

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.025

朱时应, 黄倩, 李天顺, 等. 拉萨温性草原土壤原生动物群落对不同放牧强度的响应. 土壤, 2023, 55(4): 903–910.

拉萨温性草原土壤原生动物群落对不同放牧强度的响应^①

朱时应, 黄倩, 李天顺, 普布*

(西藏大学理学院生命科学系高原动物学实验室, 拉萨 850000)

摘要: 探究土壤原生动物对拉萨河谷温性草原不同放牧强度的响应, 可以动态监测草原生态环境的变化, 为保护青藏高原草原生态环境提供科学依据。本研究选取 5 年围封的温性草原进行为期 3 年的放牧试验, 于 2018 年 9 月采取不同放牧强度下的土壤样品进行土壤原生动物培养和鉴定(非淹没培养法、活体观察法)。结果表明: 供试样地共鉴定出土壤原生动物 46 属, 隶属于 2 门、12 纲、21 目和 36 科; 不同放牧强度下的土壤原生动物主要类群为旋毛纲(Spirotrichea); 不同放牧强度下土壤原生动物多样性指数(H 、 E 、 C 、 M)无显著差异($P>0.05$); Jaccard 相似性指数在极不相似到中等不相似之间; 样地 B3(禁牧)单独聚为一类, 说明其空间异质性较大; 全氮是影响土壤原生动物分布的主要环境因子, 土壤湿度、速效钾、电导率等环境因子共同影响不同放牧强度下土壤原生动物物种组成和分布。

关键词: 草原生态系统; 放牧强度; 土壤原生动物; 多样性; 环境因子

中图分类号: Q985.1 **文献标志码:** A

Response of Soil Protozoa Community to Different Grazing Intensities in Lhasa Valley Grassland

ZHU Shiyang, HUANG Qian, LI Tianshun, Pubu*

(Plateau Zoology Laboratory, Department of Life Sciences, School of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China)

Abstract: In this study, a 3-year experiment with different grazing intensities was conducted in a temperate grassland enclosed for 5 years in Lhasa Valley grassland in order to provide scientific evidence to conservation of grassland ecological environment on the Qinghai-Tibet Plateau. Soil samples were collected and soil protozoa were cultured and identified by non-submerged culture and in vivo observation in September of 2018. The results showed that a total of 46 soil protozoa genera were identified, belonging to 36 families, 21 orders, 12 classes and 2 phyla. The main group of soil protozoa was Spirotrichea under different grazing intensities. The diversity indexes (H , E , C , M) of soil protozoa had no significant difference under different grazing intensities ($P>0.05$), Jaccard similarity index ranged from extremely dissimilar to moderately dissimilar. Plot B3 (ban grazing) was clustered into a single category, indicating that the spatial heterogeneity was large. TN was the main environmental factor affecting the distribution of soil protozoa, the combined effects of soil water content (SWC), rapid available potassium (RAK), EC and other environmental factors affected the species composition and distribution of soil protozoa under different grazing intensities.

Key words: Grassland ecosystem; Grazing intensity; Soil protozoan; Diversity; Environmental factors

草原作为中国陆地最重要的生态系统之一, 生态功能价值巨大^[1], 在保护生物多样性、发展畜牧业、防止水土流失和维护生态平衡等方面发挥着重要作用^[2]。放牧是人类利用天然草原的主要方式^[3], 能够有效调节草原生态系统的生产力, 是对草原最经济、

最普遍的利用方式之一^[4]。家畜对草原的践踏、采食和排泄等行为不但能够调节植物凋落物周转率而且还可以促进土壤理化因子循环, 调节土壤微生物活性^[5]。但是草原生态系统对于不同程度放牧的响应不同, 高强度放牧显著影响植物和土壤动物群落多样

①基金项目: “一江四河”流域生物多样性调研与维持机制评价综合科学考察项目(藏财科教指〔2021〕1号和藏财科教指〔2019〕01号)和西藏大学研究生高水平人才培养计划项目(2020-GSP-S042)资助。

* 通讯作者(purbuzd@163.com)

作者简介: 朱时应(1996—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为动物生态学。E-mail: 1228284079@qq.com

性,导致其多样性下降,草原植被退化,加剧草原土壤荒漠化^[6-9],进而压迫生物的生存环境,导致其生物多样性进一步下滑^[10],不利于草原生态系统的可持续发展^[11];中度放牧强度下植物和土壤动物多样性指数最高,动植物多样性的提高缓解了放牧对于草原生态系统的压力^[12];轻度放牧则增加了土壤养分的含量^[13-16],改变了土壤有机碳的分布格局,促使土壤有机碳向下层土壤转移^[17]。

青藏高原面积的 33% 被草原覆盖^[18],是当地进行畜牧生产的基础^[19]。草原上生长着具有经济和药用价值的植物,是一个巨大的碳储库和诸多珍稀野生动物的栖息地,对维护青藏高原生态安全有着至关重要的作用。生活在土壤腐殖质中或者是土壤表面凋落物中的原生动物称之为土壤原生动物^[20]。土壤原生动物作为土壤有机整体的一部分^[21],个体微小、分布广、种类多,能够对土壤环境的微小变化作出积极且准确的响应^[22-23]。放牧将会导致土壤产生侵蚀作用,土壤环境发生改变^[24],进而影响土壤原生动物的物种组成和群落结构。因此,土壤原生动物对于不同放牧强度下的草原生态系统是一种理想的指示生物。本研究以拉萨河谷温性草原为研究对象,通过不同放牧强度的试验,探究土壤原生动物群落特征和环境因子对温性草原不同放牧强度的响应,以期对不同放牧强度下的草原生态系统变化提供基础研究数据,为保护青藏高原草原生态系统,促进草原生态系统可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于拉萨河上游彭波河流域第一农业大县林周县^[25]的卡孜乡白郎村境内,属于典型的高原季风半干旱气候区,太阳光辐射强,昼夜温差大,年降雨量在 440 mm 左右^[26],6—9 月为雨季,年平均气温 4.1℃^[27],无霜期 120 d^[28]。土壤土层较薄,平均厚度 25 cm,草原砾石土在研究区较为常见^[29]。温性暖干草原是研究区主要的草地类型,常见的植被有草沙蚕(*Tripogon bromoideas*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、劲直黄芪(*Astragalus strictus*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)等^[3];常见的动物有西藏飞蝗(*Locusta migratoria tibetensis*)、高原兔(*Lepus oiostolus*)、高原山鹑(*Perdix hodgsoniae*)等^[30]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 根据白朗沟地理环境特征将研究区域划分为 4 个采样区,即自牧(A)、禁牧(B)、中

牧(C)和重牧(D)4 种不同放牧强度。在 2016 年 7 月—2018 年 9 月进行放牧试验,每年的 7、8、9 月中旬各放牧 1 次,时间为 8 h。自牧为自然开放的放牧状态;禁牧为每公顷 0 只羊单位进行放牧;中牧为每公顷 1.6 只羊单位进行放牧;重牧为每公顷 2.47 只羊单位进行放牧^[31-32]。每个样区 3 个重复,共计 12 个样地。为避免客观因素带来的试验误差,试验羊为 2~3 龄健康、体重相近、性别一致的彭波细毛羊(本地绵羊)^[3]。不同放牧强度样地概况见表 1。

表 1 不同放牧强度样地概况

样地	海拔(m)	北纬	东经
A1	3 961	91°07'34"	29°52'24"
A2	3 943	91°07'34"	29°52'23"
A3	3 957	91°07'34"	29°52'23"
B1	3 958	91°07'34"	29°52'26"
B2	3 960	91°07'34"	29°52'25"
B3	3 962	91°07'34"	29°52'24"
C1	3 963	91°07'33"	29°52'23"
C2	3 954	91°07'33"	29°52'23"
C3	3 982	91°07'32"	29°52'23"
D1	3 956	91°07'33"	29°52'24"
D2	3 953	91°07'33"	29°52'25"
D3	3 956	91°07'33"	29°52'25"

1.2.2 采样方法 2018 年 9 月在每个样地(20 m × 20 m),用 GPS(型号:MAP 63lcsx)记录经纬度及海拔,采用梅花五点采样法选取 5 个样方(20 cm × 20 cm),拣去土壤表面的凋落物后用土壤墒情速测仪 T2S-2X 测定土壤表层温度(ST)和土壤湿度(SWC),用土壤养分速测仪 JN-QXM 测定全氮(TN)、有效磷(AP)、速效钾(RAK) 含量和电导率(EC),用土壤采集器采集 0~10 cm 土层土样,共获得 180(12 × 5 × 3)个样品。将采集好的土壤样品带回实验室,在牛皮纸上平整地铺开,为防止空气中漂浮的原生动物孢囊影响后续试验结果,用草纸覆盖,在干燥阴凉处自然风干 1 个月后将装入牛皮纸中备用。

1.2.3 土壤原生动物培养与鉴定 取 50 g 已风干的土壤样品于直径 15 cm 的培养皿中,在 25℃恒温培养箱中采用“非淹没培养皿法”^[33]培养土壤原生动物,即在培养皿中加入土壤浸出液,使土壤样品充分湿润但不被淹没。从第 2 天开始采用“活体观察法”^[34]进行形态学物种鉴定,并记录所鉴定物种的个体数,直到没有新的物种出现为止。土壤纤毛虫物种分类采用 Lynn^[35]的分类系统,土壤肉鞭虫物种分类采用 Levine 等^[36]分类系统。

1.3 数据处理与分析

在 Excel 2019 中对数据进行初步的处理，用 SPSS 21.0 对土壤原生动动物与环境因子之间进行单因素方差分析(One-way ANOVA)，并进行多重比较(Duncan 法)；运用 R 4.0.5 计算多样性指数(H 、 E 、 C 、 M)和相似性系数(Jaccard)^[37-38]；采用 Origin 2019b 作图；采用 Canoco 4.5 for Windows 对土壤原生动动物物种和环境因子进行去趋势对应分析(DCA)和典范对应分析(CCA)。

多样性指数(Shannon-Wiener):

$$H = -\sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \ln\left(\frac{n_i}{N}\right) \quad (1)$$

均匀度指数(Pieluo):

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (2)$$

优势度指数(Simpson):

$$C = \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N}\right)^2 \quad (3)$$

丰富度指数(Margalef):

$$M = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (4)$$

Jaccard 相似性系数:

$$J = \frac{c}{a+b-c} \quad (5)$$

式中： H 为物种多样性指数； n_i 为第 i 类群的个体数； N 为总个体数； S 为所有的类群数； c 表示两个样地中共同拥有的物种数； a 和 b 表示两个不同样地中各自拥有的物种数。相似性指数在 0~0.25 表示极不相似，在 0.25~0.5 表示中等不相似，在 0.5~0.75 表示中等相似，在 0.75~1 表示极相似。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度下土壤原生动动物群落组成

拉萨河谷温性草原 4 个放牧强度下，共鉴定出土壤原生动动物 46 属，隶属于 2 门、12 纲、21 目、36 科(表 2)。其中，优势类群为变形目(Amoebida)，共计 6 属，占总物种数的 13.043%；次优势类群为散毛目(Sporadotrichia)，共计 5 属，占总物种数的 10.870%；罕见类群为篮口目(Nassulida)、小胸目(Microthoracida)、瓶纤目(Armophorida)、楯纤目(Scuticociliatidae)、游仆虫目(Euplotidae)、异毛目(Hererotrichida)、领鞭目(Choanoflagellida)、尾滴目(Cercomonadida)、双滴目(Diplomonadida)和中阳目(Centrohelida)，共计 10 属，占总物种数的 21.74%。

表 2 拉萨河谷温性草原土壤原生动动物群落组成

门	纲	目	科	属	各目比例 (%)
纤毛门 Ciliophora	核残基纲 Karyorelictea	原口目 Protostomztida	颈毛虫科 Trachelocercea	颈毛虫属 <i>Trachelocerca</i>	4.348
			喙纤科 Loxodidae	喙纤虫属 <i>Loxodes</i>	
寡膜纲 Oligohymenophorea	膜口目 Hymenostomatida	四膜科 Tetrahymenidea	豆形虫属 <i>Colpidium</i>	4.348	
			舟形科 Lembadionidae	舟形虫属 <i>Lembadion</i>	
		帆口目 Pleuronematida	帆口科 Cyclidiidae	帆口虫属 <i>Pleuronema</i>	4.348
			膜袋科 Cyclidiidae	膜袋虫属 <i>Cyclidium</i>	
篮口纲 Nassophorea	篮口目 Nassulida	篮口科 Nassulidae	篮口虫属 <i>Nassula</i>	2.174	
		小胸目 Microthoracida	小胸虫科 Microthoracidae	拟小胸虫属 <i>Pseudomicrothorax</i>	2.174
裂口纲 Litostomatea	侧口目 Pleurostomatida	漫游虫科 Litonotidae	漫游虫属 <i>Litonotus</i>	6.522	
		裂口科 Amphileptidae	斜叶虫属 <i>Loxophyllum</i>		
			裂口虫属 <i>Amphileptus</i>		
		刺钩目 Haptorida	管叶科 Trachelophyllidae	管叶虫属 <i>Trachelophyllum</i>	8.696
瓶纤纲 Armophorea	瓶纤目 Armophorida	纤口虫属 <i>Chaenea</i>			
		长吻虫科 Lacrymariidae	长吻虫属 <i>Lacrymaria</i>		
		刀口虫科 Spathidiidae	刀口虫属 <i>Spathidiidae</i>		
		扭头科 Metopidake	扭头虫属 <i>Metopus</i>	2.174	
前管纲 Prostomatea	前管目 Prorodontida	裸口虫科 Holophryidae	裸口虫属 <i>Holophrya</i>	8.696	
			拟裸口虫属 <i>Pseudoholophrya</i>		
		斜板科 Plagiocampidae	板纤虫属 <i>Placus</i>		
	前管虫科 Prorodontidae	尾毛虫属 <i>Urotricha</i>			

续表 2

门	纲	目	科	属	各目比例 (%)
肉鞭门 Sarcomastigophora	肾形纲 Colpodea	肾形目 Colpodida	肾形科 Colpodidae	肾形虫属 <i>Colpoda</i> 拟肾形虫属 <i>Pseudocolpoda</i>	4.348
	旋毛纲 Spirotrichea	散毛目 Sporadotrichia	急游科 Strombidiidae 尖毛虫科 Oxytrichidae 尾柱虫科 Urostylidae 管柱科 Trachelophyllidae	急游虫属 <i>Strombidium</i> 棘尾虫属 <i>Stylonychia</i> 织毛虫属 <i>Histiculus</i> 斜毛虫属 <i>Plagiopyla</i> 殖口虫属 <i>Gonostomum</i>	10.870
		楯纤目 Scuticociliatidae	楯纤科 Aspidiscidae	楯纤虫属 <i>Aspidisca</i>	2.174
		游仆虫目 Euplotidae	游仆虫科 Euplotidae	游仆虫属 <i>Euplotes</i>	2.174
	异毛纲 Heterotricha	异毛目 Hererotrichida	旋口虫科 Spirostomidae	旋口虫属 <i>Spirostomum</i>	2.174
	动鞭纲 Zoomastigophorea	领鞭目 Choanoflagellida	领鞭科 Choanoflagellidae	单领鞭虫属 <i>Monosiga</i>	2.174
		尾滴目 Cercomonadida	尾滴科 Cercomonadidae	尾滴虫属 <i>Cercomonas</i>	2.174
		双滴目 Diplomonadida	六鞭科 Hexamitidae	锥滴虫属 <i>Trepomonas</i>	2.174
		泥生目 Pelobiontida	鞭变形科 Mastigamoebidae	无吻虫属 <i>Clautrivia</i> 小鞭虫属 <i>Mastigella</i> 叶鞭虫属 <i>Phyllomitus</i> 异鞭虫属 <i>Anisonema</i>	8.696
	太阳纲 Heliozoa	中阳目 Centrohelida	刺日科 Raphidiophryidae	刺孢虫属 <i>Acanthocystis</i>	2.174
		太阳目 Actinophryida	太阳科 Actinophryidae	光球虫属 <i>Actinosphaerium</i> 太阳虫属 <i>Actinophrys</i>	4.348
	叶足纲 Lobosea	变形目 Amoebida	哈氏科 Hartmannellida	哈氏虫属 <i>Hartmannella</i> 囊变形虫属 <i>Saccamoeba</i>	13.043
			甲变形科 Thecamoebidae	甲变形虫属 <i>Thecamoeba</i>	
			盘变形科 Discamoebidae	盘变形虫属 <i>Discamoeba</i>	
			条变形科 Striamoebidae	条变形虫属 <i>Striamoeba</i>	
			晶盘科 Hyalodiscidae	晶盘虫属 <i>Hyalodiscus</i>	

对不同放牧强度下土壤原生动物群落组成分析可知,中牧和重牧状态下的温性草原土壤原生动物主要类群是旋毛纲(Spirotrichea),分别占总物种数 41% 和 76%;其次为前管网(Prostomatea),分别占总物种数 34% 和 10%。禁牧和自牧状态下温性草原土壤原生动物主要类群为旋毛纲(Spirotrichea),分别占总物种数的 28% 和 61%;其次为肾形纲(Colpodea),分别占总物种数的 15% 和 20%(图 1)。

2.2 不同放牧强度下土壤原生动物多样性

对拉萨河谷温性草原土壤原生动物多样性指数 (H 、 E 、 C 、 M)进行单因素方差分析,结果显示,各多样性指数在不同放牧强度下无显著性差异 ($P>0.05$),但 H 、 E 、 C 指数均为中牧>禁牧>重牧>自牧, M 指数为重牧>中牧>禁牧>自牧(图 2)。

2.3 不同放牧强度下土壤原生动物群落相似性

Jaccard 相似性结果显示(图 3),不同放牧强度下

拉萨河谷温性草原 12 个样地相似性系数在 0.053 ~ 0.45,属于极不相似到中等不相似。位于极不相似的样品有 40 对,位于中等不相似的样品有 26 对,整体相似性程度不高,其中样地 D3 和 B3 的相似性程度最低,为 0.053;样地 A1 和 A2 的相似性程度最高,为 0.45。

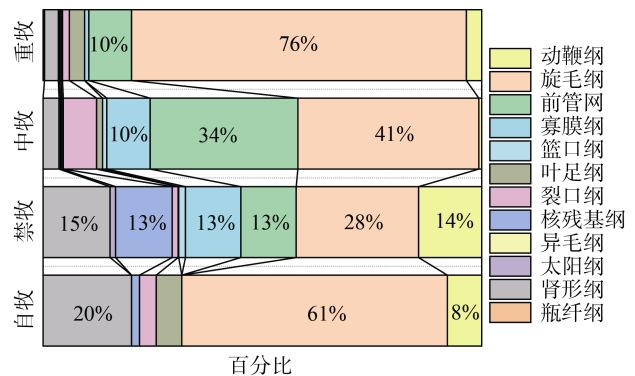


图 1 不同放牧强度下土壤原生动物群落组成

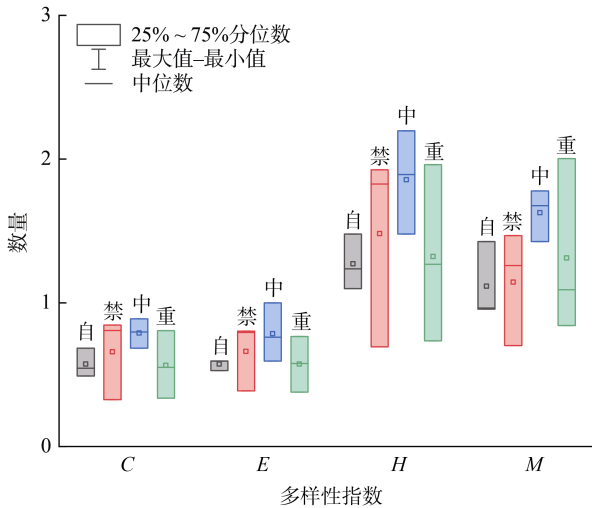


图 2 不同放牧强度下土壤原生动动物多样性指数

对不同放牧强度下 12 个样地基于欧式距离进行系统聚类, 结果(图 4) 显示, 12 个样地整体上聚为两大类, 样地 B3 单独聚为一类, 其他样地聚为一类。除样地 B3 外的其他样地又可分为两大类, 样地 A1、A2、A3、C2、D1 和 D3 聚为一类, 样地 B1、B2、C1、C3 和 D2 聚为一类。表明样地 B3 土壤原生动动物群落组成空间异质性较大。

2.4 不同放牧强度下的环境因子

统计分析结果(表 3)显示, SWC、ST、TN 和 AP 在不同放牧强度下具有不同程度的差异($P < 0.05$), EC 和 RAK 在不同放牧强度下没有差异性($P > 0.05$)。其中, 自牧状态下的 AP 含量和禁牧状态下的 TN 含量显著低于其他样地。

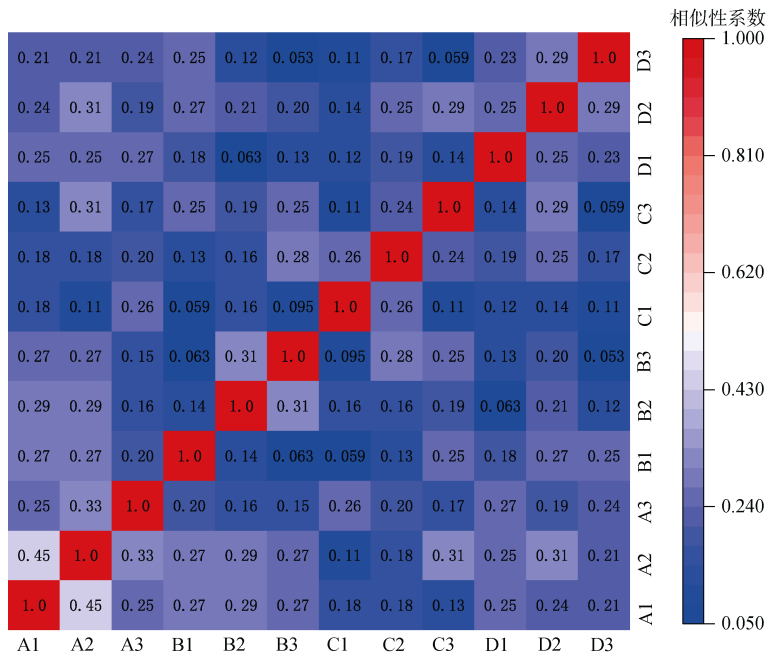


图 3 不同放牧强度下土壤原生动动物相似性

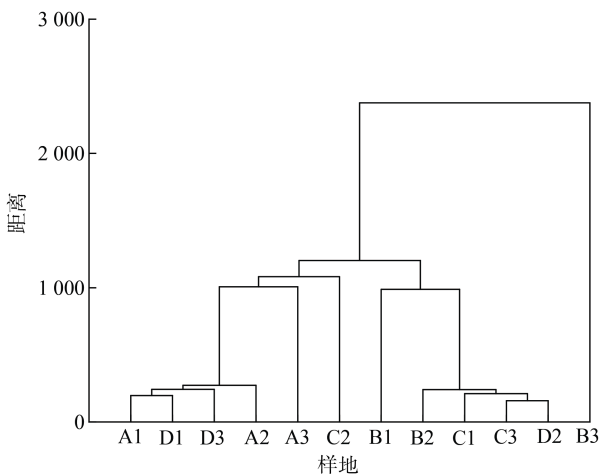


图 4 不同放牧强度土壤原生动动物聚类分析

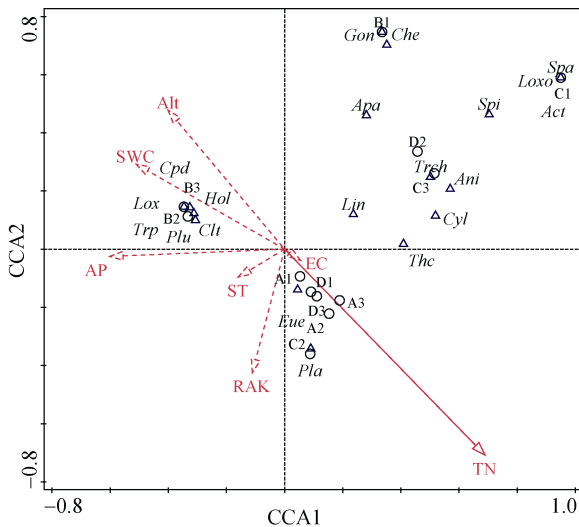
2.5 不同放牧强度下土壤原生动动物与环境因子的关系

去趋势对应分析结果显示, 排序轴长度大于 3, 可以使用单峰模型。本研究共筛选出 7 个环境因子包括海拔(Alt)、土壤湿度(SWC)、土壤温度(ST)、电导率(EC)、全氮(TN)、有效磷(AP)和速效钾(RAK)进行典范对应分析 (CCA), 并使用蒙特卡洛拟合的方法对环境因子进行显著性检验, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 轴 1 和轴 2 共同解释了物种变异的 32.99%, 说明轴 1 和轴 2 在一定程度上能够反映拉萨河谷温性草原不同放牧强度下的土壤原生动动物群落、不同放牧强度样地与环境因子的关系。TN($P=0.028$, $F=0.004$) 是显著解释变量, 解释了土壤原生动动物群落变异的

表 3 不同放牧强度下的环境因子

放牧强度	SWC(%)	EC(mS/cm)	ST(°C)	TN(mg/kg)	AP(mg/kg)	RAK(mg/kg)
自牧	17.35 ± 4.55 ab	0.34 ± 0.50 a	23.87 ± 7.70 a	2 583.33 ± 75.06 a	1.2 ± 0.17 b	67.67 ± 10.02 a
禁牧	24.33 ± 2.65 a	0.58 ± 0.06 a	18.43 ± 0.76 ab	167.67 ± 19.66 b	2.4 ± 0.95 ab	55.67 ± 8.08 a
中牧	23.88 ± 1.92 a	0.62 ± 0.05 a	15.53 ± 1.31 b	2 600 ± 240.62 a	2.13 ± 0.70 ab	63.33 ± 4.51 a
重牧	12.96 ± 9.04 b	0.58 ± 0.02 a	15.4 ± 0.66 b	2 546.67 ± 72.34 a	2.93 ± 1.21 a	66.67 ± 10.05 a

注：SWC 为土壤湿度；EC 为电导率；ST 为土壤温度；TN 为全氮；AP 为有效磷；RAK 为速效钾；同列不同的小写字母代表不同放牧强度间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。



(Gon: 殖口虫属一种, *Gonostomum* sp.; Che: 纤口虫属一种, *Chaenea* sp.; Apa: 楯纤虫属一种, *Aspidisca* sp.; Spa: 刀口虫属一种, *Spathidiidae* sp.; Loxo: 斜叶虫属一种, *Loxophyllum* sp.; Lox: 喙纤虫属一种, *Loxodes* sp.; Spi: 旋口虫属一种, *Spirostomum* sp.; Act: 光球虫属一种, *Actinosphaerium* sp.; Trch: 管叶虫属一种, *Trachelophyllum* sp.; Ani: 异鞭虫属一种, *Anisonema* sp.; Lin: 漫游虫属一种, *Litonotus* sp.; Cyl: 膜袋虫属一种, *Cyclidium* sp.; Thc: 甲变形虫属一种, *Thecamoeba* sp.; Cpd: 拟肾形虫属一种, *Pseudocolpoda* sp.; Hol: 裸口虫属一种, *Holopphrya* sp.; Trp: 锥滴虫属一种, *Trepomonas* sp.; Plu: 帆口虫属一种, *Pleuronema* sp.; Clt: 无吻虫属一种, *Clautrivia* sp.; Eue: 游仆虫属一种, *Euplotes* sp.; Pla: 板纤虫属一种, *Placus* sp.)

图 5 不同放牧强度下土壤原生动物与环境因子的关系

16.2%，是影响不同放牧强度下土壤原生动物群落分布的主要环境因子，用实线表示，其他的环境因子用虚线表示。代表 TN 的箭头长度最长，说明 TN 对于不同放牧强度下的土壤原生动物群落变化影响最大。样地 B1、B2、B3 投影点与代表 SWC 的箭头距离最近，说明 SWC 是影响该样地的主要环境因子；样地 A1、A2、A3、C3、D1、D2、D3 投影点与代表 EC 的箭头距离最近，说明 EC 对该样地的影响最大；样地 C2 投影点与代表 RAK 的箭头距离最近，说明 RAK 对该样地的影响最大；样地 C1 投影点与代表 TN 的箭头距离最近，表明 TN 是影响该样地的主要环境因子。SWC 与 *Cpd*、*Lox*、*Trp* 等呈最大的正相关关系，

TN 与 *Eue*、*Pla* 呈最大的正相关关系，EC 与 *Thc*、*Lin*、*Ani* 等呈最大的正相关关系，说明 SWC、TN、EC 是影响拉萨河谷温性草原不同放牧强度下土壤原生动物种的主要环境因子。

3 讨论

土壤原生动物作为土壤动态变化的指示生物，对于土壤环境的微小变化都会作出积极的响应^[22]。优势类群作为群落特征重要的组成部分，对于土壤动物群落结构具有明显的控制作用^[39-40]。随着放牧强度的下降，草原生态系统承载力增强，土壤原生动物的群落逐渐复杂化，由肾形纲(Colpodea)R-对策逐渐向旋毛纲(Spirotrichea)K-对策转变^[23]。但是青藏高原作为中国生态屏障，生态环境良好，在大环境下不同放牧强度的土壤原生动物都以旋毛纲为主要类群。不同的放牧强度会对草原生态系统的生物量和物种组成产生不同的影响^[41-42]，这导致不同放牧强度下的土壤原生动物群落相似性低，其中 D3 和 B3 样地的群落相似性最低，原因是重牧和禁牧两种极端的放牧形式下土壤原生动物物种组成差异较大，而且样地 B3 的土壤湿度显著高于其他样地，这导致 B3 样地与其他样地分离单独聚为一类。中度放牧模式下植被群落覆盖度和土壤养分都能够维持在较高水平^[3]，植物群落多样性指数(H、C)在此达到最大值^[43]，土壤原生动物作为土壤有机体的一部分，其多样性指数(H、E、C)随着植被盖度和土壤养分的增加而达到最大值。重度放牧能够显著降低草原植被高度和生物多样性^[19]。重牧条件下即高干扰强度下对土壤原生动物的影响增加，总个体数降低，导致重牧强度下的原生动物丰富度指数(M)较高于其他放牧强度。

不同放牧强度下的草原生态系统土壤环境因子高低不同，自牧状态下的土壤有效磷含量和禁牧状态下的土壤全氮含量显著低于其他放牧强度的样地，自牧状态下畜牧粪便增加了土壤有机质的含量，有机质含量过高直接导致土壤对磷酸根的固定作用显著降低^[44]，从而使自牧状态下的土壤有效磷含量显著低

于其他放牧样地。植被和生物量使土壤全氮的含量在一定水平上保持稳定,土壤有机质的生物积累和水解作用能够显著影响土壤全氮的含量^[45-46],禁牧状态下的草原生态系统缺少畜牧粪便有机质的添加,导致禁牧状态下的土壤全氮含量显著低于其他放牧强度样地。大多数的土壤动物生活在土壤孔隙水中,其生命活动的产生依赖于土壤水分的可获得性^[47],土壤原生动动物生长繁殖的主要限制因子是土壤湿度^[48],禁牧状态下样地 B1、B2、B3 没有畜牧的侵扰,草地植被较其他放牧强度的样地更为茂盛,避免了阳光直接照射土壤表面所造成的水分大量蒸发,因此土壤湿度对于禁牧样地的影响最大。其他不同强度的放牧样地由于畜牧的干扰,在畜牧粪便的作用下,土壤中的有机质含量增加,而土壤有机质能够影响土壤中其他理化因子的水平。土壤中的全氮和速效钾能够提供土壤原生动动物生长繁殖所必需的营养^[30],土壤电导率与土壤 pH 有着密切的关系,土壤电导率高的土壤 pH 往往比较低^[49],土壤原生动动物对于环境的变化异常敏感,过高、过低的土壤 pH 都能够影响土壤原生动动物的生存繁殖。因此,土壤湿度、全氮、速效钾、电导率等环境因子的共同作用影响着不同放牧强度下土壤原生动动物的物种组成和分布。

4 结论

不同放牧强度下拉萨河谷温性草原共鉴定出土壤原生动动物 46 属,其中主要类群为旋毛纲(Spirotrichea);单因素方差分析显示,土壤原生动动物多样性指数(H 、 C 、 E 、 M)在不同放牧强度下无显著性差异($P>0.05$);相似性指数在极不相似到中等不相似之间,样地间物种组成差异较大,空间异质性强;全氮是不同放牧强度下土壤原生动动物物种组成和分布的主要影响因素。

参考文献:

- [1] 张海军. 草原资源的保护与可持续发展[J]. 中国牧业通讯, 2007(13): 35-36.
- [2] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [3] 向明学, 郭应杰, 古桑群宗, 等. 不同放牧强度对拉萨河谷温性草原植物群落和物种多样性的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 668-674.
- [4] 刘勇, 张雅雯, 南志标, 等. 天然草地管理措施对植物病害的影响研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4211-4220.
- [5] 曹淑宝, 刘全伟, 王立群, 等. 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.
- [6] 宋洁, 王凤歌, 温璐, 等. 放牧对温带典型草原植物物种多样性及土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1694-1701.
- [7] 武崎, 吴鹏飞, 王群, 等. 放牧强度对高寒草地不同类群土壤动物的群落结构和多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1826-1834.
- [8] 丁成翔, 杨晓霞, 董全民. 青藏高原高寒草原放牧方式对植被、土壤及微生物群落的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 159-169.
- [9] 李东丽. 草原荒漠化的成因及防治对策[J]. 林业科技情报, 2020, 52(1): 16-18.
- [10] 张宇, 王露雨, 向昌林, 等. 不同放牧强度对赛罕乌拉草原蜘蛛多样性的影响[J]. 生物多样性, 2021, 29(4): 467-476.
- [11] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 510-516.
- [12] 刘颖, 王德利, 王旭, 等. 放牧强度对羊草草地植被特征的影响[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 22-28.
- [13] 何贵永, 孙浩智, 史小明, 等. 青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 12-20.
- [14] 李瑞华, 李晓兵, 王宏, 等. 内蒙古典型草原放牧压力评价及土壤 N 储量响应[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 758-768.
- [15] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 等. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 11-18.
- [16] 靳茗茗, 徐增让, 成升魁. 藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8753-8762.
- [17] 张静妮, 赖欣, 李刚, 等. 贝加尔针茅草原植物多样性及土壤养分对放牧干扰的响应[J]. 草地学报, 2010, 18(2): 177-182.
- [18] 曹广民, 张金霞, 赵新全, 等. 草毡寒冻锥形土壤 CO₂ 释放量估测方法初探[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 261-267.
- [19] 高成芬, 张德罡, 王国栋. 不同强度短期放牧对高寒草甸植被特征的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(5): 9-15.
- [20] 陈素芳, 徐润林. 土壤原生动物的研究进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(S1): 187-194.
- [21] 崔振东, 庞延斌, 张作人. 土壤原生动动物[J]. 动物学杂志, 1989, 24(2): 43-47.
- [22] 宁应之, 万贯红, 杨元罡, 等. 甘肃省徽县不同退耕还林模式下土壤纤毛虫群落特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1697-1706.
- [23] 宁应之, 周小燕, 烟郑杰, 等. 土壤纤毛虫群落对退牧还草生态恢复的响应——以玛曲县为例[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2386-2395.
- [24] 郭嘉华, 王立新, 张景慧, 等. 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): 832-840.
- [25] 关卫星, 罗黎鸣, 张思源. 西藏林周县河谷农区饲草种植试验初探[J]. 西藏农业科技, 2021, 43(3): 62-65.
- [26] 罗黎鸣, 武建双, 余成群, 等. 拉萨河谷山地灌丛草地植物多样性监测方法的比较研究[J]. 草业学报, 2016,

- 25(3): 22–31.
- [27] 张晓庆, 金艳梅, 武俊喜, 等. 拉萨河谷冬春季放牧与舍饲彭波半细毛羊牧草、血液及被毛矿物质含量[J]. 中国草地学报, 2019, 41(3): 124–129.
- [28] 金艳梅, 武俊喜, 吴洪新, 等. 补饲对西藏彭波半细毛羊产肉性能的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(5): 15–18.
- [29] 郭应杰, 罗黎鸣. 拉萨河谷天然草地空间异质性调查——以林周白草草原为例[J]. 西藏农业科技, 2017, 39(3): 45–48.
- [30] 王壮壮, 朱时应, 张秋涵, 等. 亏祖山秋季不同海拔土壤纤毛虫优势种生态位及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3494–3503.
- [31] 赵卫, 沈渭寿, 刘波, 等. 西藏地区草地承载力及其时空变化[J]. 科学通报, 2015, 60(21): 2014–2028.
- [32] 李祥妹, 赵卫, 黄远林. 基于生态系统承载能力核算的西藏高原草地资源区划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(1): 167–173.
- [33] Foissner W. Estimating the species richness of soil protozoa using the “non-flooded petri dish method” // Lee J J, Soldo A, eds. *Protocols in Protozoology*[M]. Lawrence: Allen Press, 1992.
- [34] Wilbert N. Eine verbesserte technik der protargolimpragnation für ciliaten[J]. *Mikrokosmos*. 1975, 64: 171–179.
- [35] Lynn D. *The ciliated Protozoa: Characterization, classification, and guide to the literature*[M]. 3rd ed. New York: Springer, 2010.
- [36] Levine N D, Corliss J O, Cox F E G, et al. A newly revised classification of the *Protozoa*[J]. *The Journal of Protozoology*, 1980, 27(1): 37–58.
- [37] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231–239.
- [38] Pielou E C. *Ecological diversity*[M]. New York: Wiley, 1975.
- [39] 王壮壮, 贺凯, 朱时应, 等. 年楚河流域康马县高寒草地土壤节肢动物多样性研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, 44(6): 76–84.
- [40] 王壮壮, 李天顺, 朱时应, 等. 热振森林大型土壤动物群落特征及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3392–3402.
- [41] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 244–264.
- [42] 王立红, 王悦, 王德凯, 等. 放牧对小叶锦鸡儿种群数量特征的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 800–806.
- [43] 贾子金, 乌云娜, 霍光伟, 等. 植物群落结构特征对不同放牧强度的响应——以呼伦贝尔草原为例[J]. 大连民族大学学报, 2017, 19(3): 193–197, 277.
- [44] 余旋, 朱天辉, 刘旭. 不同解磷菌剂对美国山核桃根际微生物和酶活性的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 117–123.
- [45] 王国会, 王建军, 陶利波, 等. 围封对宁夏荒漠草原土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(1): 76–81.
- [46] 孟婷婷, 武丹. 靖边县北部风沙区低效林地土壤全氮分布特征[J]. 农业与技术, 2022, 42(10): 76–79.
- [47] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, et al. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 37–44.
- [48] 刘旻霞, 李全弟, 蒋晓轩, 等. 兰州市北山不同林地春夏季土壤纤毛虫群落特征[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 3955–3967.
- [49] 杨笑笑, 刘信宝, 陈震, 等. 土壤盐度影响甜高粱生长发育及脱盐因素分解的研究[J]. 中国草地学报, 2022, 44(5): 73–81.