

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2025.01.015

引用格式:吕卫东,董全民,孙彩彩,等.牦牛和藏羊暖季放牧对青藏高原高寒草地不同组分碳、氮的影响[J].草地学报,2025,33(1):126–136

LYU Wei-dong, DONG Quan-min, SUN Cai-cai, et al. Effects of Warm-Season Grazing by Yak and Tibetan Sheep on Different Fractions of Carbon and Nitrogen in Alpine Grassland of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 126–136

## 牦牛和藏羊暖季放牧对青藏高原高寒草地不同 组分碳、氮的影响

吕卫东,董全民,孙彩彩,刘文亭,冯斌,刘玉祯,张振祥,杨晓霞\*

(青海大学畜牧兽医科学院/青海省高寒草地适应性管理重点实验室/三江源区高寒草地生态教育部重点实验室,  
青海 西宁 810016)

**摘要:**土壤碳、氮是植物生长主要的养分来源,对于维持土壤肥力,提高土壤微生物活性以及对缓解全球气候变化具有重要意义。本研究依托青海省高寒草地-家畜系统适应性管理技术平台(<https://ghcd.agiot.cn>)研究不同放牧方式对不同组分碳、氮的影响。结果表明:牦牛、藏羊单独放牧显著增加了微生物生物量碳,混合放牧显著降低了微生物生物量碳;对微生物生物量氮而言,单独放牧和混合放牧均显著降低了微生物生物量氮含量,放牧对土壤总碳和土壤总氮无显著影响。放牧对微生物生物量碳、微生物生物量氮、可溶性有机碳和可溶性有机氮的影响大于对土壤总碳和土壤总氮的影响。从微生物生物量的角度分析,高寒草地以混合放牧为优,单独放牧会加剧高寒草地土壤微生物碳限制。本试验确定了不同放牧方式下高寒草地土壤不同组分碳、氮含量,可以为该区域草地的可持续管理提供科学依据。

**关键词:**放牧;青藏高原;高寒草地;微生物生物量

中图分类号:S812.2

文献标识码:

文章编号:1007-0435(2025)01-0125-11

## Effects of Warm-Season Grazing by Yak and Tibetan Sheep on Different Fractions of Carbon and Nitrogen in Alpine Grassland of the Qinghai-Xizang Plateau

LYU Wei-dong, DONG Quan-min, SUN Cai-cai, LIU Wen-ting, FENG Bin, LIU Yu-zhen,  
ZHANG Zhen-xiang, YANG Xiao-xia\*

(Qinghai Academy of Animal and Veterinary Science, Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River-Source (Qinghai University), Ministry of Education, Xining, Qinghai Province 810016, China)

**Abstract:** Soil carbon and nitrogen are the primary nutrient sources of plant growth, playing a crucial role in maintaining soil fertility, enhancing soil microbial activity, and mitigating global climate change. This study used the Qinghai Provincial Alpine Grassland-Livestock Management Technology Platform (<https://ghcd.agiot.cn>) to investigate the impacts of different grazing patterns on various carbon and nitrogen components. The results showed that grazing yak and Tibetan sheep separately significantly increased microbial biomass carbon, whereas mixed grazing significantly decreased it. In terms of microbial biomass nitrogen, both separate and mixed grazing significantly reduced its content. Grazing had no significant effect on soil total carbon and soil total nitrogen. The influences of grazing on microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, soluble

收稿日期:2024-04-15;修回日期:2024-05-28

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U20A2007);国家自然科学基金地区科学基金项目(32160343);2021年度“西部之光”人才培养计划项目资助

作者简介:吕卫东(1997-),男,汉族,甘肃静宁人,硕士研究生,主要从事放牧草地生态学研究,E-mail: 1913612253@qq.com; \*通信作者  
Author for correspondence, E-mail: xxyang@qhu.edu.cn

organic carbon, and soluble organic nitrogen were more pronounced than that on soil total carbon and soil total nitrogen. From the perspective of microbial biomass, mixed grazing was preferable in alpine grasslands, as separate grazing exacerbated soil microbial carbon limitation in these ecosystems. This study quantified the carbon and nitrogen content of different soil components in alpine grasslands under various grazing patterns, providing a scientific basis for sustainable grassland management in this region.

**Key words:** Grazing; Qinghai-Xizang Plateau; Alpine grassland; Microbial biomass

我国是一个草原大国,天然草地面积为 $4\times 10^8$   $\text{hm}^2$ ,约占国土面积的41%<sup>[1]</sup>。草地储存了陆地生态系统中近1/3的有机碳,维持着30%的净初级生产力,提供了全球30%~50%的畜产品,在全球气候变化、碳(C)氮(N)及养分循环、保持水土、调节畜牧业生产等方面具有重要的作用<sup>[1-2]</sup>。草地生态系统作为陆地生态系统的子系统,在全球变化及生态系统功能发挥等方面起着非常关键的作用。青藏高原是典型的高寒地区,面积 $2.5\times 10^6$   $\text{km}^2$ ,平均海拔超过4000 m,因易受气候影响而被称为“全球气候火炉”和“全球变化预警区”<sup>[3]</sup>。

土壤碳、氮是植物生长主要的养分来源,对于维持土壤肥力,提高土壤微生物活性以及对缓解全球气候变化具有重要意义。土壤总碳和总氮在促进植物生长发育起着非常重要的作用,是土壤中的养分来源<sup>[4]</sup>。可溶性有机碳、氮作是土壤养分库中的活性组分,其含量相比于全量养分所占的比例极少,但在一定的时间和空间条件下易受外界环境条件改变的影响<sup>[5-6]</sup>。土壤微生物生物量碳、氮是土壤养分库中更活跃的成分,对土壤条件变化非常敏感,易受外界环境的影响<sup>[7]</sup>。在草地生态系统中,家畜-植物-土壤是一个有机的整体。三者之间相互影响、相互制约,放牧不仅会直接影响草地生产力、生物多样性以及导致生物种群特征发生变化,还可以影响草地群落组成和土壤养分状况<sup>[8-9]</sup>。蒲宁宁<sup>[10]</sup>对不同放牧强度下昭苏草甸草原土壤碳、氮组分的研究发现:土壤微生物生物量碳、氮含量随着放牧强度的增加呈现“先升高后降低”的趋势;但不同放牧强度对土壤总碳、总氮无显著影响。王蓓等<sup>[11]</sup>对青藏高原东部牦牛单独放牧处理下高寒草甸土壤碳、氮组分的研究发现:放牧显著增加了土壤可溶性碳、氮含量。

有关放牧对土壤不同碳、氮组分的研究多集中于不同放牧强度和家畜单独放牧的研究。牦牛和藏羊是青藏高原高寒草地最主要的放牧家畜,两者采食习性不同,对草地的践踏效果不同,对草地产生的影响也不尽相同。牛的采食模式为“扫荡式”采食,羊的采食模式为“摘芯式”采食,不同的采食模式会造成对草地采食不均匀<sup>[12]</sup>,且牦牛、藏羊混

合放牧对草地产生的影响尚不明确<sup>[13]</sup>。那么牦牛单独放牧、藏羊单独放牧、牦牛藏羊不同比例混合放牧时对土壤不同碳、氮组分会产生什么样的影响?在高寒草地生态系统中,从微生物生物量的角度分析最优的放牧方式是什么?

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究试验地位于青海省海晏县西海镇( $36^{\circ}44' \sim 37^{\circ}39' \text{ N}$ ,  $100^{\circ}23' \sim 101^{\circ}20' \text{ E}$ ,海拔3100 m)。研究区属青海湖盆地,当地气候为山地高原气候,也就是说该地区只有两个季节:非生长季和生长季,非生长季节从10月至次年4月,长而冷;生长季节只有5个月,即5月至9月,短而凉爽。年平均气温约 $1.4^{\circ}\text{C}$ ,年降水量约330~370 mm。土壤为粘壤土,植物群落以矮嵩草(*Kobresia humilis*)、赖草(*Leymus secalinus*)、披碱草(*Elymus nutans*)、苔草(*Carex aridula*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)为主。

### 1.2 试验设计

本试验于2014年开始,采用随机区组设计,设置5个放牧处理和一个不放牧处理,每个处理设置3个重复小区,共有18个小区。5个放牧处理包括2个单独放牧处理(仅牦牛和藏羊放牧)和3个混合放牧处理(根据牦牛和藏羊的数量,牦牛和藏羊的比例分别为1:2,1:4和1:6)。每年6月初至10月底进行放牧,每月放牧时间为10 d,然后在每月剩余时间里,把牲畜放到邻近的草地上,保证每月约50%~55%的地上生物量被牲畜采食。因此,通过每月放养牲畜,使放牧强度保持在中等水平。放牧强度为 $3.86 \text{ Sheep}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

试验用的牦牛和藏羊分别重约100 kg和30 kg。根据预试日采食量,假设1头牦牛相当于3只羊[每头牦牛每天采食 $(3.7\pm 0.7) \text{ kg}$ 干物质,每只羊每天采食 $(1.2\pm 0.2) \text{ kg}$ 干物质]。地块面积根据牦牛和藏羊的数量确定,以确保各处理之间的放牧强度相同<sup>[14-15]</sup>。各处理的牲畜数量和小区面积见表1。

表1 放牧试验设计

Table 1 Experimental design of grazing

处理 Treatment	牦牛数量 Number of yaks/head	藏羊数量 Number of sheep/head	小区面积 Area of plot/hm <sup>2</sup>	小区重复个数 Number of plots
牦牛单独放牧 YG	1	0	0.26	3
藏羊单独放牧 SG	0	2	0.17	3
牦牛藏羊 1:2 混牧 MG1:2	1	2	0.43	3
牦牛藏羊 1:4 混牧 MG1:4	1	4	0.60	3
牦牛藏羊 1:6 混牧 MG1:6	1	6	0.76	3
不放牧 CK	0	0	0.05	3

### 1.3 土壤样品采集和测定方法

土壤样品采集于2022年8月进行,在不同放牧处理下的各重复小区内,用直径4 cm的土钻,以0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm,分层取样,每个重复小区内每层3钻取样,然后将同一层次的3个重复取样进行混合。混合后的土壤样品分为两份,其中一份土壤样品于4℃冷藏保存用于土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、氮(Microbial biomass nitrogen, MBN),土壤可溶性碳(Dissolve organic carbon, DOC)、氮(Dissolve organic nitrogen, DON)的测定,另外一份土壤样品自然风干后用于土壤全碳(Total carbon, TC)、全氮(Total nitrogen, TN)的测定。

MBC, MBN用氯仿熏蒸法测定<sup>[16]</sup>,每份土壤分为2份,1份在真空干燥器中熏蒸24 h,另1份不做熏蒸处理。熏蒸和未熏蒸的土壤均用0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提(水土比为4:1,40 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液,10g鲜土),浸提液经过滤后吸取10 mL定容至50 mL容量瓶,然后用TOC总碳分析仪(Warip TOC SELECT)进行测定,MBC和MBN含量最终由熏蒸和未熏蒸的差值计算得出,MBC的转化系数为0.45,MBN的转化系数为0.54。DOC和DON用0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提后用TOC总碳分析仪测定。TC和TN过200目筛,用元素分析仪(FLASHAMART)进行测定。

### 1.4 数据分析

所有数据均经过正态性和方差齐性检验,用单因素方差分析和Tukey多重比较来确定不同放牧方式之间土壤微生物生物量碳、氮,可溶性有机碳、氮,总碳、总氮的差异;用双因素方差分析来确定不同放牧方式和土层深度及其交互作用的影响。在 $P \leq 0.05$ 的水平上评估显著差异。所有统计分析均在R4.2.2中完成,统计图形在SigmaPlot 14.0中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 放牧与土层深度对不同组分碳、氮的影响

由表2可知,放牧对MBC、MBN、MBC/MBN均有极显著影响( $P < 0.001$ ),土层深度对MBC、MBN( $P < 0.001$ )和MBC/MBN( $P < 0.05$ )有显著影响。放牧和土层深度对MBC,MBN和MBC/MBN( $P < 0.001$ )有极显著的交互作用。与微生物生物量一致,放牧、土层深度对DOC、DON和DOC/DON( $P < 0.001$ )有极显著影响,放牧和土层深度对MBC,MBN和MBC/MBN( $P < 0.001$ )有极显著的交互作用。放牧和土层深度对TC和TN( $P < 0.001$ )有极显著影响。土层深度对TC/TN( $P < 0.001$ )有极显著影响,但放牧对TC/TN无影响。放牧和土层深度对TC、TN和TC/TN无显著交互作用。

### 2.2 不同放牧方式对微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)的影响

未放牧处理下,高寒草地生态系统0~30 cm土层MBC和MBN分别为1610.3 mg·kg<sup>-1</sup>和370.3 mg·kg<sup>-1</sup>,SG、YG显著增加了MBC含量(1756.5 mg·kg<sup>-1</sup>和1876.3 mg·kg<sup>-1</sup>, $P < 0.05$ ),而混合放牧处理下MBC含量显著低于牦牛、藏羊单独放牧和未放牧处理( $P < 0.05$ )。对MBN而言,放牧显著降低了MBN含量( $P < 0.05$ )。除去未放牧处理,各放牧处理下MBC含量的平均值为1167.6 mg·kg<sup>-1</sup>,其中MG1:4下MBC含量最低为546.1 mg·kg<sup>-1</sup>,YG下MBC含量最高,约是MG1:4下的3.4倍;各放牧处理下MBN的平均值为228.3 mg·kg<sup>-1</sup>,其中MG1:2下MBN含量最低为167.5 mg·kg<sup>-1</sup>,SG下MBN含量最高为291.7 mg·kg<sup>-1</sup>约是MG1:2下的1.7倍。

未放牧处理下,高寒草地生态系统0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm土层MBC含量分别为716.6 mg·kg<sup>-1</sup>、497.7 mg·kg<sup>-1</sup>和396.0 mg·kg<sup>-1</sup>(图1),分别占MBC总量的44.5%,30.9%和

24.6%;不同土层之间MBC含量差异显著(表2,  $P<0.05$ )。未放牧处理下,高寒草地生态系统0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层MBN含量分别为171.3, 122.7 和 76.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图1), 分别占MBN总量的46.3%, 33.1% 和 20.6%, 不同土层之间

MBN含量差异显著(表2,  $P<0.05$ )。在放牧处理下, SG、YG显著增加了0~10 和 10~20 cm 土层MBC含量, 各混合放牧处理显著降低了各土层MBC含量( $P<0.05$ )。对MBN而言, 放牧显著降低了各土层MBN含量( $P<0.05$ )。

表2 放牧与土层深度对微生物生物量碳、氮的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of microbial biomass carbon and nitrogen in grazing and soil depth

	放牧 Grazing		深度 Depth		放牧×深度 Grazing×Depth	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
MBC	412.34	<0.001	554.94	<0.001	66.45	<0.001
MBN	370.00	<0.001	951.76	<0.001	48.63	<0.001
MBC/MBN	108.84	<0.001	4.15	0.018	21.09	<0.001
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
DOC	48.08	<0.001	132.99	<0.001	4.10	<0.001
DON	41.14	<0.001	114.10	<0.001	7.86	<0.001
DOC/DON	51.43	<0.001	16.36	<0.001	3.64	<0.001
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
TC	5.33	<0.001	40.07	<0.001	0.73	0.697
TN	4.73	<0.001	123.18	<0.001	0.37	0.957
TC/TN	1.49	0.197	35.79	<0.001	0.67	0.752

注: MBC, 微生物生物量碳; MBN, 微生物生物量氮; MBC/MBN, 微生物生物量碳氮比; DOC, 可溶性有机碳; DON, 可溶性有机氮; DOC/DON, 可溶性有机碳氮比; TC, 土壤总碳; TN, 土壤总氮; TC/TN, 土壤总碳氮比

Note: MBC, Microbial Biomass Carbon; MBN, Microbial Biomass Nitrogen; MBC/MBN, Microbial Biomass C:N; DOC, Dissolve Organic Carbon; DON, Dissolve Organic Nitrogen; DOC/DON, Dissolve Organic C:N; TC, Total Carbon; TN, Total Nitrogen; TC/TN, Soil total C:N

### 2.3 不同放牧方式对DOC和DON的影响

未放牧处理下,高寒草地生态系统0~30 cm 土层DOC和DON分别为453.9  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和65.4  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。DOC对放牧的响应存在不同的结果, SG、MG1:6显著降低了DOC含量(388.7  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和380.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $P<0.05$ ), 其他放牧处理对DOC含量无显著影响。对DON而言, SG显著增加了DON含量(82.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $P<0.05$ ), 其他放牧处理显著降低了DON含量(图2,  $P<0.05$ )。

未放牧处理下,高寒草地生态系统0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层DOC含量分别为166.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、155.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和132.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 分别占DOC总量的36.6%、34.2% 和 29.2%;不同土层之间DOC含量差异显著(表2,  $P<0.05$ )。未放牧处理下,高寒草地生态系统0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层DON含量分别为26.2, 22.7 和 16.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 分别占DON总量的40.1%, 34.7% 和 25.2%;不同土层之间DON含量差异显著(表2,  $P<0.05$ )。在放牧处理下, SG、MG1:6显著降低了各土层DOC含量( $P<0.05$ ), 其他放牧处理对DOC含量无显著影响。对DON而言, SG显著增加了DON含量( $P<0.05$ ), 其他放牧处理对DON含量无显著影响。

### 2.4 不同放牧方式对土壤总碳(TC)、氮(TN)的影响

未放牧处理下,高寒草地生态系统0~30 cm 土层TC和TN分别为130.0  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和9.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。MG1:2显著降低了TC含量(114.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 图3,  $P<0.05$ ), 其他放牧处理对TC含量无显著影响。TN含量变化相对稳定, 各放牧处理未对其产生显著影响, SG处理下TN含量最高为10.3  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , MG1:2处理下TN含量最低为8.9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

未放牧处理下,高寒草地生态系统0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层TC含量分别为48.0, 41.2 和 39.8  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 分别占TC总量的37.2%、31.9% 和 30.9%;0~10 cm 土层TC含量显著高于10~20 cm 和 20~30 cm 土层。未放牧处理下,高寒草地生态系统0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层TN含量分别为3.7, 3.2 和 2.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 分别占TN总量的38.3%、33.1% 和 28.0%, 不同土层之间TN含量差异显著(表2,  $P<0.05$ )。放牧处理下, MG1:2显著降低了各土层TC含量( $P<0.05$ ), 其他放牧处理对各土层TC含量无显著影响。相比于TC, TN含量变化较为稳定, 放牧对各土层TN含量无显著影响。



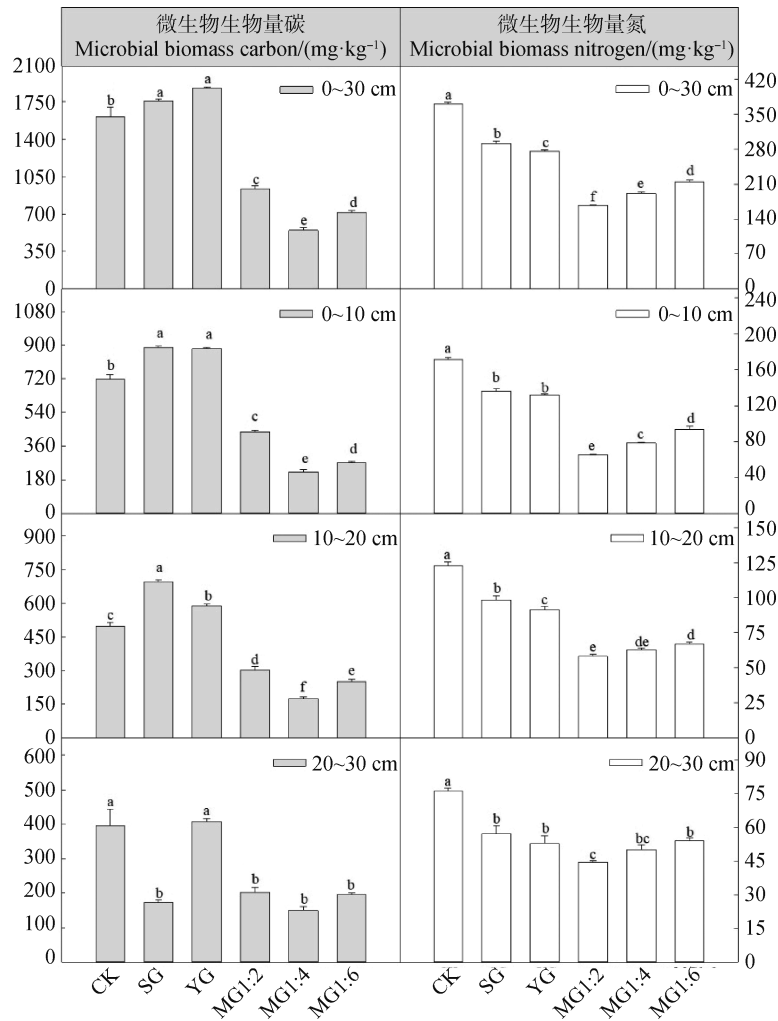


图 1 不同放牧方式对微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)的影响

Fig. 1 Effect of different grazing patterns on microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN)

注:YG,牦牛单独放牧;SG,藏羊单独放牧;MG1:2,牦牛藏羊 1:2 混合放牧;MG1:4,牦牛藏羊 1:4 混合放牧;MG1:6,牦牛藏羊 1:6 混合放牧;CK,不放牧,下同;不同小写字母表示同一指标在不同放牧处理间差异显著, $P<0.05$

Note: YG, yak grazing alone; SG, Tibetan sheep grazing alone; MG1:2, yak and Tibetan sheep 1:2 mixed grazing; MG1:4, yak and Tibetan sheep 1:4 mixed grazing; MG1:6, yak and Tibetan sheep 1:6 mixed grazing; CK, no-grazing, the same as below; Different lowercase letters represent significant differences in the same index between different grazing treatments, with  $P<0.05$

## 2.5 不同放牧方式对 MBC/MBN, DOC/DON 和 TC/TN 的影响

由图 4 所示,未放牧处理下,高寒草地生态系统 0~30 cm 土层 MBC/MBN 为 4.4。SG、YG 显著增加了 MBC/MBN (6.0 和 6.8,  $P<0.05$ )。混合放牧处理下, MG1:2 显著增加了 MBC/MBN (5.6,  $P<0.05$ ), MG1:4 和 MG1:6 显著降低了 MBC/MBN (2.8 和 3.4,  $P<0.05$ )。未放牧处理下,高寒草地生态系统 0~30 cm 土层 DOC/DON 为 7.0。SG 显著降低了 DOC/DON (4.8,  $P<0.05$ ),而其他放牧处理对 DOC/DON 无显著影响。未放牧处理下,高寒草地生态系统 0~30 cm 土层 TC/TN 为 13.4,放牧

对 TC/TN 无显著影响。

## 2.6 不同指标间的相关性分析

MBC 与 MBC/MBN 呈极显著正相关,与 DOC 和 DOC/DON 呈极显著负相关 ( $P<0.001$ )。MBN 与 MBC/MBN ( $P<0.001$ ) 和 DON 呈显著负相关 ( $P<0.05$ ),与 DOC/DON 呈正相关 ( $P<0.05$ )。MBC/MBN 与 DOC 和 DOC/DON 呈极显著负相关 ( $P<0.001$ ),与 DON 呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。TC 和 TN 呈现显著正相关 ( $P<0.05$ )。DOC 和 DOC/DON 呈极显著正相关 ( $P<0.001$ )。

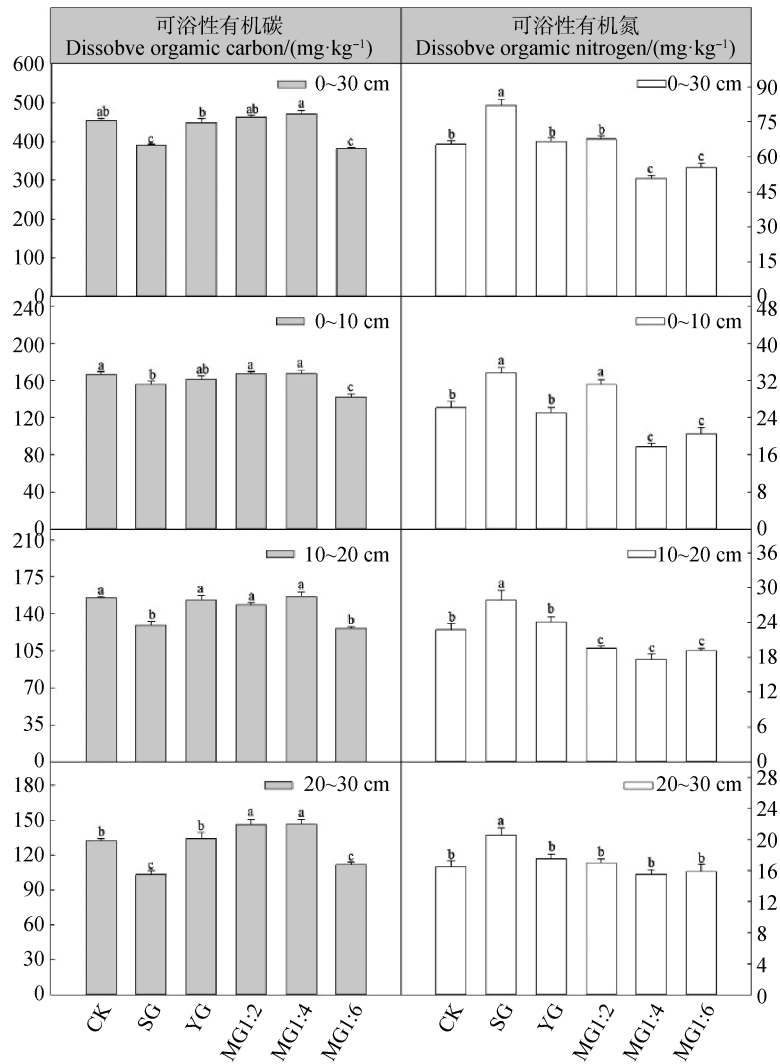


图 2 不同放牧方式对 DOC、DON 的影响

Fig. 2 Effect of different grazing patterns on dissolve organic carbon (DOC) and nitrogen (DON)

### 3 讨论

#### 3.1 放牧对土壤微生物生物量碳、氮的影响

土壤微生物生物量是土壤有机质的活性组成部分,作为一个短暂的养分库,负责分解和转化来自地上和地下植物残体的有机物质,并从使用的有机质中释放养分。土壤微生物生物量碳、氮是土壤微生物生物量的关键元素组成部分<sup>[17]</sup>。本试验研究表明:不同土层土壤微生物生物量含量表现为:0~10 cm 土层>10~20 cm 土层>20~30 cm 土层,这与其他学者研究结果一致<sup>[18]</sup>。表层土壤微生物生物量较高,是因为表层土壤微生物较为活跃。此外,与深层土壤相比,表层土壤中根系分泌物和植物凋落物的有机质输入潜力更高<sup>[19]</sup>。从土壤环境方面进行分析,相比于表层土壤,深层土壤环境趋于稳定,微生物生物量碳、氮受外界环境因子的

影响减弱<sup>[20]</sup>。

研究表明高寒草地土壤微生物生物量碳对放牧存在不同的响应,有增加<sup>[21]</sup>,降低<sup>[22]</sup>和无影响<sup>[23]</sup>三种结果。在中等放牧强度下,牛、羊单独放牧均增加了土壤微生物生物量碳<sup>[24-25]</sup>,这与本试验研究结果一致,牦牛、藏羊单独放牧时其不同的采食习性对草地产生不同的影响,牦牛喜食禾草,藏羊则以杂类草和豆科植物为主<sup>[26]</sup>。牛、羊采食后的留茬高度也存在差异,羊采食的留茬高度约为2~3 cm,牛采食的留茬高度约为5~6 cm,因此单种家畜放牧时容易造成采食不均的现象。羊单独放牧时对植物采食过低不利于草地恢复,牛单独放牧时采食不充分对草地利用效率较低<sup>[27]</sup>。牦牛、藏羊单独放牧时喜食牧草被采食后其他未被采食的牧草开始占据主要的生态位。单独放牧时对植物的采食不均匀让草地出现“破碎化”,使得适口性差,较难分解的植物增加,易

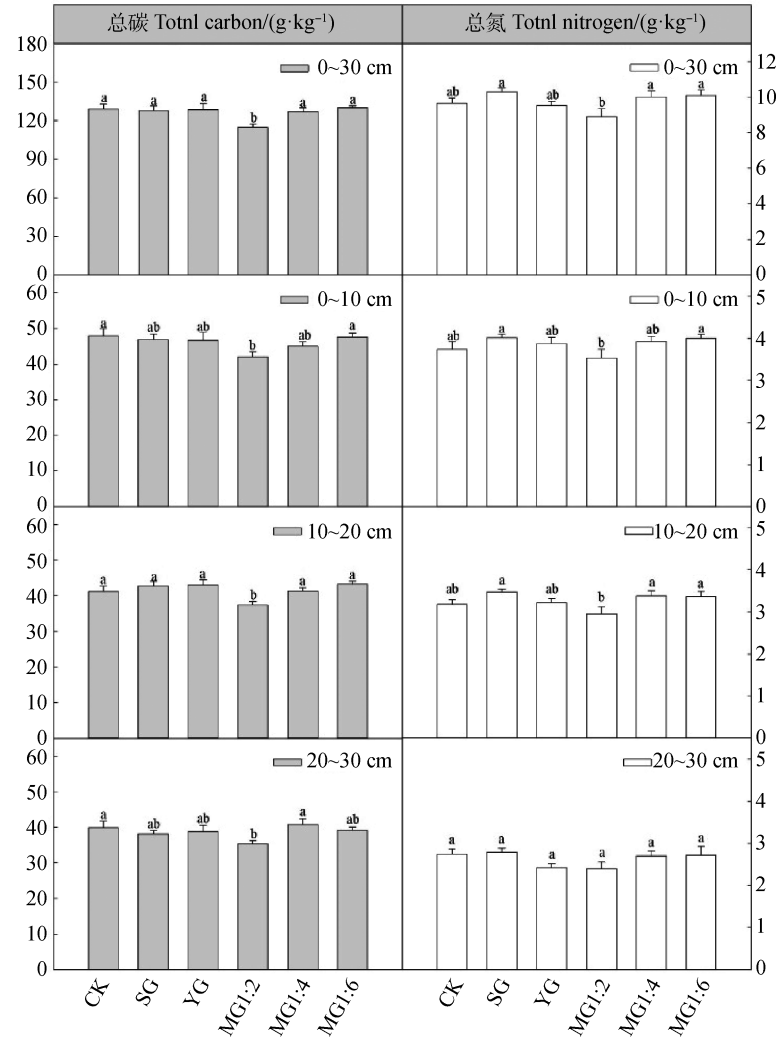


图 3 不同放牧方式对土壤 TC、TN 的影响

Fig. 3 Effect of different grazing patterns on total carbon (TC) and nitrogen (TN)

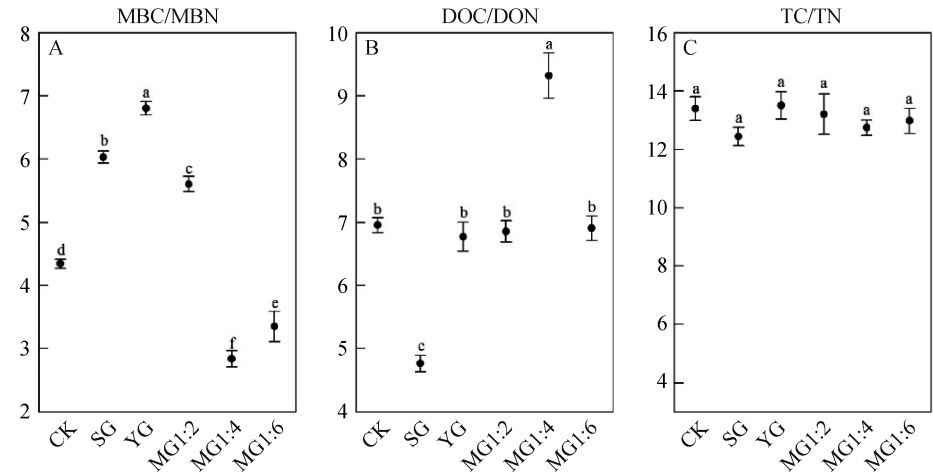


图 4 不同放牧方式对 0~30 cm 土层 MBC/MBN(A)、DOC/DON(B)和 TC/TN(C)的影响

Fig. 4 Effects of different grazing patterns on MBC/MBN (A),DOC/DON (B),and TC/TN (C) in 0-30 cm soil layers

分解植物的减少使土壤中的可利用碳源减少,微生物则开始通过贮存过量元素来适应该种环境胁迫<sup>[28]</sup>。在我们的试验结果中也发现牛、羊单独放牧时微生物加强了对可溶性有机碳的利用,将其贮存在体内来应对碳源缺乏的环境胁迫,所以会出现牛、羊单独放牧时微生物生物量碳增加的现象。牛、羊

混合放牧时对草地的采食更加均匀利用效率更高,家畜采食不同植物的不同部位,植物光合产物减少,向根部沉积的有机物减少;同时混合放牧时家畜践

踏频率增加,土壤容重增加、团聚体受损,土壤微生物活性降低,利用可溶性有机碳的能力下降,造成微生物生物量碳含量降低<sup>[29-30]</sup>。

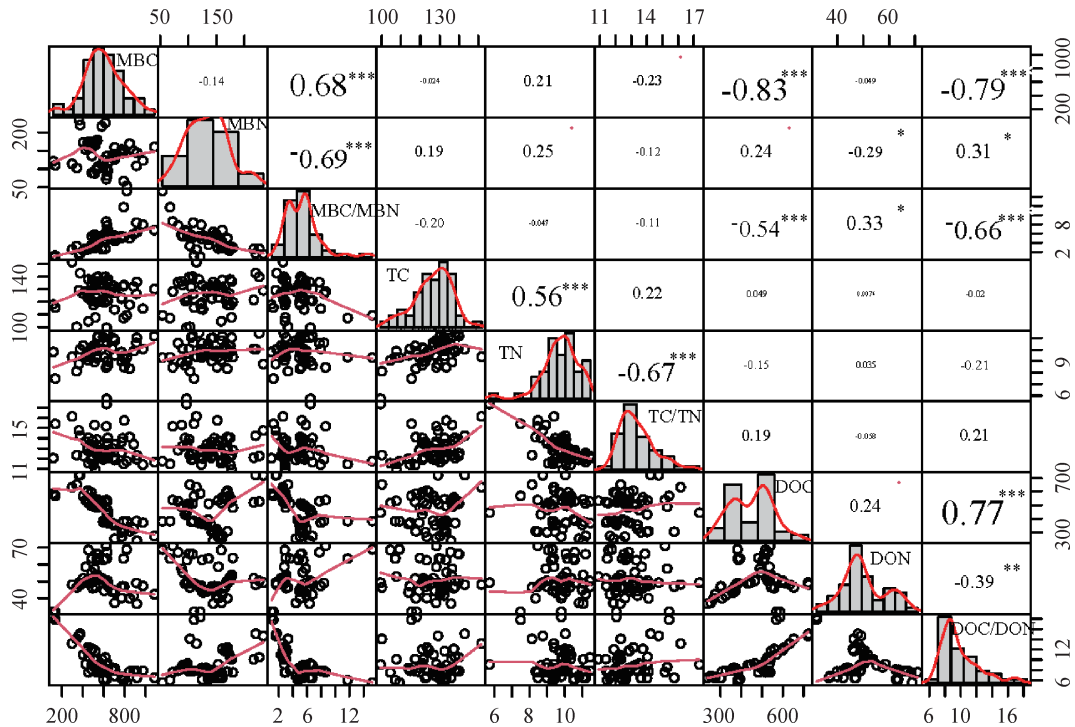


图5 不同指标间的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between different indicators

注:\*,\*\*和\*\*\*表示分别在0.05,0.01和0.001水平上相关性显著

Note:\*,\*\*,and\*\*\* indicate significant correlation at the 0.05,0.01 and 0.001 levels,respectively

对MBN而言,无论是牦牛、藏羊单独放牧还是混合放牧均显著降低了MBN含量。但在降低幅度上略有差异。牦牛、藏羊混合放牧时MBN含量显著低于单独放牧,但随着藏羊比例的增加MBN含量逐渐升高。不同放牧方式下MBN含量均下降是因为本试验是在植物生长旺季(8月)进行,在植物生长旺季由于土壤中的氮源有限,微生物为避免与植物竞争可利用氮会优先将可利用氮供给植物使用,使生长旺季的植物氮库增加而自身的氮库降低<sup>[31]</sup>。土壤中的氮源是植物和微生物共同的食物,家畜采食植物地上组织后要从土壤中吸收更多的氮恢复地上组织的生长,土壤中氮源的减少会增强植物对氮的竞争超过土壤微生物,同样会导致微生物生物量氮和氮库减少<sup>[32-33]</sup>。

不同放牧方式均降低了微生物生物量氮,但是不同的放牧家畜及其组合对微生物生物量有不同的影响,这可能受到不同家畜排泄物的影响。牛的粪便较为集中,而羊的粪便颗粒较小且更为分散还给土壤氮素的量更高,微生物从土壤中吸收的氮

素更多<sup>[8]</sup>。在混合放牧处理下随着羊比例的增加,羊粪便的比例同样增加,导致MG1:6处理下MBN含量增加。混合放牧处理下MBN含量均低于牛、羊单牧可能与对土壤的践踏程度有关,混合放牧处理下家畜数量增多,对草地践踏作用增强导致土壤氮含量损失,微生物固定的氮素减少<sup>[34]</sup>。

### 3.2 放牧对土壤可溶性有机碳、氮,土壤总碳、总氮的影响

本试验中可溶性碳、氮和土壤总碳、总氮在垂直方向上的分布均表现为0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm,这与大多数人研究结果一致,因为表层土壤微生物较为活跃。DOC和DON是土壤中活性较高、周转速率快、易被微生物分解和利用的碳、氮,易受外界各种环境的影响<sup>[35-36]</sup>。本试验研究发现SG显著降低了DOC含量,在混合放牧处理下只有MG1:6有显著影响,说明藏羊放牧对DOC的影响可能大于牦牛放牧的影响。SG在降低DOC的同时显著增加了DON的含量,这是微生物在面对土



壤资源化学计量比失衡所做出的一种策略。当土壤中DOC散失过多时,土壤中的固氮菌和腐生真菌会增加土壤中氮和磷的输入以维持化学计量比的稳定<sup>[37]</sup>。

本试验研究发现不同放牧方式对TC和TN无影响,因为草地生态系统的滞后性和弹性<sup>[38-39]</sup>。植物凋落物是土壤有机质的主要来源未放牧处理下有较厚的凋落物覆盖。放牧小区内由于家畜的践踏不仅减少了凋落物的数量而且转化成植物碎屑,植物碎屑在风力作用下被带离该生态系统,使得土壤TC和TN含量降低。放牧处理对TC和TN影响不显著的另外一个原因是家畜采食植物地上部分之后由于植物的补偿性生长会重新生长出幼嫩器官,植物的幼嫩器官含有更高的碳氮含量,这些物质在满足地上部分生长后可向地下运输积累,因而减少了因放牧导致的土壤碳氮损失<sup>[40]</sup>。

相比于TC和TN,放牧对DOC、DON和MBC、MBN的影响较大。在草地生态系统中,TC和TN在一定时间尺度上处于平衡状态。在我们的研究中放牧对土壤全量养分的影响弱于对土壤活性养分的影响,土壤全量养分的微小变化对放牧家畜的响应难以观测得到,尤其是在较短的时间尺度上<sup>[41]</sup>。

### 3.3 放牧对MBC/MBN, DOC/DON和TC/TN的影响

不同组分碳氮比代表不同的生态学意义,MBC/MBN反映土壤中真菌与细菌的比例<sup>[42]</sup>,对可溶性碳氮来说土壤中DOC/DON降低时土壤微生物生命活动受到碳限制<sup>[43-44]</sup>,而TC/TN的变化对土壤氮素转化具有重要意义<sup>[45]</sup>。本试验研究结果表明,牛、羊单独放牧时MBC/MBN显著增加,混合放牧时除MG1:2外MBC/MBN显著降低,说明牛、羊单独放牧时真菌群落占主要部分,混合放牧时则以细菌群落为主。牛、羊单独放牧由于其采食不均匀导致土壤环境变差,真菌数量增加,这与真菌具有更高的抗逆性有关<sup>[46-47]</sup>。混合放牧时对草地的采食较为均匀,土壤环境质量较好,细菌群落占微生物生物量的主要部分。细菌群落为主时微生物生物量氮含量较低,这与我们的研究结论一致。细菌和真菌的生活方式不同,细菌具有更快的周转率(即较短的生命周期),以细菌群落为主体时会加快土壤氮素损失<sup>[18]</sup>。我们的研究结果也表明混合放

牧处理下可溶性有机氮含量较低,可能是因为混合放牧处下以细菌为主,DON作为能源被细菌吸收利用。

本试验中SG显著降低了DOC,但显著增加DON,使DOC/DON显著降低。一般来说,当土壤中DOC/DON降低时,土壤微生物生长受到碳限制。SG处理下DOC/DON显著降低,表明藏羊放牧可能会增加高寒草地土壤微生物的碳限制<sup>[48]</sup>。SG和YG处理下,TC含量分别为 $127.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $128.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,但两个处理之间无显著差异。这与Zhou的研究结果相同,尽管放牧藏羊和牦牛放牧都降低了土壤碳库,但放牧藏羊时土壤碳的减少程度更高<sup>[49]</sup>。

## 4 结论

本研究依托长期放牧控制试验平台探讨了家畜类型和混合比例对高寒草地土壤碳、氮组分的影响,研究结果表明:单独放牧显著增加了微生物生物量碳,混合放牧显著降低了微生物生物量碳;对微生物生物量氮而言,单独放牧和混合放牧均显著降低了微生物生物量氮含量,放牧对土壤总碳和土壤总氮无显著影响。放牧对微生物生物量碳、微生物生物量氮、可溶性有机碳和可溶性有机氮的影响大于对土壤总碳和土壤总氮的影响。从微生物生物量的角度分析,高寒草地以混合放牧为优,单独放牧会加剧高寒草地土壤微生物碳限制。

## 参考文献

- [1] 陈佐忠,汪诗平,王艳芬,等. 中国典型草原生态系统[M]. 北京:科学出版社,2000:1-2
- [2] 张扬建,朱军涛,沈若楠,等. 放牧对草地生态系统影响的研究进展[J]. 植物生态学报,2020,44(5):553-564
- [3] 王根绪,程国栋,沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. 冰川冻土,2002,24(6):693-700
- [4] EZE S, PALMER S M, CHAPMAN P J. Soil organic carbon stock in grasslands: effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 223: 74-84
- [5] 曹静娟. 祁连山草地管理方式变化对土壤有机碳、氮库的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010:3-4
- [6] BOLAN N S, BASKARAN S, THIAGARAJAN S. An evaluation of the methods of measurement of dissolved organic carbon in soils, manures, sludges and stream water[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1996, 27: 2723-2737

- [7] 薛菁芳,高艳梅,汪景宽,等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报,2007,38(2):247-250
- [8] 方军武. 放牧对典型草原群落生产力、养分含量及其化学计量学特征的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2018:13-30
- [9] 李江文,王忠武,任海燕,等. 荒漠草原建群种短花针茅功能性状对长期放牧的可塑性响应[J]. 西北植物学报,2017,37(9):1854-1863
- [10] 蒲宁宁. 放牧强度对昭苏草甸草原土壤有机碳组分及其碳、氮特征的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013:17-19
- [11] 王蓓,孙庚,罗鹏,等. 模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响[J]. 生态学报,2011,31(6):1506-1514
- [12] 王岭,张敏娜,徐曼,等. 草地多功能提升的多样化家畜放牧理论及应用[J]. 科学通报,2021,66(30):3791-3798
- [13] 王旭,王德利,刘颖,等. 羊草草地生长季放牧山羊采食量和食性选择[J]. 生态学报,2002,22(5):661-667
- [14] YANG X X, DONG Q M, CHU H, et al. Different responses of soil element contents and their stoichiometry (C:N:P) to yak grazing and Tibetan sheep grazing in an alpine grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 285(8):106628
- [15] 张艳芬,杨晓霞,董全民,等. 牦牛和藏羊混合放牧对放牧家畜采食量和植物补偿性生长的影响[J]. 草地学报,2019,27(6):1607-1614
- [16] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社,2000:39-58
- [17] SINGH J S, GUPTA V K. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634:497-500
- [18] 徐晓凤,牛德奎,郭晓敏,等. 放牧对武功山草甸土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 草业科学,2018,35(7):1634-1640
- [19] LIU N, ZHANG Y J, CHANG S J, et al. Impact of grazing on soil carbon and microbial biomass in typical steppe and desert steppe of Inner Mongolia[J]. PLoS One, 2012, 7:e36434
- [20] 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
- [21] BARDGETT R D, JONES A C, JONES D L, et al. Soil microbial community patterns related to the history and intensity of grazing in sub-montane ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33: 1653-1664
- [22] 何亚婷,董云社,齐玉春,等. 草地生态系统土壤微生物量及其影响因素研究进展[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1350-1359
- [23] 王启兰,王长庭,杜岩功,等. 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
- [24] WANG Y N, LI F Y, SONG X, et al. Changes in litter decomposition rate of dominant plants in a semi-arid steppe across different land-use types: Soil moisture, not home-field advantage, plays a dominant role[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 303:107119
- [25] MA L N, GAO X L, LIU G F, et al. The retention dynamics of N input within the soil-microbe-plant system in a temperate grassland[J]. Geoderma, 2020, 368:114290
- [26] LIU J, FENG C, WANG D L, et al. Impacts of grazing by different large herbivores in grassland depend on plant species diversity[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(4):1053-1062
- [27] 张鲜花,朱进忠,靳瑰丽,等. 新疆褐牛放牧饲养条件下放牧强度对草地及家畜的影响[J]. 新疆农业科学,2013,50(5):931-937
- [28] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5:22
- [29] SHRESTHA G, STAHL P D. Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: effects of long-term grazing exclusion[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 125(1-4):173-181
- [30] RAIESI F, ASADI E. Soil microbial activity and litter turnover in native grazed and ungrazed rangelands in a semiarid ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(1):76-82
- [31] JIA Z, LI P, WU Y T, et al. Deepened snow loosens temporal coupling between plant and microbial N utilization and induces ecosystem N losses[J]. Global Change Biology, 2022, 28(15):4655-4667
- [32] 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
- [33] 韩晓日,郑国砥,刘晓燕,等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. 中国农业科学,2007,40(4):765-772
- [34] 丁成翔. 青藏高原高寒草原土壤微生物对不同放牧方式的响应[D]. 西宁:青海大学,2020:48-58
- [35] DÍAZ-RAVINA M, ACEA M J, CARBALLAS T. Microbial biomass and its contribution to nutrient concentrations in forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(1):25-31
- [36] HOLT J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid northeastern Australia[J]. Applied Soil Ecology, 1997, 5(2):143-149
- [37] 袁晓波. 氮沉降对黄土高原典型草原植物群落稳定性及土壤微生物养分利用过程的影响[D]. 兰州:兰州大学,2020:76-79
- [38] 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
- [39] BERG W A, BRADFORD J A, SIMS P L. Long-term soil nitrogen and vegetation change on sandhill rangeland[J]. Journal of Range Management, 1997, 50:482
- [40] 詹天宇,孙建,张振超,等. 基于meta分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报,2020,28(12):1847-1858
- [41] 董星丰,赵光影,李苗,等. 大兴安岭北部多年冻土区土壤碳氮含量及有机碳矿化特征[J]. 生态学报,2021,41(17):6728-6737

- [42] FAUCI M F, DICK R P. Soil microbial dynamics: short- and long-term effects of inorganic and organic nitrogen[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 801-806
- [43] KAISER C, FRANKLIN O, DIECKMANN U, et al. Microbial community dynamics alleviate stoichiometric constraints during litter decay[J]. Ecology letters, 2014, 17(6): 680-690
- [44] HUYGENS D, DÍAZ S, URCELAY C, et al. Microbial recycling of dissolved organic matter confines plant nitrogen uptake to inorganic forms in a semi-arid ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 142-151
- [45] SCHIPPER L A, SPARLING G P. Accumulation of soil organic C and change in C:N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand[J]. Biogeochemistry, 2011, 104(1): 49-58
- [46] CHEN H H, MOTHAPPO N V, Shi W. Fungal and bacterial N<sub>2</sub>O production regulated by soil amendments of simple and complex substrates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 84: 116-126
- [47] ZHANG M X, ZHAO L Y, HU J P, et al. Different grazers and grazing practices alter the growth, soil properties, and rhizosphere soil bacterial communities of *Medicago ruthenica* in the Qinghai-Tibetan Plateau grassland [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 352: 108522
- [48] 潘森, 卜嘉玮, 甘安琪, 等. 放牧强度对高寒草地土壤微生物胞外酶化学计量的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1780-1787
- [49] ZHOU G Y, ZHOU X H, HE Y H, et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: A meta-analysis[J]. Global change biology, 2017, 23: 1167-1179

(责任编辑 刘婷婷)