



生态学杂志
Chinese Journal of Ecology
ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目：青藏高原高寒草地土壤微生物活性对放牧强度的响应
作者：孙彩彩，安海涛，董全民，刘文亭，吕卫东，杨晓霞
收稿日期：2024-03-11
网络首发日期：2024-09-05
引用格式：孙彩彩，安海涛，董全民，刘文亭，吕卫东，杨晓霞. 青藏高原高寒草地土壤微生物活性对放牧强度的响应[J/OL]. 生态学杂志.
<https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240905.0912.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

青藏高原高寒草地土壤微生物活性对放牧强度的响应

孙彩彩 安海涛 董全民 刘文亭 吕卫东 杨晓霞*

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

摘要 土壤微生物在草地生态系统中发挥着重要的作用, 了解放牧条件下土壤微生物活性变化对评估草地土壤质量状况具有重要意义。为研究青藏高原地区高寒草地不同放牧强度(无放牧、轻度放牧、中度放牧和重度放牧)影响下土壤微生物活性的变化特征, 采用室内分析与野外取样调查相结合的方法, 分析了不同放牧强度下土壤理化特征(有机碳、pH、铵态氮、硝态氮和速效磷)和微生物活性(微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物熵、基础呼吸和微生物代谢熵)等指标的变化。结果表明: (1) 0~10 cm 土层, 放牧降低了土壤有机碳和土壤铵态氮含量, 提高了土壤 pH。(2) 随放牧强度的增加, 土壤微生物生物量碳、生物量氮和微生物熵均呈现降低的趋势, 微生物生物量碳和生物量氮含量均在 0~10 cm 土层最高, 分别为 404.44~748.49 和 101.73~173.78 mg·kg⁻¹。(3) 随放牧强度的增加, 土壤基础呼吸逐渐降低, 而微生物代谢熵随放牧强度的增强逐渐增大。(4) 土壤有机碳、pH 和铵态氮是影响土壤微生物活性的重要因子。综上, 随放牧强度的增强和土层深度的增加, 土壤微生物生物量碳、生物量氮、微生物熵和土壤基础呼吸均呈降低的趋势, 而微生物代谢熵随放牧强度的增强和土层深度的增加呈增加的趋势。

关键词 高寒草地; 放牧强度; 土壤微生物活性

Response of soil microbial activity to grazing intensity in alpine grassland of Qinghai-Tibet Plateau. SUN Caicai, AN Haitao, DONG Quanmin, LIU Wenting, LYU Weidong, YANG Xiaoxia*(Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine/Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River-Source, Ministry of Education/Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining 810016, China).

Abstract: Soil microorganisms play an important role in grassland ecosystems. Understanding the changes of soil microbial activity under grazing conditions is of great significance for evaluating grassland soil quality. In this study, we examined the changes of soil microbial activity under different grazing intensities (no grazing, light grazing, moderate grazing and heavy grazing) in alpine grassland of Qinghai-Tibet Plateau. We investigated the soil physical and chemical properties (organic carbon, pH, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus) and microbial activities (microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, microbial entropy, soil basal respiration and microbial quotient) under different grazing intensities by combining indoor analysis with field sampling. The results showed that: (1) In the 0-10 cm soil layer, grazing decreased soil organic carbon and soil ammonium nitrogen contents, but increased soil pH. (2) Soil microbial biomass carbon, biomass nitrogen and microbial entropy showed a decreasing trend with increasing grazing intensity, and the contents of microbial biomass carbon and biomass nitrogen were the highest in the soil layer of 0-10 cm, which ranged from 404.44-748.49 and

国家自然基金地区科学基金项目(32160343)、国家自然基金联合基金项目(U20A2007)、2021 年度中国科学院“西部之光”人才培养计划和青海省科技厅创新团队项目(2021-ZJ-901)资助。

收稿日期: 2024-03-11 接受日期: 2024-09-03

*通信作者 E-mail: xxyang@qhu.edu.cn

101.73-173.78 mg·kg⁻¹, respectively. (3) In grazing treatments, it showed that soil basal respiration gradually decreased with the intensification of grazing intensity, and microbial quotient gradually increased as the grazing intensity strengthened. (4) Soil organic carbon, pH and ammonium nitrogen were important factors affecting soil microbial activity. In summary, soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, microbial entropy and soil basal respiration tended to decrease with increasing grazing intensity and soil depth, while microbial quotient tended to increase with increasing grazing intensity and soil depth.

Keywords: alpine grassland; grazing intensity; soil microbial activity

青藏高原高寒草地是我国畜牧业生产及发展的重要基地,同样也是重要的生态保护屏障,其生态功能能否正常发挥对于稳定和维持区域生态系统平衡具有重要影响(杨晓霞等,2023)。长期以来,不合理的放牧及人为干扰的加剧,导致草地生态系统功能紊乱,环境恶化,进而出现草地退化日益严重的现象(任强等,2021)。家畜放牧是高寒草地最主要的草地利用活动(Liang et al., 2021),家畜通过多种行为与方式不仅影响植物群落组成与土壤状况,而且还将对土壤养分循环和土壤微生物活动产生影响(Chillo et al., 2015)。微生物作为土壤中最活跃的生物(Xu et al., 2014),其生物量碳、生物量氮等变化有利于加强关于放牧影响下草地土壤整体质量变化的认识(Singh et al., 2017)。因此,分析不同放牧强度对高寒草地土壤微生物活性的影响,有利于高寒草地的可持续利用及发展,对于制定科学的放牧管理方案至关重要。

土壤微生物生物量通常指的是去除活的植物体(如植物的根系等)外,土壤中体积小于 $5\times10^3 \mu\text{m}^3$ 的生物总量(巢林等,2023)。土壤微生物生物量不仅是组成土壤有机质重要活性部分,而且与土壤养分循环(如碳循环、氮循环、磷循环等)、土壤有机质的分解、腐殖质的形成等息息相关(马守臣等,2015; 隽英华等,2023)。土壤微生物生物量作为土壤养分的储库,能够较好的衡量土壤肥力状况,逐渐受到研究者的关注(敖登等,2024)。对土壤微生物生物量进行研究有利于加强对土壤养分循环、转化的认识(陈国潮,1999),因此,土壤微生物生物量的高低能够反映土壤矿化水平,是体现土壤生态系统整体状况的重要指标。土壤呼吸能够反映土壤转化及氧化能力,特别是土壤基础呼吸,不仅可以体现土壤物质的代谢强度及特性,而且能反映土壤实际情况(苏永红等,2008)。随着放牧的影响,地上植被组成发生变化,因此土壤中的根系及土壤中生活的微生物组成、类群和活性也随之变化,因此,土壤基础呼吸也会发生变化。潘森(2024)研究表明,放牧导致土壤基础呼吸增强的主要原因有两方面,一方面,放牧干扰下草地覆盖度降低,使土壤表层温度增加;另一方面,放牧通过改变土壤养分分布及“碳供应”潜力进而对土壤基础呼吸产生影响。李国辉等(2010)研究发现,黄土高原7种典型植物根际土壤的微生物生物量碳、氮和基础呼吸均比非根际土壤高。迄今为止,关注放牧影响下土壤微生物活性变化的研究还较少。因此,了解土壤微生物活性的变化对于评估青藏高原地区高寒草地土壤质量状况具有重要意义。

本研究以青藏高原高寒草地作为对象,分析不同放牧强度影响下不同土层的土壤微生物活性的变化,旨在为该地区土壤养分质量及健康评价提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州西海镇($36^{\circ}44'N$ — $37^{\circ}39'N$, $100^{\circ}23'E$ — $101^{\circ}20'E$, 3150 m),该区年均温 1.5°C ,年降雨量400 mm,属高原大陆性气候。本研究区草地类型为草甸化草原,优势植物以矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)和干生薹草(*Carex xaridula*)为主(孙彩彩等,2023)。

1.2 试验设计与样品采集

本研究基于“青海省高寒草地-家畜系统适应性管理技术平台”开展，该平台位于青海省海北藏族自治州西海镇，于2014年开始建设，主要围绕国家生态文明战略和区域生态保护和畜牧业高质量发展的需求，通过“土-草-畜-人”非平衡系统多界面动态耦合与管理的研究，探究高寒草地适应性管理新途径，实现高寒草地生态系统健康及资源禀赋可持续管理的目标。放牧强度试验采用随机区组试验设计，包括4个处理，分别为无放牧（No grazing, CK，草地利用率为0%）、轻度放牧（Light grazing, LG，草地利用率为30%~35%）、中度放牧（Moderate grazing, MG，草地利用率为50%~55%）和重度放牧（Heavy grazing, HG，草地利用率为65%~70%），每个放牧处理3个重复，共计12个放牧小区，放牧家畜采用青藏高原特有家畜藏羊。放牧强度试验自2018年开始，持续至今，每年6—10月进行放牧，每月放牧时间为10天，剩余时间将放牧家畜赶至临近草地进行放牧（Zhou et al., 2023）。

本试验样品取样工作于2023年7月25日完成，在4个放牧处理，共12个放牧小区内，选取5 m×5 m的样地，根据“对角线法则”，使用土钻分别采集0~10、10~20和20~30 cm土层的土样，每个放牧小区各取5钻，将各放牧小区的土样充分混合后过2 mm筛，一部分风干进行土壤理化指标（土壤有机碳、pH值、速效磷）的测定，一部分在-4 °C冰箱进行低温保存，进行微生物生物量碳、氮、铵态氮和硝态氮的测定。

表1 放牧强度试验设计

Table 1 Experimental design of grazing intensity

处理 Treatments	藏羊头数 Number of Tibetan sheep(heads)	小区面积 Area of plot(hm ²)
无放牧 No grazing, CK	0	0.05
轻度放牧 Light grazing, LG	2	0.66
中度放牧 Moderate grazing, MG	2	0.51
重度放牧 Heavy grazing, HG	2	0.39

1.3 测定方法与指标计算

土壤微生物生物量碳（MBC）、氮（MBN）采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 提取-TOC 仪测定法（邓飘云等, 2019），换算系数分别为0.45和0.54；土壤基础呼吸（SBR）的测定参考吴金水等（2006）改进的密室密闭培养法测定。

土壤有机碳（SOC）通过元素分析仪（FLASHAMART）进行测定；土壤 pH 通过 pH 计进行测定；土壤铵态氮（NH₄⁺-N）和硝态氮（NO₃⁻-N）通过间断分析仪进行测定；土壤速效磷（AP）采用0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法法进行测定（鲍士旦, 2000）。

微生物熵（ q_{MB} ）和微生物代谢熵（ q_{CO_2} ）的计算公式如下（渠俊峰等, 2018）：

$$q_{MB}=MBC/SOC$$

$$q_{CO_2}=SBR/MBC$$

1.4 数据处理

本试验全部数据均经过正态性和方差齐性检验。通过单因素方差分析（One-way ANOVA）和多重比较（Duncan）比较不同放牧处理和不同土层间土壤理化性质、微生物生物量碳、氮、土壤基础呼吸等指教间的差异；通过 Pearson 相关性分析土壤理化性质与土壤微生物生物量碳、氮等指标间的关系。采用 SPSS 20.0 对数据进行统计分析，通过 Origin 2023b 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 放牧强度对土壤理化性质的影响

由图 1 可知, 不同放牧强度对不同土层土壤理化性质影响不同。在 0~10 cm 土层, CK 处理下土壤有机碳和土壤铵态氮含量显著高于其他处理; 土壤 pH 在 CK 处理显著低于其他放牧处理; 土壤硝态氮在 LG 处理下最高; 土壤速效磷随放牧强度的增加而呈增加的趋势。在 10~20 cm 土层, 土壤有机碳在各放牧处理间差异不显著; 土壤硝态氮、铵态氮和速效磷均表现为在 MG 处理最高。在 20~30 cm 土层, 土壤有机碳和硝态氮在各放牧处理间差异不显著; 土壤铵态氮在 LG 处理最高。

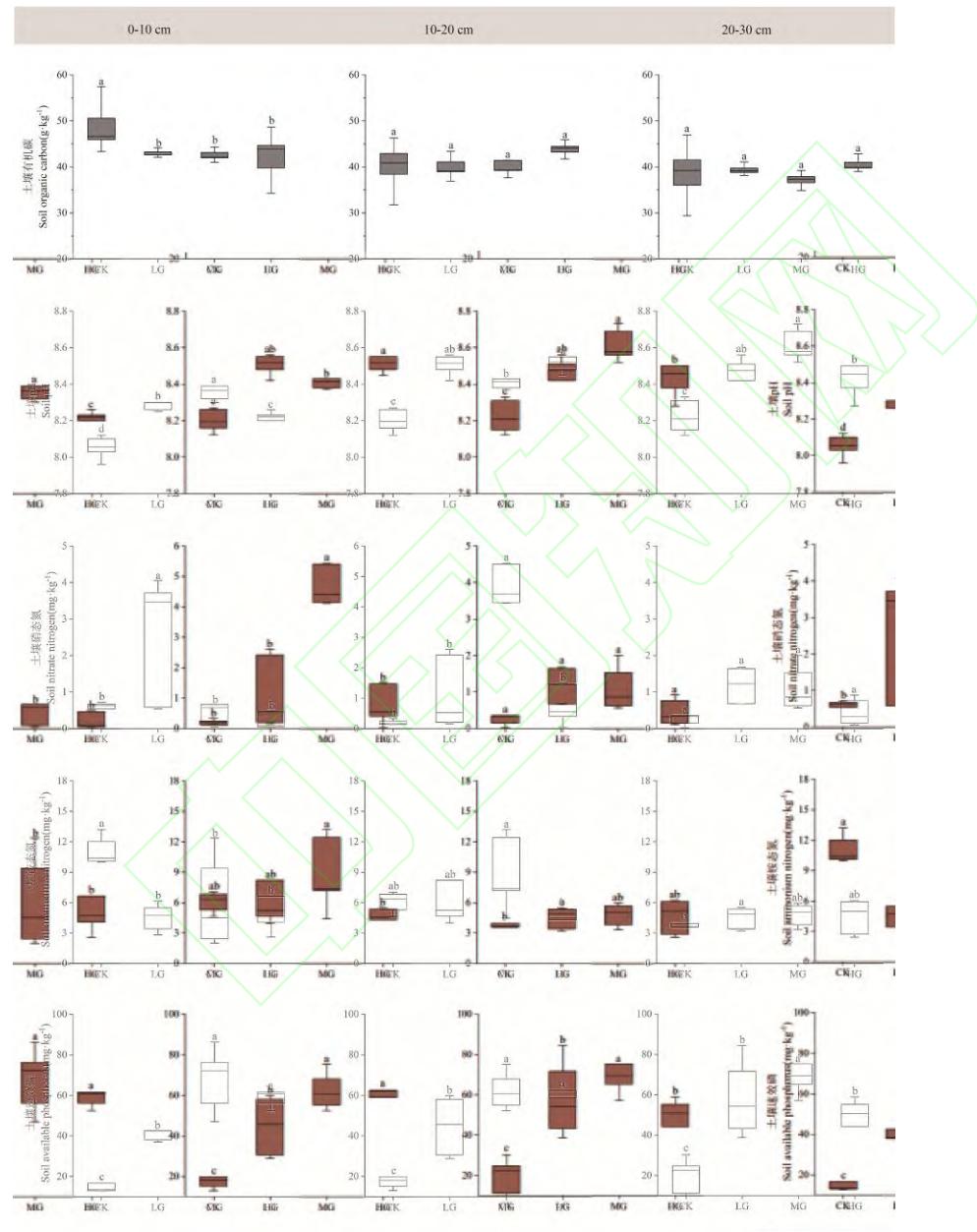


图 1 放牧对土壤理化性质的影响

Fig.1 Effect of grazing on soil physical and chemical properties

注: 图中不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different lowercase letters indicate significant differences between different treatments of the same soil layer ($P < 0.05$).

2.2 不同放牧强度土壤微生物生物量的特征变化

不同放牧强度显著影响土壤微生物生物量碳、氮(图 2)。随放牧强度的增加, 在各土

层土壤微生物生物量碳、氮均呈现降低的趋势。在0~10 cm土层，土壤微生物生物量碳的变化范围为404.44~748.49 mg·kg⁻¹，其中CK处理下微生物生物量碳显著高于其他放牧处理($P<0.05$)，而HG处理下微生物生物量碳最低；在10~20和20~30 cm土层，土壤微生物生物量碳其变化范围分别为135~525.57和115.93~334.02 mg·kg⁻¹，放牧强度越强，土壤微生物生物量碳越低，且各放牧处理间差异显著($P<0.05$)。在各放牧处理，土壤微生物生物量碳均在0~10 cm土层最高，随土壤深度的加深，土壤微生物生物量碳逐渐降低。

在0~10 cm土层，土壤微生物生物量氮在CK处理最高，为173.78 mg·kg⁻¹，HG处理最低，为101.73 mg·kg⁻¹；在10~20 cm土层，CK处理的土壤微生物生物量氮显著高于其他放牧处理($P<0.05$)；在20~30 cm土层，随放牧强度的增加，土壤微生物生物量氮逐渐降低。在各放牧处理，土壤微生物生物量氮均表现为0~10 cm土层最高，20~30 cm土层最低，在各土层间微生物生物量氮差异显著($P<0.05$)。

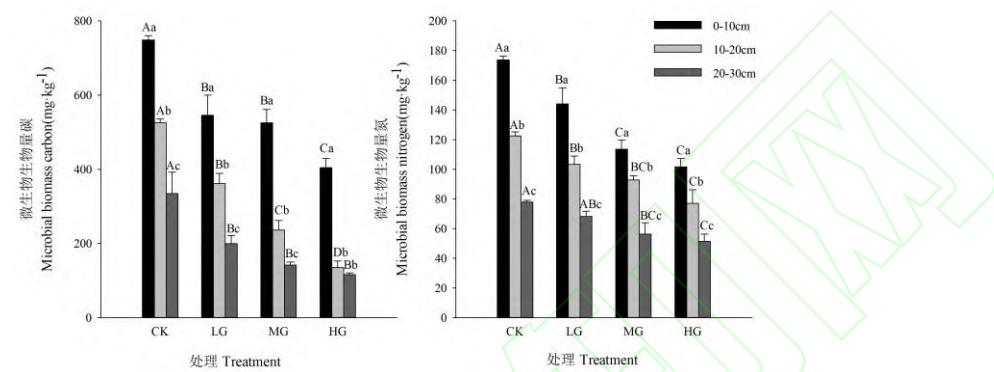


图2 不同放牧强度土壤微生物量的变化

Fig.2 Changes of soil microbial biomass at different grazing intensities

注：图中数据为平均值±标准误。不同大写字母表示同一土层不同处理间差异显著，不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著($P<0.05$)，下同。

Note: The data are average ± standard error. Different uppercase letters indicate significant differences between different treatments of the same soil layer, and different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers of the same treatment ($P<0.05$). The same below.

微生物熵指的是土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的比值，反映土壤中活性有机碳所占比例。在0~30 cm土层，微生物熵均表现为随放牧强度的增加呈现逐渐降低的趋势(图3)，其中在CK处理下微生物熵值最大，而在HG处理下微生物熵值最小。在CK处理，微生物熵在0~10和10~20 cm土层间差异不显著，但均显著高于20~30 cm土层($P<0.05$)；在LG和HG处理，微生物熵均随土层的加深而显著降低；在HG处理，0~10 cm土层的微生物熵显著高于其他土层。

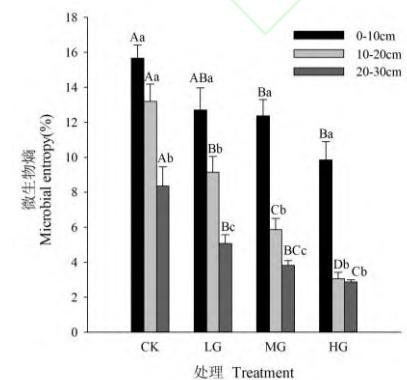


图3 不同放牧强度土壤微生物熵的变化

Fig.3 Changes of soil microbial entropy at different grazing intensities

2.3 不同放牧强度土壤基础呼吸和代谢熵的变化

图4显示，放牧对土壤基础呼吸和微生物代谢熵存在一定的影响。在0~10和20~30 cm

土层，土壤基础呼吸在各放牧处理间差异不显著；在 10~20 cm 土层，土壤基础呼吸在 CK 处理最高，HG 处理最低。在各放牧处理均表现为随放牧强度的增加土壤基础呼吸逐渐降低。

微生物代谢熵随放牧强度的增加而逐渐增大。在 0~10 cm 土层，微生物代谢熵在各放牧处理差异不显著；在 10~20 cm 土层，微生物代谢熵在 HG 处理最高；在 20~30 cm 土层，微生物代谢熵在 MG 处理最高。CK 和 HG 处理下，微生物代谢熵均表现为 10~20 cm 土层处理最高，而在 LG 和 MG 处理，微生物代谢熵随土层的加深而加大，但各土层间差异不显著。

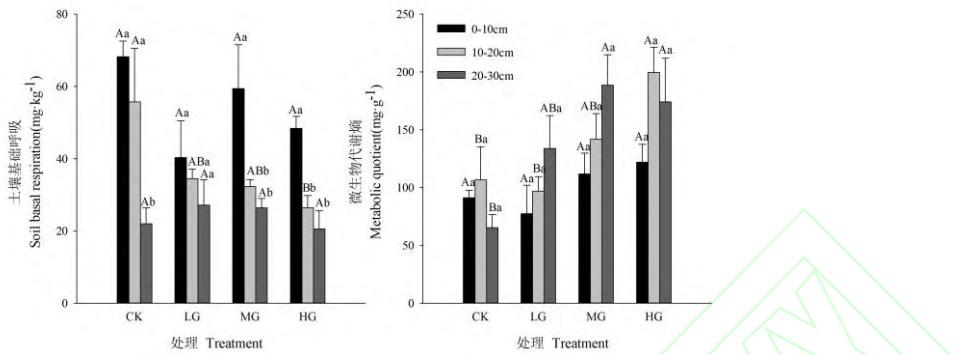


图 4 不同放牧强度土壤基础呼吸和代谢熵的变化

Fig.4 Changes of soil basal respiration and metabolic entropy at different grazing intensities

2.4 不同放牧强度下土壤理化性质与土壤微生物生物量指标的关系

由表 2 可知，CK 处理下，土壤有机碳与土壤微生物生物量碳、氮、基础呼吸呈正相关；pH 与土壤微生物生物量碳、生物量氮呈负相关 ($P<0.05$)；土壤铵态氮与土壤微生物生物量碳、氮、微生物熵呈显著正相关 ($P<0.01$)，与土壤基础呼吸呈正相关 ($P<0.05$)。LG 处理下，土壤有机碳与土壤微生物生物量碳、微生物熵呈正相关，与微生物生物量氮呈显著正相关；土壤速效磷与微生物代谢熵呈正相关 ($P<0.05$)。MG 处理下，土壤有机碳与土壤微生物生物量碳、氮、微生物熵呈正相关，而与微生物代谢熵呈负相关；土壤 pH 与土壤微生物生物量碳、氮、微生物熵呈显著负相关。HG 处理下，土壤 pH 与土壤微生物生物量碳、微生物熵呈显著负相关，而与微生物代谢熵呈显著正相关 ($P<0.01$)。

表 2 不同放牧强度土壤理化性质与土壤微生物生物量的相关分析

Table 2 Correlation analysis between soil physical and chemical properties and soil microbial biomass at different grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	指标 Index	SOC	pH	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	AP
CK	MBC	0.74*	-0.68*	0.65	0.95**	-0.30
	MBN	0.76*	-0.79*	0.66	0.97**	-0.24
	SBR	0.76*	-0.54	0.49	0.73*	-0.37
	q_{MB}	0.44	-0.56	0.41	0.83**	-0.11
LG	q_{CO_2}	0.52	-0.14	0.16	0.25	-0.28
	MBC	0.78*	-0.63	0.37	0.08	-0.52
	MBN	0.84**	-0.59	0.46	-0.02	-0.43
	SBR	0.28	-0.46	0.54	-0.38	0.20
MG	q_{MB}	0.71*	-0.59	0.39	0.10	-0.56
	q_{CO_2}	-0.51	0.19	-0.08	-0.47	0.78*
	MBC	0.76*	-0.81**	-0.36	-0.03	0.12
	MBN	0.87**	-0.87**	0.06	0.36	-0.09
	SBR	0.55	-0.66	-0.39	0.01	0.42

	q_{MB}	0.71*	-0.81**	-0.36	-0.05	0.16
	q_{CO_2}	-0.69*	0.69*	0.03	-0.21	0.37
HG	MBC	0.08	-0.83**	-0.39	0.57	0.19
	MBN	0.47	-0.64	-0.47	0.30	0.25
	SBR	0.12	-0.62	-0.27	0.38	0.43
	q_{MB}	-0.01	-0.84**	-0.39	0.60	0.14
	q_{CO_2}	0.07	0.85**	0.64	-0.22	0.35

注: *表示 $P<0.01$, **表示 $P<0.05$ 。MBC: 微生物生物量碳; MBN: 微生物生物量氮; SBR: 土壤基础呼吸; q_{MB} : 微生物熵; q_{CO_2} : 微生物代谢熵; SOC: 土壤有机碳; pH: 土壤 pH; NO_3^- -N: 土壤硝态氮; NH_4^+ -N: 土壤铵态氮; AP: 土壤速效磷。

Note: *indicates $P<0.01$, ** indicates $P<0.05$. MBC, Microbial biomass carbon; MBN: Microbial biomass nitrogen; SBR: Soil base respiration; q_{MB} : microbial entropy; q_{CO_2} : microbial quotient; SOC: Soil organic carbon; pH: soil pH; NO_3^- -N: soil nitrate nitrogen; NH_4^+ -N: soil ammonium nitrogen; AP: Soil available phosphorus.

3 讨 论

土壤微生物作为陆地生态系统中最丰富、最活跃的生物组分, 其生物量大小能够在一定程度上反映微生物对于养分的需求 (Zechmeister-Boltenstern *et al.*, 2015)。放牧作为高寒草地最重要的利用方式之一, 对草地生态系统的影响是复杂且多面的。由于放牧时间、放牧强度及草地类型等存在差异, 放牧对土壤微生物量的影响存在一定的分歧。通常放牧会使土壤微生物量降低(韦应莉等, 2018)。Qu 等 (2023) 以半干旱草原为对象, 研究重度放牧 6 年和 8 年后, 与未放牧草地相比, 草地微生物生物量分别降低了 24% 和 51%。王启兰等 (2008) 探讨了青藏高原高寒嵩草草甸不同放牧压力下土壤微生物量的变化, 研究发现, 随放牧压力的增加土壤微生物量显著降低。本研究发现, 在青藏高原高寒草地地区, 土壤微生物生物量碳和生物量氮随放牧强度的增加而显著降低。原因在于随放牧强度的增加, 土壤中根系生物量逐渐减少, 而根系分泌物有利于土壤微生物的生长和繁殖, 因此, 随放牧强度的增强, 土壤微生物生物量碳、氮含量逐渐降低。此外, 本研究还发现, 土壤微生物生物量随土层的加深而逐渐降低, 表现为 0~10 cm 土层的土壤微生物量最高, 这与已有研究结果相符。探究其原因是, 相比于 10~20 cm 土层, 0~10 cm 土层 (表层土) 土壤微生物更为活跃, 而且 0~10 cm 土层中根系分泌物和植物凋落物的有机质输入潜力更大(Liu *et al.*, 2012)。另外, 从土壤整体环境方面考虑, 相比于 0~10 cm 土层, 深层次土壤环境更加稳定, 因此, 受外界干扰相对更弱(彭晓茜等, 2016)。

通常, 土壤微生物熵作为生态生理指标, 用来评价环境的胁迫作用 (巢林等, 2023)。环境受到外界干扰后, 土壤微生物为了维持其生长需要消耗更多的能量, 对底物碳的利用率降低, 而 SOC 变化是缓慢的过程, 因此, 土壤微生物生物量碳降低, 微生物熵亦会降低 (周元等, 2020)。Anderson (2003) 以森林土壤作为对象, 研究酸化胁迫条件下土壤微生物的变化, 结果表明, 当微生物熵的值小于 2.0 时, 意味着微生物的生存空间会受到环境的胁迫。有研究表明, 土壤微生物生物量是影响微生物熵的关键(Cao *et al.*, 2021), 但也有研究表明, 气候环境 (如土壤温度、水分条件) 与微生物熵息息相关(Xu *et al.*, 2014)。可见, 影响土壤微生物熵的因子存在一定的不确定性。本研究中, 微生物熵随放牧强度的增强及土层的加深而降低, 这是由于放牧影响下, 土壤微生物的底物资源以及土壤环境逐渐恶化, 不利于土壤微生物的存活与生长, 进而导致微生物熵降低。

土壤基础呼吸是土壤有机碳矿化的主要指标之一, 是陆地生态系统碳循环过程的重要组成部分 (Yuan *et al.*, 2012)。土壤基础呼吸往往受到土壤理化性质特征的调控, 如土壤理化性质特征发生改变, 则会导致土壤微生物群落和养分代谢过程发生变化, 进而间接的调控

土壤基础呼吸过程 (Yuan *et al.*, 2019)。本研究中, 土壤基础呼吸在 0~10 和 20~30 cm 土层间差异不显著, 但在 10~20 cm 土层, 重度放牧不利于土壤基础呼吸, 说明放牧引起土壤微生物和土壤理化特征间的不平衡, 并未导致土壤基础呼吸速率发生显著的变化, 但是, 随放牧强度的增强, 土壤基础呼吸作用降低, 表明重度放牧不利于土壤微生物的基础呼吸。而微生物代谢熵能反映环境的变化及干扰对土壤微生物的影响, 微生物代谢熵越小, 表明形成单位微生物质量所呼出的 CO₂ 少, 土壤碳损失较少; 反之, 值越大, 表明土壤碳损失越多 (Brookes, 1995)。本研究中, 表层土 (0~20 cm) 的微生物代谢熵随放牧强度的增加, 表现为先降低后升高, 在轻度放牧处理下最低, 在重度放牧处理下最高, 这表明当土壤中微生物的生存环境受到外界干扰影响时, 将更多的碳用于维持自身的生长和发育。微生物代谢熵在各放牧强度处理(除无放牧处理)表现为微生物代谢熵在 10~30 cm 土层高于 0~10 cm 土层, 可能原因是相比于深层土, 表层土的熟化程度高, 土壤熟化程度越高, 微生物代谢熵越低(敖登等, 2024), 土壤微生物呼吸所消耗的碳少, 反映出土壤微生物对基质的利用效率高。

相关性分析表明, 土壤有机碳、铵态氮和 pH 是影响土壤微生物量等的重要非生物因素。土壤中氮元素是促进微生物生长的重要元素, 有利于加速土壤微生物残体的形成, 而微生物残体是土壤有机碳的重要来源 (Wang *et al.*, 2021)。另外, 相比于土壤硝态氮, 铵态氮向氨基糖的转化速率更高(李响等, 2012), 对微生物残体的分解与累积等作用产生影响(Cui *et al.*, 2020)。本研究中土壤 pH 与土壤微生物生物量碳、氮、微生物熵和微生物代谢熵间呈负相关关系, 与已有研究结果一致 (郭继勋等, 1996)。可能原因是土壤 pH 值较低时, 对土壤有机碳溶解产生影响, 加强了土壤中交换性铝离子的生物毒性, 引起土壤微生物群落发生改变, 降低土壤微生物生物量, 进而降低了土壤有机碳的分解。

4 结 论

放牧降低了土壤有机碳和土壤铵态氮含量。随放牧强度的增强和土层深度的增加, 土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮和微生物熵显著降低。各放牧处理的土壤基础呼吸均表现为表层土 (0~10 cm) 最高, 重度放牧处理显著的降低了 10~20 cm 土层的土壤基础呼吸。微生物代谢熵整体上随放牧强度的增加而加大。土壤有机碳、pH 值和铵态氮是影响土壤微生物量和基础呼吸的重要理化因子。

参考文献

- 敖 登, 贺琬婷, 冯程龙, 等. 2024. 青藏高原典型冰川小流域土壤微生物生物量及胞外酶活性的分布特征研究. 生态学报, **44**(4): 1-17.
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 巢 林, 曾 鑫, 欧梦菲, 等. 2023. 喀斯特山区不同土地利用方式对土壤微生物生物量、酶活性及其化学计量的影响. 山地学报, **41**(1): 28-40.
- 陈国潮. 1999. 土壤微生物量测定方法现状及其在红壤上的应用. 土壤通报, **30**(6): 284-287.
- 邓飘云, 周运超, 闫文德, 等. 2019. 年龄杉木林MB-P的调控因子. 水土保持研究, **26**(1): 260-265.
- 郭继勋, 祝廷成, 马文明, 等. 1996. 东北羊草草原土壤微生物与生态环境的关系. 草地学报, **4**(4): 240-245.
- 隽英华, 何志刚, 刘慧屿, 等. 2023. 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应. 土壤, **55**(6): 1223-1229.
- 李国辉, 陈庆芳, 黄懿梅, 等. 2010. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响. 生态学报, **30**(4): 976-983.
- 李 响, 何红波, 张 威, 等. 2012. 外源无机氮素形态对土壤氨基糖动态的影响. 应用生态学报, **23**(5): 1153-1158.
- 马守臣, 张合兵, 王 锐, 等. 2015. 煤矸石填埋场土壤微生物学特性的时空变异. 煤炭学报, **40**(7): 1608-1614.
- 潘 森. 2024. 放牧强度和畜种组合对高寒草甸土壤微生物养分代谢及土壤多功能性的影响(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 彭晓茜, 王 媛. 2016. 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. 微生物学通报, **43**(9): 1918-1930.
- 渠俊峰, 葛梦玉, 王 坤, 等. 2018. 邹城东滩矿区复垦土壤微生物量碳与基础呼吸的特征. 长江流域资源

- 与环境, **27**(8): 1858-1865.
- 任 强, 艾 驚, 胡 健, 等. 2021. 不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响. 生态学报, **41**(17): 6862-6870.
- 苏永红, 冯 起, 朱高峰, 等. 2008. 土壤呼吸与测定方法研究进展. 中国沙漠, **28**(1): 57-65.
- 孙彩彩, 董全民, 杨晓霞, 等. 2023. 牦牛和藏羊放牧对青藏高原高寒草甸土壤节肢动物群落的影响. 应用生态学报, **34**(11): 3127-3134.
- 王启兰, 王长庭, 杜岩功, 等. 2008. 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. 草业学报, **17**(2): 39-46.
- 韦应莉, 曹文侠, 李建宏, 等. 2018. 不同放牧与围封高寒灌丛草地土壤微生物群落结构PLFA分析. 生态学报, **38**(13): 4897-4908.
- 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 2006. 生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社.
- 杨晓霞, 赵新全, 董全民, 等. 2023. 青藏高原高寒草地适应性管理释义: 概念及实现途径. 科学通报, **68**(19): 2526-2536.
- 周 元, 陈远学, 蒋 帆, 等. 2020. 玉米地土壤微生物量碳、氮及微生物熵对不同物料还田的响应. 水土保持学报, **34**(2): 173-180.
- Anderson TH. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **98**: 285-293.
- Brookes PC. 1995. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, **19**: 269-279.
- Cao R, Yang WQ, Chang CH, et al. 2021. Soil microbial biomass carbon and freeze-thaw cycles drive seasonal changes in soil microbial quotient along a steep altitudinal gradient. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **126**: e2021JG006325.
- Chillo V, Ojeda RA, Anand M, et al. 2015. A novel approach to assess livestock management effects on biodiversity of drylands. *Ecological Indicators*, **50**: 69-78.
- Cui J, Zhu ZK, Xu XL, et al. 2020. Carbon and nitrogen recycling from microbial biomass to cope with C:N stoichiometric imbalance by priming. *Soil Biology and Biochemistry*, **142**: 107720.
- Liang M, Liang C, Hautier Y, et al. 2021. Grazing-induced biodiversity loss impairs grassland ecosystem stability at multiple scales. *Ecology Letters*, **24**: 2054-2064.
- Liu N, Zhang YJ, Chang SJ, et al. 2012. Impact of grazing on soil carbon and microbial biomass in typical steppe and desert steppe of Inner Mongolia. *PLoS ONE*, **7**: e36434.
- Qu Q, Wang Z, Gan Q, et al. 2023. Impact of drought on soil microbial biomass and extracellular enzyme activity. *Frontiers in Plant Science*, **14**: 1221288.
- Singh JS, Gupta VK. 2017. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. *Science of the Total Environment*, **634**: 497-500.
- Wang BR, An SS, Liang C, et al. 2021. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, **162**: 108422.
- Xu XF, Schimel JP, Thornton PE, et al. 2014. Substrate and environmental controls on microbial assimilation of soil organic carbon: A framework for Earth system models. *Ecology Letters*, **17**: 547-555.
- Yuan BC, Yue XD. 2012. Soil microbial and enzymatic activities across a chronosequence of Chinese pine plantation development on the Loess Plateau of China. *Pedosphere*, **22**: 1-12.
- Yuan XB, Niu DC, Gherardi LA, et al. 2019. Linkages of stoichiometric imbalances to soil microbial respiration with increasing nitrogen addition: Evidence from a long-term grassland experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, **138**: 170-180.
- Zechmeister-Boltenstern S, Keiblunger KM, Mooshammer M, et al. 2015. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations. *Ecological Monographs*, **85**: 133-155.
- Zhou QY, Dong QM, Wang FC, et al. 2023. Cascading effects of seed-stem individual spatial patterns along a grazing gradient. *Frontiers in Plant Science*, **15**: 1137726.

作者简介 孙彩彩, 女, 1998年生, 博士研究生, 主要研究方向为草地生态与环境保护研究。

E-mail: 1084399203@qq.com

责任编辑 魏中青