

# 人工草地建设对甘南草原土壤理化特性和微生物数量特征的影响

姚宝辉<sup>1,2</sup>, 王缠<sup>1,2</sup>, 郭怀亮<sup>1,2</sup>, 张倩<sup>1,2</sup>, 杨晶<sup>1,2</sup>, 康宇坤<sup>1,2</sup>, 苏军虎<sup>1,2</sup>

(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:** 研究甘南草原高寒草甸退化草地人工种草后土壤理化性质和微生物数量特征, 为退化草地的修复与利用提供参考。于2017年5, 7, 10月分别采集播种燕麦、黑麦及其未播种的草地土壤, 测定其理化特性及微生物数量特征。结果表明: 人工种植的黑麦草地土壤水分均大于燕麦人工草地, 5, 7月人工草地土壤含水量均显著大于对照草地, 但10月差异不显著( $P > 0.05$ ); pH在各月份不同播种方式下差异均不显著( $P > 0.05$ ); 土壤全氮、全磷在不同月份间差异亦不显著( $P > 0.05$ ), 但黑麦人工草地5月10—20 cm层的有机碳、10月40—50 cm层的全氮含量均显著大于燕麦人工草地及对照样地( $P < 0.05$ ), 7月20—30 cm层燕麦人工草地的有机碳含量显著大于黑麦人工草地及对照草地; 5月0—30 cm层燕麦人工草地和黑麦人工草地的细菌数量显著高于对照草地的细菌数量( $P < 0.05$ ), 7月0—10 cm层人工草地细菌数量显著高于对照草地( $P < 0.05$ ), 10月黑麦人工草地0—30 cm层细菌数量均显著高于对照草地( $P < 0.05$ ); 5, 10月真菌数量在0—10 cm层人工草地显著高于对照草地( $P < 0.05$ ), 7月10—30 cm层人工草地的真菌数量、0—10 cm层的放线菌数量均显著高于对照草地( $P < 0.05$ ); 冗余分析发现, 土壤细菌和真菌的变化具有联动性, 且与土壤有机质、全氮、全磷等养分呈正相关。综上, 人工种草后土壤养分的变化导致了土壤微生物数量的差异, 这需要在草地管理中予以重视。

**关键词:** 甘南草原; 人工草地建植; 土壤理化性质; 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)01-0192-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.031

## Effects of Artificial Supplementary Sowing on Soil Physical and Chemical Characteristics and Microorganism Quantity in Gannan Grassland

YAO Baohui<sup>1,2</sup>, WANG Chan<sup>1,2</sup>, GUO Huailiang<sup>1,2</sup>,

ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, YANG Jing<sup>1,2</sup>, KANG Yukun<sup>1,2</sup>, SU Junhu<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** The aim of the current study was to examine the changes of soil physical and chemical properties and microbial quantity characteristics and to provide a reference for the restoration and utilization of the degraded grassland in alpine meadow of Gannan, Gansu Province. Soils were classified as reseeded rye group, reseeded oat group and non-reseeded (control group), and the soil was collected from the above three groups on May, July and October 2017, respectively, to investigate their physiochemical characteristics and the microbial quantity characteristics. Results showed that the soil water contents of reseeded rye grassland was significantly higher than that of oat grassland ( $P < 0.05$ ), the soil water contents of the above grassland were significantly higher than that of control in May and July, while there was no significant difference in October ( $P > 0.05$ ). There was no significant difference in pH among different sowing methods in each month ( $P > 0.05$ ). There was no significant difference in total nitrogen and phosphorus contents among different soil groups ( $P > 0.05$ ). However, the soil organic carbon contents in 10—20 cm soil layer in May, and the total nitrogen content in 40—50 cm soil layer in October of the reseeded rye group were significantly higher than

收稿日期: 2018-08-12

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); 教育部重点实验室开放基金项目(2017-GSAU-CYJ-03)

第一作者: 姚宝辉(1993—), 男, 在读硕士研究生, 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

the same parameters of the oat and control groups ( $P < 0.05$ ). On the contrary, the soil organic carbon content in 20–30 cm soil layer of the reseeded oat group was significantly higher than those of the rye and control groups in July. In May, the soil bacterial loads in 0–30 cm soil layer of the reseeded rye and oat groups were significantly higher than that of the control group ( $P < 0.05$ ), while the same parameter in 0–10 cm soil of reseeded groups was significantly higher than that of the control group in July ( $P < 0.05$ ), and the bacterial load in 0–30 cm soil layer of the reseeded rye group was significantly higher than that of the control in October ( $P < 0.05$ ). In May and October, the fungal load in 0–10 cm soil layer of both reseeded rye and oat groups were significantly higher than that of the control group ( $P < 0.05$ ), and the fungal load in 10–30 cm soil layer and actinomycelial load in 0–10 cm soil layer of reseeded groups were significantly higher than that of control group in July ( $P < 0.05$ ). Redundancy analysis showed that the changes of soil bacteria and fungi were linkage, and positively correlated with soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and other nutrients. Therefore, it could be concluded that the changes of soil nutrients after supplementary sowing had led to the differences in soil microbial quantity, which needed attention in grassland restoration and management practices.

**Keywords:** Gannan grassland; supplementary sowing; soil physical and chemical properties; microorganism quantity; redundancy analysis

青藏高原面积约占全国陆地总面积的 26.80%，是我国的主要畜牧业基地<sup>[1]</sup>。甘南草原位于青藏高原的东部边缘，是黄河首曲最大的生态湿地，曾被称为“亚洲第一牧场”，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<sup>[2]</sup>。近年来，在全球气候变化影响下甘南草原呈现出严重退化态势，已经威胁到当地的生态环境安全、生物多样性保护和畜牧经济的发展<sup>[3]</sup>，加之过度放牧、不合理的开垦和管理措施等，导致草原鼠虫害频发，更使草地退化愈加严重。据统计，甘南草原退化草地面积约 85 hm<sup>2</sup>，约占草地总面积的 30% 左右<sup>[3]</sup>，甘南草原退化草地的修复与管理已迫在眉睫。

根据草地不同退化程度和草地类型，可将退化草地生态系统的恢复方法分为修复、重建和保护 3 种<sup>[4]</sup>。在甘南草原等青藏高原东缘地区，以一年生人工草地为主，多年生人工草地、牧草种子田、饲料生产田等多类型为辅的人工草地生态系统已经发展成为该地区草地农业的主要形式<sup>[5]</sup>。人工草地不仅能为畜牧业提供高产的优质牧草，还具有涵养水源、保持水土、改良土壤、美化环境的能力。人工草地在群落盖度、密度、高度和生物量等方面一般优于天然草地，尤其在快速恢复水土流失区、严重退化的草地和撂荒地的植被方面具有优异的能力<sup>[5]</sup>。贾倩民等<sup>[6]</sup>研究了宁夏干旱区不同人工草地对土壤特性和微生物数量特征的影响，发现人工草地的土壤容重、pH、全盐均低于撂荒地，人工草地的土壤有机质、全氮、速效氮和速效磷含量均显著高于撂荒地，且人工草地表层土

壤细菌、真菌和放线菌数量均显著高于撂荒地。字洪标等<sup>[7]</sup>发现三江源区不同建植年限人工草地土壤微生物功能多样性存在差异，随着建植年限的增加，土壤养分状况、微生物群落稳定性和生态环境得到改善。人工草地建设已在生态环境保护、农牧业经济发展、农牧民生计改善方面起到了显著作用，而全面分析人工草地建设对草地生态系统的影响，对掌握草地可持续管理具有重要的现实指导意义。

土壤微生物是草地生态系统的重要组成部分，参与草地生态系统的物质循环和能量流动，对土壤原有腐殖质的分解具有一定的促进作用，可以加速 C、N 等元素的循环，对有机质的分解转化也起主导作用，是土壤养分的“源”和“库”<sup>[4]</sup>。土壤微生物与地表植物之间存在着相互依存和制约关系，“土壤—微生物—植被”生态系统被破坏，生态稳定性降低，土壤养分含量减少，而人工草地建植等可以明显改善退化草地地上和地下生物量、微生物数量和土壤生物活性<sup>[8]</sup>。同时，微生物对土壤质量和肥力很重要，是衡量土壤健康的重要指标。对退化草地进行人工播种处理后，可有效解决和控制草原日趋恶化的问题，土壤物理性质可得到有效的改善，土壤养分含量、草地生物量也会得到增加<sup>[5]</sup>。然而，以前研究多是探讨土壤理化性质与土壤微生物量等的变化，土壤微生物量的研究也多集中于土壤微生物量碳和土壤微生物氮<sup>[9]</sup>，未见甘南草原人工建植后土壤微生物数量变化及其成因等的相关报道，随着退化草地综合治理工程和“生态屏障”建设的实施，掌握人工草地建设对草地生态系统的影响对其科学修复和综合治理至关重要。本研究通过分析甘南草原高寒草甸退化草地人工草

地建植后土壤理化特性和微生物数量特征,旨在深入揭示草地生态系统恢复的机制,为甘南草原退化草地的恢复与重建及科学管理提供参考。

## 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,地理坐标为 33°58′21″—34°48′48″ N,101°35′34″—102°58′15″ E,年平均气温 2.3 ℃,无绝对无霜期,年降水量为 632~781 mm,日照时间长,年蒸发量 1 000~1 500 mm,降水主要集中于 5—9 月,土壤为亚高山草甸土,境内平均海拔约 3 000 m<sup>[10]</sup>。

### 1.2 样品采集

试验以人工种植燕麦、黑麦的土壤为主,并分别于 2017 年 5 月 20 日、7 月 20 日和 10 月 20 日分别采集对照和人工草地的土样,各样地内采用五点法分别采集 0—50 cm 土样,每层 10 cm,分 5 层(0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 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,并及时带回实验室做微生物数量;风干(自然晾干,避免阳光暴晒),用于土壤理化特性的测定与分析。

### 1.3 试验方法

土壤理化性质测定:土壤全氮测定采用半微量凯氏定氮法;土壤全磷测定采用硫酸—高氯酸消解法;土壤有机碳采用重铬酸钾、外加热法测定<sup>[11]</sup>;土壤水分采用 105 ℃ 烘干法测定;土壤酸碱度采用 pH 计测定。

土壤微生物测定: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。配

制土壤悬浮液(经过预实验测试细菌、放线菌、真菌分别选择 10<sup>-4</sup>、10<sup>-3</sup>、10<sup>-2</sup> 稀释度的土壤悬浮液)。接种于培养基中,用无菌刮铲涂抹均匀。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)=(菌落平均数×稀释倍数)/土壤烘干质量,计算总量<sup>[12]</sup>。

### 1.4 数据分析

应用 Excel 2010 软件对所得数据进行简单记录和处理并制作相关图表;SPSS 19.0 软件对数据进行多重比较分析和单因素方差分析。为了揭示高寒草原土壤理化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<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质的变化

由表 1 可知,5、10 月土壤含水量均随土层深度的加深而下降,而 7 月的土壤含水量随土层深度的加深先增大后减小。5 月燕麦和黑麦人工草地土壤含水量在 0—50 cm 土层内显著大于对照草地( $P < 0.05$ )。7 月黑麦人工草地在 0—50 cm 土层内的土壤含水量在 0—10 cm 层土壤 pH 均显著大于燕麦人工草地及对照草地( $P < 0.05$ ),但燕麦人工草地与对照草地差异不显著( $P > 0.05$ )。10 月人工草地的土壤水分在 0—50 cm 土层内和对照草地无显著性差异( $P > 0.05$ )。人工草地和对照草地 pH 均呈弱碱性,pH 在各月人工草地和对照草地差异不显著( $P > 0.05$ ),但随月份的增加 pH 增加,同一种人工草地不同土层土壤 pH 差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 1 人工草地建设前后土壤含水量和 pH 的变化

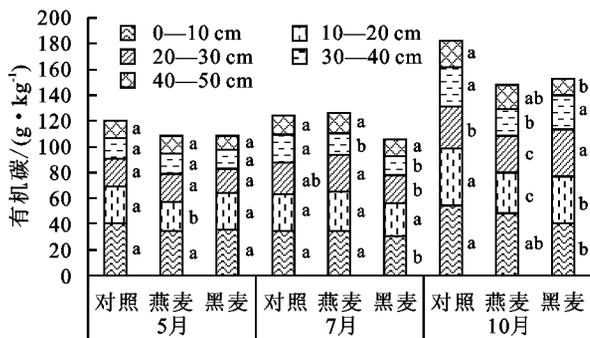
月份	土层深度/cm	土壤含水量/%			土壤 pH		
		对照	燕麦	黑麦	对照	燕麦	黑麦
5 月	0—10	18.34±0.11Ac	27.57±0.10Aa	27.02±0.08Ab	7.26±0.11Aa	7.29±0.11Ba	7.35±0.17Aa
	10—20	18.13±0.12ABCc	23.54±0.02Bb	24.97±0.02Ba	7.33±0.19Aa	7.38±0.10ABa	7.42±0.14Aa
	20—30	18.28±0.08Bc	22.08±0.12Cb	22.85±0.21Ca	7.41±0.23Aa	7.44±0.07ABa	7.46±0.15Aa
	30—40	18.00±0.08BCc	21.17±0.01Db	22.07±0.14Ca	7.53±0.13Aa	7.50±0.06ABa	7.48±0.12Aa
	40—50	17.89±0.01Cc	19.79±0.07Eb	21.16±0.46Da	7.48±0.15Aa	7.62±0.04Aa	7.46±0.13Aa
7 月	0—10	13.19±0.23Cb	12.92±0.30Bb	15.97±0.12Da	7.53±0.01Aab	7.50±0.02Bb	7.60±0.02Aa
	10—20	13.24±0.37Cb	13.66±0.07Bb	16.26±0.06Ca	7.56±0.04Aa	7.59±0.03ABa	7.58±0.03Aa
	20—30	14.61±0.04Ab	15.32±0.35Ab	18.13±0.03Aa	7.60±0.02Aa	7.57±0.03ABa	7.62±0.07Aa
	30—40	13.73±0.25BCc	15.16±0.14Ab	17.54±0.02Ba	7.56±0.02Aa	7.62±0.04Aa	7.63±0.05Aa
	40—50	14.21±0.07ABc	15.85±0.12Ab	17.65±0.07Ba	7.55±0.04Aa	7.64±0.03Aa	7.67±0.08Aa
10 月	0—10	39.13±1.56Aa	38.71±0.52Aa	37.21±1.09Aa	7.77±0.03Aa	7.92±0.15Aa	8.00±0.03BCa
	10—20	34.34±0.73Ba	34.45±0.94Ba	32.38±1.43Ba	7.93±0.11Aa	7.90±0.19Aa	8.17±0.03ABa
	20—30	32.15±0.21Ba	30.38±0.37Cb	31.58±0.04Ba	7.96±0.14Aa	7.8±0.17Aa	8.26±0.04Aa
	30—40	29.99±1.38Ca	29.31±0.89Ca	30.6±0.48Ba	8.01±0.14Aa	7.87±0.11Aa	8.15±0.03ABCa
	40—50	28.5±0.82Ca	28.77±0.05Ca	30.47±0.46Ba	8.04±0.13Aa	8.04±0.21Aa	7.95±0.12Ca

注:表中数据为平均值±标准误差;不同大写字母表示同一人工草地不同土层之间的差异显著( $P < 0.05$ );不同小写字母表示不同人工草地同一土层之间的差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

由图 1 可知,土壤有机碳随土层深度的增加而减

少。在同一人工草地中,燕麦人工草地 10 月 0—30 cm

土层有机碳含量均显著大于 5,7 月 ( $P < 0.05$ ), 黑麦人工草地 10 月 0—20 cm 土层有机碳含量均显著大于 5,7 月 ( $P < 0.05$ )。在不同人工草地中, 5,7,10 月对照草地 0—20 cm 土层有机碳含量均大于燕麦及黑麦人工草地, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。由图 2 可知, 土壤全氮含量随土层深度的增加而减少, 在相同人工草地中, 7 月燕麦和黑麦人工草地全氮含量在 0—40 cm 土层大于 5,10 月。在不同播种处理下, 对照草地全氮含量在 0—20 cm 土层大于燕麦及黑麦人工草地, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。由图 3 可知, 土壤全磷随土层深度的增加而减少, 全磷在相同月份燕麦和黑麦人工草地与对照草地间差异均不显著 ( $P > 0.05$ ), 全磷在不同月份间同一人工草地差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。



注: 小写字母表示不同草地同一土层之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 人工草地建设前后土壤有机碳的变化

## 2.2 土壤微生物数量变化

由表 2 可知, 微生物数量变化均表现为细菌数量最多、放线菌次之、真菌最少, 但人工建植处理后草地土壤微生物数量明显增多。5 月 0—30 cm 土层燕麦和黑麦人工草地的细菌数量显著高于对照草地的细菌数量 ( $P < 0.05$ ), 但 7 月细菌数量只有在 0—10 cm 土层人工草地显著高于对照草地 ( $P < 0.05$ ), 10 月只

有黑麦人工草地的细菌数量在 0—30 cm 显著高于对照草地 ( $P < 0.05$ ), 燕麦人工草地的细菌数量与对照草地的细菌数量差异不显著; 5,10 月真菌数量在 0—10 cm 土层人工草地显著高于对照草地 ( $P < 0.05$ ), 但 10—30 cm 土层差异不显著 ( $P > 0.05$ )。7 月 10—30 cm 土层人工草地真菌数量显著高于对照草地的值 ( $P < 0.05$ ), 但 0—10 cm 土层真菌数量差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 5,10 月, 人工草地 0—10 cm 层放线菌数量与对照草地无差异显著 ( $P > 0.05$ ), 但 7 月 0—10 cm 层燕麦人工草地的放线菌数量显著高于对照草地的值 ( $P < 0.05$ )。

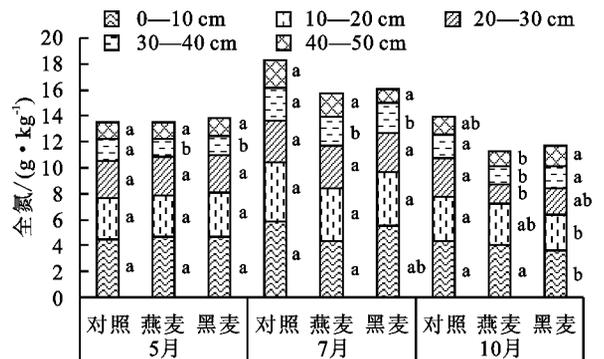


图 2 人工草地建设前后土壤全氮的变化

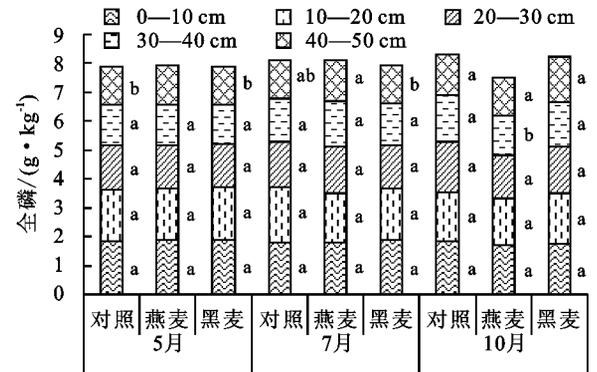


图 3 人工草地建设前后土壤全磷的变化

表 2 人工草地建设前后土壤微生物数量的变化

月份	土层深度/cm	细菌/( $\times 10^5 \cdot \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )			真菌/( $\times 10^3 \cdot \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )			放线菌/( $\times 10^3 \cdot \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )		
		对照	燕麦	黑麦	对照	燕麦	黑麦	对照	燕麦	黑麦
5 月	0—10	93.25±7.41b	138.00±6.75a	135.25±7.55a	15.25±2.98b	28.50±1.26a	26.50±3.93a	149.5±7.60a	156.75±5.53a	169.75±7.42a
	10—20	65.75±5.28b	91.25±5.48a	90.75±3.75a	15.00±3.03a	13.00±0.41a	14.75±1.65a	177.25±7.69a	142.00±7.80a	179.5±18.54a
	20—30	33.50±4.19b	48.75±1.18a	52.00±6.62a	6.25±1.70a	11.00±1.83a	8.50±1.76a	93.75±1.89b	125.50±6.34a	117.50±2.02a
7 月	0—10	134.33±3.48b	175.33±4.81a	173.67±5.24a	22.33±2.60a	31.33±3.18a	31.33±1.76a	97.67±7.62b	152.00±15.89a	114.67±4.06b
	10—20	72.33±4.91a	71.67±6.06a	85.00±2.89a	11.00±1.15b	21.00±0.58a	22.33±0.88a	87.00±4.51ab	93.33±2.91a	75.67±2.33b
	20—30	45.00±3.46a	32.33±4.48a	45.00±5.69a	5.33±0.88c	16.00±1.15a	11.33±0.88b	65.67±6.64a	38.33±2.33b	38.67±1.45b
10 月	0—10	82.33±1.45b	88.67±2.73b	109.33±3.18a	39.33±5.61b	73.33±7.84a	62.00±7.94a	132.00±12.22a	205.67±17.57a	158.33±11.47a
	10—20	56.33±2.40b	60.33±10.84b	91.33±5.90a	40.33±7.13a	34.33±5.04a	32.67±0.67a	230.67±43.98a	197.67±3.48a	85.33±6.96b
	20—30	37.67±5.17b	42.67±2.60b	72.67±4.26a	16.00±1.15a	15.00±2.08a	10.00±3.21a	215.33±18.82a	193±6.08a	59.67±10.53b

不同月份间比较发现, 5 月燕麦和黑麦人工草地在 0—30 cm 土层细菌、真菌和放线菌数量差异性不显著 ( $P > 0.05$ ); 7 月燕麦和黑麦人工草地在 0—30 cm 土层细菌数量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但真菌数量在 20—30 cm 层燕麦人工草地显著高于黑麦人工草地 ( $P < 0.05$ ), 放线菌数量在 0—20 cm 土层燕麦

人工草地显著高于黑麦人工草地 ( $P < 0.05$ ); 10 月燕麦和黑麦人工草地在 0—30 cm 土层细菌数量差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 但真菌数量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 10—20 cm 土层燕麦人工草地的放线菌数量显著高于黑麦人工草地 ( $P < 0.05$ )。

从季节变化来看, 细菌数量在人工草地和对照草

地的表层 0—10 cm 土层从 5,7 月至 10 月出现先增大后减小的趋势,在 7 月达到最大值;真菌数量在人工草地和对照草地的表层 0—10 cm 土层从 5,7 月至 10 月一直在增大,10 月真菌数量达到最大值;而放线菌数量在人工草地和对照草地的表层 0—10 cm 土层从 5,7 月至 10 月出现先减小后增大的趋势,但 7 月放线菌数量小于 5,10 月的放线菌数量。

### 2.3 土壤微生物与土壤因子之间的相关关系

采用冗余分析(RDA)揭示人工草地建设对甘南草地土壤理化性质与微生物数量之间的相互作用发现,土壤有机质、全氮、全磷、含水量呈正相关性较强,pH 与它们呈负相关性。土壤细菌和真菌之间相关性较强,细菌和真菌与土壤有机质、全氮、全磷、含水量呈正相关,与 pH 呈负相关;土壤碳氮比与放线菌呈负相关。由图 4 可知,5 月对照草地 RDA 分析的第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 63.84%和 21.14%的土壤因子与微生物之间的关系,2 轴累计解释 84.98%;燕麦人工草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 72.75%,第 2 排序轴解释了 9.12%,黑麦人工草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 52.23%,第 2 排序轴解释了 17.25%,说明排序轴反映了环境因子与微生物之间的大部分信息。从环境因子箭头连线与排序轴的夹角来看,5 月对照草地土壤碳氮比和土壤含水量主要构成了第 1 排序轴,并且土壤碳氮比与排序轴正相关,土壤含水量与排序轴正相关;而第 2 排序轴有土壤有机质、全氮、全磷、pH 构成而其中,前 3 个指标与排序轴负相关,pH 与排序轴正相关。而在燕麦和黑麦的人工草地中土壤有机质、全氮、全磷等主要构成了第 1 排序轴,人工草地建设后土壤有机质、全氮、全磷与第 1 排序轴的相关性增加。

7 月土壤微生物与环境因子的 RDA 分析发现,对照草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 92.51%,第 2 排序轴解释了 4.70%,燕麦人工草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 88.82%,第 2 排序轴解释了 3.33%,黑麦人工草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 97.88%,第 2 排序轴解释了 0.79%,说明排序轴反映了环境因子与微生物之间的绝大部分信息(图 5)。从环境因子的相关性来看,土壤有机质、全氮、全磷正相关性较强,在人工草地草地土壤含水量和 pH 与它们呈负相关性。土壤细菌和真菌之间相关性较强,细菌和真菌与土壤有机质、全氮、全磷、呈正相关,与土壤含水量和 pH 呈负相关;在黑麦人工草地真菌和放线菌相关性较强,人工草地土壤 pH 与放线菌呈负相关。人工草地与对照草地相比,人工草地建设后土壤有机质、全氮、全磷和含水量与排序轴之间的相

关性有所提升;土壤含水量在人工草地建设前与排序轴相关性不显著,人工草地建设后与排序轴相关性达到显著。

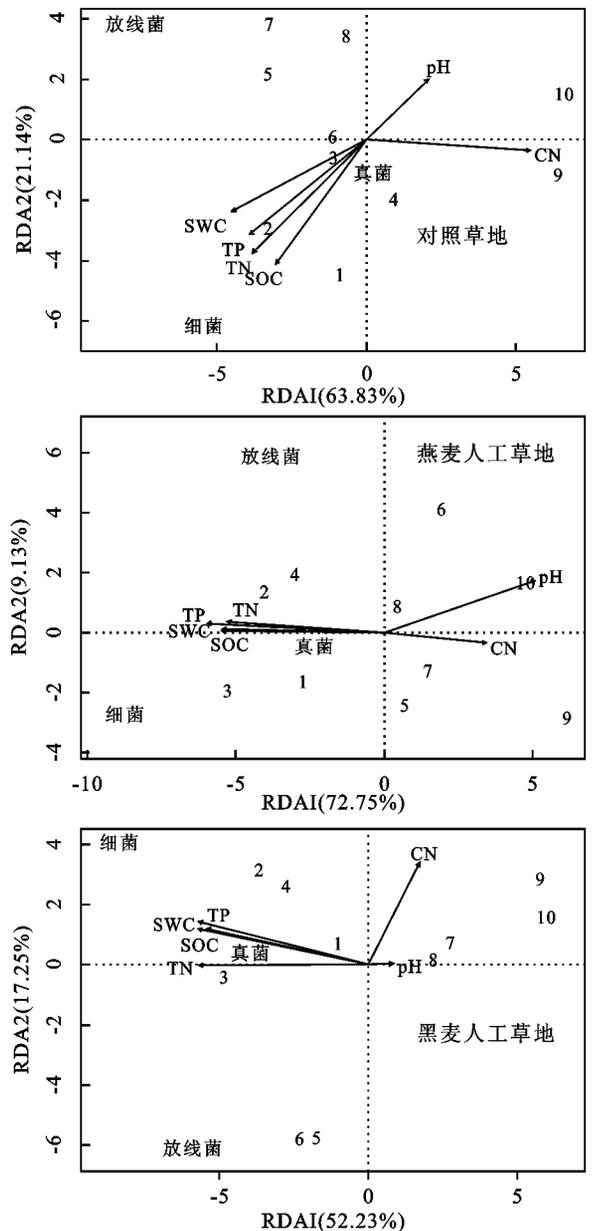


图 4 人工草地建设前后 5 月土壤微生物与环境因子的冗余分析

10 月土壤微生物与环境因子的 RDA 分析发现,对照草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 67.1%,第 2 排序轴解释了 9.62%。燕麦人工草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 74.52%,第 2 排序轴解释了 11.80%。黑麦人工草地 RDA 分析的第 1 排序轴解释了 63.18%,说明排序轴反映了环境因子与微生物之间的大部分信息。从环境因子的相关性来看,土壤有机质、全氮、含水量呈正相关性较强。土壤细菌和真菌之间相关性较强,在燕麦人工草地土壤细菌与土壤有机质、全氮、含水量呈正相关性较强,在燕麦人工草地土壤真菌与土壤有机质、全氮、含水量和全磷呈正相关性较强。土壤有机质、全氮、含水量和全磷在人工草

地建设前与第 2 排序轴相关性强,人工草地建设后与第 1 排序轴的相关性强(图 6)。

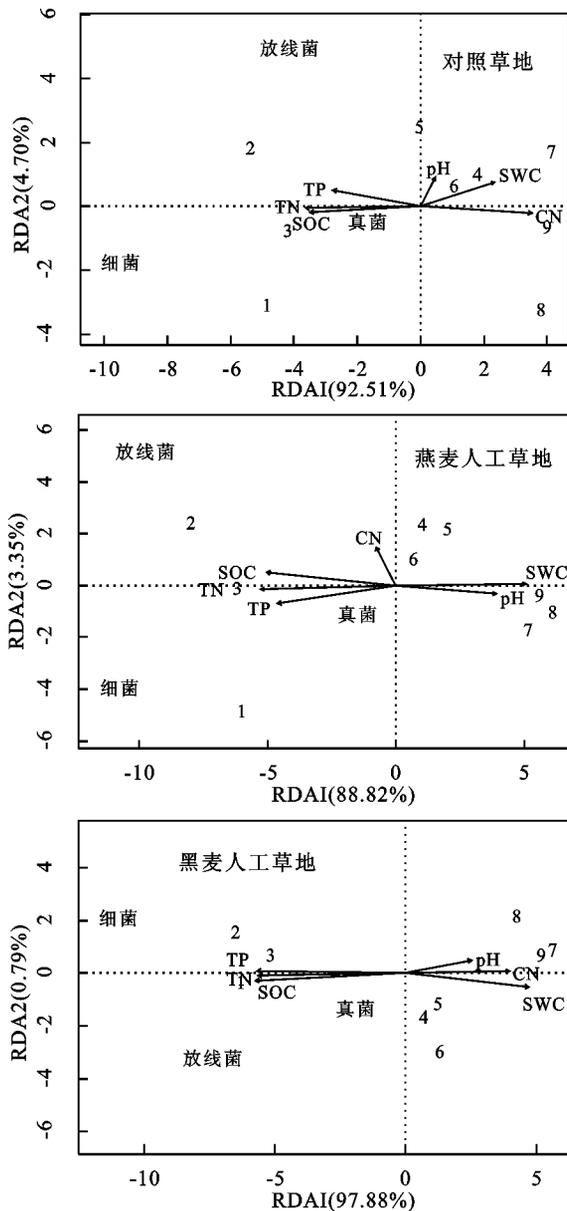


图 5 人工草地建设前后 7 月土壤微生物与环境因子的冗余分析

### 3 讨论

#### 3.1 人工草地建设对退化草地土壤理化性质的影响

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<sup>[14]</sup>。本研究发现,人工草地建设明显提高了退化草地土壤含水量,是由于退化草地通过人工草地建设,增加了植被盖度,减少了裸露地表面积,降低了蒸发量,加之植被也有利于收集雨水,土壤表层含水量较对照草地明显增加。同时由于植被的增加,相应的根系量增多,土壤容重下降,孔隙度增加,人工草地建设有效改善了土壤的保水性和通透性。pH 是土壤的一个重要指标,适宜的 pH 有利于提高土壤养分的有效性,促进土壤微生物活动,加速养分循环,从而促进牧草生长<sup>[15]</sup>。

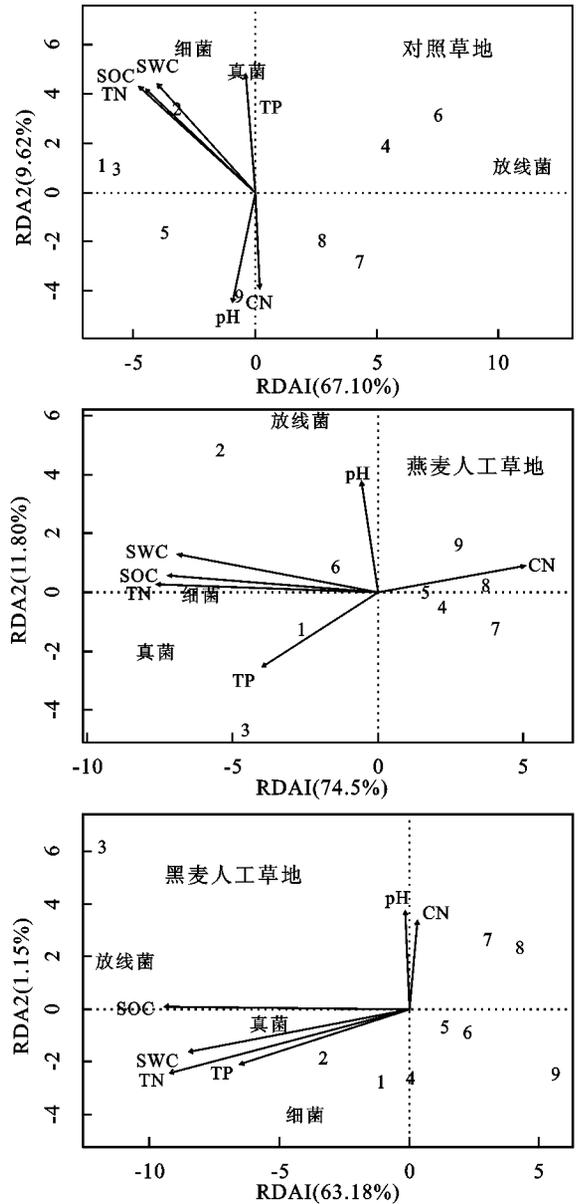


图 6 人工草地建设前后 10 月土壤微生物与环境因子的冗余分析

本研究发现,人工草地建设后退化草地的土壤 pH 随时间的增加而逐渐增加,这可能与植物利用和土壤微生物的活动以及土壤盐分循环有一定关系,这一趋势有待进一步研究。此外,土壤有机质、全氮和全磷被认为是表征土壤肥力和生产力的重要指标之一。土壤有机质、全氮和全磷含量通常用于衡量土壤的基础肥力,它们既是构成植物体内重要有机化合物的组成成分,同时又以多种方式参与植物体内的生理过程,对植物的生长发育和生理代谢都起着重要作用。本研究发现,人工草地建设提高了退化草地土壤有机碳,这说明随时间的增加,人工草地建设可以促进土壤有机碳的积累。而对照草地的有机碳大于人工草地的,是因为人工草地建设年限短,以及人工草地建设加快退化草地土壤有机碳的吸收,被草地植物的生长发育所利用,植物对土壤有机碳的利用率得到

提高。根据草原生态化学的研究,土壤中氮素对草地植物的生长发育有着直接的影响,5—9月随着土壤水分和气候温度的适宜变化,草地植物生长逐渐旺盛,使草地植物对氮元素的需求增加,导致土壤全氮含量随季节变化逐渐减少。而本研究发现,全氮在7月(草地植物生长盛期)含量大于5月(草地植物开始生长期)及10月(草地植物生长衰退期),其机制需要进一步研究。土壤中的磷素大部分是以迟效性状态存在,因此土壤全磷含量并不能作为土壤磷素供应的指标,全磷含量高时并不意味着磷素供应充足,但全磷含量低时,却能意味着磷素供应不足。而且全磷与成土母质的形成有关,在小范围内其含量无明显变化。本研究中,全磷在人工草地与对照草地间差异均不显著,可能是磷元素在土壤中的稳定性比较好,抗干扰能力强;也可能由于人工草地建设年限比较短,其效应还没有体现出来。

### 3.2 人工草地建设对退化草地土壤微生物数量的影响

本研究发现,甘南草地土壤微生物数量在人工草地和对照草地间差异性显著,人工草地建设对甘南草地退化有明显的改善作用,减少了土壤养分和微生物量的流失,减缓了草地土壤环境的退化。与前期研究<sup>[16]</sup>一致,细菌是该区域草地土壤优势类群,与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。由于细菌可产生胞外代谢物,如多糖、脂类和蛋白质,起到胶结以稳定团聚体的作用<sup>[17]</sup>。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;同时,草地土壤微生物数量有明显的垂直分布规律,即微生物类群具有表聚性,土壤细菌、真菌、放线菌数量均随土层深度的增加而减少<sup>[12]</sup>。表层土壤微生物数量最大,是土壤微生物最活跃的土层。因为草地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<sup>[18]</sup>。在偏碱性土壤中真菌数量少的,是因为土壤细菌、放线菌在中性偏碱的土壤中生长较好,而真菌一般较耐酸<sup>[19]</sup>,但本研究中土壤 pH 差异不显著,因而没有进行 pH 与土壤土壤微生物数量的探讨。

季节变化能引起土壤微生物的生境的变化,即季节变化可通过土壤水分、温度、土壤有机质、土壤 pH 等因素的改变来影响土壤微生物结构组成、数量、生物量以及活性等方面的变化<sup>[20]</sup>。本研究中,细菌在

随季节变动出现先增大后减小的趋势,在7月下旬细菌数量达到最大值;可能是因为7月下旬气温达到一年中的最高值,植物生长迅速,根系活动旺盛,能提供较多的有机物,有利于细菌生长繁殖;而10月下旬温度低,细菌代谢减弱,主要是温度抑制细菌的增长繁殖。真菌数量随季节变动出现一直在增大的现象,在10月下旬真菌数量达到最大值;是因为真菌是真核生物,而细菌和放线菌属于原核生物,因此真菌比细菌和放线菌具有更多的细胞结构和细胞器,以及遗传物质也多,所以真菌的生长繁殖需要更多的能量和物质来构建结构和遗传物质;真菌数量虽然比细菌和放线菌少,但是真菌的微生物生物量比细菌和放线菌多,10月下旬有大量枯枝落叶富集地表,通过动物扰动逐渐进入土壤循环,真菌获得较为丰富的能量供应,不断增殖<sup>[21]</sup>。放线菌数量随季节变动出现先减小后增大的趋势,可能是与土壤含水量有关,由于天气原因7月发生干旱,降水量较少,影响放线菌的生长繁殖。

### 3.3 土壤微生物与土壤因子之间的相关关系

人工草地建设后外界环境的变化会影响微生物的变化,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细微改变作出快速而显著的反应<sup>[22]</sup>。本研究发现,人工草地和对照草地土壤细菌数量和真菌数量相关程度高,土壤细菌和真菌的变化具有联动性,土壤细菌和真菌与土壤有机质、全氮、全磷等养分呈正相关性强,说明土壤细菌和真菌的生长繁殖易受到土壤有机质、全氮、全磷等养分影响。而人工草地建设后,草地物种组成相对单一及草地生产力高,因而枯枝落叶富集地表,土壤养分含量相对较高,从而使土壤有机质、全氮、全磷等养分增加,土壤细菌数量和真菌数量也有部分增加,这是因为微生物生长所需的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,是决定土壤微生物生长繁殖的首要因素<sup>[21]</sup>,而土壤全氮、土壤含水量和全磷则对土壤微生物生长繁殖具有次要影响;土壤微生物生长繁殖是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。

RDA 分析图中第1排序轴能解释大部分微生物数量的变化以及微生物数量和土壤因子的关系,在对照草地土壤有机质、全氮、全磷和土壤含水量与第1排序轴的相关性较低,而在燕麦和黑麦的人工草地土壤有机质、全氮、全磷和土壤含水量等与第1排序轴的相关性增加,使土壤有机质、全氮、全磷和土壤含水

量在影响微生物生长的因素中增高。Banerjee 等<sup>[23]</sup>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。本研究只分析了人工草地建设处理下土壤理化性质和微生物数量特征,没有对微生物群落的结构进行分析,未来很有必要结合高通量测序技术,以及网络过程分析,探讨补播处理后微生物群落的响应过程。此外,本研究发现人工草地建设后将会使植被—土壤微生物—土壤肥力生态链产生扰动,未来进一步研究掌握这些环节的关系,能更好的服务于退化草地修复及其综合管理。

## 4 结论

(1)人工草地建设显著改善了退化草地的土壤水环境,土壤含水量较对照草地增加明显,且人工种植的黑麦草地土壤水分均大于燕麦人工草地,土壤有机碳有显著增加( $P < 0.05$ ),但全氮全磷增长不显著( $P > 0.05$ )。

(2)人工草地建设后的草地土壤微生物数量明显增多。从5,7月至10月,细菌数量在表层0—10 cm土层出现先增大后减小的趋势,真菌数量在表层一直在增大,而放线菌数量在表层出现先减小后增大的趋势。

(3)土壤细菌和真菌的变化具有联动性,人工草地建设后,草地土壤理化性质的改变,使土壤有机质、全氮、全磷和土壤含水量在影响微生物生长的因素中增高。

### 参考文献:

[1] 尚占环,董全民,施建军,等. 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[J]. 草地学报,2018,26(1):1-21.

[2] 朱炜歆,索南吉,顾振宽,等. 甘南草地土壤微生物与理化特性[J]. 草业科学,2012,29(10):1491-1496.

[3] 张中华,周华坤,赵新全,等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. 生物多样性,2018,26(2):111-129.

[4] 张宪洲,王小丹,高清竹,等. 开展高寒退化生态系统恢复与重建技术研究,助力西藏生态安全屏障保护与建设[J]. 生态学报,2016,36(22):7083-7087.

[5] 董世魁,蒲小鹏,胡自治. 青藏高原高寒人工草地生产-生态范式[M]. 北京:科学出版社,2013:2-76.

[6] 贾倩民,陈彦珍,杨阳,等. 不同人工草地对于旱区弃耕地土壤理化性质及微生物数量的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(1):178-220.

[7] 字洪标,刘敏,阿的鲁骥,等. 三江源区不同建植年限对人工草地土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(4):978-987.

[8] 魏媛,张金池,俞元春,等. 退化喀斯特植被恢复对土壤微生物数量及群落功能多样性的影响[J]. 土壤,2010,

42(2):230-235.

- [9] 蒋永梅,师尚礼,田永亮,等. 高寒草地不同退化程度下土壤微生物及土壤酶活性变化特征[J]. 水土保持学报,2017,31(3):244-249.
- [10] 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.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,1999:42-50.
- [12] 尹伟,胡玉昆,柳妍妍,等. 巴音布鲁克高寒人工草地土壤可培养微生物区系特征[J]. 生态学杂志,2010,29(2):303-308.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李凤霞,王学琴,郭永忠,等. 宁夏不同类型盐渍化土壤微生物区系及多样性[J]. 水土保持学报,2011,25(5):107-111.
- [16] 王海英,宫渊波,陈林武. 嘉陵江上游不同植被恢复模式土壤微生物及土壤酶活性的研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):172-177.
- [17] 李新荣,龙利群,王新平,等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠,2001,21(1):4-11.
- [18] 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.
- [19] Spohn M, Klaus K, Wanek W, et al. Microbial carbon use efficiency and biomass turnover times depending on soil depth—Implications for carbon cycling [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2016, 96: 74-81.
- [20] 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.
- [21] 谢龙莲,陈秋波,王真辉,等. 环境变化对土壤微生物的影响[J]. 热带农业科学,2004,24(3):39-47.
- [22] Pascual J A, Garcia C, Hernandez T, et al. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(13): 1877-1883.
- [23] Banerjee S, Schlaeppi K, Van M D H. Keystone taxa as drivers of microbiome structure and functioning [J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, doi: 10.1038/s41579-018-0024-1.