了牧草蒸腾所引起的土壤水分含量差异,是家畜践踏间接作用的结果。可以推断,土壤水分对践踏作用的敏感性在 1 年中是连续变化的,暖季是敏感性的衰减期,冷季是敏感性的增强期。

土壤 0~40cm 平均 TN 和 AN 含量,以及 0~20cm 平均 AP、TS 和 SOM 含量,随放牧践踏增强呈逐渐下降趋势,0~20cm 平均 TP 含量呈逐渐上升趋势(图 3),用容重校正的体积含量有类似的变化趋势。结果显示,放牧践踏促进土壤磷积累,但抑制 TN、AN、AP 和 SOM 的积累。家畜践踏梯度上,TP 与 AP、TN 与 AN 之间异步变化,表明放牧践踏既影响土壤 P、N 积累,也可能抑制 P、N 的矿化作用,对土壤 P 尤其明显。

表 6 各样地的践踏强度和放牧强度

Table 6 Trampling intensity and grazing intensity in every sites

样地 Site No.	1	2	3	4	5	6
践踏强度①	19.95	13.95	9.99	7.02	4.23	2.86
放牧强度②	5373.3	4108.3	3193.9	2455.0	1678.4	1252.5

①Trampling intensity (t · d)/hm<sup>2</sup> ②Grazing intensity (kg · d)/hm<sup>2</sup>

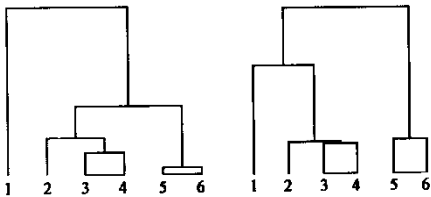


图 1 6 个样地依据放牧践踏指标(左)和土壤理化性质(右)的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of 6 sites in winter grazing grassland based the trampling indices (left) and soil properties (right) respectively

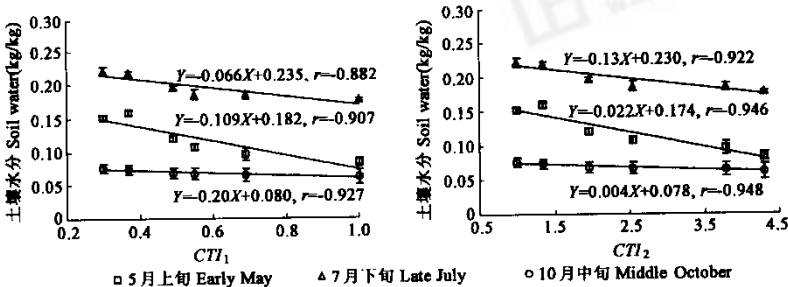


图 2 家畜践踏与土壤水分的关系

Fig. 2 Interrelationship between trampling and soil water

各土层理化性状与  $CTI_2$  线性回归,斜率的涵义是践踏强度变化 1 个单位,土壤性状的响应幅度,因此斜率的绝对值可作为不同土层土壤性状对践踏敏感性的定量指标,其值愈大,说明土壤性状对践踏作用愈敏感。牧压梯度上,0~10cm 土层水分和 AN 含量与  $CTI_2$  相关不显著( $p>0.05$ ),但 0~900m 样地相关显著( $p<0.05$ )。数据表明,20~30cm 和 30~40cm 土层水分和 AN 含量对践踏的敏感性随土层加深而增加(表 7)。0~40cm 土层 TN 含量的敏感性 10~30cm 土层最高,总体上 0~30cm 土层高于 30~40cm 土层。

~10cm 土层 AP 含量的敏感性高于 10~20cm 土层。可见,不同土层土壤理化性质对践踏响应有所差异。

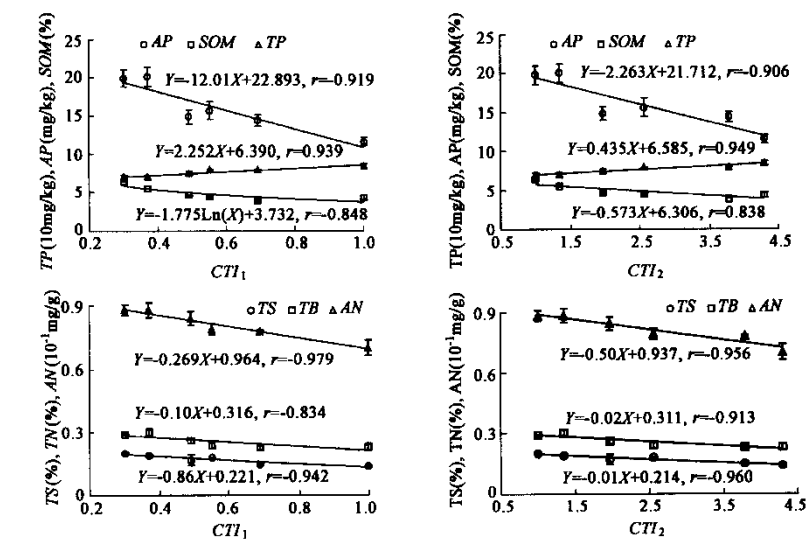


图 3 家畜践踏与土壤理化性质的关系

Fig. 3 Interrelationship between trampling and physical and chemical properties of soil

表 7 不同土层性状与 CTI<sub>2</sub> 的关系

Table 7 Interrelationship between CTI <sub>2</sub> and soil properties in different layers								
土层 Soil layer (cm)	土壤水分 Soil water(kg/kg)		AN (mg/kg)		TN (%)		AP (mg/kg)	
	AVS	r	AVS	r	AVS	r	AVS	r
0~10					0.020	-0.883 *	2.991	-0.925 *
10~20	0.010	-0.966 **	4.468	-0.831 *	0.021	-0.885 *	1.537	-0.834 *
20~30	0.012	-0.855 *	7.274	-0.945 **	0.021	-0.937 **		
30~40	0.014	-0.893 *	8.323	-0.833 *	0.017	-0.882 *		

AVS 线性拟合方程斜率的绝对值 Absolute value of slope of linear regressive equation; \* 0.05 水平显著 Significance at 0.05 level; \*\* 0.01 水平显著 Significance at 0.01 level

两个土壤性状综合指标在践踏强度梯度上存在相同的拐点(Key point)(图 4),在拐点两侧,ISQ 和 ISS 的变化模式有明显差异(图 4),反映出在不同的践踏强度范围内,土壤性状之间的相互关系具有不同的稳定的变化趋势。分析认为,在放牧生态系统中,土壤子系统对家畜践踏作用具有一定的耐受性(Tolerance),其表现不是单一的土壤性状的稳定(图 3),而是它们之间相互关系的稳定性(图 4)。

拐点对应的相对践踏强度阈值为  $CTI_2 = 1.96$ ,绝对践踏强度和放牧强度分别为  $7.02(t \cdot d)/hm^2$  和  $2455.0(kg \cdot d)/hm^2$ 。根据草地放牧演替 5 级划分法<sup>[1]</sup>,放牧践踏阈值对应着冬季牧场从稍形过牧到明显过牧,植物群落以短花针茅为亚优势种。践踏强度低于这个阈值,短花针茅在群落中上升为优势种,践踏强度大于这个阈值,短花针茅的优势种地位依次被赖草、冰草和醉马草替代(表 1),与聚类分析的结果相近。处于践踏强度阈值两侧的草地分别是短花针茅群落、赖草群落和醉马草群落(表 1),均为放牧演替群落的稳定阶段,符合群落演替的多稳态-多演替途径假说<sup>[24]</sup>。

3 讨论

两个放牧胁迫指数,CTI<sub>1</sub> 较为客观、计算简单,CTI<sub>2</sub> 整体上保持或提高了各单项指标对践踏的敏感性,尤其是土壤容重对践踏的灵敏性(表 5),更适于作为放牧管理的决策依据。路径密度在 5 个单项指标

中对放牧压力较为敏感,容易目测获取,适于生产运用。在冬季牧场,第3样地的践踏强度或放牧强度接近整个牧场的平均水平(表6),草地健康的日常监测可以简便地以第3样地代表整个牧场,如果第3样地的路径状况趋向于第2样地,则表明牧压增强、草地进一步退化;如果趋向于第4样地,显示牧压减弱、退化草地在恢复。

在牧场水平,以往的研究常以样点离牧场入口或饮水点的距离确定相对牧压<sup>[2,25,17]</sup>,或以群落放牧演替系列间接反映牧压<sup>[26,27]</sup>。而以冬季牧场载畜量为基础,根据践踏综合指数可以计测牧场不同地段的绝对践踏强度或放牧强度(表6),在牧场水平直接定量放牧强度,为草地放牧管理提供参考。在我国广大牧区,变季节连续放牧为划区轮牧是退化草地恢复和草地健康保育的重要途径之一,该鹿场可以不同样地的放牧强度和践踏强度为依据,确定冬季牧场的轮牧小区及其放牧强度,达到可持续利用的目的。

草地粪量一定程度上反映家畜的活动密度,在甘肃马鹿冬季牧场,草地粪量( $Y, g/m^2$ )与家畜践踏强度( $X$ )正相关( $CTI_1: Y = 27.22X - 7.04, r = 0.90, p < 0.05$ ;  $CTI_2: Y = 4.76X - 3.46, r = 0.83, p < 0.05$ ),说明路径主要由家畜践踏所致。冷季在高山草地放牧的反刍家畜绵羊,排泄物中有99.5%的磷和67.2%的氮通过粪排放到草地中<sup>[28,29]</sup>,同为反刍动物的甘肃马鹿可能有类似情况。粪量虽然随放牧践踏增强而增多,但是除土壤总磷外,土壤速效磷和氮素含量呈下降趋势,说明草地践踏较重地段虽然有较多的排泄物返还,但土壤中营养元素的积累量却较低(图3),可能与践踏作用导致土壤物理结构恶化,降低氮、磷的矿化作用和促进氮挥发有关。反映出以往对排泄物的作用估计过高,而对放牧践踏作用估计较低。

过去认为矿质元素富集的上层土壤对草地的重要性和对放牧的敏感性均高于下层土壤<sup>[5,30]</sup>。在甘肃马鹿冬季牧场,0~40cm土层水分和速效氮含量对践踏的敏感性随土层深度增加而提高(表7)。因此,就放牧的践踏作用而言,仅仅研究草原上层土壤(0~20cm)尚不足以获取全面、准确的草地放牧的践踏信息。

在祁连山北坡高山草地,醉茅草群落是重牧地段的稳定群落<sup>[31]</sup>,青藏高原的矮嵩草甸和内蒙古高原的冷蒿草原也是放牧条件下的稳定群落<sup>[25,27]</sup>。这些地区降水的季节不均匀性和年际变幅较大<sup>[32,33]</sup>,必然引起草地土壤水分和与其密切相关的矿质元素变化<sup>[28,29]</sup>,却没有改变依赖于土壤营养物质的放牧稳定群落<sup>[25,27,31]</sup>。显然,放牧践踏条件下,这些群落的相对稳定可能并非依赖于单一土壤要素的稳定,而是取决于它们之间相互关系的稳定性,这是重度践踏草地具有较高耐牧性的土壤基础。该推论与本项研究结果相符,其中机理尚需深入研究。

References:

[1] Ren J Z. *Pastoral Agriculture Ecology*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995. 51~84.  
[2] Gansu Agriculture University. *Grassland Science*. Beijing: Agricultural Press, 1961. 161~179.  
[3] Fu Y K, Sun J X. *Improvement and Utilization of Grassland*. Lznhou: Gansu Science & Technology Press, 1986. 57~135.  
[4] Hodgson J. *Grazing Management- Science into Practice*. Longman Group UK Limited, 1990.  
[5] Hodgson J, Illius A W. *The Ecology and Management of Grazing Systems*. CABI, Oxon, UK, 1995.  
[6] Lemaire G, Hodgson J, de Moraes A, et al. *Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology*. CABI publishing, Oxon, UK, 1999.  
[7] Kobayashi Y, Nomoto N. Effects of trampling and vegetation removal on species diversity and microenvironment under different shade conditions. *J. Veget. Sci.*, 1997, 8(6): 873~880.

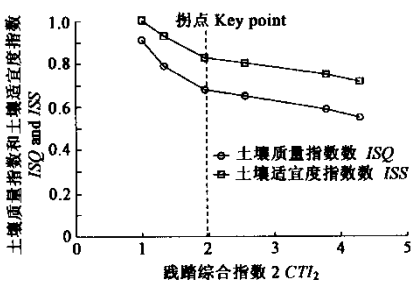


图4 土壤质量指数和土壤适宜度指数与践踏强度综合指数2的关系

Fig. 4 Interrelationship between index of soil quality (ISQ) and index of soil suitability (ISS) and  $CTI_2$



- [8] Severson K E, DeBano L F. Influence of Spanish goats on vegetation and soils in Arizona Chaparral. *J. Range Manag.*, 1991, **44**(2): 111~117.
- [9] Li J L, Xu P, Meng L, *et al.* Study on effects of different rotation grazing intensity on soil, plant and livestock in autumn pasture of *Artemisia* desert in low hill area of northern slope of Tianshan mountain. *Acta Pratacult. Sin.*, 1990, **2**(2): 60~65.
- [10] Weigel J R, Britton C M, Mcpherson G R. Trampling effects from short-duration grazing on tobo sagrass range. *J. Range Manag.*, 1990, **43**(2): 92~95.
- [11] Jiang W L, Zhang Y J, Fu Y K, *et al.* Study on controlling grassland shrub and weeds by sheep night penning. II Effects of sheep browsing and trampling on grassland. *Acta Pratacult. Sin.*, 1999, **8**(Suppl.): 82~89.
- [12] Winkei V K, Roundy B A, Blough D K. Effects of seedbed preparation and cattle trampling on burial of grass seeds. *J. Range Manag.*, 1991, **44**(2): 171~175.
- [13] Winkei V K, Roundy B A. Effects of cattle trampling and mechanical seedbed preparation on grass seedling emergence. *J. Range Manag.*, 1991, **44**(2): 176~180.
- [14] Cole D N. Experimental trampling of vegetation. I Relationship between trampling intensity and vegetation response. *J. Appl. Ecol.*, 1995, **32**: 203~214.
- [15] Cole D N. Experimental trampling of vegetation. II Predictors of resistance and resilience. *J. Appl. Ecol.*, 1995, **32**: 215~224.
- [16] Editorial Committee of Annuals of Chinese Animal Husbandry. *Annals of Chinese Animal Husbandry* 1999. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [17] Yang L M, Li J D, Yang Y F.  $\beta$ -diversity of grassland communities along gradient of grazing disturbance. *Chin. J. App. Ecol.*, 1999, **10**(4): 442~446.
- [18] Qin Z M, Zhao J. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *Acta Geograph. Sin.*, 2000, **55**(5): 545~554.
- [19] Ren J Z ed. *Research Methods of Pratacultural Science*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998, 1~29.
- [20] Nanjing Soil Institute, Chinese Academy of Science. *Analysis on Physical and Chemical Property of Soil*. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1978. 62~141.
- [21] General Inspection Office of Soil of Gansu Province. *Soil of Gansu*. Beijing: Agriculture Press, 1993.
- [22] Li Z Z, Zhao S L, Zhang P Y. The niche-fitness theory and its application to the systems of crop growth. *J. Lanzhou Uni.*, 1999, **29**(4): 219~224.
- [23] Editorial Committee of Agriculture, General Editorial Committee of Chinese Grand Encyclopedia, Editorial Department of Chinese Grand Encyclopedia Press. *Chinese Grand Encyclopedia Agriculture II*. Beijing: Chinese Grand Encyclopedia Press, 1990. 1245~1253.
- [24] Tausch R J, Wigand P E, Burkhardt J W. Viewpoint: plant community thresholds, multiple steady states, and multiple successional pathways; legacy of the quaternary? *J. Range Manag.*, 1993, **48**: 439~447.
- [25] Li Y H. The divergence and convergence of *Aneurolepidium chinense* steppe and *Stipa grandis* steppe under the grazing influence in Xilin river valley, Inner Mongolia. *Acta Phytoecol. Geobot. Sin.*, 1988, **12**(3): 189~196.
- [26] Zhao S L, Yang F X, Chen Q C. A test of using the method of fuzzy mathematic to study the grazing retrogressive succession stages of the *Stipa* steppe. *Acta Bot. Sin.*, 1982, **4**(4): 366~373.
- [27] Zhou X M, Wang Q J, Zhang Y Q, *et al.* Quantitative Analysis of Succession Law of the Alpine Meadow Under the Different Grazing Intensities. *Acta Phytoecol. Geobot. Sin.*, 1987, **11**(4): 276~286.
- [28] Ren J Z, Zhu X Y, Wang Q, *et al.* Nitrogen cycling in the alpine pasture-sheep system. *Chin. J. Grassland and Forage*. 1986, **3**(4): 4~8.
- [29] Chen Y M, Wu Z L, Zhu X Y, *et al.* Phosphorus cycling in grass-Koresia alpine grassland. *Acta Pratacult. Sin.*, 1995, **4**(2): 75~80.
- [30] Bai K Y, Wang P, Han J G, *et al.* Nitrogen distribution at grass-soil system and growing dynamic on Russian wildryegrass pasture as influenced by grazing. *Acta Agrest. Sin.*, 1999, **7**(1): 46~53.
- [31] Hou F J, Li G. Change of ecological landscape in Hexi region. *J. Soil Water Conserv.*, 2001, **15**(6): 53~57.
- [32] Bai Y 万方数据 model of above-ground biomass of *Aneurolepidium chinese* community in response to seasonal precipitation. *Acta Pratacult. Sin.*, 1997, **6**(2): 1~6.

[33] Li Y N. Simulation of forage yield and stocking rate on alpine grassland in response to warming trend of climate. *Acta Pratacult. Sin.*, 2000, **9**(2): 77~82.

参考文献:

[1] 任继周. 草地农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995. 51~84.

[2] 甘肃农业大学. 草原学. 北京: 农业出版社, 1961. 161~179.

[3] 符义坤, 孙吉雄. 草地改良与利用. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1986. 57~135.

[9] 李建龙, 许鹏, 孟林, 等. 不同轮牧强度对天山北坡低山带蒿属荒漠秋场土草畜影响研究. 草业学报, 1990, **2**(2): 60~65.

[11] 蒋文兰, 张英俊, 符义坤, 等. 绵羊宿营法防除天然草地灌木杂草研究, II 绵羊啃食和践踏对植物与土壤物理性状的影响. 草业学报, 1999, **8**(增刊): 82~89.

[16] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 中国畜牧业年鉴, 1999. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[17] 杨利民, 李建东, 杨允菲. 草地群落放牧干扰梯度  $\beta$  多样性研究. 应用生态学报, 1999, **10**(4): 442~446.

[18] 秦明周, 赵杰. 城乡结合部土壤质量的变化特点与可持续利用对策——以开封市为例. 地理学报, 2000, **55**(5): 545~554.

[19] 任继周 主编. 草业科学研究方法. 北京: 中国农业出版社, 1998. 1~29.

[20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 62~141.

[21] 甘肃省土壤普查办公室. 甘肃土壤. 北京: 农业出版社, 1993.

[22] 李自珍, 赵松岭, 张鹏云. 生态位适宜度理论及其在作物生长系统中的应用. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, **29**(4): 219~224.

[23] 中国大百科全书总编辑委员会《农业》编辑委员会, 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书-农业卷. 北京, 上海: 中国大百科全书出版社, 1990. 1245~1253.

[25] 李永宏. 内蒙古锡林河流域羊草草原和大针茅草原在放牧影响下的分异和趋同. 植物生态学与地植物学学报, 1988, **12**(3): 189~196.

[26] 赵松岭, 杨凤翔, 陈庆诚. 针茅草原放牧衰退退演替代阶段的模糊数学分类. 植物学报, 1982, **4**(4): 366~373.

[27] 周兴民, 王启基, 张堰青, 等. 不同放牧强度下高寒草甸植被演替规律的数量分析. 植物生态学与地植物学学报, 1987, **11**(4): 276~286.

[28] 任继周, 朱兴运, 王钦, 等. 高山草地-绵羊系统的氮循环. 中国草原与牧草. 中国草原与牧草. 1986, **3**(4): 4~8.

[29] 陈亚明, 吴自立, 朱兴运, 等. 高山禾草——嵩草型草地的磷循环. 草业学报, 1995, **4**(2): 75~80.

[30] 白可喻, 王培, 韩建国, 等. 放牧强度对新麦草人工草地氮素在牧草与土壤中的分配和动态的影响. 草地学报, 1999, **7**(1): 46~53.

[31] 侯扶江, 李广. 河西地区生态景观的演变. 水土保持学报, 2001, **15**(6): 53~57.

[32] 白永飞, 许志信. 降水量的季节分配对羊草草原群落地上生物量影响的数学模型. 草业学报, 1997, **6**(2): 1~6.

[33] 李英年. 高寒草甸牧草产量和草场载畜量模拟研究及对气候变暖的响应. 草业学报, 2000, **9**(2): 77~82.