

# 连续4年不同放牧强度内蒙古典型草原土壤微生物量 碳、氮、磷含量差异

朱晓亚 李子豪 赵小蓉\* 林启美 李贵桐

(中国农业大学 土地科学与技术学院,北京 100193)

**摘要** 为了解放牧干扰下草原土壤微生物量变化特征,以内蒙古锡林郭勒典型草原放牧控制试验样地为研究平台,采用双因素方差分析对2014—2017年不同放牧强度下土壤微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、微生物量氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)、微生物量磷(Microbial biomass phosphorus, MBP)含量进行了调查。结果表明:1)连续4年不同放牧强度下MBC、MBN含量年际变化不显著( $P>0.05$ ),全年平均值分别为306.00和55.98  $\mu\text{g/g}$ ,MBP含量年际变化显著( $P<0.001$ ),放牧第一年土壤MBP含量平均为40.99  $\mu\text{g/g}$ ,第二年以后土壤MBP含量大幅度降低,降低了50.38%~79.97%;2)不同放牧强度下,土壤MBC、MBN、MBP含量均在G8处理下达到最大值,且均高于不放牧处理(G0);3)土壤微生物量碳氮含量的比值一直保持相对稳定,微生物量碳磷含量比值在中度放牧强度(G8)下与对照保持一致。因此,放牧对土壤微生物量的影响,尤其是对微生物磷含量的影响不仅与放牧强度有关,还与放牧时间有关。4年连续放牧尚未对该地区土壤微生物量碳、氮含量造成显著影响,对土壤微生物量磷含量的影响明显。中度放牧强度(G8)可能最适宜微生物生存,可提高土壤微生物量,维持合理的微生物量碳氮磷含量比值,有利于维持草原群落的稳定,提高草原群落的生产力。

**关键词** 内蒙古; 典型草原; 放牧; 土壤微生物量

中图分类号 S154.36

文章编号 1007-4333(2020)06-0121-10

文献标志码 A

## Differences of soil microbial biomass C, N and P contents in typical grasslands of Inner Mongolia under different grazing intensities

ZHU Xiaoya, LI Zihao, ZHAO Xiaorong\*, LIN Qimei, LI Guitong

(College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** In order to understand the change characteristics of soil microbial biomass under the disturbance of grazing, this study took the grazing control test plot of Xilin Gol in Inner Mongolia as the research platform, and the content of soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN) and microbial biomass phosphorus (MBP) were investigated under different grazing intensities between 2014 and 2017. The results showed that: 1) There were no significant annual changes in MBC and MBN content under different grazing intensities for four consecutive years ( $P>0.05$ ). The annual average values were 306.00 and 55.98  $\mu\text{g/g}$ , respectively. The annual change of MBP content was significant ( $P<0.001$ ). The soil MBP content in the first year of grazing was 40.99  $\mu\text{g/g}$  on average. After the second year, the soil MBP content decreased by 50.38% - 79.97%. 2) Under different grazing intensities, the contents of soil MBC, MBN and MBP reached the maximum under G8 treatment, and were higher than those under non-grazing treatment (G0); 3) Soil MBC : N ratio remained relatively stable, and MBC : P ratio was consistent with the control under moderate grazing intensity (G8). Therefore, the effect of grazing on soil microbial biomass, especially MBP content, is not only related to grazing intensity, but also related to grazing times. However, continuous grazing for 4 years

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)计划(2014CB138801)

第一作者: 朱晓亚, 博士研究生, E-mail: zhuxiaoya9412@foxmail.com

通讯作者: 赵小蓉, 副教授, 主要从事土壤微生物生态研究, E-mail: zhaoxr@cau.edu.cn

displayed no significantly impact on the content of soil MBC and MBN in this area, but its impact on MBP content was obvious. The moderate grazing intensity (G8) was the most suitable for microbial survival, which improved soil microbial biomass, maintained a reasonable ratio of microbial biomass carbon to nitrogen and phosphorus, and was conducive to maintain soil microbial biomass and the stability of grassland community and improve the productivity of grassland community.

**Keywords** Inner Mongolia; typical grassland; grazing; soil microbial biomass

内蒙古典型草原是欧亚大陆草原生态系统的重要组成部分,也是我国重要的绿色生态屏障。放牧是内蒙古草原的主要利用方式之一,适度放牧不但能提高草原净初级生产力,还能维护植物多样性和草原生态系统的稳定,防止草原生态系统退化<sup>[1]</sup>。不合理的放牧活动会对草原生态系统产生诸多的负面影响,导致草原生产力下降,最终会导致草原退化,甚至沙化,影响草原生态系统的可持续利用及其生态功能的发挥<sup>[2-3]</sup>。因此,探寻放牧条件下最大限度优化草原的措施具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

微生物是草原生态系统的重要组成,也是土壤最活跃的成分。常用土壤微生物量碳氮磷度量,既反映土壤微生物数量,也体现土壤养分库与源的状况<sup>[7]</sup>,可作为土壤扰动及健康质量的重要指标<sup>[8]</sup>。放牧对土壤微生物产生诸多影响,牲畜的踩踏作用尤其是过度放牧,可能导致土壤紧实,从而降低土壤微生物量及其活性<sup>[9-10]</sup>,甚至改变微生物群落,出现更多的厌氧微生物<sup>[11]</sup>;牲畜的排泄物含有大量的可利用养分,可作为微生物基质,提高微生物量<sup>[12-13]</sup>;牲畜选择性采食,将影响植被,进而影响输入土壤的有机物质种类和数量,间接地影响土壤微生物<sup>[14]</sup>。关于放牧对草原土壤微生物量的影响还没有一致的结论,如:孙海燕等<sup>[15]</sup>和宋俊峰等<sup>[16]</sup>研究均表明,随着放牧强度的增加,土壤环境恶化,不利于微生物生长繁殖,从而降低土壤微生物量;杨青等<sup>[17]</sup>研究却发现适度放牧能增加根系的渗出物,提高微生物活性,从而增加土壤微生物量;赵吉等<sup>[18]</sup>研究表明自由轻牧区(4只羊/hm<sup>2</sup>,120 d/y)的土壤微生物量在9年后仍无明显减少。同时,土壤微生物量碳氮磷含量对放牧的响应可能不同步。邬嘉华等<sup>[19]</sup>对温带典型草原土壤微生物量的研究表明,放牧对土壤微生物量碳、磷含量的影响显著,但对土壤微生物量氮含量无显著影响。因此,由于草原生态系统本身十分复杂,放牧导致的土壤微生物量的变化,不仅与土壤理化性质的变化有关,还受外界环境因素如气候因子的影响<sup>[20]</sup>。除放牧强度外,放牧年限也是影

响土壤微生物量的重要因素之一。已有研究表明,长期过度放牧会造成土壤微生物量降低,那么长期放牧的时间是如何界定的?短期放牧和长期放牧对土壤微生物量产生的影响是否一致?放牧对土壤微生物量的影响如何随时间发生变化?目前对于这些问题还没有清晰和确切的答案,关于放牧对草原土壤微生物量的年际动态变化的研究还比较少。因此,本研究拟以内蒙古锡林浩特盟典型草原为研究对象,设置不同放牧强度试验,采用双因素分析方法,探究放牧对土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响及其年际动态变化特征,以期了解不同放牧强度下土壤微生物量碳、氮、磷含量及其比值的差异,合理评价放牧年限和放牧强度对内蒙古典型草原土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响,并提出适宜的放牧强度建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 放牧试验及土样采集

放牧梯度试验样地位于锡林郭勒盟锡林浩特市东北40 km处的毛登牧场,地理坐标44°15'24" N~44°15'41" N,116°32'08" E~116°32'28" E,海拔1 111~1 121 m,样地属于温带半干旱典型草原栗钙土地带,砂质壤土。

试验设置5个放牧强度梯度:放牧羊数分别为0、4、8、12、16只/1.33 hm<sup>2</sup>,记为G0、G4、G8、G12、G16,分别代表对照、轻度放牧、中度放牧、重度放牧和极重度放牧。每个放牧强度设置3个重复,随机区组排列。试验于2014年开始,放牧时间为每年6—10月。2014—2017年,每年8月初牧草最大生物量时期,用土钻随机多点采集0~20 cm土层土壤,每个小区至少取15土钻,混合均匀后,取1 kg装于自封袋中,置4℃冰箱低温保存。每份土样分为2部分:一部分新鲜土样过2 mm筛后供测定土壤微生物量;一部分自然风干后过筛用于测定土壤理化指标。

### 1.2 测定项目及方法

土壤含水量采用恒温箱烘干法<sup>[21]</sup>,土壤有机质

含量采用重铬酸钾外加热容量法<sup>[22]</sup>, 土壤全磷用  $\text{HClO}_4\text{—H}_2\text{SO}_4$  消煮, 钼锑抗比色法测定<sup>[23]</sup>, 土壤速效磷含量用  $\text{NaHCO}_3$  浸提—钼锑抗比色法测定<sup>[23]</sup>, 土壤全氮含量的测定采用半微量开氏法<sup>[23]</sup>。土壤微生物量碳氮含量采用氯仿熏蒸— $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法, 微生物量碳氮含量分别为熏蒸浸提液与未熏蒸浸提液中碳氮含量的差值然后除以转换系数 0.45, 浸提液中的碳氮含量用微量有机碳氮分析仪 (multi N/C<sup>®</sup> 3100, Jena, Germany) 测定; 土壤微生物量磷含量同土壤微生物量碳氮含量的方法进行熏蒸, 去除氯仿后加入 0.5 mol/L pH 8.5  $\text{NaHCO}_3$  溶液振荡过滤, 同时另称取等质量土壤, 加入  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液 (25 mg/kg), 然后加入  $\text{NaHCO}_3$  溶液振荡过滤。微生物量磷含量的计算公式如下:

$$\text{微生物量磷}/(\mu\text{g}/\text{g}) = \rho \times V / (0.40 \times R \times M)$$

式中:  $\rho$  为熏蒸与未熏蒸土壤浸提液中磷浓度的差值,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;  $V$  为浸提液体积,  $\text{mL}$ ;  $R$  为所加入无机磷的回收率;  $M$  为称取的土壤质量,  $\text{g}$ 。所有滤液中的磷浓度均用钼锑抗比色法测定<sup>[24-25]</sup>。

### 1.3 统计分析

所有结果用烘干土壤质量表示, 为 3 次重复平均值。土壤微生物量碳、氮、磷含量均为质量含量, 土壤微生物量碳氮含量比、碳磷含量比均为质量比。采用双因素方差分析不同放牧强度和放牧年限土壤基础理化性质和微生物量碳氮磷含量的差异, 用最小显著性差异 ( $\text{LSD}_{0.05}$ ) 表示不同处理之间 95% 置信度的差异。采用 Pearson 相关性分析土壤微生物量与土壤养分之间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基础理化性质

连续 4 年放牧前后, 土壤理化性质的变化如表 1 所示。2014 年试验伊始, 不同放牧强度下, 土壤有机质、全氮和全磷含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 而速效磷含量表现为中度放牧 (G8) 处理显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。连续 4 年放牧后, 各放牧强度土壤有机质、全氮、全磷和速效磷含量变化不显著, 平均分别仅提高了 4.08%、0.78%、0.79%、12.25%。

表 1 2014 和 2017 年不同放牧强度下试验土壤基础理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil in different intensity of grazing plots in 2014 and 2017

年份 Year	放牧强度 Treatment	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (mg/kg) Total P	速效磷/ (mg/kg) Avail P
2014 年	G0	27.56 ab	1.61 a	341.72 a	3.66 b
	G4	25.98 b	1.49 a	338.41 a	3.74 ab
	G8	27.62 ab	1.64 a	343.73 a	4.38 a
	G12	27.35 ab	1.54 a	327.61 a	3.59 b
	G16	28.75 a	1.64 a	336.32 a	3.41 b
2017 年	G0	27.92 ab	1.63 a	346.26 ab	3.81 b
	G4	26.13 b	1.49 a	330.81 bc	4.01 b
	G8	29.53 a	1.62 a	354.20 a	5.31 a
	G12	28.69 ab	1.55 a	316.59 c	4.16 b
	G16	30.59 a	1.69 a	326.52 bc	3.79 b

注: 同列不同字母表示同一年份不同放牧强度下土壤基础理化性质差异显著 ( $P < 0.05$ )。G0、G4、G8、G12、G16 分别代表对照、轻度放牧、中度放牧、重度放牧和极重度放牧。下同。

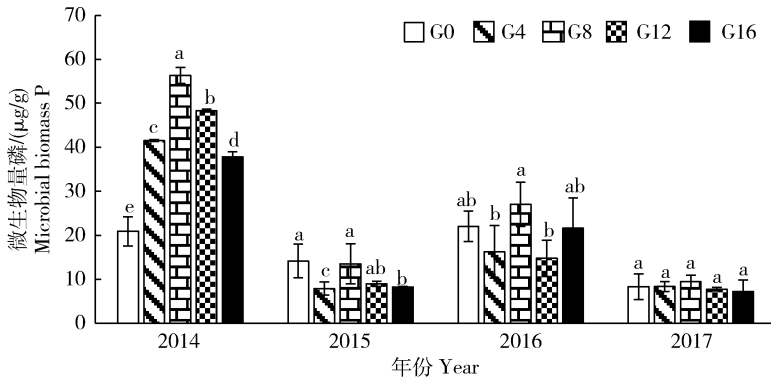
Note: Different letters within same columns indicate significant differences of soil basic physicochemical properties under different grazing intensities in the same year ( $P < 0.05$ ). G0, G4, G8, G12 and G16 represent control, light grazing, medium grazing, heavy grazing and extremely heavy grazing, respectively. The same below.

与2014年相比,连续4年放牧后,放牧效应明显,除全氮外,放牧均增大了土壤有机质、全磷和速效磷含量在不同放牧强度处理之间的差异,尤其是中度放牧(G8)处理变化最大,分别提高了6.93%、3.05%和21.23%,说明中度放牧(G8)有利于提高土壤养分含量。

## 2.2 土壤微生物量磷

放牧对土壤微生物量磷含量的影响如图1所示。不同放牧强度下,土壤微生物量磷含量差异很大,且因年际而异。第一年,不同放牧强度土壤微生物

量磷含量差异最大,均是对照的2~3倍,尤其是G8处理最高达56.35  $\mu\text{g/g}$ ,而G0只有20.90  $\mu\text{g/g}$ ;第二年以后,不同放牧强度土壤微生物量磷含量大幅度降低,相较于第一年平均分别降低了74.21%、50.38%、79.97%,这可能是由于土壤环境骤变,造成土壤微生物量磷快速周转所导致的。但2014—2017年试验期间,土壤微生物量磷含量均在中度放牧强度(G8)下含量最高,且均高于不放牧(G0)处理,说明中度放牧有利于提高土壤微生物量磷含量,长期中度放牧可减缓土壤微生物量磷的损失。



同一年份不同字母表示不同放牧强度下差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Different letters indicate significant differences among different grazing intensities in the same year ( $P < 0.05$ ). The same below.

图1 2014—2017年不同放牧强度对土壤微生物量磷含量的影响

Fig. 1 Effects of grazing intensity on microbial biomass P content from 2014 to 2017

## 2.3 土壤微生物量碳

土壤微生物量碳含量对放牧强度的响应及其年际动态变化特征如图2所示。2014—2017年试验期间,土壤微生物量碳含量为290.55~325.75  $\mu\text{g/g}$ ,平均306.00  $\mu\text{g/g}$ 。试验前3年,不同放牧强度对土

壤微生物量碳含量没有显著影响( $P > 0.05$ ),但在放牧第四年,放牧效应开始显现,土壤微生物量碳含量表现为放牧处理均高于对照不放牧处理(G0),尤其是中度放牧(G8)处理,比G0显著提高25.15% ( $P < 0.05$ )。

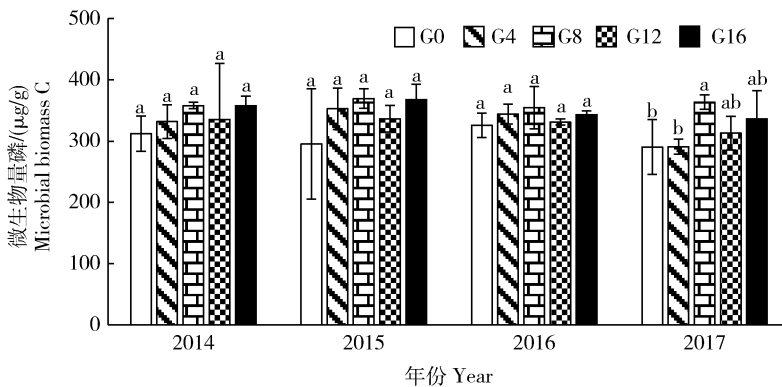


图2 2014—2017年不同放牧强度对土壤微生物量碳含量的影响

Fig. 2 Effects of grazing intensity on microbial biomass C content from 2014 to 2017

### 2.4 土壤微生物量氮

图 3 展示了土壤微生物量氮含量对放牧强度的响应及其年际动态变化特征。2014—2017 年试验期间,土壤微生物量氮含量为 30.12~76.72  $\mu\text{g/g}$ , 平均 55.98  $\mu\text{g/g}$ 。不同放牧强度之间土壤微生物

量氮含量也没有显著性差异( $P>0.05$ ),但与不放牧(G0)处理相比,放牧样地的土壤微生物量氮含量均有所提高。连续 4 年放牧中,土壤微生物量氮含量整体呈现先增加后降低的趋势,与微生物量碳含量变化一致。

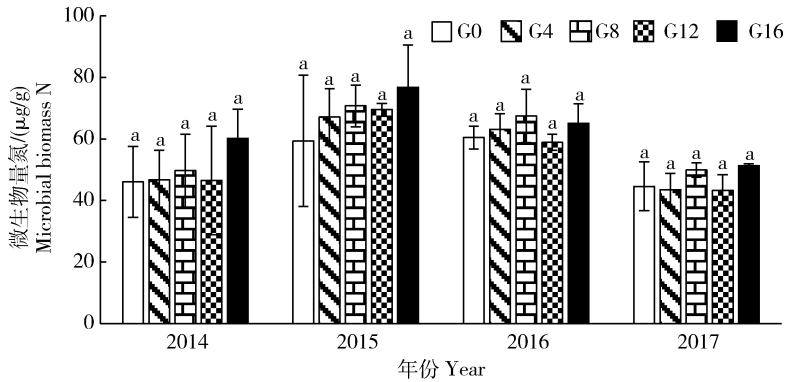


图 3 2014—2017 年不同放牧强度对微生物量氮含量的影响

Fig. 3 Effects of grazing intensity on microbial biomass N content from 2014 to 2017

### 2.5 土壤微生物量碳磷含量比和碳氮含量比

土壤微生物量碳磷含量比值对放牧强度的响应及其年际动态变化特征如图 4 所示。结果发现:不同放牧强度土壤微生物量碳磷含量比值有显著性差异( $P<0.05$ ),比值为 6.36~49.62,这主要是由土壤微生物量磷含量的变化引起的。从第二年开始,不同放牧强度土壤微生物量碳磷含量比值均显著高于对照( $P<0.05$ ),说明放牧可能会加剧土壤磷养分限制的风险,且中度放牧强度(G8)下土壤微生物量碳磷含量比值与不放牧处理(G0)最接近,说明长期中度放牧可维持合理的微生物量碳磷含量比。不同放牧强度土壤微生物量碳氮含量比相对稳定,为

5.06~7.06,平均为 6.11(图 5)。

### 2.6 土壤微生物量与土壤养分之间的关系

由表 2 可知,土壤微生物量碳、氮含量仅与土壤有机质有显著正相关性,相关性系数分别为 0.78 和 0.81( $P<0.05$ )。土壤微生物量磷含量与全磷、速效磷均有显著正相关关系( $r$  分别为 0.82 和 0.83,  $P<0.05$ ),而与土壤氮磷含量比有显著负相关关系( $r=-0.90, P<0.05$ ),说明微生物量磷含量对放牧引起的土壤全磷和速效磷含量的变化有正响应。土壤微生物量磷含量还与土壤含水量有显著负相关关系( $r=-0.79, P<0.05$ ),说明含水量也是影响土壤微生物量磷含量的重要因素之一。

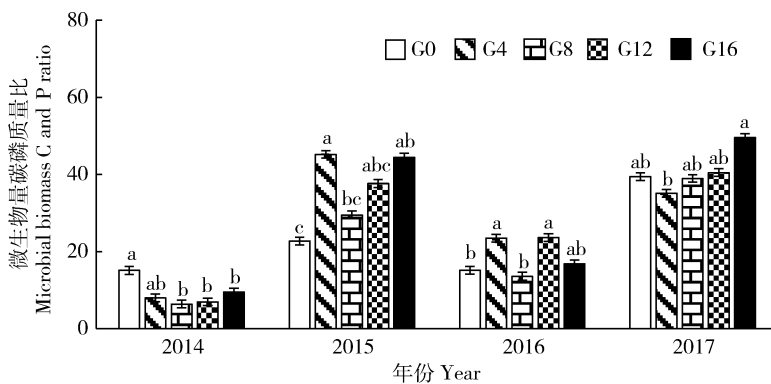


图 4 2014—2017 年不同放牧强度下土壤微生物量碳磷量比值的变化

Fig. 4 Content change of soil microbial biomass C and P ratio in different grazing intensity from 2014 to 2017

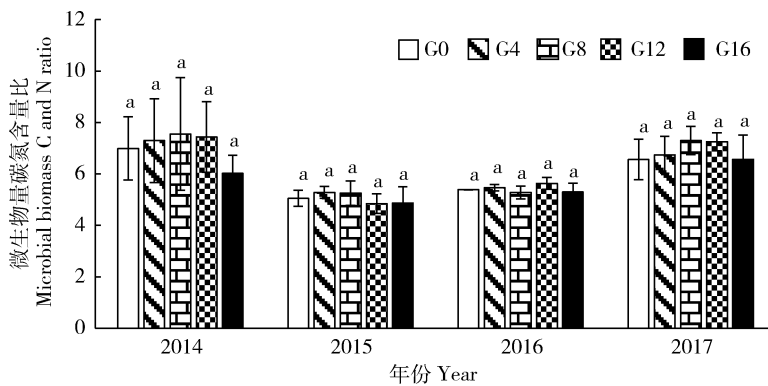


图5 2014—2017年不同放牧强度下土壤微生物量碳氮含量比值变化

Fig. 5 Content change of soil microbial biomass C and N ratio in different grazing intensity from 2014 to 2017

表2 土壤微生物量与土壤养分之间的关系

Table 2 The relationship between the microbial biomass and soil nutrients

变量 Variable	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (mg/kg) Total P	速效磷/ (mg/kg) Avail P	含水量 Water content/%	$m_C/m_N$	$m_C/m_P$	$m_N/m_P$
微生物量碳/ $(\mu\text{g/g})$ Microbial biomass C	0.78 *	0.52	0.33	0.65	0.03	0.67	0.42	0.20
微生物量氮/ $(\mu\text{g/g})$ Microbial biomass N	0.81 *	0.66	0.41	0.48	0.45	0.38	0.40	0.33
微生物量磷/ $(\mu\text{g/g})$ Microbial biomass P	-0.22	-0.20	0.82 *	0.83 *	-0.79 *	-0.11	-0.68	-0.90 *

注: \* 表示变量之间有显著相关性( $P < 0.05$ )。

Note: \* represents that there is significant correlation between variables ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 放牧年限对土壤微生物量的影响

国内外大量研究表明放牧由于牲畜的踩踏、采食及其排泄物等会对土壤养分和微生物量含量产生显著影响<sup>[26-30]</sup>。总体上,当考虑时间尺度时,高强度放牧对土壤肥力有负面的影响,短期内由于加速了养分的循环效率,产生有利的影响,但长期无管理的超载放牧必然造成系统物质资源输入和输出的不平衡,最终导致草原生态系统退化,特别是在相对脆弱的干旱和半干旱生态区。由于已有研究是建立在长期放牧基础之上,而且草地生态系统对外界干扰具有滞后性和弹性<sup>[12]</sup>,对放牧的时间效应还不是很清楚。本研究探究放牧时间效应的结果显示:连续4

年放牧期间,各放牧处理土壤微生物量碳、氮含量的年际变化不显著(表3),说明短期放牧不足以影响该地区生态系统土壤微生物量碳、氮含量,可能需要更长时间尺度来进一步探索土壤微生物量碳、氮含量对放牧的响应;然而,与土壤微生物量碳、氮不同,土壤微生物量磷含量年际变化极显著,且在放牧的第二年各放牧处理均出现骤降(图1)。造成这种差异的原因可能有:1)土壤微生物量同时受营养基质的物理化学组成和土壤理化性质的影响<sup>[31]</sup>,所以造成土壤微生物量碳、氮、磷含量的年际变化趋势不同;2)土壤理化指标的变化不仅与放牧等人为因素有关,还受降雨等气候因素的影响。通过对样地土壤含水量的4年监测(表4),本研究发现,2015年土壤含水量显著高于其他3年。

水分条件好,牧草生物量高,对磷的需求增加,牧草吸磷量增加,土壤有效磷含量降低,微生物量磷含量降低,这可能是造成土壤微生物量磷含量在

第二年骤降的主要原因<sup>[20]</sup>;3)相比于土壤微生物量碳、氮,土壤微生物量磷周转速度更快,对环境变化更敏感<sup>[32]</sup>。

表3 土壤微生物量碳、氮、磷含量对放牧强度和放牧时间的响应

Table 3 Response of soil microbial biomass C, N and P content to grazing intensity and grazing age

变量 Variables	放牧强度 Treatment	放牧年限 Grazing age	放牧强度×放牧年限 Grazing intensity×Grazing age
微生物量碳 Microbial biomass C	$P < 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$
微生物量氮 Microbial biomass N	$P > 0.05$	$P > 0.05$	$P > 0.05$
微生物量磷 Microbial biomass P	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.001$

表4 2014—2017年不同放牧强度下土壤含水量变化

Table 4 Change of soil water content in different grazing intensity from 2014 to 2017 %

放牧强度 Treatment	2014年	2015年	2016年	2017年
G0	5.51 Ca	14.19 Aa	4.21 Dab	8.00 Ba
G4	5.20 Ca	12.98 Ab	4.20 Cab	6.99 Ba
G8	5.46 Ca	12.41 Ab	4.48 Cab	7.59 Ba
G12	5.09 Ca	12.68 Ab	3.93 Cb	6.75 Ba
G16	5.77 Ca	12.70 Ab	4.81 Ca	7.12 Ba

注:不同小写字母表示同一年份不同放牧强度下差异显著;不同大写字母表示同放牧强度下年际差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different grazing intensities in the same year. Different capital letters indicate significant differences in different year under the same grazing intensity ( $P < 0.05$ ).

### 3.2 放牧强度对土壤微生物量的影响

在草地生态系统中,家畜通过采食、践踏及排泄物直接影响土壤,或通过这三者对植被和微生物的作用间接影响土壤,土壤的结构和微生物量的特征则是三者综合作用的结果<sup>[33]</sup>。一般来说,放牧会降低土壤微生物量,马秀枝等<sup>[34]</sup>研究发现内蒙古羊草草原土壤和大针茅草原土壤中的微生物量都因放牧而有不同程度下降;王启兰等<sup>[35]</sup>对青藏高原海北高寒蒿草草甸的研究结果表明土壤微生物量随着放牧强度增加而降低。然而,本研究结果与上述研究并不一致。本研究发现连续放牧4年,仅在中度放牧(G8)的第四年土壤微生物量碳含量显著高于对

照不放牧(G0)处理(图2),其他放牧强度并不影响微生物量碳含量。这一方面是因为牲畜通过踩踏活动促使有机质进入土壤的量增加;另一方面是因为牲畜的排泄物向土壤中输入活性物质,形成有利于微生物生长的环境,从而促进微生物量碳含量增加。不同放牧强度下,土壤微生物量氮含量无显著差异(图3),这与邬嘉华等<sup>[19]</sup>对温带典型草原的研究是一致的,但土壤微生物量氮含量的变化趋势与微生物量碳是一致的。这也从侧面反应了本研究设置的放牧强度尚未对土壤微生物量具有显著的实质性的影响。目前关于放牧强度的标准不统一,也难以定量,最终导致放牧对土壤影响的研究结果不尽相同。

土壤微生物量磷含量在放牧前3年均随放牧强度的增加先增加后降低,在中度放牧强度(G8)下达到最高值(图1),说明影响土壤微生物量磷含量和微生物量碳、氮含量的因素并不一致。土壤微生物量同时受营养基质的物理化学组成和土壤理化性质的影响,土壤微生物量碳、氮含量更易受土壤有机质含量和组成影响,土壤微生物量磷含量更易受环境条件变化、土壤养分尤其是磷素含量的影响。本研究证实了不同放牧强度下土壤微生物量磷含量的变化趋势与速效磷含量变化趋势一致,均是先随放牧强度的增加先增加,在G8处理达到最大值,而后降低。在适度放牧下,牲畜的频繁采食使磷从系统中的输出增加,引起土壤中全磷的各组分向速效磷成分转移量增大,磷对有随着放牧强度继续加强,造成土壤磷素养分的输出量持续增加,而地上部分归还量降低,加速了土壤磷素的失调,导致土壤微生物量磷含量降低。虽然土壤微生物量碳、氮、磷含量随放牧强度变化不一致,但均在中度放牧强度(G8)下达到最大值,研究结果符合“中度干扰假说”<sup>[12]</sup>,即适度放牧有利于土壤微生物量的增加。适度放牧增加了物种丰富度,加快了物质和能量流动,使微生物繁殖加快,加之放牧牲畜排泄物的影响,均使土壤养分增加,故有利于微生物的生长繁殖;而过度放牧对植被和微生物都产生了胁迫,导致微生物死亡,微生物量下降。

本研究中,土壤微生物量碳、氮、磷含量比值(25/4/1)低于全球均值(46/6/1)<sup>[36]</sup>,暗示该区域可能受氮磷养分的限制。已有研究结果表明土壤微生物量碳、氮和磷之间的化学计量比是一个相对稳定的值<sup>[36-37]</sup>。本研究结果显示土壤微生物量碳氮含量比值保持相对稳定(图5),但土壤微生物量碳磷含量比值随放牧波动较大(6.36~49.62),且土壤微生物量碳磷含量比值在不同放牧强度下均显著高于对照值,说明放牧可能会加剧该地区土壤磷养分限制的风险。不放牧处理中的植物残体会自然返还到原系统中,但放牧处理中,随着动物的不断摄取,地上部植物生物量被移出了土壤系统,长期下来,必须造成相对多的磷损失,从而加剧了放牧样地土壤磷缺失的风险。土壤微生物量碳磷含量比值在中度放牧强度(G8)下与对照保持一致,表明适度放牧可维持合理的微生物量碳磷含量比值。本研究中,4年连续放牧(每年只在6月—10月份放牧)还不足以对土壤微生物量造成显著影响,随着时间延长,影响可

能会逐渐显著,有待于进行深入的研究。

## 4 结 论

内蒙古典型草原土壤微生物量碳、氮、磷含量对放牧年限和放牧强度的响应存在差异。4年短期放牧对土壤微生物量碳、氮含量没有显著影响( $P > 0.05$ ),而对土壤微生物量磷含量则有显著影响,随放牧年限延长,土壤微生物量磷含量降低。年际之间气候变化,尤其是降雨量对土壤微生物量磷含量的影响不可忽视。连续4年放牧,不同放牧强度下,土壤微生物量碳、氮、磷含量均在中度放牧(G8)处理下达到最大值,且均高于对照不放牧处理(G0);同时,土壤微生物量碳氮含量比值一直保持相对稳定,微生物量碳磷含量比值在中度放牧强度(G8)下与对照保持一致,说明中度放牧强度(G8)可能最适宜微生物生存,可提高土壤微生物量,维持合理的微生物量碳氮磷含量比值。但4年连续放牧还不足以对土壤微生物量造成显著影响,随着时间延长,影响可能会逐渐显现,有待深入研究。

## 参考文献 References

- [1] 杨弦, 郭焱培, 安尼瓦尔·买买提, 刘鸿雁, 马文红, 于顺利, 唐志尧. 中国北方温带灌丛生物量的分布及其与环境的关系[J]. 植物生态学报, 2017, 41(1): 22-30  
Yang X, Guo Y P, Anwar M, Liu H Y, Ma W H, Yu S L, Tang Z Y. Distribution of biomass in relation to environments in shrublands of temperate China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(1): 22-30 (in Chinese)
- [2] 宝力道, 徐文芳, 王忠武, 王静, 韩国栋. 不同放牧强度短花针茅荒漠草原碳截存研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2012, 33(3): 94-99  
Bao L D, Xu W F, Wang Z W, Wang J, Han G D. Carbon sequestration of *Stipa breviflora* desert steppe under different grazing intensities[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2012, 33(3): 94-99 (in Chinese)
- [3] McNaughton S J. Compensatory plant growth as a response to herbivory [C]. *Herbivore-Plant Interactions at Northern Latitudes*, Kevo: Nordic Society Oikos, 1983, 40(3): 329-336
- [4] 郭剑, 陈实, 徐斌, 申格, 金云翔, 张玉静, 杨秀春. 基于SPOT-VGT数据的锡林郭勒盟草原返青期遥感监测[J]. 地理研究, 2017, 36(1): 37-48  
Guo J, Chen S, Xu B, Shen G, Jin Y X, Zhang Y J, Yang X C. Remote sensing monitoring of grassland vegetation greenup based on SPOT-VGT in Xilingol League[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(1): 37-48 (in Chinese)



- [5] 张珺, 任鸿瑞. 人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1125-1133  
Zhang J, Ren H R. Effects of human activities on net primary productivity in the Xilingol grassland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7): 1125-1133 (in Chinese)
- [6] 迟登凯, 王宏, 李晓兵, 许凯凯, 喻峰. 锡林郭勒盟不同类型植被的生长季变化[J]. 草业科学, 2016, 33(9): 1825-1834  
Chi K D, Wang H, Li X B, Xu K K, Yu F. The variability of growing season of different vegetation types in Xilingol League [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(9): 1825-1834 (in Chinese)
- [7] Mårtensson L M, Olsson P A. Reductions in microbial biomass along disturbance gradients in a semi-natural grassland [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 62(6): 8-13
- [8] 彭晓茜, 王妮. 内蒙古温带草原土壤微生物生物量碳的空间分布及驱动因素[J]. 微生物学通报, 2016, 43(9): 1918-1930  
Peng X Q, Wang W. Spatial pattern of soil microbial biomass carbon and its driver in temperate grasslands of Inner Mongolia [J]. *Microbiology*, 2016, 43(9): 1918-1930 (in Chinese)
- [9] Leff J W, Jones S E, Prober S M. Consistent responses of soil microbial communities to elevated nutrient inputs in grasslands across the globe[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(35): 10967-10972
- [10] Hobbie, Sarah E. Plant species effects on nutrient cycling; Revisiting litter feedbacks [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2015, 30(6): 357-363
- [11] 高雪峰, 韩国栋, 张功, 赵萌莉, 卢萍. 荒漠草原不同放牧强度下土壤酶活性及养分含量的动态研究[J]. 草业科学, 2007, 24(2): 10-13  
Gao X F, Han G D, Zhang G, Zhao M L, Lu P. Study on dynamics of soil enzyme activity and nutrient of desert steppe under different grazing intensities[J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(2): 10-13 (in Chinese)
- [12] 刘佳慧, 张韬. 放牧扰动对锡林郭勒典型草原植被特征及土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2016-2023  
Liu J H, Zhang T. Response of plant characteristics and soil nutrients on grazing disturbance in typical grassland in Xilin Gol[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, 26(12): 2016-2023 (in Chinese)
- [13] McNaughton S J. Promotion of the cycling of diet-enhancing nutrients by African grazers[J]. *Science*, 1997, 278(5344): 1798-1800
- [14] 王亚婷, 王玺, 赵天启, 贾丽欣, 杨阳, 乔芙蓉, 张峰, 赵萌莉. 不同放牧强度上内蒙古短花针茅草原植物功能群水分和氮素利用效率相关分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 964-970  
Wang Y T, Wang X, Zhao T Q, Jia L X, Yang Y, Qiao Q R, Zhang F, Zhao M L. Integration of water and nitrogen use efficiency of plant function groups in the *Stipa breviflora* grassland of Inner Mongolia along grazing gradients [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, 26(6): 964-970 (in Chinese)
- [15] 孙海燕, 万书波, 李林, 刘登望. 放牧对荒漠草原土壤养分及微生物量的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 82-88, 93  
Sun H Y, Wan S B, Li L, Liu D W. Effects of grazing on soil nutrients and microbial biomass in desert steppe[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 82-88, 93 (in Chinese)
- [16] 宋俊峰, 韩国栋, 张功, 武春燕. 放牧强度对草甸草原土壤微生物数量和微生物生物量的影响[J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2008, 37(2): 237-240  
Song J F, Han G D, Zhang G, Wu C Y. The effects of grazing intensity on soil microorganisms and soil microbial biomass in meadow steppe [J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition*, 2008, 37(2): 237-240 (in Chinese)
- [17] 杨青, 何贵永, 孙浩智, 杜国祯. 青藏高原高寒草甸土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(4): 6-11  
Yang Q, He G Y, Sun Z H, Du G Z. The response of soil physico-chemical property and microbial biomass to grazing on Tibetan Plateau [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(4): 6-11 (in Chinese)
- [18] 赵吉. 不同放牧率对冷蒿小禾草草原土壤微生物数量和生物量的影响[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 223-227  
Zhao J. Effects of different grazing rates on soil microbial quantity and biomass of *Artemisia frigida* grass grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1999, 7(3): 223-227 (in Chinese)
- [19] 邱嘉华, 王立新, 张景慧, 卓义, 武胜男, 王凤歌, 徐智超, 祁瑜, 温璐. 温带典型草原土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 45-53  
Wu J H, Wang L X, Zhang J H, Zhuo Y, Wu S N, Wang F G, Xu Z C, Qi Y, Wen L. Response of soil properties and microbial biomass to different grazing intensities in temperate typical steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(4): 45-53 (in Chinese)
- [20] 陈昊. 水分状况对内蒙古典型草原土壤微生物量及群落结构的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018  
Chen H. Impact of water status on soil microbial biomass and community structure of typical grassland of Inner Mongolia [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [21] Schmutge T J, Jackson T J, Mckim H L. Survey of methods for soil moisture determination[J]. *Water Resources Research*, 1979, 16(6): 961-979
- [22] Mebius L J. A rapid method for the determination of organic carbon in soil[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1960, 22(1): 120-124
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)

- [24] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707
- [25] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006  
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y. *Method and Application of Soil Microbial Biomass Measurement* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)
- [26] Smith S W, Vandenberghe C, Hastings A, Johnson D, Pakeman R J, van der Wal R, Woodin S J. Optimizing carbon storage within a spatially heterogeneous upland grassland through sheep grazing management[J]. *Ecosystems*, 2014, 17(3): 418-429
- [27] Duchardt C J, Miller J R, Debinski D M, Engle D M. Adapting the fire-grazing interaction to small pastures in a fragmented landscape for grassland bird conservation [J]. *Rangeland Ecology and Management*, 2016, 69(4): 300-309
- [28] Mamadou O, Motte L G, De Ligne A, Heinesch B, Aubinet C. Sensitivity of the annual net ecosystem exchange to the cospectral model used for high frequency loss corrections at a grazed grassland site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 228-229: 360-369
- [29] Kurtz D B, Asch F, Giese M, Hülsebusch C, Goldfarb M C, Casco J F. High impact grazing as a management tool to optimize biomass growth in northern Argentinean grassland [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 63: 100-109
- [30] 杨阳, 贾丽欣, 乔莽塔, 李梦然, 张峰, 陈大岭, 张昊, 赵萌莉. 重度放牧对荒漠草原土壤养分及微生物多样性的影响[J]. 中国草地学报, 2019(4): 72-79  
Yang Y, Jia L X, Qiao J R, Li M R, Zhang F, Chen D L, Zhang H, Zhao M L. Effects of heavy grazing on soil nutrients and microbial diversity in desert steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019(4): 72-79 (in Chinese)
- [31] 李香真, 陈佐忠. 不同放牧率对草原植物与土壤 C、N、P 含量的影响[J]. 草地学报, 1998, 6(2): 90-98  
Li X Z, Chen Z Z. Influences of stocking rates on C, N, P contents in plant-soil system[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1998, 6(2): 90-98 (in Chinese)
- [32] Kouno K, Wu J, Brookes P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 617-622
- [33] 曹淑宝, 刘全伟, 王立群, 王浩然, 王婧瑶. 短期放牧对草甸草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报, 2012, 39(6): 741-748  
Cao S B, Liu Q W, Wang L Q, Wang H R, Wang J Y. Effect of short-term grazing on soil microorganisms and soil enzyme activities in meadow steppe[J]. *Microbiology*, 2012, 39(6): 741-748 (in Chinese)
- [34] 马秀枝, 王艳芬, 汪诗平, 王金枝, 李长生. 放牧对内蒙古锡林河流域草原土壤碳组分的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 569-576  
Ma X Z, Wang Y F, Wang S P, Wang J Z, Li C S. Impacts of grazing on soil carbon fractions in the grasslands of Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4): 569-576 (in Chinese)
- [35] 王启兰, 王长庭, 杜岩功, 曹广民. 放牧对高寒嵩草草甸土壤微生物量碳的影响及其与土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 39-46  
Wang Q L, Wang C T, Du Y G, Cao G M. Grazing impact on soil microbial biomass carbon and relationships with soil environment in alpine Kobresia meadow [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 39-46 (in Chinese)
- [36] Xu X, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749
- [37] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252

责任编辑: 杨爱东