

## 不同干扰对黄土区典型草原土壤理化性质的影响

陈芙蓉<sup>1,2</sup>, 程积民<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 李媛<sup>3</sup>, 马正锐<sup>1,2</sup>, 魏琳<sup>3</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以黄土区云雾山典型草原为研究对象, 分析 4 种干扰方式(封育、封育+施肥、封育+火烧和放牧)对土壤理化性质的影响。结果表明:(1)在 0—50 cm 土层, 封育、封育+施肥、封育+火烧地的土壤容重随土层深度的增加而增加, 放牧地的土壤容重随土层深度的增加而减少。其中, 在 0—20 cm 土层, 放牧显著高于其他 3 种干扰方式, 封育+施肥显著低于其他 3 种干扰方式;(2)在 0—50 cm 土层, 4 种干扰方式的土壤含水量随土层深度的增加而增加, 依次为封育+火烧>封育+施肥>封育>放牧;(3)在 0—50 cm 土层, 4 种干扰方式的土壤有机质、全氮和速效钾含量随土层深度的增加而减少;火烧地的全磷含量随土层深度增加而减少, 其他 3 种干扰方式的全磷含量呈现先增加后减少的趋势。在 0—30 cm 土层, 4 种干扰方式土壤养分(有机质、全氮、全磷和速效钾)含量为封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧, 且放牧会导致 0—10 cm 所有养分含量显著降低( $P<0.01$ )。(4)4 种干扰方式, 有机质与全氮、全磷和速效钾呈极显著的正相关关系( $P<0.01$ )。

**关键词:** 典型草原; 干扰方式; 土壤理化性质

中图分类号:S158.2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2012)02-0105-06

## Effects of Different Disturbances on Soil Physical and Chemical Properties in the Typical Grassland of Loess Region

CHEN Fu-rong<sup>1,2</sup>, CHENG Ji-min<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, LI Yuan<sup>3</sup>, MA Zheng-rui<sup>1,2</sup>, WEI Lin<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry

of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Graduate University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049; 3. Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Effects of four types of disturbances (enclosure, fertilization, enclosure+burning and grazing) to the soil physical and chemical properties were analyzed. Results were as follows: (1) In the 0—50 cm soil layer, the soil bulk density increased with soil depth in enclosure(E), enclosure+fertilization(EF) and enclosure+burning(EB) grassland, while it was decreased in grazing(G) grassland. In the 0—20 cm soil layer, it was significantly higher of G than the other three types while EF was the lowest. (2) In the 0—50 cm soil layer, the soil water content increased with soil depth in the four types of disturbances and tended to be in the order of EB > EF > E > G. (3) In the 0—50 cm soil layer, soil organic carbon, total nitrogen and available potassium all decreased with soil depth, and total phosphorus decreased with soil depth of EB while it was increased at first and then decline in the other three types. In the 0—30 cm soil layer, the order of soil nutrient content tended to be EF > EB > E > G. The nutrient content of G in 0—10 cm soil layer was significantly lower than the other three types of disturbances ( $P<0.01$ ). (4) Soil organic carbon content was positively related( $P<0.01$ ) to total nitrogen, total phosphorus and available potassium in all the four types of disturbances.

**Key words:** typical grassland; disturbance types; soil physical and chemical properties

我国温带草原面积占国土面积的 1/4, 具有独特的草场资源(植被、土壤、野生动物、植物等), 近年来却不断遭受着不合理的人为干扰, 引起植被退化, 而随着人口急增, 草地生态压力日趋扩大。草原退化的本质是植

收稿日期: 2011-12-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050202); 国家重点实验室基金项目(10502-Z8); 林业公益性行业科研专项(200904056)

作者简介: 陈芙蓉(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: cfrmax@163.com

通讯作者: 程积民(1955—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事草地生态学和恢复生态学研究。E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

被破坏引起土壤风蚀的加剧,土壤风蚀又会导致土壤肥力下降,土壤肥力的下降进一步导致草原植被的退化。草原的这种退化过程在很大程度上就是人为干扰—草原破坏—土壤肥力下降之间的一个恶性循环<sup>[1]</sup>。因此定量研究干扰对土壤的影响对于认识人类活动与草原生态系统退化的关系有非常重要的意义。放牧、封育、施肥和火烧是人类在草地生态系统管理实践中施加于草地的主要干扰类型,对草地土壤理化性质产生重要影响。国内外学者在不同干扰对草地土壤的影响方面做过大量的研究工作,认为干扰不但会影响草地土壤物理结构,如容重、渗透率、紧实度、透气性等,也会对草地土壤养分的积累有不同程度的影响<sup>[2]</sup>。如适度放牧能使立枯物倒伏、破碎、加速分解,促使土壤肥力增加。而过度放牧会使草原地面裸露,土壤通透性下降,土壤表层含水量降低,造成水土流失,土壤肥力降低<sup>[3]</sup>。封育能提高草地生产力,增加土壤有机质、全氮、全磷、速效磷钾含量和微生物数量<sup>[4]</sup>。而火烧会减少土壤表层有机质含量,增加矿质养分含量<sup>[5]</sup>。已有的相关研究多集中于单一干扰对草原土壤理化性质的影响或人类活动对草原生态系统生产力及物种多样性的影响等方面,不同的干扰对草原土壤理化性质的比较研究又主要集中在内蒙典型草原<sup>[6]</sup>,而对于黄土区典型草原的研究却很少。鉴此,本文以黄土区典型草原为对象,研究不同干扰方式对土壤理化性质影响,以初步了解不同干扰方式下草地土壤性质的变化,探讨典型草原的合理利用与有效保护问题,为草地畜牧业的可持续发展提供科学指导,以期配置和优化各种干扰方式,为草地的恢复及可持续利用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区自然概况

试验区位于宁夏固原云雾山草原自然保护区,它是我国黄土高原半干旱区最完整、面积最大的典型草原生态系统,代表了黄土高原半干旱区的自然特征。地理位置 106°24′—106°28′E, 36°13′—36°19′N, 面积 6 700 hm<sup>2</sup>, 海拔 1 800~2 100 m, 年平均气温 5 °C, 最热月为 7 月, 气温为 22~25 °C, 最冷月为 1 月, 平均最低气温 -14 °C。年降水量 400~450 mm, 降水季节分配不均, 全年 65%~75% 的降水集中在 7—9 月, 蒸发量为 1 330~1 640 mm。土壤类型为黑垆土和黄绵土。该区自 1982 年开始封育, 植被主要是温带典型草原, 其建群种和优势种是本氏针茅(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、大针茅(*S. grandis*)、冷蒿(*A. frigida*)群落, 伴生种类型以猪毛蒿(*A. scoparis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、星毛委陵菜(*Comarum acaulis*)群落为主, 其中丛生禾本科植物本氏针茅在该区分布范围最广。

### 1.2 试验材料与设计

2011 年 5 月在云雾山草原自然保护区, 分别选取 4 个人为干扰的典型样地: 施肥样地、火烧样地、放牧样地和封育样地, 试验共设置 4 个群落特征相近、地形一致, 并具有相同水热条件的阳坡样地, 按不同干扰方式设置 4 个处理, 分别为封育+施肥、封育+火烧、封育和放牧(根据草地年产草量 4 500 kg/hm<sup>2</sup>, 每只羊每 1 d 需要 3 kg 草, 设置载畜率水平每 6 个月每 1 hm<sup>2</sup> 为 2.07 只羊单位, 属中度放牧, 放牧绵羊数为 4 只), 样地具体情况如表 1。考虑到地形因素的影响, 在每个样地选取坡底、坡中和坡上 3 个坡位, 每个坡位随机法选取 3 个样方, 用直径 5 cm 的土钻取样, 每个样方重复 3 次, 取样深度为 50 cm, 每 10 cm 一层共分 5 层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm, 40—50 cm), 对同一样方的 3 次重复混匀装袋, 带回实验室处理。在每个坡位挖一个 50 cm×50 cm×50 cm 的土壤剖面, 50 cm 深度上每隔 10 cm 一层, 分 5 层采用环刀取土用于测定土壤容重, 每层 2 个重复。

表 1 研究样地的地理位置与干扰方式

干扰方式	土壤类型	地理位置	海拔/m	利用与管理方式
封育(E)	黑垆土、 黄绵土	E106°23′6″ N36°15′7″	2085~2103	封禁年限为 20 年, 采用铁丝网围栏, 完全排除牲畜踩食和人为刈割。
封育+ 施肥(EF)	黑垆土、 黄绵土	E106°23′9″ N36°15′13″	2050~2059	连续 20 年封禁, 于 2010 年 7 月中旬施肥, 施氮磷钾复合肥(N-P-K)(其中总氮(N)含量 20.2%, 有效磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )含量 9.5%, 钾(K <sub>2</sub> O)含量 10.5%), 施肥量为 600 kg/hm <sup>2</sup> 。
封育+火 烧(EB)	黑垆土、 黄绵土	E106°23′6″ N36°15′6″	2099~2112	连续 20 年封禁, 在 2011 年 4 月初由于人为原因, 致草地火烧, 火烧比例 <30%, 属于轻度火烧。
放牧 (G)	黑垆土、 黄绵土	E106°22′13″ N36°15′13″	2032~2059	连续多年放牧利用, 放牧试验于 2010 年 5 月初开始, 10 月末结束, 采取轮牧方式, 放牧期 3 个月, 每隔 1 个月进行 1 次放牧, 每次 10 d, 每天从早上 6:00 将家畜赶入放牧区让其自由采食, 到下午 18:00 赶回畜圈休息。

### 1.3 样品分析方法

取回的土样置于室内风干,去除细根及杂质,研磨后分别过 1.00 mm 和 0.25 mm 土壤筛。土壤含水量采用烘干法,在 $(105\pm 2)$  °C 条件下将土样烘干至恒重。土壤有机质采用浓硫酸—重铬酸钾外加热法测定;全氮用半微量凯氏定氮法测定;全磷用酸溶—钼锑抗比色法测定;土壤速效钾含量采用 1.0 mol/L 的醋酸铵溶液浸提—火焰光度法测定。以上指标测定时均重复 3 次。

### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 软件对数据进行预处理,采用 SAS V8 统计分析软件对土壤特征值进行分析,由 Shapiro-Wilk 检验发现数据符合正态分布,采用 ANOVA 分析方法检验各处理在  $P=0.05$  显著水平上的差异,如差异显著,采用 Duancan 法在  $P=0.05$  显著水平上进行多重比较。采用 Pearson 法分析土壤养分之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干扰方式对土壤物理性质的影响

土壤容重是土壤紧实度和土壤结构的评价指标。从同一干扰方式来看,封育、封育+施肥和封育+火烧地的土壤容重随土层深度增加而增加,对容重的影响主要表现在 0—20 cm 土层(表 2),这与植物根系在土壤中的空间分布有关。因为植物根系主要分布在土壤表层<sup>[7]</sup>,所以表层土壤比较疏松,随着土层深度增加,根系逐渐减少,土壤通气性变差,使得土壤紧实度增加,土壤容重变大。而放牧地的容重随土层深度增加而降低,因为其植被盖度小,地上生物量小,根系随之减少,加上牲畜的踩踏,使得土壤紧实度增加,土壤结构变差,说明放牧对上层土壤的压实作用更显著,使土壤容重增加。这与王明君等<sup>[8]</sup>研究放牧对草甸土壤的影响结果一致。不同干扰方式同一土层比较,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,放牧地的土壤容重最大,封育+火烧和封育地次之,封育+施肥地最小,且放牧地显著高于其他 3 种干扰样地( $P<0.05$ );在土层 20—30 cm 和 30—40 cm,4 种干扰方式间没有显著差异;在 40—50 cm 土层,不同干扰方式土壤容重依次为封育+火烧>封育>放牧>封育+施肥,且封育+火烧地的容重显著高于封育+施肥地( $P<0.05$ ),其他土层间没有显著差异。总之,在 0—50 cm 土层,封育+施肥地的土壤容重最小,说明施肥后草地的通透性变好,土壤结构优于其他样地,有利于保持土壤水分和肥力。

土壤含水量受大气降水、蒸发、植物吸收蒸腾及土壤特性等影响,是决定植物生长及系统构成的重要指标。从同一干扰方式来看(表 2),在 0—50 cm 各土层,4 种干扰方式的土壤含水量都随土层深度增加而增加。这是因为本地区连续数月几乎没有降水,加上土壤表层水分蒸发大,导致表层含水量小于深层。由表 2 可以看出,对在不同干扰方式同一土层的土壤含水量来说,在 0—50 cm 土层,依

表 2 不同干扰方式对黄土区典型草原土壤物理性质的影响

测定指标	土层深度/cm	封育+施肥	封育+火烧	封育	放牧
土壤容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	0—10	0.98±0.04b	1.03±0.02b	1.03±0.03b	1.20±0.01a
	10—20	1.00±0.02b	1.05±0.02b	1.06±0.02b	1.16±0.01a
	20—30	1.04±0.08a	1.12±0.01a	1.10±0.04a	0.14±0.03a
	30—40	1.04±0.03a	1.14±0.02a	1.13±0.03a	1.11±0.04a
	40—50	1.08±0.02b	1.16±0.02a	1.14±0.02ab	1.11±0.02ab
土壤含 水量/%	0—10	10.45±0.30a	11.85±0.61a	10.27±0.87a	7.70±0.51b
	10—20	11.30±0.20b	13.22±0.65a	11.27±0.84b	8.74±0.25c
	20—30	13.11±0.45b	16.02±0.85a	12.72±1.04b	10.34±0.50c
	30—40	15.66±0.62b	18.28±0.56a	14.40±0.10bc	12.76±0.81c
	40—50	17.12±0.54b	19.43±0.59a	15.47±0.82b	15.44±0.85b

注:多重比较仅限于不同干扰同层间的比较,同行不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

依次为封育+火烧>封育+施肥>封育>放牧。在 0—10 cm 土层,封育、封育+施肥和封育+火烧地的土壤含水量都显著高于放牧地( $P<0.05$ ),而前 3 种干扰间差异不显著;在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,只有封育与封育+火烧地的含水量差异不明显,其他干扰方式间差异显著( $P<0.05$ );在 30—40 cm 土层,封育+火烧、封育+施肥与放牧地三者间差异显著( $P<0.05$ ),其他干扰方式间差异不显著;在 40—50 cm 土层,封育+火烧地土壤含水量显著高于其他 3 种干扰方式( $P<0.05$ )。总之,在 4 种干扰方式中,封育+火烧地的土壤含水量最高,放牧地的最低。一般来说火烧去除了地表枯落物,使地面裸露,温度升高,土壤水分蒸发增加<sup>[9]</sup>。但本研究取样在 5 月初(植物生长初期),其他干扰样地植物还没有返青,而火烧地却是一片“绿岛”,因为植物火烧后的灰分中保存着植物极易吸收的元素形式(如金属氧化物),是火后植物旺盛生长的最主要原因<sup>[10]</sup>。所以火烧去除了地表的枯枝落叶,促进幼苗更新,使草地提早返青,植物高度和植被盖度都高于其他样地,土壤入渗和持水能力增大,土壤含水量增大。而放牧地由于牲畜的踩踏使土壤变得紧实,从而降低对水分的渗透与蓄积能力,土壤含水量最小。

## 2.2 不同干扰方式对土壤养分的影响

### 2.2.1 不同干扰对土壤有机质含量的影响

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标之一,土壤肥力是土壤物理、化学、生物性质的综合反映,所以有机质在维持土壤结构、供应土壤养分等方面起着重要作用<sup>[11]</sup>。不同干扰方式土壤有机质含量随土壤深度的增加而减少,表现出相同的垂直变化规律(表 3)。有机质含量与土层深度之间的关系可以用直线函数较好地拟合( $y = -0.0396x + 5.3988, R^2 = 0.938$ ),且负相关关系达到极显著( $P < 0.01$ )。4 种干扰方式在 0—50 cm 土层内有机质含量为封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧。放牧地的有机质含量在每一土层都最

表 3 不同干扰方式对黄土区典型草原土壤养分的影响

土壤养分	土层深度/cm	封育+施肥	封育+火烧	封育	放牧
有机质含量/%	0—10	6.03±0.26a	5.53±0.16a	4.81±0.19b	4.37±0.07b
	10—20	5.33±0.21a	4.80±0.10b	4.20±0.11c	3.67±0.11d
	20—30	4.67±0.19a	4.27±0.10a	3.79±0.10b	3.40±0.14b
	30—40	4.35±0.08a	3.70±0.08b	3.69±0.07b	3.29±0.10c
	40—50	4.15±0.03a	3.38±0.12b	3.46±0.11b	3.31±0.08b
全氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	0—10	3.32±0.08a	3.18±0.06a	2.76±0.08b	2.45±0.05c
	10—20	3.16±0.11a	2.86±0.05b	2.47±0.05c	2.08±0.04d
	20—30	2.84±0.07a	2.65±0.05b	2.35±0.05c	1.97±0.06d
	30—40	2.66±0.04a	2.38±0.04b	2.28±0.04b	1.96±0.04c
	40—50	2.44±0.07a	2.11±0.05b	2.14±0.06b	2.05±0.08b
全磷含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	0—10	0.77±0.02a	0.73±0.01b	0.71±0.01bc	0.69±0.01c
	10—20	0.78±0.01a	0.72±0.01b	0.69±0.01c	0.66±0.01c
	20—30	0.73±0.01a	0.72±0.01a	0.67±0.01b	0.65±0.01b
	30—40	0.77±0.01a	0.68±0.01b	0.69±0.02b	0.67±0.01b
	40—50	0.76±0.02a	0.71±0.01b	0.69±0.01b	0.68±0.01b
速效钾含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	0—10	300.81±66.90a	286.01±12.00a	265.07±5.48a	211.02±12.80b
	10—20	233.97±45.49a	185.25±5.74b	183.68±6.22b	163.75±8.35b
	20—30	190.56±21.96a	143.28±10.73b	122.27±5.26b	118.05±6.05b
	30—40	142.34±12.65a	119.14±7.19b	100.50±5.54b	103.96±6.07b
	40—50	109.83±4.97a	102.79±4.39a	89.90±6.55a	98.60±6.72a

低,就 0—10 cm 的土层来看,封育+施肥、封育+火烧和封育有机质含量分别为放牧的 1.38,1.27,1.10 倍;10—20 cm 的土层,则分别为其的 1.45,1.31,1.14 倍。同层间比较,0—10 cm 和 20—30 cm 土层,封育+施肥与封育+火烧地的有机质含量显著高于封育和放牧地( $P < 0.05$ ),其他干扰间差异不显著;在 10—20 cm 土层,4 种干扰间均有显著性差异;在 30—40 cm 土层,除火烧地和封育地没有明显差异外,其他干扰间均有显著性差异( $P < 0.05$ );在 40—50 cm,施肥地有机质含量显著高于其他 3 种干扰( $P < 0.05$ )。说明放牧会导致土壤有机质含量降低,封育+施肥干扰有利于有机质积累。

2.2.2 不同干扰对土壤全氮含量的影响 从表 3 可以看出,4 种干扰方式土壤全氮含量也随着土层深度的增加呈直线下降的趋势,可以用直线方程( $y = -0.0181x + 3.0478, R^2 = 0.970$ )对全氮含量与土层深度的关系进行描述,且呈极显著的负相关关系( $P < 0.01$ )。4 种干扰方式 0—40 cm 土层内土壤全氮含量为封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧。其中,在 0—10 cm 土层,除封育+施肥与封育+火烧地间全氮含量没有差异,其他干扰间差异显著;在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,4 种干扰方式间都有显著性差异( $P < 0.05$ );在 30—40 cm 土层,除封育+火烧地和封育地没有差异,其他干扰间有显著性差异;在 40—50 cm 土层封育+施肥地全氮含量显著高于其他 3 种干扰样地( $P < 0.05$ ),放牧地仍为最低,但它与封育+火烧和封育地之间差异不明显。这表明在典型草原放牧导致了土壤全氮含量降低,而封育+施肥使全氮含量升高。

2.2.3 不同干扰对土壤全磷含量的影响 土壤全磷含量受成土母质和耕作施肥等人类生产活动影响较大。如表 3,4 种干扰方式土壤全磷含量随土层深度的增加变化不是很大,全磷含量在封育+施肥、封育和放牧地的变化规律不同于有机质和全氮,随土层深度的增加,全磷含量呈现先减少后增加的趋势;封育+火烧地随土层深度的增加而减少。在 0—50 cm 土层内 4 种干扰方式全磷含量由大到小的顺序仍为封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧。同层间比较,由于人为施肥(含磷)的缘故,在每一土层施肥地的全磷含量都显著高于其他干扰(除了在 20—30 cm 与火烧地差异不显著);在 0—50 cm 土层封育和放牧地的全磷没有显著差异。在 0—10 cm 土层,封育+火烧地的全磷显著高于放牧地( $P < 0.05$ );在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,封育+火烧地显著高于封育地和放牧地( $P < 0.05$ );在深层 30—40 cm 和 40—50 cm,由于磷元素在土壤中的移动性较差,封育+火烧、封育和放牧地的全磷含量几乎没有差异,这也说明火烧干扰对表层土壤的影响更为直接和明显,而对深层土壤的影响则较小。

2.2.4 不同干扰对土壤速效钾含量的影响 土壤速效钾是植物生长过程中易被较快吸收利用的钾素形态,其含量的高低是判断土壤钾素营养丰缺的重要指标<sup>[12]</sup>。如表 3,土壤速效钾含量随土层深度增加而降低,它们的

关系符合二次幂函数关系( $y=0.0986x^2-9.9641x+353.75, R^2=0.998$ ), 相关关系达到极显著( $P<0.01$ ), 说明在浅层土壤, 速效钾含量下降速率较快, 而随土层深度增加下降速率逐渐减慢。在 0—30 cm 土层, 封育+施肥地速效钾含量最高, 封育+火烧和封育地次之, 放牧地最小; 而在 30—50 cm 土层, 速效钾含量为封育+施肥 > 封育+火烧 > 放牧 > 封育。因为施肥地施了钾元素的缘故, 使施肥地的速效钾含量是最高的, 而封育+火烧地是由于植物焚烧后草木灰的加入, 使得速效钾含量仅次于施肥地。不同干扰方式同层间比较, 速效钾含量差别不是很大。在 0—10 cm 土层, 放牧地显著低于其他 3 种干扰方式(3 种干扰间差异不显著)( $P<0.05$ ); 在 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 土层, 封育+施肥显著高于其他 3 种干扰方式(3 种干扰间差异不显著)( $P<0.05$ ), 而在 40—50 cm 土层, 4 种干扰方式间没有显著性差异。说明放牧对土壤表层速效钾的影响较大, 而对深层影响较小。

2.2.5 土壤有机质与全氮、全磷和速效钾的相关性 许多研究表明, 各种土壤养分之间存在一定的相关性。本文把有机质( $y_1$ )作为土壤养分最重要的指标, 与全 N( $y_2$ )、全 P( $y_3$ )、速效 K( $y_4$ )间呈极显著正相关( $r_{12}=0.946^{**}$ ,  $r_{13}=0.640^{**}$ ,  $r_{14}=0.790^{**}$ ,  $n=150$ )。因为天然草地氮素的输入量少部分来源于大气沉降, 而大部分依赖于植物残体的归还量及生物固氮<sup>[13]</sup>。土壤氮的输出主要产生于土壤有机质的分解, 分解后大部分被植物吸收利用, 部分  $\text{NH}_3$  经硝化、反硝化或挥发, 释放到大气中<sup>[14]</sup>, 所以土壤全氮的含量变化取决于有机质含量。另外植物根系的分泌物和死亡的根系为微生物提供了丰富的能源, 微生物活动加快, 土壤中物质的输入和输出速率加快, 促进了土壤养分物质循环, 使土壤全氮、全磷和速效钾得到补充<sup>[15]</sup>。由此可见: 有机质与土壤养分密切相关, 它可以丰富土壤 N 库、P 库, 提高速效 K 含量。有人研究表明, 土壤全 N 的 95%、全 P 的 40%~60% 以及速效钾的 70% 来源于有机质<sup>[16]</sup>, 说明有机质含量直接或间接地影响土壤中其他营养元素的含量, 有机质在土壤中的积累与矿化也直接影响全 N、部分全 P 和速效钾含量的变化, 因此土壤保肥的核心应是保持和提高土壤有机质含量。

### 3 讨论

本研究中, 4 种干扰方式样地的有机质和全氮含量随土层深度的增加呈直线下降趋势, 速效钾含量随土层深度的增加呈二次幂函数下降趋势。这与许中旗等<sup>[6]</sup>研究人为干扰对内蒙典型草原土壤养分状况影响的结果一致。土壤养分的主要来源是植物根系及枯落物的分解, 枯落物主要集中在土壤表层, 有机质积累多, 植物根系也主要分布在土壤表层(0—30 cm)中, 随着土层深度的增加, 植物根系分布减少, 有机质来源少, 故而呈现出大多数养分随土层深度的增加而递减的趋势。又因为枯落物和植物根系对土壤的影响主要限于土壤表层, 所以不同干扰方式对土壤表层的影响更为直接和明显, 对深层土壤的影响较小, 因此 4 种干扰方式间土壤养分表层差异明显, 深层不明显。全磷主要由成土母质和施肥状况决定, 在土壤中的存在形式较稳定、不易流失, 更倾向于土壤母质中所含矿物的控制<sup>[17]</sup>。

人为干扰影响草地生态系统的结构、功能和进入土壤的动植物残体数量, 所以不同干扰对土壤养分有较大的影响。而土壤的养分状况主要取决于气候条件、土壤母质和生物因素<sup>[6]</sup>, 本研究中 4 种干扰方式的气候条件和土壤的成土母质是相同的, 因此导致其养分含量不同主要是各样地的植被状况。

封育是一种有效且简便易行的促进草原恢复的措施, 它通过人为降低或完全排除牲畜对草地生态系统的影响, 使系统在自身的弹性下得以恢复和重建。前人已经研究封育可显著提高退化草地的生产力, 改良土壤结构和水分状况, 提高地上生物量, 促进退化草原正向演替发展<sup>[18]</sup>。本研究结果表明, 与放牧相比, 封育显著改善了 0—20 cm 土层容重和 0—30 cm 土层的含水量状况, 显著增加了 0—40 cm 土层全氮含量和 0—10 cm 速效钾含量。因为封育提高了植被平均高度、盖度和地上生物量, 从而增加了土壤肥力; 由于本研究区封育年限过长(20 年), 地表枯落物积累过多, 不利于草地更新和土壤养分循环, 所以土壤有机质含量增加不是很显著。

封育+火烧干扰优于单一封育措施, 与封育相比, 封育+火烧显著提高了 0—30 cm 土层的有机质和全氮含量、10—30 cm 土层的全磷含量, 这是因为草地经轻度火烧后, 土壤表面残留的有机物和根系部枯落物分解的有机质补充到土壤中, 使表层有机质增加, 促进土壤种子库和幼苗库的更新<sup>[19]</sup>; 同时本次火烧对土壤破坏不大, 枯落物中的氮和一些灰分进入土壤中补充土壤营养, 使全氮和全磷含量增加; 这与孙明学<sup>[20]</sup>研究塔河林区轻度火烧后增加了土壤全氮和全磷结果一致。在 4 种干扰方式中, 封育+施肥干扰改善土壤肥力效果最显著。在 0—50 cm 土层, 封育+施肥地的有机质、全氮、全磷和速效钾含量都高于封育+火烧地。这是因为施氮磷钾肥一方面直接补充了草地土壤养分, 增加了地上生物量, 使地上枯落物和根系增多, 同时植被盖度的增加改善

了地表的微生境水分条件,从而增加了输入土壤中有机物质的量,进一步促进土壤全氮、全磷和速效钾的积累;另一方面施肥增加了土壤微生物的数量及其活性,促使其转化为各种成分的有机质,有利于有机质的积累。

放牧是草地重要的利用和干扰方式,放牧家畜通过选择性采食、践踏和粪便归还直接影响草原植物群落结构和土壤理化性质。将土壤表层(0—10 cm)中的有机质含量与针茅草原的退化程度对应起来: $>2.5\%$ 为未退化; $2.5\% \sim 2.0\%$ 为轻度退化; $2.0\% \sim 1.6\%$ 为中度退化; $<1.6\%$ 为严重退化<sup>[1]</sup>。按此标准,放牧地属于轻度退化,其表层土壤有机质含量为 2.45%。研究表明,随着典型草原盖度的降低和地上群落的退化,土壤物理、化学性质和肥力也呈现明显下降趋势<sup>[21]</sup>。本研究表明,放牧使土壤容重增大,含水量减少,土壤有机质、全氮、全磷和速效钾含量都减少。

#### 4 结论

(1)在土壤物理性质方面,对土壤容重来说,0—50 cm 土层,封育、封育+施肥、封育+火烧地的土壤容重随土层深度的增加而增加,放牧地的土壤容重随土层深度的增加而减少。其中,在 0—20 cm 土层,放牧显著高于其他 3 种干扰方式,封育+施肥显著低于其他 3 种干扰方式;施肥能增加土壤孔隙度,改善土壤结构。对土壤含水量来说,在 0—50 cm 土层,4 种干扰方式的土壤含水量随土层深度的增加而增加。4 种干扰方式含水量为封育+火烧 $>$ 封育+施肥 $>$ 封育 $>$ 放牧;封育+火烧地土壤含水量在 10—50 cm 土层显著高于其他方式样地;而放牧使 0—40 cm 土层含水量显著减少。

(2)在土壤化学性质方面,0—50 cm 土层,4 种干扰方式的土壤有机质、全氮和速效钾含量随土层深度的增加而减少;火烧地的全磷含量随土层深度增加而减少,其他 3 种干扰方式的全磷含量呈现先增加后减少的趋势。不同干扰方式对土壤的养分状况有明显的影响,在 0—30 cm 土层,4 种干扰方式土壤养分(有机质、全氮、全磷和速效钾)含量为封育+施肥 $>$ 封育+火烧 $>$ 封育 $>$ 放牧;且放牧会导致 0—10 cm 所有养分含量的显著降低。4 种干扰方式样地土壤有机质与全氮、全磷和速效钾呈极显著的正相关。

参考文献:

- [1] 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第 5 集)[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [2] Percival H J, Parfitt R L, Scott N A. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grassland; Is clay content important? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1623-1630.
- [3] Curl M L, Wilkins R J. The comparative effects of defoliation, treading and excreta on a *Lolium perenne*-*Trifolium repens* pasture grazed by sheep[J]. Journal Agricultural Science Cambridge, 1983, 100: 451-460.
- [4] 曹成有, 邵建飞, 蒋德明, 等. 围栏封育对重度退化草地土壤养分和生物活性的影响[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2011, 32(3): 427-430.
- [5] 李政海, 绛秋. 火烧对土壤养分状况的影响[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版, 1994, 25(4): 444-449.
- [6] 许中旗, 闵庆文, 王英舜, 等. 人为干扰对典型草原生态系统土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 38-42.
- [7] 李金芬, 程积民, 刘伟, 等. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征[J]. 草地学报, 2010, 18(5): 661-668.
- [8] 王明君, 赵萌莉, 崔国文, 等. 放牧对草甸草原植被和土壤的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 758-762.
- [9] 周道玮, 姜世成, 田洪艳, 等. 草原火烧后土壤水分含量的变化[J]. 东北师大学报:自然科学版, 1999(1): 97-102.
- [10] Lobert J M. Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen-containing gases[J]. Nature, 1990, 346: 552-554.
- [11] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 等. 土壤有机质及其研究方法综述[J]. 世界科技研究进展, 2005, 27(5): 72-78.
- [12] 李娟, 张世熔, 孙波, 等. 湫水河流域生态修复过程中土壤速效钾的时空变异[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 88-92.
- [13] 李忠佩, 王效举. 小区域水平土壤有机质动态变化的评价与分析[J]. 地理科学, 2000, 20(2): 182-188.
- [14] 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 384-389.
- [15] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 等. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426-2431.
- [16] 康师安, 关世英. 羊草草原暗栗钙土养分含量与动态的研究[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [17] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1173-1178.
- [18] Mekuriaa W, Veldkamp E, Haile M, et al. Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray, Ethiopia[J]. Journal of Arid Environment, 2007, 69: 270-284.
- [19] Wylie N H, Alicia S, M, Roberto A D, et al. Fire and grazing in grasslands of the Argentine Caldenal; Effects on plant and soil carbon and nitrogen[J]. Acta Oecologica, 2007, 32: 207-214.
- [20] 孙明学. 塔河林区林火对土壤性质与植被恢复的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [21] 安卓, 牛得草, 文海燕, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及 C : N : P 化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 801-807.