

甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化

姚宝辉^{1,2}, 王缠^{1,2}, 张倩^{1,2}, 孙小妹^{2,3},
杨晶^{1,2}, 蔡志远^{1,2}, 郭怀亮^{1,2}, 苏军虎^{1,2}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学—新西兰梅西大学草地生物多样性研究中心, 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要: 研究甘南高寒草甸退化草地土壤理化性质和微生物数量动态变化特征, 为退化草地改良修复提供理论依据。于2017年5、7、10月分别采集极度(ED)、中度(MD)和轻度(LD)退化草地, 以及未退化的对照草地(CK)土壤, 测定其理化特性及微生物数量特征。结果表明: CK的土壤含水量在5、7月均显著小于LD、MD和ED的土壤含水量, 而在10月显著大于LD、MD和ED的土壤含水量; 随着退化程度的加剧, 土壤pH逐渐增大, 有机碳、全氮和全磷含量逐渐减小; 土壤细菌数量对草地的退化反映更敏感, 放线菌次之, 真菌最小; CK和LD的土壤微生物数量随土层深度下降更为明显; 冗余分析结合蒙特卡罗置换检验结果发现, 各月份影响微生物数量的环境因子不同, 显著影响5月微生物数量的是土壤全磷和土壤含水量, 而7月除土壤pH外, 其余指标均有显著影响, 10月除土壤pH和土壤碳氮比外, 植被盖度和生物量等均有显著影响。可见, 甘南高寒草甸土壤理化特征和三大微生物数量对退化程度的响应具有季节差异, 不同时期影响因素和权重需在草地管理中予以重视。

关键词: 甘南退化草地; 土壤理化性质; 土壤微生物数量; 冗余分析

中图分类号: S812.2; S182 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0138-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.021

Dynamic Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Microbial Quantity During the Degradation of Gannan Alpine Meadow

YAO Baohui^{1,2}, WANG Chan^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, SUN Xiaomei^{2,3},
YANG Jing^{1,2}, CAI Zhiyuan^{1,2}, GUO Huailiang^{1,2}, SU Junhu^{1,2}

(1. College of Grassland Science, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2. Gansu Agricultural University-Massey University Research Centre for Grassland Biodiversity, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 3. College of Resource and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The aim of the current study was to examine the dynamic changes of soil physicochemical properties and microbial quantities, and to provide theoretical basis for the improvement and restoration of the degraded grassland in Gannan alpine meadow. The soil samples were collected from light degradation (LD), moderate degradation (MD), extreme degradation (ED) and control grassland (CK) in May, July and October, 2017, to investigate the physicochemical characteristics and the microbial quantities. The results showed that the soil water content of CK was significantly lower than that of the degraded grassland in May and July, while significantly higher than that of the degraded grassland in October. With the aggravation of degradation degree, soil pH value gradually increased, while the content of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus gradually decreased. The number of soil bacteria was more sensitive to grassland degradation, followed by actinomycetes and fungi. The soil microbial quantities of CK and LD decreased more obviously with the increasing of soil layer depth. Redundancy analysis and the Monte Carlo permutation test

收稿日期: 2018-12-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(31460566, 31760706); 甘肃省杰出青年基金项目(1606RJDA314); 甘肃农业大学“伏羲杰出人才”培育项目(Gaufx-02J03); 甘肃农业大学学科建设专项(GSAU-XKJS-2018-003)

第一作者: 姚宝辉(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事草地生态与草地保护研究。E-mail: 735310030@qq.com

通信作者: 苏军虎(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事草地生态与草地保护研究。E-mail: sujh@gsau.edu.cn

showed that the environmental factors affecting soil microbial quantities were different in each month. Soil microbial quantities were significantly affected by total phosphorus and soil water content in May, while other factors except soil pH had significant effects in July. Except soil pH value and C/N, vegetation coverage, aboveground and underground biomass and other environmental factors had significant effects in October. All of the above results revealed that the responses of soil physicochemical characteristics and soil microbial quantities to grassland degradation had seasonal variation in Gannan alpine meadow, the influencing factors and weights in different periods also needed to be paid attention to in grassland management.

Keywords: Gannan degraded grassland; soil physical and chemical properties; soil microbial quantity; redundancy analysis

草地是陆地生态系统的重要组成部分,在涵养水源、生物多样性保护和碳素循环过程等方面起着重要的生态屏障作用^[1]。随着草地畜牧业的迅速发展和人类活动对草地资源的过度开发利用,以及全球变暖、草原鼠虫害等的影响,加之对草地生态系统缺乏相应的保护和有效建设,使得原有的草地植被遭到破坏,草地“三化”不断扩展,生态屏障功能下降,已经威胁到生态环境平衡、生物多样性保护和畜牧经济的发展^[2-3]。据统计,甘南州天然草地总面积约 272 万 hm^2 ,目前甘南退化草地面积高达总面积的 70% 以上,其中重度、中度退化草地占退化草地的 30%,退化草地的修复与管理迫在眉睫^[4]。

土壤微生物作为草地地下生态系统最大的资源库,是土壤系统中各种生物进程的主要推动者,土壤中的微生物数量巨大、种类繁多,繁殖速度快、活动强度大,是联系不同圈层物质循环与能量流动的重要纽带,参与着土壤中各种生物化学作用。由于土壤微生物对土壤质量的变化反应敏感,能够较早地指示草原生态环境变化和生态系统功能的变化^[5]。

近年来,高寒草甸退化草地相关研究工作引起了极大重视。周华坤等^[6]发现,随着退化程度的加剧,黄河源区高寒草原土壤湿度、土壤有机质、速效磷等逐渐减小。卢虎等^[7]研究表明,随着草地退化程度的加重东祁连山高寒草地植被种类减少、优势种改变,植物群落高度、盖度、地上生物量显著降低,土壤微生物生物量碳、氮减少。彭岳林等^[8]对藏北高寒草原研究发现,不同退化阶段土壤微生物的变化规律各不相同。魏卫东等^[9]研究表明,三江源区高寒草甸土壤温度、容重、含水量,以及全氮、有效氮、全磷和有机碳等与高草甸退化相关程度更高,且具有极显著相关关系。类似的这些研究为阐明草地退化成因以及相关管理措施的选择提供了重要依据。而对甘南地区高寒草甸退化草地的研究主要集中于草地退化的影响因素^[10-11]以及修复措施等方面^[12],而对植被(地上生物量、地下生物量和地上植被群落组成)和土壤理化性质及退化过程中土壤微生物的变化规律研究不足,

且大多研究主要集中于某一季节的特征^[13],单一季节的相关研究不能揭示动态特征,受气候因素影响也较大(如降雨量等),存在很多偶然性。本试验通过甘南高寒草甸退化草地植被的不同生长时期(返青期、生长盛期和枯黄期),分析草地退化过程中土壤理化性质和土壤微生物数量的季节动态变化规律,加深对甘南高寒草甸退化过程和机理的认识,为高寒草甸恢复与重建提供新思路及理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

试验区位于甘肃省甘南藏族自治州碌曲县尕海乡($34^{\circ}14'07''-34^{\circ}48'48''$ N, $102^{\circ}10'80''-102^{\circ}58'15''$ E),年平均气温 1.2°C ,无绝对无霜期,年降水量为 $632\sim 781$ mm,年均日照时间 $2\ 200\sim 2\ 400$ h,年蒸发量 $1\ 000\sim 1\ 500$ mm,降水主要集中于 5—9 月,海拔 $3\ 400\sim 3\ 600$ m^[14]。

从试验期 2017 年 6 月中旬以来,碌曲县降水量减少幅度较为明显,且持续偏少五成以上天数达到 40 天以上;碌曲县降水量与历年同期值相比 6 月中旬偏少 77%,6 月下旬偏少 93%,7 月上旬偏少 56%,7 月中旬偏少 100%^[15]。

根据《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级标准》(GB 19377—2003)^[16],以及研究区草地退化程度,将甘南草原研究区的草地分为轻度退化(light degradation, LD)草地植被盖度 75%~80%、中度退化(moderate degradation, MD)草地植被盖度 50%~75%和极度退化(黑土滩)(extreme degradation, ED)草地植被盖度 $<50\%$,3 个演替阶段和 1 个对照组(正常草地,CK)草地植被盖度 $\geq 90\%$,样地具体情况见表 1。

1.2 样品采集

分别于 2017 年 5 月下旬(草地植被返青期)、7 月下旬(草地植被生长盛期)和 10 月下旬(草地植被枯黄期)采集调查地区的土样。因土壤微生物数量多集中于上层土壤中,0—10 cm 为土壤表层,10—20 cm 为土壤亚表层。本试验只采集 0—30 cm,研究土壤表层和亚表层对退化程度的响应异同^[8]。各样地

内采用五点法,分别采集 0—30 cm 土样,每层 10 cm,分 3 层(0—10,10—20,20—30 cm),同一土层混合均匀,利用四分法的方式取适量土样,封装好写好

标签,放入冰盒,并及时带回实验室测定微生物数量;风干(自然晾干,避免阳光暴晒),然后用于土壤理化特性的测定与分析。

表 1 样地基本情况

退化程度	物种组成	植被盖度/%	地下生物量/ (g·m ⁻²)	地上生物量/ (g·m ⁻²)	优势种
CK	莎草科、禾本科、豆科草地	90(≥90)	2455.36	3125.41	苔草(<i>Carex supina</i>)、冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)、垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)、黄花苜蓿(<i>Medicago falcata</i>)
LD	莎草科、禾本科草地	75(75~80)	1898.67	2475.12	苔草、垂穗披碱草
MD	杂类草草地	50(50~75)	639.11	1581.74	鹅绒委陵菜(<i>Potentilla anserina</i>)、密花香薷(<i>Elsholtzia densa</i> Benth.)
ED	少量杂类草、沙化土地	20(<50)	254.27	704.83	箭叶橐吾(<i>Ligularia sagitta</i>)

1.3 试验方法

土壤理化性质:土壤全氮采用 H₂SO₄—NaSO₄:CuSO₄:Se 催化法消煮,用半微量凯氏定氮法测定;土壤全磷测定采用钼锑抗法显色法测定;土壤有机碳,经过重铬酸钾溶液消煮后,采用硫酸亚铁滴定法测定;土壤含水量采用 105 ℃ 烘干称重测定;土壤 pH,水土比 2.5(mL):1(g)放入小烧杯用 pH 计记录 pH^[17]。

土壤微生物数量:采用涂抹平板计数法,对细菌、真菌、放线菌分别进行测定。细菌培养采用牛肉膏—蛋白胨培养基,真菌培养采用马丁—孟加拉红琼脂培养基,放线菌培养采用改良高氏 1 号琼脂培养基。取土壤鲜样 10 g,在无菌条件下用 90 mL 生理盐水($w=0.85\%$)灭菌后配成不同质量分数梯度土壤悬浮液,测定 3 个相邻稀释度土壤溶液中的菌落个数。细菌稀释度选取 10⁻⁴,10⁻⁵,10⁻⁶,真菌稀释度选取 10⁻¹,10⁻²,10⁻³,放线菌稀释度选取 10⁻²,10⁻³,10⁻⁴,接种于培养基中,用无菌刮铲涂抹均匀,每稀释度 3 个重复。选细菌和放线菌的菌落数为 20~200 个、真菌菌落数为 15~150 个的培养皿,计算后发现细菌、放线菌、真菌分别选择 10⁻⁴,10⁻³,10⁻² 稀释度的土壤悬浮液合适。将所有培养皿置于 28~37 ℃ 黑暗条件下避光培养,真菌培养 2~3 天,细菌培养 3~4 天,放线菌培养 5~7 天。对所得按土壤微生物数量(cfu·g⁻¹)=(菌落平均数×稀释倍数)/土壤烘干质量,计算总量^[18]。

植被数据方面,应用四度一量的方法测定植被盖度、地下地上生物量。因 5 月各不同退化程度植被特征差异较小未采集该数据,采集了 10 月植被数据做环境因子的相关分析^[19]。

1.4 数据分析

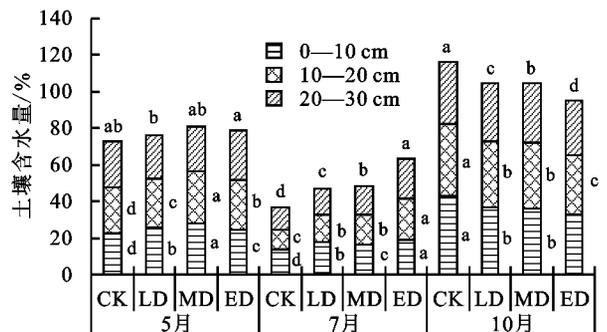
采用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析。为了揭示高寒草原环境因子与土壤微生物数量之间

的关系,应用 R 语言软件 Vegan 软件包基于线性模型进行冗余分析(RDA, Redundancy analysis),为评估环境因子对土壤微生物数量影响的相对重要性,分别计算每个环境因子的决定系数(r^2), r^2 越小,表示该环境因子对土壤微生物数量分布影响越小。 Pr 表示相关性的显著性检验,所有排序的显著性均由 Permutation test(置换 999 次)进行检验^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度草地土壤理化性质及其变化

土壤含水量在 7 月最小,对照草地的土壤含水量在 5 月和 7 月 0—20 cm 层均显著小于轻度、中度和极度退化草地($P<0.05$),而对照草地 10 月 0—30 cm 层的土壤含水量却显著大于轻度、中度和极度退化草地(图 1, $P<0.05$)。土壤 pH 在各月份间变化差异均不显著($P>0.05$)。在同一月份,土壤 pH 随着退化程度的加剧而逐渐增加,极度退化草地 0—30 cm 土层土壤 pH 显著大于对照草地、轻度和中度退化草地($P<0.05$),pH 随土层变化差异不显著(表 2, $P>0.05$)。



注:不同小写字母表示同一季节不同退化草地同层之间的差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同退化程度草地土壤含水量的变化

土壤有机碳含量随调查月份增大。5 月中度退化草地 0—10 cm 层土壤有机碳含量显著大于对照草地以及轻度和极度退化草地土壤有机碳含量($P<$

0.05),7月轻度退化草地0—30 cm层土壤有机碳含量显著大于对照草地以及中度和极度退化草地土壤有机碳含量($P<0.05$),10月对照草地0—30 cm层土壤有机碳含量显著大于轻度、中度和极度退化草地土壤有机碳含量($P<0.05$),而且随退化程度的增加土壤有机碳含量逐渐减少(图2)。土壤全氮含量在各月份间变化差异不显著($P>0.05$)。5月和7月轻度退化草地0—20 cm层全氮含量显著大于极度退化草地的全氮含量($P<0.05$),10月在各退化草地土壤全氮含量随退化程度的加剧减小,对照草地0—10

cm层土壤全氮含量显著大于轻度、中度和极度退化草地的全氮含量(图3, $P<0.05$)。5月中度退化草地0—10 cm层土壤全磷含量显著大于对照草地和轻度退化草地的全磷含量($P<0.05$),7月对照草地0—10 cm层土壤全磷含量显著大于轻度、中度和极度退化草地的全磷含量($P<0.05$),10月对照草地和轻度退化草地0—10 cm层土壤全磷含量显著大于中度和极度退化草地的全磷含量($P<0.05$),土壤全磷含量随土层的变化不显著。土壤全磷含量在各月份间变化差异不显著(图4, $P>0.05$)。

表2 不同退化程度草地土壤 pH 和土壤有机碳与碳氮比的变化

退化程度	土层深度/cm	5月		7月		10月	
		pH	C/N	pH	C/N	pH	C/N
CK	0—10	7.32±0.01b	5.59±0.55a	7.26±0.03b	8.84±0.31a	7.21±0.03c	9.31±0.10b
	10—20	7.32±0.03c	6.67±0.74ab	7.31±0.02ab	6.96±0.13b	7.21±0.02c	10.33±0.02a
	20—30	7.30±0.02b	6.71±0.97a	7.28±0.01b	8.83±0.24a	7.33±0.02b	10.82±0.62a
LD	0—10	7.33±0.03b	5.27±0.25a	7.27±0.03ab	6.97±0.02c	7.38±0.04b	11.10±0.21a
	10—20	7.39±0.01b	4.87±0.75b	7.18±0.04b	7.51±0.09a	7.35±0.02b	10.13±0.87a
	20—30	7.30±0.04b	6.56±1.02a	7.22±0.02b	7.42±0.12b	7.33±0.01b	7.25±0.31b
MD	0—10	7.37±0.02ab	6.65±0.87a	7.20±0.05b	7.59±0.08b	7.46±0.01ab	10.47±0.37a
	10—20	7.37±0.02bc	8.21±0.61a	7.22±0.06b	7.20±0.09ab	7.48±0.02a	7.30±0.20b
	20—30	7.40±0.03b	6.22±0.57a	7.30±0.06b	7.43±0.41b	7.51±0.02a	7.27±0.06b
ED	0—10	7.44±0.04a	5.05±0.42a	7.36±0.03a	6.80±0.12c	7.49±0.02a	10.45±0.34a
	10—20	7.48±0.02a	5.08±0.56b	7.37±0.03a	6.83±0.25b	7.45±0.01a	8.57±0.03b
	20—30	7.51±0.01a	4.81±0.27a	7.45±0.04a	7.44±0.08b	7.53±0.02a	9.82±0.08a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示同一季节不同退化草地同层之间的差异显著($P<0.05$)。下同。

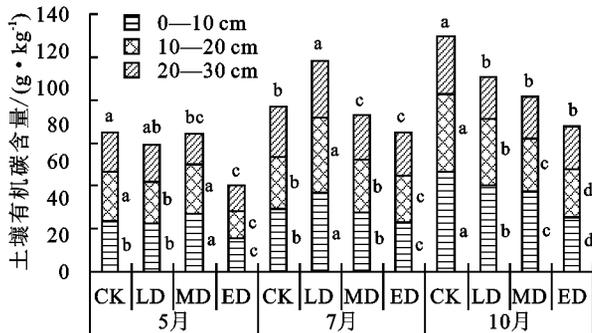


图2 不同退化程度草地土壤有机碳的变化

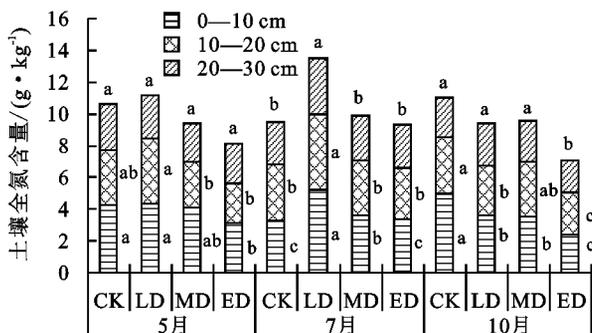


图3 不同退化程度草地土壤全氮的变化

2.2 不同退化程度草地土壤微生物数量及其季节变化

由表3可知,5月,除极度退化草地真菌和放线菌数量外,其余各处理下细菌、真菌和放线菌数量均随土层深度的增加而减小,极度退化草地0—10 cm层真菌和放线菌数量小于10—20 cm层,差异不显著

($P>0.05$)。随退化程度的加剧,0—10 cm的细菌数量出现先减小后增大的趋势,而真菌和放线菌数量出现先增大后减小的趋势。对照草地0—10 cm细菌和放线菌数量显著小于极度退化草地($P<0.05$),但真菌数量差异不显著($P>0.05$)。

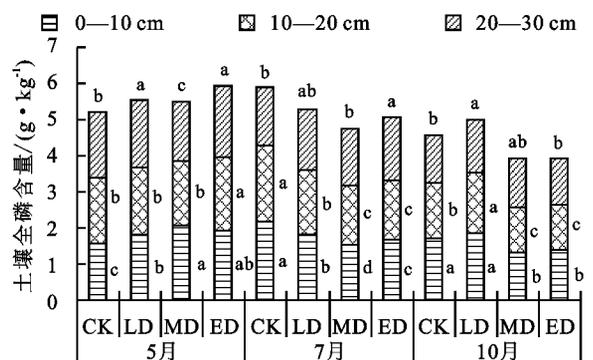


图4 不同退化程度草地土壤全磷的变化

7月细菌和放线菌数量均随土层深度的增加而减小,但10—20 cm层真菌数量在各退化草地均最大。随退化程度的加剧0—10 cm层细菌和放线菌数量逐渐减小,真菌数量出现先增大后减小的趋势,且对照草地放线菌数量显著大于轻度、中度和极度退化草地($P<0.05$)。

10月份细菌、真菌和放线菌数量在各退化草地均为0—10 cm层最大,但真菌和放线菌在极度退化草地表层和亚表层间差异不显著。随退化程度的加剧,0—10 cm层细菌和放线菌数量出现先减小后增

大的趋势,真菌数量逐渐增大,但差异均不显著($P>0.05$)。对照草地和极度退化草地 0—10 cm 微生物数量比较,细菌数量间差异显著($P<0.05$),真菌和放线菌数量间差异不显著($P>0.05$)。

从季节变化来看,细菌数量在对照草地和中度退

化草地 0—10 cm 层从 5 月至 10 月出现增大的趋势,轻度退化草地和极度退化草地呈先增大后减小的趋势;真菌数量在对照草地及轻度和极度退化草地呈现先减小后增大的趋势;放线菌数量呈现先增大后减小的趋势,7 月放线菌数量最大。

表 3 不同退化程度草地土壤微生物数量

退化程度	土层深度/cm	5月			7月			10月		
		细菌 (10^5 cfu·g ⁻¹)	真菌 (10^3 cfu·g ⁻¹)	放线菌 (10^4 cfu·g ⁻¹)	细菌 (10^5 cfu·g ⁻¹)	真菌 (10^3 cfu·g ⁻¹)	放线菌 (10^4 cfu·g ⁻¹)	细菌 (10^5 cfu·g ⁻¹)	真菌 (10^3 cfu·g ⁻¹)	放线菌 (10^4 cfu·g ⁻¹)
CK	0—10	99.33±10.99b	22.00±4.73a	92.33±2.19b	149.00±8.66a	13.50±0.87b	238.00±8.08a	322.00±14.05a	18.67±2.33a	185.67±33.72a
	10—20	39.00±5.86ab	8.67±1.86b	87.33±4.41b	75.50±12.99a	66.00±5.20a	176.00±6.35a	87.33±11.86a	17.67±1.33bc	73.33±1.67b
	20—30	45.67±4.10a	5.33±0.88b	78.33±7.51b	38.00±4.04a	16.50±0.87c	101.50±6.06a	94.67±21.17a	5.67±0.88b	73.67±5.21a
LD	0—10	86.67±2.03b	36.00±6.66a	140.00±6.25a	143.50±18.76a	17.50±0.87b	191.50±2.60b	107.33±7.42b	36.00±9.24a	85.67±10.65a
	10—20	83.33±26.03a	13.00±2.52b	131.33±12.99a	59.00±16.17ab	19.50±0.87c	125.00±3.46b	81.00±6.11a	29.67±5.36a	85.00±10.97b
	20—30	52.33±11.05a	10.33±0.88ab	87.67±2.91ab	20.50±1.44b	13.00±0.58c	91.00±1.15ab	56.00±12.53a	12.00±0.58a	69.33±17.85a
MD	0—10	44.33±10.04c	31.33±2.85a	119.00±11.53ab	80.50±2.02b	42.50±2.60a	187.50±3.75b	95.33±15.19b	37.33±8.22a	113.00±10.97a
	10—20	36.00±4.58b	16.00±1.53b	113.67±6.77ab	30.50±1.44b	58.50±7.79a	126.50±11.26b	76.67±36.70a	15.33±2.96c	97.00±12.70b
	20—30	32.67±4.26a	13.00±0.58a	56.33±6.96c	18.50±2.60b	48.00±4.04a	89.00±3.46ab	55.67±26.62a	14.00±0.58a	59.33±3.67a
ED	0—10	122.67±10.68a	31.33±5.24a	132.67±20.04a	78.50±28.00b	18.00±2.31b	174.00±5.77b	119.33±15.93b	39.67±6.57a	171.67±48.20a
	10—20	33.75±5.34b	38.67±8.01a	140.00±14.53a	36.50±10.68ab	40.00±2.31b	142.00±6.35b	31.00±1.13a	26.33±0.67ab	149.67±12.72a
	20—30	32.33±7.22a	15.33±2.85a	102.33±6.01a	24.00±5.20b	35.00±4.04b	82.00±3.46b	60.67±9.84a	15.67±2.33a	66.33±14.86a

2.3 环境因子与土壤微生物数量冗余分析

5 月环境因子与微生物数量冗余分析结果表明,第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 39.59%和 14.28%的土壤微生物数量的变化,环境因子只能解释 53.87%的微生物数量变化。第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 72.43%和 26.14%的环境因子—土壤微生物数量的关系变化,说明第 1 和第 2 排序轴能够很好地反映环境因子与土壤微生物数量间的关系。蒙特卡罗置换检验结果不显著(图 5,表 4, $P>0.05$)。

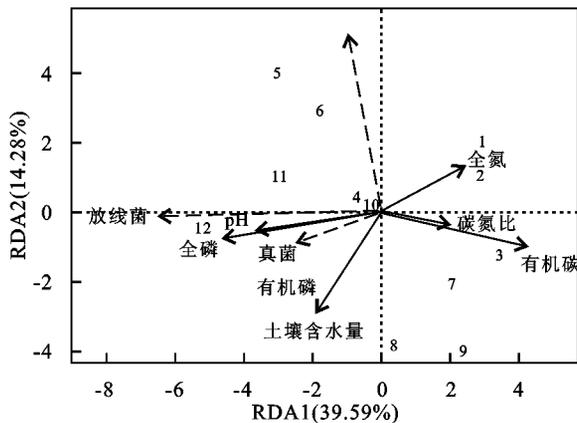


图 5 5 月环境因子与微生物数量 RDA 排序图

由表 5 可知,在各环境因子与土壤微生物数量 RDA 排序相关系数中,RDA1 和 RDA2 所对应的值表示环境因子与排序轴的相关性。本研究发现,5 月不同环境因子对微生物数量的影响不同,按照决定系数 r^2 排序,结果为土壤全磷>含水量>土壤有机碳>pH>全氮>碳氮比,然而只有土壤全磷和土壤含水量等因子与土壤微

生物数量间相关性显著($Pr<0.05$)。

7 月退化草地环境因子与微生物数量冗余分析结果表明,第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 74.76%和 14.58%的土壤微生物数量的变化,土壤有机碳、全氮、全磷、土壤含水量和碳氮比等因子能解释的微生物数量变化为 89.34%,不能解释的为 10.66%。第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 80.11%和 15.62%的环境因子—土壤微生物数量的关系变化,说明第 1,2 排序轴能够很好地反映环境因子与土壤微生物数量间的关系。蒙特卡罗置换检验结果极显著(图 6,表 4, $P<0.01$)。7 月不同环境因子对微生物数量的影响不同,按照决定系数排序,结果为碳氮比>全磷>全氮>土壤含水量>土壤有机碳>pH,只有土壤有机碳、全氮、全磷、土壤含水量和碳氮比等因子与土壤微生物数量间相关性显著($Pr<0.05$)。

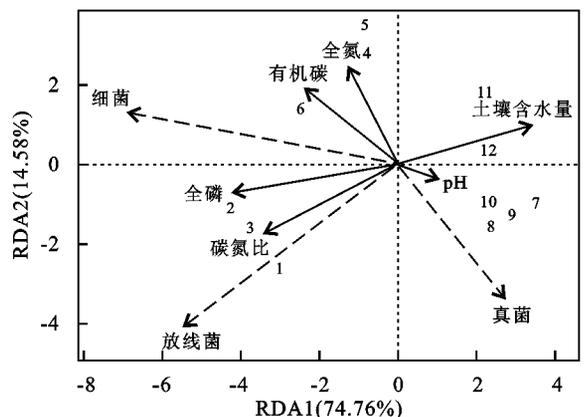


图 6 7 月环境因子与微生物数量 RDA 排序图

表 4 土壤因子与土壤微生物数量 RDA 结果

参数	5 月		7 月		10 月	
	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2
特征值	243.27	87.76	676.11	131.85	1476.48	749.73
微生物数量变化百分比/%	39.59	14.28	74.76	14.58	61.39	31.17
微生物数量变化累积百分比/%	39.59	53.87	74.76	89.34	61.39	92.56
土壤因子—微生物数量变化百分比/%	72.43	26.14	80.11	15.62	65.80	33.41
土壤因子—微生物数量变化累积百分比/%	72.43	98.57	80.11	95.73	65.80	99.21
蒙特卡罗置换检验	$P=0.508$		$P=0.001$		$P=0.023$	

10 月退化草地环境因子与微生物数量冗余分析结果表明,第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 61.39% 和 31.17% 的土壤微生物数量的变化,6 种环境因子能解释的微生物数量变化为 92.56%,还有 7.44% 微生物数量变化是土壤理化性质和草地植被等环境因子不能解释的。第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 74.54% 和 24.79% 的环境因子—土壤微生物数量的关系变化,说明第 1,2 排序轴能够很好地反映环境因子与土壤微生物数量间的关系。蒙特卡罗置换检验结果亦为显著(图 7,表 5, $P<0.05$)。10 月不同环境因子对微生物数量的影响不同,按照决定系数排序,结果为土壤含水量>土壤有机碳>全氮>地上生物量>pH>地下生物量>盖度>碳氮比>全磷,只有土壤含水量、土壤有机碳、全氮、

地上生物量、pH、地下生物量和盖度等因子与土壤微生物数量间相关性显著($P<0.05$)。

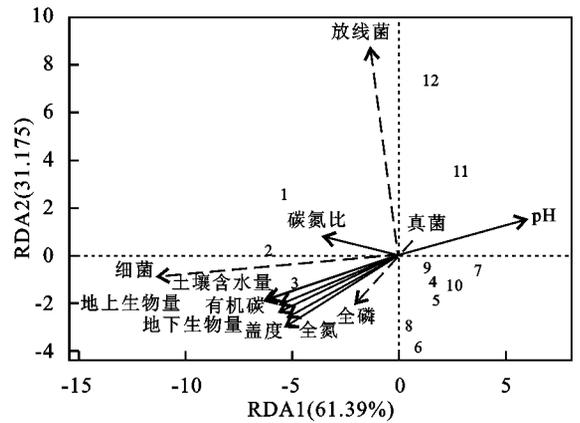


图 7 10 月环境因子与微生物数量 RDA 排序图

表 5 土壤因子与土壤微生物数量 RDA 排序相关系数

土壤因子	5 月				7 月				10 月			
	RDA1	RDA2	r^2	$Pr(>r)$	RDA1	RDA2	r^2	$Pr(>r)$	RDA1	RDA2	r^2	$Pr(>r)$
有机碳	0.9952	0.0978	0.4393	0.069	-0.6574	0.7535	0.6289	0.013	-0.9485	-0.3167	0.8017	0.001
全氮	0.8177	0.5756	0.3025	0.177	-0.3537	0.9353	0.6637	0.012	-0.8620	-0.5069	0.7556	0.006
全磷	-0.9114	-0.4114	0.6777	0.002	-0.9769	-0.2134	0.8382	0.003	-0.7038	-0.7104	0.1862	0.403
土壤含水量	-0.6632	-0.7484	0.5210	0.038	0.9288	0.3705	0.6084	0.014	-0.9484	-0.3171	0.8329	0.001
pH	-0.9156	-0.4014	0.4274	0.083	0.8780	-0.4788	0.0613	0.753	0.9625	0.2711	0.7167	0.005
碳氮比	0.9899	0.1415	0.0927	0.340	-0.8125	-0.5829	0.7861	0.002	-0.9820	0.1888	0.2458	0.267
盖度									-0.8836	-0.4681	0.6741	0.008
地上生物量									-0.9112	-0.4119	0.7259	0.004
地下生物量									-0.9292	-0.3694	0.6859	0.006

3 讨论

3.1 高寒草甸不同退化程度草地土壤理化性质变化

土壤含水量是植被恢复的主要限制因子,主要受降水量、土壤性状和植被类型的影响^[21]。极度退化和中度退化草地的土壤含水量在 20—30 cm 土层大于对照草地和轻度退化草地的土壤含水量,这可能是极度退化草地和中度退化草地土壤水分入渗速率大于对照草地^[22]。此外,土壤的退化程度与植被的退化程度呈现正比的关系^[6],随着退化程度的加剧,植被覆盖度减少,无法截留更多的水分,加之采样地 7 月降水量较少,也会导致较小的土壤含水量^[15]。而 pH 随着退化程度的加剧和土层的加深呈现逐渐升高的趋势,这与阿依敏·波沙提

等^[23]的研究结果相一致。

本研究通过对不同退化程度下土壤各层(0—30 cm)有机碳、全磷和全氮的研究发现,随着退化程度的加剧,土壤有机碳、全氮和全磷含量呈现逐渐下降的趋势。轻度退化草地的土壤养分(有机碳、全磷、全氮)含量比对照草地的高但差异不显著,以及对照草地的土壤养分含量比极度退化地区的含量高,但随着草地退化程度的加剧,草地植被覆盖度降低,植物群落多样性下降,地表枯落物减少,加之家畜的践踏和踩食的干扰,地上和地下生物量逐渐减少,草地植物群落生产能力降低,固碳能力下降,从而降低了土壤碳库的碳输入量,致使转化为土壤有机碳、全氮和全磷的量相对降低^[5,24-25]。可见,甘南高寒草甸草地退

化对其土壤养分具有重要的影响。

3.2 不同退化程度对草地土壤微生物数量的影响

土壤细菌是土壤中的优势类群,与土壤微生物总量的变化幅度类似,在土壤微生物数量中所占比例最大^[26]。因此,微生物数量的多少,尤其是细菌数量的多少在某种程度上可以反映土壤质量的变化。Salomé 等^[27]研究发现,土壤微生物参与土壤有机碳的转化,土壤表层是微生物活跃的“热点”,土壤微生物的分布具有空间异质性。本研究发现,在同一月份对照草地和轻度退化草地土壤微生物数量均随土层深度的增加而减少,而中度和极度退化草地土壤微生物数量随土层变化不显著。这可能是对照草地和轻度退化草地土壤破坏不严重,土壤表层是植物根系分布最广泛的区域,地表聚积大量凋落物,有充分的营养源,丰富的土壤有机质供微生物分解吸收,也是植物吸收营养元素主要区域,加之水热和通气状况较好,利于微生物的生长和繁殖,促进“土壤—微生物—植被”生态系统的物质循环和能量流动^[28]。而在中度退化草地和极度退化草地,由于失去植被覆盖作用,与未退化草地相比,地表昼夜温差变化大、温度变化速率大,造成水热散失及土壤可侵蚀性增加^[29],从而使土壤微生物生长的环境恶化,不利于土壤微生物的生长繁殖。本试验研究发现,5,7,10月对照草地和极度退化草地0—10cm微生物数量比较,细菌数量在3个月差异均显著,真菌数量在3个月差异都不显著,放线菌数量在2个月差异显著。这表明土壤细菌对草地退化的过程反应更敏感,放线菌次之,真菌最小。

季节变化能引起土壤微生物的生境的变化,即季节变化可通过温度、土壤物理性质和土壤养分等因素的改变来影响土壤微生物结构组成、数量以及活性^[30]。本研究中,细菌在极度退化草地随季节变动出现先减小后增大趋势。真菌数量在对照草地及轻度和极度退化草地随季节变动出现先减小后增大的现象,在7月下旬真菌数量最小,主要是因为7月比较干旱,土壤含水量比5,10月少。

本试验中的环境因子不能完全解释土壤微生物数量分布的变化,由于对照草地和其他退化草地的优势物种不同,不同草地优势种的根际微生物也有差异,因此草地植被也影响土壤微生物^[7]。而放牧活动等也对土壤微生物数量和群落有一定的影响^[5,25]。

3.3 不同退化程度草地土壤微生物数量与环境因子之间的关系

微生物是土壤生态系统中最活跃的部分,可对外界环境因子的改变作出响应^[31]。Banerjee 等^[32]发现关键物种对微生物群落的结构和功能均会产生驱动作用。微生物生长所需的六大营养要素主要有碳源、

氮源、能源、无机盐、生长因子和水等,有机碳作为土壤微生物生长的碳源和能源,全氮为微生物提供氮源,土壤有机碳和全氮是决定土壤微生物生长繁殖的首要因素。而在本研究中发现,环境因子中土壤理化性质(土壤含水量、土壤有机碳、全磷和全氮)和草地植被(盖度、地上生物量和地下生物量)的总效应达到显著水平,表明土壤含水量、土壤有机碳、全氮和全磷以及植被盖度、地上生物量和地下生物量等是退化草地土壤微生物分布的主要环境驱动因子。主要影响退化草地土壤微生物分布的是土壤含水量,王一博等^[33]研究证实,高寒草甸在10—20cm层的土壤含水量流失对高寒草甸土壤环境影响最大。土壤微生物生长繁殖是以土壤养分为物质基础的,土壤养分的成分与含量对土壤微生物具有决定性的影响^[34]。草地植被盖度、地上生物量和地下生物量也对土壤微生物数量有影响^[7]。因此,在退化草地的修复过程中,首先要防止土壤含水量散失,其次要防止土壤养分流失,土壤含水量和土壤养分不仅影响草地植被的生长,也影响土壤微生物的生长繁殖。因此,对不同退化程度的草地要采取不同的恢复措施,对轻度和中度退化程度的草地可采取围栏禁牧的措施,而针对极度退化的草地,除了要禁牧外,还应进行补播、施肥等措施来提高土壤的肥力^[35]。

4 结论

(1)甘南高寒草甸随退化程度的加剧,土壤pH逐渐增大。土壤有机碳、全氮和全磷含量在10月随草地退化程度的加剧而逐渐减小,但在5,7月变化不明显。

(2)甘南高寒草甸不同退化程度对3类土壤微生物数量的影响不同。随退化程度的加剧,细菌数量在5,10月呈现先减小后增大的趋势,7月逐渐减小;真菌数量在5,7月呈现先增大后减小的趋势,10月逐渐增大;放线菌数量在5月呈现先增大后减小的趋势,7月逐渐减小,在10月呈现先减小后增大的趋势。土壤细菌数量对草地的退化敏感性最大,放线菌次之,真菌最小。

(3)甘南高寒草甸不同植被生长时期影响微生物数量的环境因子不同,显著影响5月微生物数量的是土壤全磷和土壤含水量,而7月除土壤pH外其余指标均有显著影响,10月除土壤pH和土壤碳氮比外,植被盖度和生物量等均有显著影响,各影响因素和权重需在草地管理中重视。

参考文献:

- [1] 高海宁,张勇,秦嘉海,等. 祁连山黑河上游不同退化草地有机碳和酶活性分布特征[J]. 草地学报, 2014, 22(2): 283-290.
- [2] Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Ti-

- betan plateau: A review of the evidence of its magnitude and causes [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 1-12.
- [3] Li X L, Gao J, Brierley G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan plateau: Implications for rehabilitation [J]. *Land Degradation and Development*, 2011, 24(1):72-80.
- [4] 马琳雅,崔霞,冯琦胜,等. 2001—2011年甘南草地植被覆盖度动态变化分析[J]. *草业学报*, 2014, 23(4):1-9.
- [5] 苟燕妮,南志标. 放牧对草地土壤微生物的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(10):194-205.
- [6] 周华坤,赵新全,温军,等. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征[J]. *草业学报*, 2012, 21(5):1-11.
- [7] 卢虎,姚拓,李建宏,等. 高寒地区不同退化草地植被和土壤微生物特性及其相关性研究[J]. *草业学报*, 2015, 24(5):34-43.
- [8] 彭岳林,蔡晓布,于宝政. 不同状态高寒草原土壤微生物及其变化[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(2):379-383.
- [9] 魏卫东,刘育红,马辉,等. 基于冗余分析的高寒草原土壤与草地退化关系[J]. *草业科学*, 2018, 35(3):472-481.
- [10] 刘兴元,陈全功,王永宁. 甘南草地退化对生态安全与经济发展的影响[J]. *草业科学*, 2006, 23(12):39-42.
- [11] 闫颖慧,胡小霞. 基于灰色关联法的甘南草地退化影响因素分析:以碌曲县为例[J]. *生态经济*, 2010(2):135-137.
- [12] 陈文业,戚登臣,李广宇,等. 施肥对甘南高寒草甸退化草地植物群落多样性和生产力的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(6):31-36.
- [13] 陈文业,戚登臣,李广宇,等. 甘南高寒退化草地生态位特征及生产力研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(1):80-90.
- [14] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯库勒湿地不同植被退化阶段土壤有机碳含量及动态[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5):254-259.
- [15] 刘斌. 甘南州碌曲县降水量持续偏少五成以上已超过40天[EB/OL]. (2017-07-26). [2018-08-26]. <http://www.weather.com.cn/gansu/tqxs/07/2746445.shtml>.
- [16] 苏大学,张自和,陈佐忠,等. GB 19377—2003天然草地退化、沙化、盐渍化的分级标准[S]. 北京:中国标准出版社,2003:1-5.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,1999:42-50.
- [18] 于健龙,石红霄. 高寒草甸不同退化程度土壤微生物数量变化及影响因子[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(11):77-81.
- [19] 鲍根生,王宏生,曾辉. 有机硅助剂对“狼毒净”防除狼毒效果及草地植物群落多样性的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(2):263-268.
- [20] 赖江山,米湘成. 基于Vegan软件包的生态学数据排序分析[C]//厦门大学. 第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 厦门:厦门大学,2012:332-343.
- [21] 魏永胜,梁宗锁,山仑. 草地退化的水分因素[J]. *草业科学*, 2004, 21(10):13-18.
- [22] 李婧,张法伟,郭小伟,等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响[J]. *草地学报*, 2012, 20(5):836-841.
- [23] 阿依敏·波拉提,安沙舟,董乙强,等. 巴音布鲁克高寒草原不同退化阶段土壤养分的变化[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(5):953-960.
- [24] 刘育红,魏卫东,杨元武,等. 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(4):480-490.
- [25] Kala C P, Singh S K, Rawat G S. Effects of sheep and goat grazing on the species diversity in the alpine meadows of Western Himalaya [J]. *Environmentalist*, 2002, 22(2): 183-189.
- [26] 李瑞,刘旻霞,张灿,等. 甘南亚高寒草甸不同坡向土壤微生物群落分布特征[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11):1884-1891.
- [27] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, et al. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 416-426.
- [28] Jia B, Wang Y, Xie Z. Responses of the terrestrial carbon cycle to drought over China: Modeling sensitivities of the interactive nitrogen and dynamic vegetation [J]. *Ecological Modelling*, 2018, 368: 52-68.
- [29] 伍星,李辉霞,傅伯杰,等. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究[J]. *中国草地学报*, 2013, 35(3):77-84.
- [30] 王国兵,阮宏华,唐燕飞,等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1):37-42.
- [31] Pascual J A, Garcia C, Hernandez T, et al. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1877-1883.
- [32] Banerjee S, Schlaeppi K, Van M D H. Keystone taxa as drivers of microbiome structure and functioning [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(9): 567-576.
- [33] 王一博,王根绪,吴青柏,等. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(5):989-998.
- [34] Li Y, Wang S, Jiang L, et al. Changes of soil microbial community under different degraded gradients of alpine meadow [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 222: 213-222.
- [35] 姬万忠,王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(5):886-890.