

DOI: 10.5846/stxb201806291433

张倩, 姚宝辉, 王 缠, 康宇坤, 郭怀亮, 杨 晶, 杨莹博, 苏军虎. 不同坡向下高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征. 生态学报, 2019, 39(9): - .
Zhang Q, Yao B H, Wang C, Kang Y K, Guo H L, Yang J, Yang Y B, Su J H. Soil physical and chemical characteristics and microbial proportions in an alpine meadow with different slopes. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

不同坡向下高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征

张 倩^{1,2}, 姚宝辉^{1,2}, 王 缠^{1,2}, 康宇坤^{1,2}, 郭怀亮^{1,2}, 杨 晶^{1,2}, 杨莹博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

摘要: 阐明不同坡向下草地土壤性质的空间分异格局, 为退化草地的精准修复和科学管理提供参考。本文研究了青藏高原东缘高寒草甸退化草地不同坡向下(北坡 N、西北坡 NW、西坡 W、东坡 E、东北坡 NE、西南坡 SW 和南坡 S)土壤理化性质和微生物数量特征。结果发现: 从 N→S 坡向上, 土壤有机质、碳氮比和全氮含量均呈下降趋势, 土壤全磷含量和 pH 值在不同坡向间均无显著差异 ($P>0.05$), E 坡向全磷含量最高 ($(2.83\pm0.95)\text{ g/kg}$), NW 坡向含量最低 ($(2.07\pm0.12)\text{ g/kg}$); 土壤细菌、真菌和放线菌数量变化呈波动现象, NW 坡向的细菌 ($(13.0\times10^5\pm1.0\times10^5)\text{ 个/g}$)、真菌 ($(14.0\times10^3\pm0.0)\text{ 个/g}$) 和放线菌 ($(24.0\times10^4\pm1.0\times10^4)\text{ 个/g}$) 数量最低, E 坡向的细菌数量最高 ($(85.5\times10^5\pm2.5\times10^5)\text{ 个/g}$), S 坡向的真菌 ($(24.0\times10^3\pm0.0)\text{ 个/g}$) 和放线菌 ($(209.5\times10^4\pm4.5\times10^4)\text{ 个/g}$) 数量最高; 回归分析表明, 在 E→S 坡向上, 随土壤含水量、有机质、碳氮比和全氮含量的增加, 土壤细菌和放线菌数量均显著降低 ($P<0.05$), 而土壤真菌数量随含水量、pH 值、土壤养分含量的增加略有降低 ($P>0.05$)。可见, 不同坡向下高寒草甸土壤理化特征差异明显, 也导致了土壤微生物数量分配格局的不同。

关键词: 坡向; 高寒草甸; 微生物数量; 土壤理化性质

Soil physical and chemical characteristics and microbial proportions in an alpine meadow with different slopes

ZHANG Qian^{1,2}, YAO Baohui^{1,2}, WANG Chan^{1,2}, KANG Yukun^{1,2}, GUO Huailiang^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, YANG Yingbo², 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, China

2 Gansu Agricultural University-Massey University Research Centre for Grassland Biodiversity, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The alpine meadow is the main type grassland ecosystem which has several unique characteristics. Slope direction is one of the important topographic factors in the alpine meadow which plays an important role in the spatial differentiation of soil properties. The difference in soil nutrients and microorganisms between different slope directions may lead to different landscape qualities, and the difference in landscapes will determine the nature of the soil which finally affects the vegetation structure and growth. Therefore, understanding the role of slope effects in driving soil microbes and functions is essential for formulating sustainable ecosystem management and conservation policies. The aim of the current study is to clarify the spatial distribution pattern of grassland soil properties under different slope directions and to provide a basis for the precise restoration of degraded grassland. The soil physical and chemical properties and microbial quantity changes in the degraded

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.31460566, 31760706); 甘肃省杰出青年基金项目 (No.1606RJDA314); 甘肃农业大学“伏羲杰出人才”培育项目 (No.Gaufx-02J03); 甘肃农业大学学科建设专项基金 (GSAU-XKJS-2018-003)

收稿日期: 2018-06-29; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sujh@gsau.edu.cn

meadow of the alpine meadow in the eastern margin of the Qinghai Tibetan Plateau (N, northern slope; NW, northwest slope; W, west slope; E, eastern slope; NE, northeast slope; SW, southwest slope; S, south slope) were studied. The results showed that the soil organic matter, carbon and nitrogen ratio, and total nitrogen content decreased from north to south (N to S). The total phosphorus content and pH value of the soil were not significantly differed between the seven slopes. The content of total phosphorus in the E slope was the highest ($(2.83 \pm 0.95) \text{ g/kg}$), and the content of the NW slope was the lowest ($(2.07 \pm 0.12) \text{ g/kg}$); the counts of soil bacteria, fungi, and actinomycetes fluctuated with slope differences. The count of bacteria ($(13.0 \times 10^5 \pm 1.0 \times 10^5) \text{ cfu/g}$), fungi ($(14.0 \times 10^3 \pm 0.0) \text{ cfu/g}$) and actinomycetes ($(24.0 \times 10^4 \pm 1.0 \times 10^4) \text{ cfu/g}$), was the lowest in the NW slope, highest in the E slope for bacteria ($(85.5 \times 10^5 \pm 2.5 \times 10^5) \text{ cfu/g}$) and actinomycetes ($(209.5 \times 10^4 \pm 4.5 \times 10^4) \text{ cfu/g}$), and on the S slope fungus ($(24.0 \times 10^3 \pm 0.0) \text{ cfu/g}$) was the highest. The regression analysis showed that with the increase of soil water content, organic matter, C/N ratio, and total nitrogen content, the counts of soil bacteria and actinomycetes decreased significantly from the gradient of the N slope to the S, and there was no significant influence on the count of fungi. The change in soil pH value and total phosphorus had no significant influence on the number of microbes ($P > 0.05$). It could be concluded that soil nutrient contents were different under different slope directions. When the soil nutrient content was high, the demand for plant growth may be given priority. Therefore, during the period of high soil nutrient contents, the count of microorganisms remain relatively small.

Key Words: slope aspects; alpine meadow; microorganism quantity; physical and chemical properties

青藏高原脆弱、敏感,是生物多样性热点地区之一,其主要的生态系统类型为高寒草甸,约占可利用草地面积的 30%左右^[1]。高寒草甸是高原地区重要的饲草基地,不仅对当地畜牧业的发展、民族经济发展具有不可替代的作用,对高原地区风沙、水蚀、盐碱、内涝、地下水位变化、土壤侵蚀、土地资源的流失等自然灾害的发生也有一定的屏障作用^[2]。近年来受全球气候变化、草原鼠虫害、过度放牧、以及不合理的开垦和管理措施等,草地退化愈加严重^[3-4]。据统计,退化草地面积约 $1.62 \times 10^7 \text{ km}^2$,约占草地总面积的 30%左右,“黑土滩”作为青藏高原上严重退化的一种特殊产物,20 世纪 90 年代已经达到 $690.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$,且从 20 世纪 80 年代到 90 年代已经增加 4%左右^[5-6]。草地的退化,实际上是土壤的退化,土壤作为陆地的机质,它的结构、养分状况、微生物的数量等对退化草地的修复具有重要的度量作用,且生态系统中大多数过程的发生都需要土壤的参与^[7]。而土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的成分,也是土壤有机质的活性部分,担负着分解动植物残体的重要使命,它在人类和高等生物的生存中起着重要作用^[8]。土壤微生物推动着生态系统的能量流动和物质循环,维持生态系统正常运转^[9]。因此,查明土壤中微生物的数量及其组成情况,对探究微生物与环境之间的关系、微生物资源的利用、微生物数量的定向控制等是十分必要的,从 20 世纪 80 年代以后,人们开始研究草地与土壤微生物数量和组成的关系,近年来,草地土壤微生物的研究越来越引起国内外学者的关注^[10]。

坡向是主要地形因子之一,会引起光照、温度、降雨量、风速、土壤质地等因子的不同,导致在同一山地的几十米尺度上气候发生很大的变化,不同坡向水热情况会显著影响土壤各因子^[11-13]。高寒草甸具有很多微地形,这会导致土壤水分、类型等发生很大的差异性,进而引起土壤养分、土壤微生物的差异。土壤养分是土壤肥力的重要物质基础,也是评价土壤肥力水平的重要内容之一^[14-15]。探明土壤异质性的分布格局对精准修复措施的选择具有重要的现实指导意义。而目前对退化草地的管理措施并没有分小环境,而是根据当地总体气候条件所选择的。因此,在小尺度范围内研究土壤养分和微生物的关系,对优化退化草地精准修复及管理十分重要。前期已有研究探讨了高寒草甸阴坡、阳坡、半阴坡、半阳坡对植物群落和土壤因子的影响^[11],也有着着眼于阴坡、阳坡对植被构成和土壤养分的研究^[16],以及阴坡、阳坡梯度上的物种多样性和群落构建机制等^[17-18]。但这些研究只将坡向划分为阴坡、阳坡、半阴坡和半阳坡,且侧重研究不同坡向对土壤养分和植物群落的影响,鲜见有关土壤因子对微生物数量影响的报道。

基于此,本研究以青藏高原东缘天祝藏族自治县高寒草甸退化草地为对象,分析了除东南坡以外的所有坡向下土壤理化因子的变化以及各个坡向下土壤细菌、真菌、放线菌的数量变化,同时探讨了细菌、真菌和放线菌与土壤理化性质间的相关性。旨在为青藏高原地区高寒草甸退化草地修复,以及土壤生态过程的理解提供参考和科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于甘肃省天祝县抓喜秀龙乡南泥沟附近的高寒草甸退化草地。地理位置 $37^{\circ}19'N$, $102^{\circ}75'E$, 平均海拔约 3010 m。该地区气温年较差小,日较差大,四季不甚分明,气温垂直分布明显,年均气温 $1^{\circ}C$, 年均日照时数 2500—2700 h,降水主要集中在 6、7、8 月,年均降雨量 500 mm,年均蒸发量 1600 mm,属大陆性半干旱气候,无绝对无霜期,亚高山土壤类型^[19]。

1.2 样品采集

于 2017 年 9 月中旬,在南泥沟附近选择一座坡向分异明显的典型山坡,通过 GPS 测定坡向,沿顺时针方向将整座山坡沿着山体中部,依次划分为南坡 S、西南坡 SW、西坡 W、西北坡 NW、北坡 N、东北坡 NE、东坡 E,7 块试验样地。SW 坡、S 坡、E 坡较陡,而 W 坡、NW 坡、N 坡、NE 坡较为平缓。阴坡植被以小灌木为主,主要物种为矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*)、珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、瑞香狼毒 (*Stellera chamaejasme*); 阳坡以禾草为主,主要物种为赖草 (*Leymus secalinus*)、西北针茅 (*Stipa krylovii*)、洽草 (*Koeleria cristata*)、扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*)、矮嵩草 (*Kobresia humilis*)^[16]。在每个样地设置 4 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方,然后用土钻在每个样方中使用五点取样法,采集 0—30 cm 土壤后将同一样方中所取土壤样品混合均匀,装入自封袋编号,带回实验室放在 $4^{\circ}C$ 的冰箱中保存,并尽快完成细菌、真菌、放线菌数量的测定,剩余样品自然风干后测定土壤水分和养分^[20]。采样地具体分布如图 1 所示。

1.3 土壤微生物数量的测定

培养基分别使用:细菌—牛肉膏蛋白胨培养基,真菌—马丁氏—孟加拉红培养基,放线菌—改良高氏一号培养基,将接种的培养基放入 $28^{\circ}C$ 的培养箱(细菌培养 3—4 d、真菌培养 2—3 d、放线菌培养 5—7 d);3 种土壤微生物数量均采用稀释倾注平板涂布法,称取 10g 土壤样品,在无菌环境下用灭菌后的生理盐水配制不同梯度的土壤悬浊液(经过预实验选择稀释梯度分别为:细菌 10^{-4} 、真菌 10^{-2} 、放线菌 10^{-3});镜检计数(土壤微生物数量(个/g)=菌落平均数 $\times$ 稀释倍数/土壤质量)^[21]。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤 pH 值采用酸度计法;土壤含水量采用烘干法测定,计算公式:土壤含水量(%)= $(W_2 - W_3) / (W_3 - W_1) \times 100$ (W_1 :空铝盒重、 W_2 :铝盒+湿土重 W_3 :铝盒+干土重);土壤养分分别使用:全氮用硫酸消煮后并用流动分析仪测定;全磷采用钼锑抗显色法测定;有机质采用硫酸—重铬酸钾外加热法测定^[22]。

1.5 数据分析与处理

所有数据均采用 Excel 2007 进行处理以及回归分析;运用 SPSS 19.0 对微生物与土壤因子进行单因素方

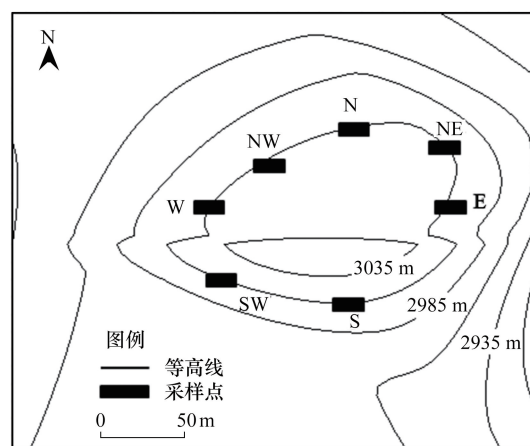


图 1 研究区域样地地图

Fig.1 Sample plot of study area

N: 北坡, North slope; NW: 西北坡, Northwest slope; W: 西坡, West slope; SW: 西南坡, Westsouth slope; S: 南坡, South slope; E: 东坡, East slope; NE: 东北坡, Northeast slope

差分析、相关性分析;并且运用 Sigma Plot 13.0 绘制研究区域图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质的变化

分析发现,各坡向土壤养分含量明显不同。土壤水分含量 NW 坡最高,具体分布为 NW 坡>N 坡>W 坡>NE 坡>S 坡>SW 坡>E 坡,符合坡向影响下土壤水分含量变化的一般规律;全阴坡水分含量最高,半阴坡和半阳坡含量次之,全阳坡含量最低,且 S 坡的土壤水分含量与 NS 坡、W 坡、N 坡和 NW 坡均存有显著差异($P<0.05$);不同坡向土壤 pH 值在 7.10—7.35 之间变化,亦无显著性差异($P>0.05$);土壤养分方面:自 N 到 S 坡向上土壤有机质、碳氮比、全氮含量呈逐渐降低趋势。E 坡的有机质含量与 N 坡、W 坡、NW 坡、SW 坡和 S 坡均存有显著差异($P<0.05$),但与 NE 坡差异不显著($P>0.05$);碳氮比含量除 N 坡与 SW 坡间差异显著外($P<0.05$),其他坡向间不显著($P>0.05$);全氮含量 NE 坡与 NW 坡、W 坡和 SW 坡之间差异显著($P<0.05$),其他坡向之间不显著($P>0.05$);而全磷含量的变化为 E 坡>S 坡>SW 坡>NE 坡>N 坡>W 坡>NW 坡,但之间无显著性差异($P>0.05$)(表 1)。

高寒草甸不同坡向土壤因子的变化因环境资源的供给水平而表现出不同的响应,土壤含水量与土壤有机质、碳氮比、全氮含量均呈极显著正相关($P<0.01$);土壤有机质含量与土壤碳氮比、全氮含量呈极显著正相关($P<0.01$);土壤碳氮比与土壤全氮呈极显著正相关($P<0.01$);土壤 pH 值和全磷含量与其他所有土壤养分之间均不存在相关性($P>0.05$)(表 2)。

表 1 土壤因子随坡向的变化(平均值±标准误)

Table 1 Variation of soil factors with slope aspects (average ± st dev)

坡向 Slope aspects	土壤含水量 Soil water content/%	土壤 pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)	土壤碳氮比 Soil carbon- nitrogen ratio	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)
东坡 East slope	30.97±0.07e	7.26±0.06a	66.05±0.67c	6.78±1.21ab	2.83±0.95a	6.79±0.02c
东北坡 Northeast slope	44.28±0.04d	7.14±0.10a	62.27±2.90cd	5.62±0.17ab	2.32±0.17a	6.43±0.10c
北坡 North slope	74.97±0.06b	7.26±0.18a	105.58±1.40a	7.65±0.74a	2.28±0.16a	8.08±0.68ab
西北坡 Northwest slope	84.43±0.41a	7.32±0.03a	100.48±1.18a	6.89±0.28ab	2.07±0.12a	9.07±0.35a
西坡 West slope	65.86±0.24c	7.22±0.16a	86.33±2.98b	6.29±0.04ab	2.18±0.03a	7.96±0.23b
西南坡 Southwest slope	35.74±4.26e	7.33±0.04a	49.95±5.65d	5.05±0.60b	2.34±0.53a	5.74±0.04c
南坡 South slope	36.06±0.04e	7.29±0.12a	49.21±7.23d	4.76±0.63b	2.44±0.00a	5.99±0.09c

不同字母表示各坡向间差异显著($P<0.05$)

表 2 土壤理化因子之间的相关关系

Table 2 Pearson's correlation coefficients of soil physical and chemical factors

项目 Item	土壤含水量 Soil water content	土壤 pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter	土壤碳氮比 Soil Carbon- nitrogen ratio	全磷 Total phosphorus
土壤 pH Soil pH	0.032				
土壤有机质 Soil organic matter	0.829 **	0.090			
土壤碳氮比 Soil Carbon-nitrogen ratio	0.921 **	0.045	0.949 **		
全磷 Total phosphorus	-0.396	0.004	-0.342	-0.270	
全氮 Total nitrogen	0.899 **	-0.099	0.896 **	0.909 **	-0.250

** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关

2.2 土壤微生物数量变化

土壤细菌、真菌、放线菌数量总体都呈现出波动现象,放线菌数量和细菌数量均在 E→S 坡向梯度上降低,但放线菌数量降低程度大,真菌数量在坡向梯度上基本没有变化;土壤细菌数量 E 坡最高,NW 坡最低,具

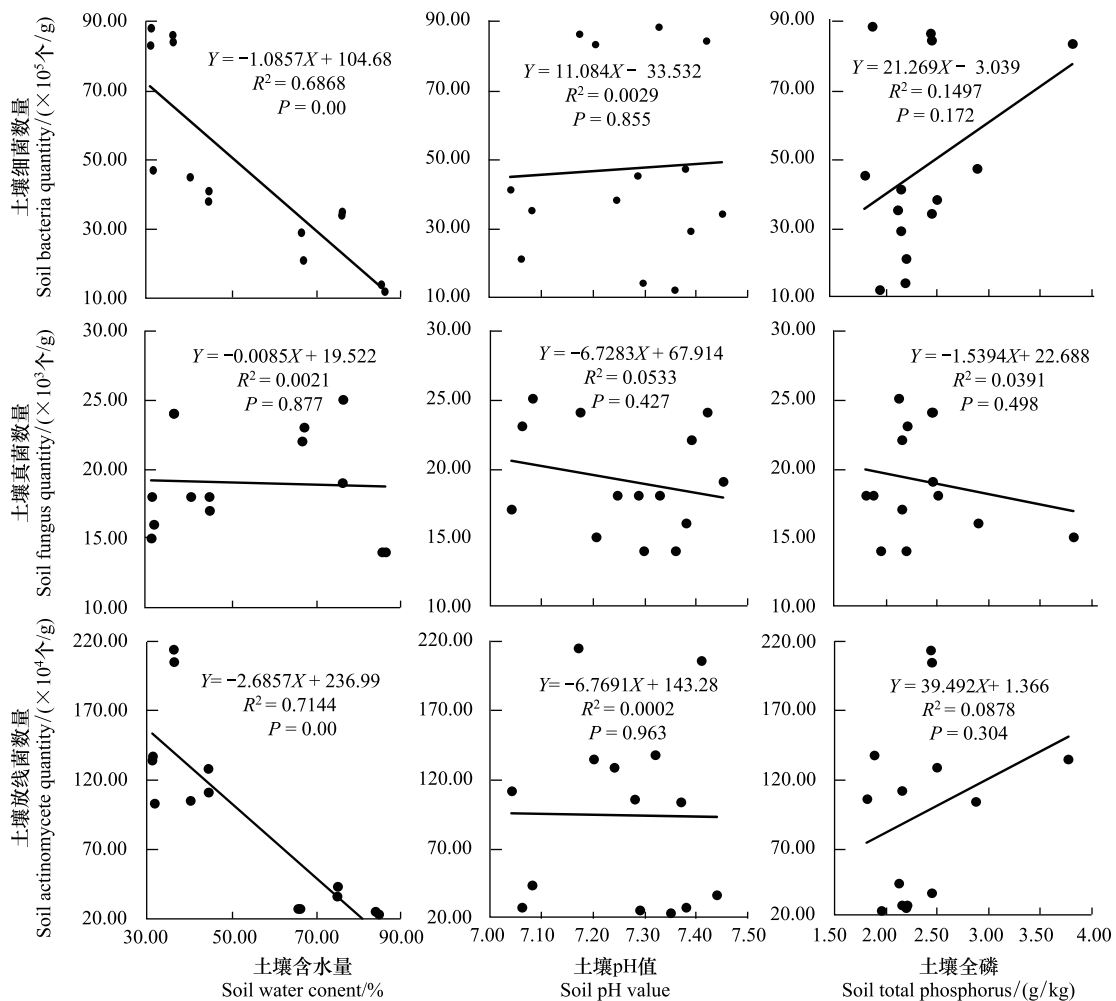
体分布为 E 坡>S 坡>SW 坡>NE 坡>N 坡>W 坡>NW 坡;放线菌数量总体表现为 S 坡数量最高,NE 坡和 SW 坡次之,NW 坡数量最低;而真菌数量分布则不同,S 坡>W 坡>N 坡>NE 坡>SW 坡>E 坡>NW 坡;对不同坡向土壤微生物进行显著性检验,土壤细菌数量 E 坡与 NE 坡、N 坡、SW 坡、W 坡、NW 坡之间均存在差异性($P<0.05$),与 S 坡差异不显著($P>0.05$);土壤真菌数量 S 坡与 SW 坡、NW 坡、E 坡、NE 坡之间差异显著($P<0.05$),与其他坡向差异均不显著($P>0.05$);土壤放线菌数量在 W 坡和 NW 坡之间不存在差异性($P>0.05$),其余所有坡向之间差异均显著($P<0.05$)(表 3)。

表 3 土壤微生物数量随坡向的变化(平均值±标准误)

Table 3 Variation of soil microorganism quantity with slope aspects (average ± st dev)

坡向 Slope aspects	细菌 Bacteria/($\times 10^5$ 个/g)	真菌 Fungus/($\times 10^3$ 个/g)	放线菌 Actinomycete/($\times 10^4$ 个/g)
东坡 East slope	85.5±2.5a	16.5±1.5c	135.5±1.5b
东北坡 Northeast slope	39.5±1.5bc	17.5±0.5bc	119.5±8.5c
北坡 North slope	34.5±0.5c	22.0±3.0ab	39.5±3.5e
西北坡 Northwest slope	13.0±1.0e	14.0±0.0c	24.0±1.0f
西坡 West slope	25.0±4.0d	22.5±0.5a	27.0±0.0ef
西南坡 Southwest slope	46.0±1.0b	17.0±1.0c	104.0±1.0d
南坡 South slope	85.0±1.0a	24.0±0a	209.5±4.5a

不同字母表示各坡向间差异显著($P<0.05$)



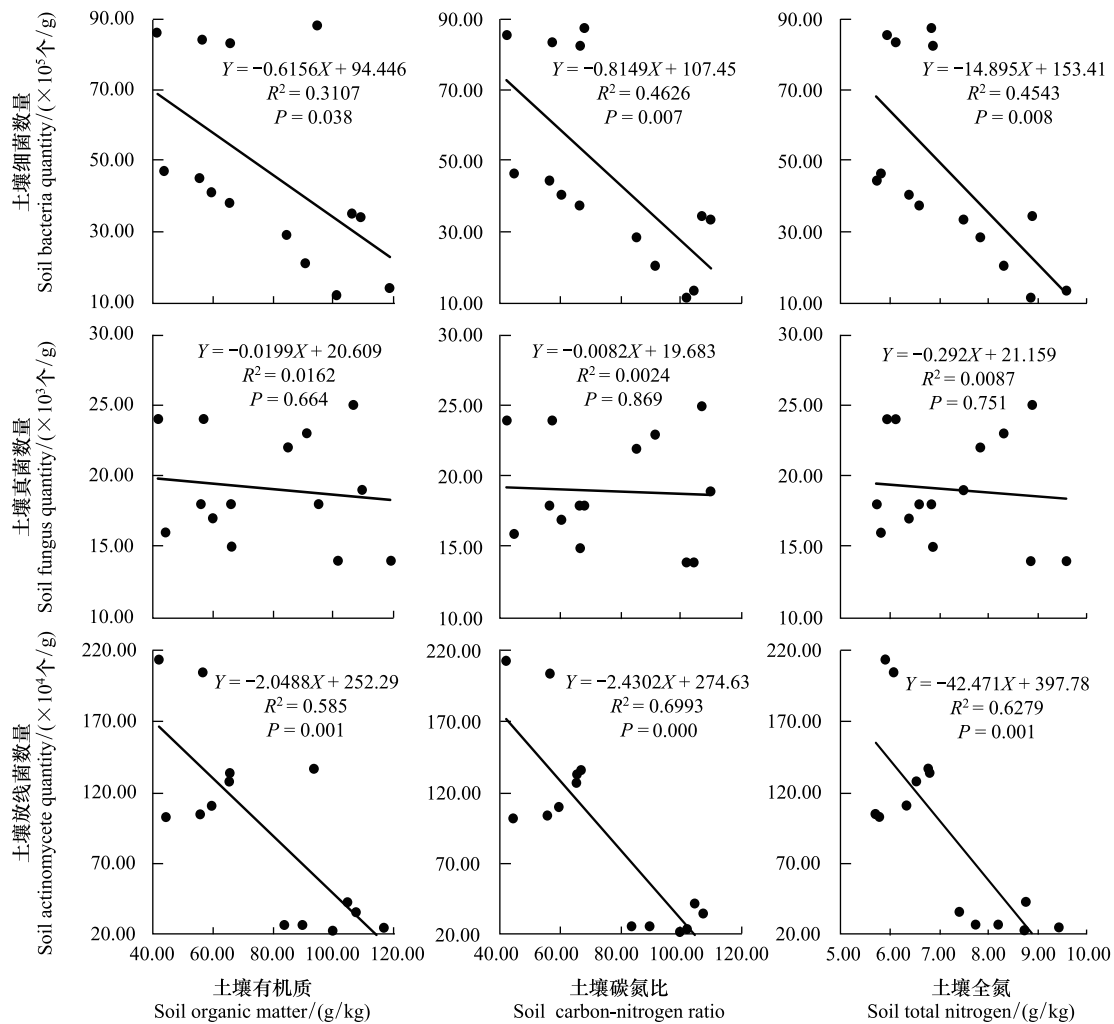


图2 土壤因子与微生物的关系

Fig. 2 The relationship between soil factors and microorganism

2.3 微生物与土壤因子之间的相关关系

土壤微生物与土壤因子密切相关,对不同坡向的土壤因子和微生物数量采用线性回归分析可知,从土壤含水量与土壤微生物的关系可以看出,土壤含水量与土壤细菌和放线菌的相关性均为显著负相关($P < 0.05$),随着土壤含水量的降低,细菌和放线菌数量会呈现出增加趋势,与真菌数量之间相关性不显著($P = 0.877$);土壤 pH 值与细菌、真菌和放线菌数量之间相关性均不显著($P > 0.05$),随着土壤 pH 值的增加微生物数量都没有显著变化;土壤有机质对细菌和放线菌数量的影响均呈现出显著负相关($P < 0.05$),随有机质的减少细菌和放线菌数量均增加,与真菌数量之间没有显著相关性;土壤碳氮比对细菌和放线菌数量的影响一致,均呈现出显著负相关($P < 0.05$),随着土壤碳氮比的增加细菌和放线菌数量均减小;土壤全磷与细菌、真菌和放线菌数量之间均没有显著相关性($P > 0.05$);土壤全氮对细菌和放线菌数量的影响均一致,都随全氮含量的增加微生物数量均减少,且都表现出显著相关性($P < 0.05$)(图2)。

3 讨论

了解各个坡向细菌、真菌、放线菌的数量情况及土壤因子的变化趋势,是评价坡向梯度上土壤肥力的重要基础^[23]。不同坡向下地表所接受的太阳辐射量差别很大,而太阳辐射的差异性导致土壤温度、湿度、有机质、碳氮含量等在坡向梯度上的不同^[24-25]。Gong^[26]等研究发现土壤全氮、有机质、碳氮比含量阴坡显著高于阳

坡,表明阴坡较阳坡相比具有丰富的土壤资源,这与本研究结果相同。原因可能由于 W 坡、NW 坡、N 坡、NE 坡坡度平缓、植被多以灌丛为主,这些都有利于水分的聚集、凋落物的截获、积累,以及灌丛根部对土壤养分有较强的储存能力^[27]。微生物可以准确、全面的对微环境的改变及时作出评价^[28]。而细菌、真菌、放线菌是微生物的三大类群,典型微生物群体中,每克根系土壤中含 10^9 个细菌, 10^7 个放线菌, 10^6 个真菌,几乎是非根系土壤中含量的 10—100 倍^[29]。本研究表明,土壤微生物数量总体表现为细菌数量最多,放线菌数量次之,真菌数量最少(表 3)。这与马红梅等^[30]对高寒草甸土壤微生物特征的研究结果一致。从 E→S 坡向上,3 种微生物数量均减小(表 3),说明阴坡微生物数量高于阳坡,可能由于阳坡土壤含水量、养分含量较低,以及禾草的密度低,土壤裸露较阴坡多等这些因素均不利于微生物的生存所导致。因此可知,微生物数量和土壤因子在不同坡向梯度上,均表现出一定的规律性,对了解该区域土壤肥力情况提供一定依据。

对微生物数量与环境因子相关性的研究,有利于了解生态系统中各生物间的联系、相互影响及形成过程,坡向作为主要的地形因素之一,是导致小的区域内形成迥异的局域微环境的重要因素,影响着生物的生存和生长^[14]。尹亚丽等^[31]在关于高寒草甸土壤的研究中指出,土壤微生物与土壤理化性质、地形地貌、水热条件和气候因子紧密联系,在土壤环境和气候因子发生变化时,不同地域土壤微生物群落结构也随之变化。胡雷等^[32]对三江源地区高寒草甸土壤微生物群落的研究中也表明土壤微生物群落结构(种类、数量)通过影响有机物分解、营养物质传递,从而促进植物生长。本研究中,土壤水分含量与土壤有机质、碳氮比和全氮含量均呈显著正相关($P<0.01$),说明在坡向梯度上,土壤含水量对土壤有机质、碳氮比、全氮含量的影响很大;土壤 pH 值和全磷含量与其与土壤养分之间均不存在相关性($P>0.05$)(表 2),这与王启兰等^[33]对高寒草甸土壤水分和有机质的研究结果一致。于健龙等^[34]研究了高寒草甸不同退化程度下土壤微生物数量和养分间的关系,他们的研究表明,土壤真菌数量与土壤有机质、全氮含量呈显著正相关。戴雅婷等^[35]研究了油蒿根部土壤中微生物数量和养分的关系,他们的研究表明,细菌数量随土壤有机质的增加而增加,真菌数量与有机质正相关,和含水量负相关,放线菌数量与全磷含量负相关。这都与我们的研究结果略有不同。本研究回归分析表明:细菌、放线菌数量随有机质含量的增加而减小,与全磷均无相关性,真菌数量与所有养分均没有相关性(图 2)。因此可以看出土壤因子对微生物数量的变化有着不同程度的影响。总体可知,土壤含水量、有机质、全氮、碳氮比含量对微生物数量变化影响最为显著,且均为显著负相关,这与卢慧等^[36]研究结果一致。可能由于微生物的生存需要土壤所提供的营养物质,而土壤养分含量高的时期,正是植物的生长旺盛期,使大部分土壤养分都被植物所吸收利用,因此,提供给微生物生长的物质很少^[37]。

总之,有研究已证明阳坡优势种为禾草,阴坡以杂草、灌丛为主^[24]。阴坡植被盖度、高度、密度等都高于阳坡,而这些因素均反应出坡向影响下植被对土壤养分的资源竞争与利用^[38]。阳坡坡度比阴坡陡峭,土壤易沙化,土壤中碳、氮等养分易流失^[39]。而阴坡灌丛植被有利于养分的积累、分解、微生物活动。退化草地一般采用生态修复,首先需要对草地进行调查,调查时必须考虑地形(坡向、坡度)的影响,因为植被所需养分会在坡向梯度上表现出一定的差异性,否则,所种植物可能不利于在此环境下生长,将会导致草地生态和经济的双重不利^[40]。综合考虑这些,会对退化草地的科学修复以及可持续管理提供参考。本试验中也未能对不同坡向下微生物功能基因进行研究,未来有必要采用高通量测序以及基因芯片等技术,对不同坡向下微生物群落特征,以及功能基因的差异进行分析,提供更多的数据支持,理解土壤生态系统的物质循环和能量流动的过程,更好的为草地资源的保护和利用提供支撑。

参考文献(References):

- [1] 段红芳. 青藏高原退化高寒草地生态系统中微生物群落结构多样性变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [2] 龙瑞军. 青藏高原草地生态系统之服务功能. 科技导报, 2007, 25(9): 26-28.
- [3] 苏军虎, 刘荣堂, 纪维红, 焦 婷, 蔡卓山, 花立民. 我国草地鼠害防治与研究的发展阶段及特征. 草业科学, 2013, 30(7): 1116-1123.
- [4] 成升魁, 沈镭. 青藏高原人口、资源、环境与发展互动关系探讨. 自然资源学报, 2000, 15(4): 297-304.
- [5] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地

- 及其生态恢复近 10 年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26(1): 1-21.
- [6] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997, 30(6): 1-10.
- [7] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 潘开文, 赵常明, 陈庆恒. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648-655.
- [8] 张薇, 魏海雷, 高洪文, 胡跃高. 土壤微生物多样性及其环境影响因子研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(1): 48-52.
- [9] Clark F E, Paul E A. The microflora of grassland. *Advances in Agronomy*, 1970, 22: 375-435.
- [10] Zhang Y, Dong S, Gao Q, Liu S, Ganjurjav H, Wang X, Su X, Wu X. Soil bacterial and fungal diversity differently correlated with soil biochemistry in alpine grassland ecosystems in response to environmental changes. *Sci Rep*, 2017, 7: 43077.
- [11] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应. 生态学杂志, 2013, 32(2): 259-265.
- [12] Chu H Y, Xiang X J, Yang J, Adams J M, Zhang K P, Li Y T, Shi Y. Effects of slope aspects on soil bacterial and arbuscular fungal communities in a boreal forest in China. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 226-234.
- [13] 赵拥华. 青藏高原北麓河地区冬春季多年冻土土壤 CO₂ 动态和释放研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006.
- [14] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 赵林峰, 陈孙华, 付美云, 林仲桂. 紫色土丘陵坡地土壤微生物群落的变化. 生态环境学报, 2015, 24(1): 34-40.
- [15] 曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展. 生态环境学报, 2010, 19(1): 239-243.
- [16] 徐长林. 坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响. 草业学报, 2016, 25(4): 26-35.
- [17] 聂莹莹, 李新娥, 王刚. 阳坡-阴坡生境梯度上植物群落 α 多样性与 β 多样性的变化模式及与环境因子的关系. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 73-79.
- [18] 李新娥. 亚高寒草甸阳坡—阴坡梯度上植物功能性状及群落构建机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [19] 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. 草业科学, 2016, 33(5): 886-890.
- [20] 侯媛, 刘旻霞, 孙辉荣. 青藏高原东缘亚高寒草甸植物叶性状对微生境变化的响应. 应用生态学报, 2017, 28(1): 71-79.
- [21] 牛世全, 杨婷婷, 李君锋, 达文燕, 杨建文. 盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系. 干旱区研究, 2011, 28(2): 328-334.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 李瑞, 刘旻霞, 张灿, 赵瑞东, 邵鹏. 甘南亚高寒草甸不同坡向土壤微生物群落分布特征. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1884-1891.
- [24] 刘旻霞, 马建祖. 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3295-3300.
- [25] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19.
- [26] Gong X, Brueck H, Giese K M, Zhang L, Sattelmacher B, Lin S. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(4): 483-493.
- [27] 盘远方, 陈兴彬, 姜勇, 梁士楚, 陆志任, 黄宇欣, 倪鸣源, 覃彩丽, 刘润红. 桂林岩溶石山灌丛植物叶功能性状和土壤因子对坡向的响应. 生态学报, 2018, 38(5): 1581-1589.
- [28] Pascual J A, Garcia C, Hernandez T, Moreno J L, Ros M. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1877-1883.
- [29] 吴建峰, 林先贵. 土壤微生物在促进植物生长方面的作用. 土壤, 2003, (1): 18-21.
- [30] 马红梅, 邵新庆, 张建全, 钟梦莹, 柴琦, 余群, 魏佳宁. 玉树高寒草甸不同利用方式下土壤微生物的特征. 草地学报, 2015, 23(1): 75-81.
- [31] 尹亚丽, 王玉琴, 鲍根生, 王宏生, 李世雄, 宋梅玲, 邵宝莲, 温玉存. 退化高寒草甸土壤微生物及酶活性特征. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3881-3890.
- [32] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 马力, 刘伟, 向泽宇. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化. 草业学报, 2014, 23(3): 8-19.
- [33] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 高寒草甸不同植被土壤微生物数量及微生物生物量的特征. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1002-1008.
- [34] 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. 西北农业学报, 2011, 20(11): 77-81.
- [35] 戴雅婷, 闫志坚, 王慧, 吴洪新. 油蒿根际土壤微生物数量及其与土壤养分的关系. 中国草地学报, 2012, 34(2): 71-75.
- [36] 卢慧, 丛静, 刘晓, 王秀磊, 唐军, 李迪强, 张于光. 三江源区高寒草甸植物多样性的海拔分布格局. 草业学报, 2015, 24(7): 197-204.
- [37] 宋秋华, 李凤民, 王俊, 刘洪升, 李世清. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响. 生态学报, 2002, 22(12): 2125-2132.
- [38] Westoby M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil*, 1998, 199(2): 213-227.
- [39] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 张兴昌, 山仑. 陕北黄土丘陵区撂荒群落土壤养分与地上生物量空间异质性. 生态学报, 2008, 28(1): 13-22.
- [40] 龚时慧, 温仲明, 施宇. 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应. 生态学报, 2011, 31(20): 6088-6097.