

# 不同放牧干扰对滇西北高原泥炭沼泽土壤生态化学计量特征的影响

方 昕<sup>1,2</sup>, 郭雪莲<sup>1,2</sup>, 郑荣波<sup>3</sup>, 付 倩<sup>1,2</sup>

(1.西南林业大学 湿地学院, 昆明 650224; 2.西南林业大学

国家高原湿地研究中心, 昆明 650224; 3.西南林业大学 化学工程学院, 昆明 650224)

**摘 要:**为了阐明放牧过程对泥炭沼泽土壤化学计量特征的影响及机制,为放牧对湿地生态系统干扰及泥炭沼泽养分循环研究提供理论基础。以滇西北高原泥炭沼泽为研究对象,分析了土壤含水率、pH 值、总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )及土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量特征,从而研究了放牧过程中藏猪翻拱(ZG)和牦牛践踏(JT)对泥炭沼泽土壤化学计量特征的影响。结果表明:放牧降低了土壤含水率、pH 值、TN、TOC 含量,增加了 TP 含量;ZG 显著增加了  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量。放牧降低了土壤养分化学计量,其中 ZG 和 JT 的 C/P 存在显著差异( $p < 0.05$ );放牧降低了微生物生物量碳氮比(MBC/MBN)及微生物生物量碳磷比(MBC/MBP),却提高了微生物生物量氮磷比(MBN/MBP),其中 ZG 对微生物生态化学计量的影响显著高于 JT;放牧增加了生态酶化学计量。冗余分析显示 TP、含水率、容重、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TOC 是主要影响化学计量的环境因子。MBC/MBN、MBN/MBP 均与对应的生态酶化学计量呈正相关,然而 MBC/MBP 呈相反趋势。C/N、C/P 均与对应的生态酶化学计量呈正相关,然而 N/P 与对应的生态酶活性呈负相关。土壤养分化学计量变化影响了微生物生态化学计量以及生态酶化学计量。

**关键词:**放牧干扰;土壤养分化学计量;生态酶化学计量;泥炭沼泽

中图分类号:S152; S153; S154.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0009-06

## Effect of Difference Grazing Distributions on Soil Ecological Stoichiometric Characteristics in Peatland of Northwest Yunnan Plateau

FANG Xin<sup>1,2</sup>, GUO Xuelian<sup>1,2</sup>, ZHENG Rongbo<sup>3</sup>, FU Qian<sup>1,2</sup>

(1.College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2.National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

3.College of Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** In order to clarify the influence and mechanism of grazing process on the stoichiometric characteristics of peat swamp soil, provide theoretical basis for the research on disturbance of grazing to wetland ecosystem and nutrient cycling of peatland, a typical peatland was selected to study the effect of pig arching (ZG) and yak trampling (JT) on soil ecological stoichiometric characteristics in northwestern Yunnan plateau, and the contents of moisture, pH value, soil total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonium ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) and soil ecological stoichiometric characteristics were investigated. The results showed that livestock grazing reduced soil moisture, pH value, TN, TOC, but increased TP, the soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  was increased by ZG, grazing reduced soil nutrient stoichiometry, and there was a significant difference in C/P between JT and ZG ( $p < 0.05$ ); grazing decreased MBC/MBN and MBC/MBP, but increased MBN/MBP; ZG had stronger effects on microbial ecological stoichiometry than JT; grazing increased soil ecoenzyme stoichiometry. Redundancy analysis showed that TP, moisture, bulk density,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TOC were primary environmental factors affecting soil ecological stoichiometry. The MBC/MBN

收稿日期:2019-04-09

修回日期:2019-06-14

资助项目:国家自然科学基金(41563008);云南省高原湿地科学创新团队(2012HC007)

第一作者:方昕(1994—),男,四川西昌人,硕士研究生,研究方向为湿地土壤微生物。E-mail:xcfangxin@163.com

通信作者:郭雪莲(1979—),女,吉林通榆人,副教授,硕士生导师,主要从事湿地生态学和生物地球化学研究。E-mail:guoxuelian2009@hotmail.com

and MBN/MBP were positively related to the ecological enzyme stoichiometry, while the MBC/MBP showed the opposite trend. N/P was negatively correlated with the ecological enzyme activity, the soil C/N and C/P were positively correlated with ecoenzyme stoichiometry. The changes of soil nutrient stoichiometry affected microbial ecological stoichiometry and ecoenzyme stoichiometry.

**Keywords:**grazing; soil nutrient stoichiometry; ecoenzymatic stoichiometry; peatland

土壤微生物作为土壤有机质分解和养分循环的主要参与者,与土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素循环过程密切相关<sup>[1]</sup>。微生物作为自然界主要分解者,其功能会随底物化学计量特征的变化而改变,从而影响底物分解速度以及元素周转速率,进而影响生态系统的功能过程<sup>[2]</sup>。土壤酶作为微生物分泌的主要物质,影响 C,N,P 等元素的循环<sup>[3]</sup>,其中与 C,N,P 密切相关的酶主要是  $\beta$ -葡萄糖苷酶( $\beta$ -1, 4-glucosidase,  $\beta$ G)、N-乙酰- $\beta$ -氨基葡萄糖苷酶( $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase, NAG)和酸性(碱性)磷酸酶[acid (alkaline)phosphatase, AP]<sup>[4]</sup>。

生态化学计量学作为研究多重化学元素平衡的科学,广泛用于生态系统养分平衡研究<sup>[5]</sup>。不同酶活性之间的比值如  $\beta$ G/NAG,  $\beta$ G/AP 和 NAG/AP 常与 C/N,C/P 以及 N/P 相联系,并用来评价微生物生物量 C,N,P 养分资源需求状况,Sinsabaugh 等<sup>[6]</sup>据此提出生态酶化学计量,即全球范围内生态酶活性比值与土壤微生物生物量、生物地球化学平衡相关。此外 Xu 等<sup>[7]</sup>发现土壤化学计量和生态酶化学计量存在动态平衡关系。然而将土壤养分化学计量、微生物生态化学计量、生态酶化学计量结合研究土壤化学计量特征鲜见报道。

滇西北是云南高原湿地的集中分布区,地处少数民族聚集的农牧交错带,当地对湿地资源利用的主要途径是放牧。位于滇西北核心的纳帕海湿地是我国低纬度高海拔的独特类型以及泥炭沼泽重要分布地区<sup>[8]</sup>,也是我国湿地受放牧干扰最为典型和严重区域,其中放牧方式为牦牛放牧和藏香猪放养<sup>[9]</sup>。泥炭沼泽作为碳循环的重要组成部分,其储存的碳约占陆地土壤碳库的 1/3<sup>[10]</sup>。放牧过程中牲畜采食、践踏、

排泄物返还等影响泥炭沼泽土壤理化性质和养分转化过程,改变其生态化学计量特征。然而关于放牧对泥炭沼泽土壤生态化学计量特征的影响及机制尚不清楚。本研究选取纳帕海泥炭沼泽为研究区,对比研究不同放牧干扰(牦牛放牧和藏香猪放养)对泥炭沼泽土壤养分化学计量、微生物生态化学计量及生态酶化学计量的影响,阐明放牧过程对泥炭沼泽土壤化学计量特征的影响及机制,为放牧对湿地生态系统干扰及泥炭沼泽养分循环研究提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

纳帕海湿地位于横断山脉中段云南省迪庆藏族自治州香格里拉市(99°37'—99°43'E, 27°49'—27°55'N),平均海拔 3 260 m,是低纬度、高海拔的高原湖泊湿地,其水量补给主要依靠降雨、冰雪融水和河流及地下水,纳帕海湿地气候具有高寒、年均温低、干湿季节分明等特点。土壤类型主要以沼泽土、泥炭沼泽及沼泽化草甸土壤为主<sup>[11]</sup>。

### 1.2 样地设置与采样

2018 年 4 月于云南省纳帕海国际重要湿地哈木谷村附近选取泥炭沼泽作为研究区,根据野外调查设置对照、藏香猪放养、牦牛放牧样地。样地大小为 10 m×10 m,样地特征描述见表 1。沿样地对角线选取 3 个 1 m×1 m 的小样方,并沿每个样方对角线选取 5~7 个点,取 0—10 cm 土样,每个样方内所有土样混合成一个样品。将土样放入冰盒后用液氮冷冻保存并立即带到实验室。一部分土样放在 4℃ 冰箱用于土壤酶活性、土壤微生物生物量 C,N,P 测定,一部分土样风干用于土壤理化性质测定。

表 1 样地特征描述

样地类型	土壤特征	植被群落特征
牦牛践踏样地	有践踏痕迹,土壤紧实,无明显破坏	植物盖度不足 10%,植物群落低矮
藏香猪放养样地	土壤有翻拱痕迹,土壤疏松,	植物盖度不足 10%,大量植物根系裸露枯死
对照样地	无破坏痕迹	植被高度在 20~30 cm,群落密度高,盖度在 80%左右

### 1.3 土壤理化性质分析

土壤含水率采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤 pH 值采用酸度计(Ohaus STARTER

3100, American, 西南林业大学大型仪器设备共享平台)测定,土壤 TN, TP 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮测

定<sup>[12]</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用1 mol/L KCL提取用连续流动分析仪(Seal AA3,Norderstedt,Germany,西南林业大学大型仪器设备共享平台)测定<sup>[13]</sup>。TOC用总有机碳分析仪(Elementar,Germany,西南林业大学大型仪器设备共享平台)测定。

1.4 土壤微生物生物量碳氮磷以及土壤酶活性测定

土壤微生物生物量C,N,P均采用氯仿熏蒸法进行测定,其中MBC,MBN用0.5 mol/L的K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取,MBP用0.5 mol/L的NaHCO<sub>3</sub>提取<sup>[14-16]</sup>。土壤βG,NAG以及AP采用比色法测定<sup>[17]</sup>

1.5 数据处理

使用SPSS 23单因素方差分析检验分析土壤理化性质、土壤养分及微生物生态化学计量特征及土壤生态酶化学计量在0.05显著性水平上的差异。使用

Canoco 4.5 分析土壤理化性质、土壤养分化学计量、土壤微生物生态化学计量特征及土壤生态酶化学计量之间的关系。采用Origin 2017 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同放牧干扰对泥炭沼泽土壤理化性质影响

放牧干扰在不同程度上影响泥炭沼泽土壤理化性质(表2)。JT的容重显著高于CK( $p<0.05$ ),而ZG容重低于CK。放牧样地含水率均低于CK( $p<0.05$ )。所有样地pH值 $<7$ ,呈酸性,放牧导致土壤pH值增加。土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N均表现为ZG>CK>JT。放牧降低了土壤TN,增加了土壤TP。JT显著降低了土壤TOC( $p<0.01$ ),而ZG对土壤TOC影响不显著( $p>0.05$ )。

表2 不同放牧干扰对泥炭沼泽土壤理化性质的影响

样地	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %	pH 值	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TP/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )
JT	0.78±0.19a	52.67±7.76a	5.63±0.14c	5.30±1.36b	2.84±2.59c	4.09±0.53b	4.27±1.64a	176.75±28.87b
ZG	0.39±0.13b	53.67±13.67a	6.19±0.14b	10.39±1.61a	41.34±7.20a	6.58±0.36a	4.72±0.55a	294.41±28.21a
CK	0.41±0.02b	69.77±1.34a	6.45±0.12a	9.80±2.14a	6.70±2.94b	6.66±1.01a	3.28±1.55a	300.19±20.09a

注:表中数值均为均值±标准差(n=3),同列内含不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.2 不同放牧干扰对泥炭沼泽土壤生态化学计量特征

2.2.1 对泥炭沼泽土壤养分化学计量特征的影响

放牧对泥炭沼泽土壤化学计量特征的影响如图1所示。土壤C/N,C/P和N/P均表现为CK>ZG>JT,三者的C/N和N/P均呈现CK高于JT和ZG,但差异不显著,CK土壤的C/P是JT的2.21倍,是ZG的1.48倍( $p<0.05$ )。C/P在ZG和JT存在显著差异( $p<0.05$ )。

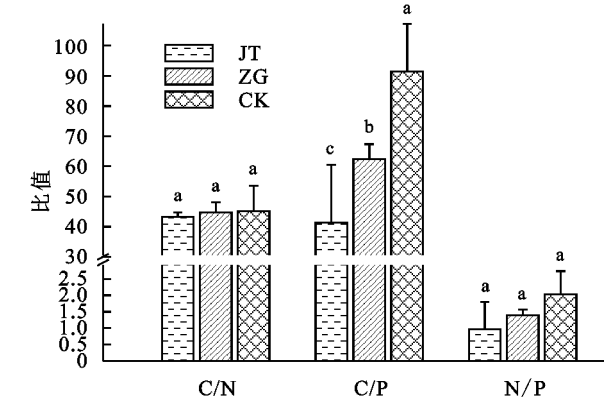


图1 不同放牧干扰下泥炭沼泽土壤养分化学计量特征

2.2.2 对泥炭沼泽土壤微生物生态化学计量特征的影响

放牧影响下泥炭沼泽土壤MBC/MBN表现为CK>JT>ZG( $p<0.05$ )(图2)。MBC/MBP表现为JT>CK>ZG( $p>0.05$ ),MBN/MBP表现为ZG>JT>CK( $p>0.05$ )。

2.2.3 对泥炭沼泽土壤生态酶化学计量特征的影响

生态酶化学计量特征均呈现放牧高于CK的趋势(图

3)。放牧影响下泥炭沼泽土壤βG/NAG差异不显著,但βG/AP和NAG/AP均表现出显著差异( $p<0.05$ )。βG/AP和NAG/AP均表现为ZG>JT>CK,其中βG/AP表现为ZG是CK的2.21倍,JT是CK的1.72倍。NAG/AP表现为ZG是CK的1.71倍,JT是CK的1.28倍。

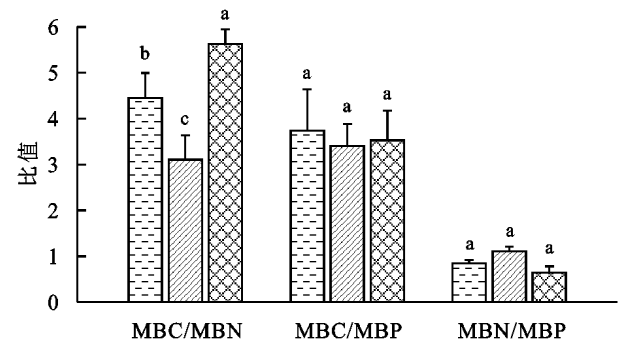


图2 不同放牧干扰下土壤微生物生态化学计量特征

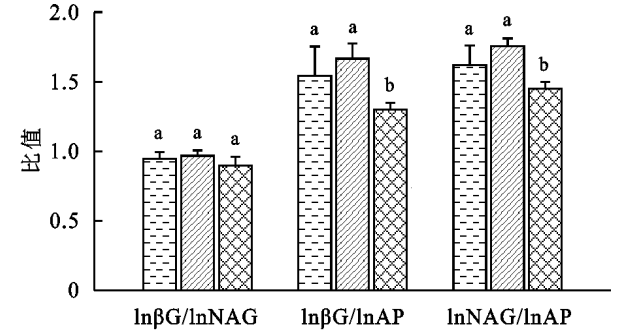


图3 不同放牧干扰下泥炭沼泽土壤生态酶化学计量特征

### 2.3 放牧干扰下泥炭沼泽土壤理化性质与化学计量特征的关系

放牧干扰下泥炭沼泽土壤理化性质与化学计量特征的关系见图 4。第一主轴和第二主轴累计解释量达到 86.90%。其中 TP、含水率、容重、pH 值、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC 等环境因子是影响土壤化学计量特征的主要环境因子( $p<0.05$ )。

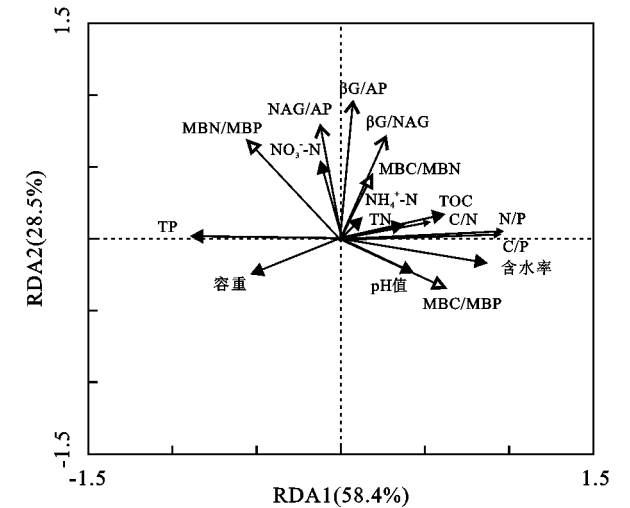


图 4 泥炭沼泽土壤理化性质与生态化学计量关系以及生态化学计量之间关系

各环境因子解释度见表 3。其中 TP、含水率、容重、pH 值、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC 解释变异信息的量分别为 26.4%、20.70%、14.09%、11.07%、9.05%、4.01%。

表 3 环境因子解释量以及 p 值		
环境因子	环境因子解释量/%	p
TP	26.40	0.002
含水率	20.70	0.004
容重	14.09	0.010
pH 值	11.07	0.016
$\text{NO}_3^-$ -N	9.05	0.020
TOC	4.01	0.041

土壤养分化学计量与 TOC、TN、含水率、pH 值呈正相关,与其他理化性质呈负相关。

土壤 MBC/MBN 与 TN、含水率、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC、 $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关,与容重、TP、pH 值呈负相关。土壤 MBC/MBP 与 pH 值、含水率、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC、 $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关,与其他理化性质呈负相关。土壤 MBN/MBP 与 TP、容重、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关,与其他理化性质呈负相关。

土壤  $\beta\text{G}/\text{NAG}$  与 TN、含水率、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC、 $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关,与容重、TP、pH 值呈负相关。土壤  $\beta\text{G}/\text{AP}$  与 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC、 $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关,与其他理化性质呈负相关。土壤  $\text{NAG}/\text{AP}$  与 TN、

TP、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC、 $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关,与其他理化性质呈负相关。土壤 MBC/MBN、MBN/MBP 均与对应的生态酶化学计量呈正相关,然而 MBC/MBP 呈相反趋势。除 N/P 与对应的生态酶活性呈负相关以外,土壤 C/N、C/P 均与对应的生态酶化学计量呈正相关。土壤 MBC/MBP、MBC/MBN 与 C/P、C/N 均呈正相关,然而 MBN/MBP 与 N/P 呈负相关。

## 3 讨论

### 3.1 不同放牧干扰对泥炭沼泽土壤理化性质的影响分析

放牧过程中藏猪翻拱及牦牛践踏均降低土壤含水率,牦牛践踏提高了土壤容重,然而藏猪翻拱降低了土壤容重,这与姚茜等<sup>[11]</sup>研究结果一致。放牧过程中,藏猪翻拱使土壤疏松,增加了土壤孔隙度以及通透性,从而促进土壤与空气接触,降低了土壤含水率以及容重<sup>[18]</sup>。践踏使土壤容重增加,降低了土壤保水和持水能力。放牧降低了土壤 TOC 主要是由于放牧降低了土壤 TOC 重要来源——地上生物量以及凋落物<sup>[19]</sup>。

本研究发现放牧活动使土壤 pH 值降低,湿地生态系统不同于其他生态系统,易受氧化还原反应的影响因而导致土壤 pH 值的变化<sup>[20]</sup>。此外植物也是影响土壤 pH 值的重要因素。

放牧活动降低了土壤 TN,这与放牧降低地上生物量,减少 N 向土壤的归还还有密切关系<sup>[21]</sup>。ZG 增加了土壤  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N,然而 JT 却呈现降低的趋势。土壤  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 主要来源于有机物质矿化分解<sup>[22]</sup>,JT 增加土壤紧实度和容重,使得土壤有机质矿化作用减弱, $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量降低,而 ZG 具有相反功能<sup>[18]</sup>。

放牧提高了土壤 TP 含量,这可能由于放牧过程中排泄物归还等活动促进了土壤 P 的固定,从而提高了土壤 P 的含量。

### 3.2 不同放牧干扰对土壤化学计量的影响分析

放牧通过畜体的采食、践踏和排泄物归还对土壤养分化学计量产生影响。与全国高寒高原地区土壤养分化学计量 C/N(13.6)、C/P(62)、N/P(5.9)相比<sup>[23]</sup>,本区域 C/N 均显著高于全国高寒高原平均(13.6),张仲胜等<sup>[24]</sup>研究全国湿地 C、N、P 化学计量发现泥炭地沼泽中营养元素 N、P 的供应更为匮乏,土壤中的物质循环过程表现出 C 富余而 N、P 不足,因此泥炭沼泽土壤 C/N 显著高于全国高寒高原平



均。而放牧降低了 C/N 及地上生物量,从而使进入土壤的养分减少有关,而源于植物残体(凋落物和根系分泌物)的有机质输入是土壤 C 和 N 的主要来源<sup>[19]</sup>。放牧降低了 C/P 也与牲畜啃食导致生物归还减少有关,此外 JT 和 ZG 的 C/P 存在显著差异,这可能由于不同放牧方式对凋落物的影响程度不同所导致。CK 的 C/P 高于全国高寒高原地区说明该区域主要受 P 的限制,此外研究区域所有土壤 N/P 均低于全国高寒高原平均,说明该区域土壤缺乏 N, N 是主要限制因素,这与 Han 等<sup>[25]</sup>研究青藏高原高寒草甸得出高原高寒草甸土壤主要受 N、P 限制一致。

在本研究中放牧干扰 MBC/MBN 均在 3~5, 然而 CK 大于 5。Paul<sup>[26]</sup>研究发现真菌的 MBC/MBN 为 4~15, 而细菌的 MBC/MBN 为 3~5, 土壤 MBC/MBP 在一定程度上反映了土壤中真菌和细菌的比例, 因此, 放牧改变了泥炭沼泽土壤微生物区系。JT 和 ZG 的微生物生态化学计量特征之间有一定差别, 这可能与两者容重、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC 差异有一定关系, 此外不同排泄物输入也可以影响微生物。本研究中 MBC/MBP 低于赵先丽等<sup>[27]</sup>提出的 MBC/MBP 一般变化值(7.0~30.0)。其值低可能由于土壤性质的差异, 即酸性土壤或有效磷较高土壤中微生物体内均有较多的 P, 具有较大释放 P 的潜力<sup>[27]</sup>, 此外温度等因素影响土壤微生物生物量磷的数量<sup>[28]</sup>。而放牧与对照 MBC/MBP 无显著差异, 这与水分、pH 值以及放牧过程中排泄物返还有一定关系。放牧 MBN/MBP 高于对照, 这可能由于放牧过程中排泄物输入补充了 N, 促进微生物生长。

土壤生态酶化学计量反映了微生物生物量和土壤有机质之间的平衡以及微生物营养吸收和生长效率<sup>[6]</sup>。在本研究中, 放牧的生态酶活性  $\beta\text{G}/\text{AP}$ ,  $\text{NAG}/\text{AP}$  均高于对照, 说明对照受 P 限制, 这与本研究中对照土壤 TP 均低于放牧干扰一致。ZG 和 JT 的  $\beta\text{G}/\text{AP}$ ,  $\text{NAG}/\text{AP}$  也存在一定差异, 这可能与猪翻拱土壤增强土壤透气性, 刺激微生物分泌参与 C, N, P 循环相关的土壤酶有关, 这与隋鹏祥等<sup>[29]</sup>研究翻耕对土壤酶活性研究结果一致。

冗余分析显示含水率、TP、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC 是影响土壤生态化学计量的主要环境因子(图 5)。土壤水分对土壤生态化学计量影响主要表现在两个方面: 一方面土壤水分影响土壤 C、N、P 循环, 从而影响土壤化学计量, 另一方面一定范围内土壤含水量增加, 直接影响酶促作用和土壤生物化学反应强度, 从而增加土壤酶

活性, 进而影响土壤生态酶化学计量<sup>[6]</sup>。P 是限制生态系统初级生产力的重要元素<sup>[30]</sup>, 从而影响生态化学计量。 $\text{NO}_3^-$ -N 作为植物、土壤微生物可利用氮的一部分养分, 其变化影响了植物、微生物的生长, 从而影响化学计量<sup>[21]</sup>。土壤 TOC 直接影响土壤养分化学计量, 也可直接作为微生物生长的碳源, 其变化导致土壤生态化学计量变化<sup>[31]</sup>。

土壤养分化学计量控制微生物生态化学计量特征和生态酶化学计量<sup>[32]</sup>, 这是因为土壤养分化学计量尤其是 C/N 与土壤微生物群落功能多样性密切相关, 其变化影响微生物生物量以及生态酶活性。土壤 N/P, MBN/MBP 与对应的  $\text{NAG}/\text{AP}$  呈负相关, 这可能由于 AP 与  $\text{NO}_3^-$ -N 含量有密切关系使得  $\text{NAG}/\text{AP}$  更易受环境因子影响。

## 4 结论

放牧活动影响了泥炭沼泽土壤理化性质, 降低了土壤含水率、pH 值、TN、TOC、增加了 TP 含量。放牧降低了土壤 MBC/MBN 和 MBC/MBP, 然而提高了 MBN/MBP, 藏猪翻拱对微生物生态化学计量的影响高于牦牛践踏。放牧增加了土壤生态酶化学计量。TP、含水率、容重、 $\text{NO}_3^-$ -N、TOC 是影响土壤生态化学计量特征的主要环境因子。土壤养分化学计量变化影响了土壤微生物生态化学计量以及土壤生态酶化学计量。

### 参考文献:

- [1] Deng Q, Cheng X, Hui D, et al. Soil microbial community and its interaction with soil carbon and nitrogen dynamics following afforestation in central China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 230-237.
- [2] 周正虎, 王传宽. 微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J]. 植物生态学报, 2016, 40(6): 620-630.
- [3] Peng X, Wang W. Stoichiometry of soil extracellular enzyme activity along a climatic transect in temperate grasslands of northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 74-84.
- [4] Saiya-Cork K, Sinsabaugh R, Zak D. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [5] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, et al. Organism size, life history, and N : P stoichiometry: toward a unified view of cellular and ecosystem processes[J]. Bioscience, 1996, 46(9): 674-684.

- [6] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, 462(7274): DOI:10.1038/nature08632.
- [7] Xu Z, Yu G, Zhang X, et al. Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China(NSTEC)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104:152-163.
- [8] 肖德荣, 田昆, 杨宇明, 等. 高原退化湿地纳帕海植物多样性格局特征及其驱动力[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(2):523-529.
- [9] 范桥发, 肖德荣, 田昆, 等. 不同放牧对滇西北高原典型湿地土壤碳、氮空间分布的差异影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(5):1151-1156.
- [10] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming[J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(2):182-195.
- [11] 姚茜, 田昆, 肖德荣, 等. 纳帕海湿地植物多样性及土壤有机质对猪拱干扰的响应[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5):1218-1222.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [13] Huang Z, Wan X, He Z, et al. Soil microbial biomass, community composition and soil nitrogen cycling in relation to tree species in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62:68-75.
- [14] 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.
- [15] Brookes P, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6):837-842.
- [16] Brookes P, Powlson D, Jenkinson D. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4):319-329.
- [17] 贾国梅, 席颖, 许文年, 等. 三峡库区消落带土壤酶活性特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):24-28.
- [18] 王雪, 郭雪莲, 郑荣波, 等. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(7):2308-2314.
- [19] 张健文, 徐长林, 杨海磊, 等. 高寒草甸冷季放牧对凋落物分解及 C, N, P 化学计量特征的影响[J]. *草业科学*, 2017, 34(10):37-44.
- [20] Seybold C A, Mersie W, Huang J, et al. Soil redox, pH, temperature, and water-table patterns of a freshwater tidal wetland[J]. *Wetlands*, 2002, 22(1):149-158.
- [21] Sun Y, He X Z, Hou F, et al. Grazing increases litter decomposition rate but decreases nitrogen release rate in an alpine meadow[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(13):4233-4243.
- [22] Wang X K, Li Z B, Xing Y Y. Effects of mulching and nitrogen on soil temperature, water content, nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 161:53-64.
- [23] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3):139-151.
- [24] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态学计量学特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5):1160-1169.
- [25] Han W, Luo Y, Du G. Effects of clipping on diversity and above-ground biomass associated with soil fertility on an alpine meadow in the eastern region of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 50(3):361-368.
- [26] Paul E A. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*[M]. New York, USA: Academic Press, 2014.
- [27] 赵先丽, 程海涛, 吕国红, 等. 土壤微生物生物量研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2006, 22(4):68-72.
- [28] 贝昭贤, 张秋芳, 郑蔚, 等. 模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(3):1106-1113.
- [29] 隋鹏祥, 张心显, 温学发, 等. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(8):2038-2045.
- [30] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1):5-15.
- [31] Anderson T-H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21(4):471-479.
- [32] Zhao F, Ren C, Han X, et al. Changes of soil microbial and enzyme activities are linked to soil C, N and P stoichiometry in afforested ecosystems [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427:289-295.