

起垄-施肥模式对极度退化高寒草甸土壤理化及酶活性特征的影响

包段红^{1,2}, 王小燕^{1,2}, 张志明^{1,2}, 苏军虎^{1,2}, 李金霞³, 郁洁汝³, 孙小妹^{1,2,3*}

(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, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】获得极度退化高寒草甸土壤快速修复模式。【方法】选用甘南藏族自治州碌曲县典型的极度退化高寒草甸为试验地, 给予不同的整地措施和施肥处理, 混播70%垂穗披碱草(*Elymus nutans*) + 30%燕麦(*Avena sativa*), 分析其对极度退化高寒草甸土壤特性的影响。【结果】1) 0~20 cm土层, 土壤有机质、碱解氮、速效磷含量和碱性磷酸酶活性在起垄样地高于平地, 20~30 cm土层, 起垄中全磷、碱解氮、速效磷含量和蔗糖酶活性高于平地样地。2) 起垄样地0~10 cm土层全磷含量在氮肥、微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理中均低于不施肥处理; 平地样地0~10 cm和20~30 cm土层, 氮肥+微生物菌剂处理土壤全磷、全钾、碱解氮、速效磷含量和碱性磷酸酶、蔗糖酶活性高于单施氮肥或微生物菌剂处理。3) 整地和施肥模式互作下, 0~10 cm、20~30 cm土层全磷含量和10~20 cm土层碱解氮及有机质含量增加显著。【结论】起垄模式较平地优化土壤有机质、全磷、碱解氮、速效磷含量和碱性磷酸酶活性方面更具优势, 采用起垄与氮肥+微生物菌剂的互补技术可快速提高有机质、全磷、碱解氮含量和碱性磷酸酶活性。

关键词: 极度退化; 高寒草甸; 起垄; 微生物菌肥; 土壤特性

中图分类号: S812.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)03-0078-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2024.03.010



青藏高原是全球陆地生态系统重要的组成部分, 由于所处生境恶劣、自身条件脆弱以及受气候变化的影响而深受全球关注^[1]。高寒草甸作为我国青藏高原不可或缺的一部分, 在维持生态功能方面(如涵养水源、保持水土和调节气候等)起着至关重要的作用, 同时也在提供畜牧产品、传承牧区文化等方面有着关键的服务功能^[2]。近年来, 受全球气候变化和人类活动

影响, 外加鼠虫害频发, 大面积优良草地正逐步退化。此外, 高寒草甸生态系统自身的脆弱敏感性, 使得地上植被在发生逆向演替的同时, 土壤的组成结构呈现亚健康状态, 肥力也趋于下降^[3], 已严重威胁到区域生态安全和当地畜牧业的可持续发展^[4], 部分愈演愈烈的退化草甸已难以依靠其自身的调节能力进行自我恢复^[5]。

土壤是植物生长的重要基质环境, 为植物提供所需的营养物质^[6]。阈值理论表明, 外界干扰超过生态系统恢复的阈值, 将引发生态系统的逆向演替^[7]。对土壤环境而言, 高寒草甸的退化包括土壤理化特性的下降和微生物群落结构的改变。研究表明, 土壤有机质含量随草地的退化而降低^[6-8], 全量与速效养分呈不同程度的下降趋势^[8-10], 土壤酶活性受多环境因子影响变化规律不一致^[9-10]。再者, 植被群落结构的退

收稿日期: 2022-06-20; **修回日期:** 2022-08-05

基金资助: 国家自然科学基金(32060386); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA024); 甘肃农业大学学科建设基金(GAU-XKJS-2018-016/214)。

作者简介: 包段红(1997-), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生。

E-mail: 2548183056@qq.com

*通信作者。E-mail: sunxm@gsau.edu.cn

化及其覆盖度的下降又引发土壤养分流失,进一步减弱土壤肥力,致使极度退化体系的土壤养分环境已不能满足植物的生长所需^[11-12]。

基于土壤和植物间的上一下调效应,对于极度退化高寒草甸的修复,首先需改善土壤肥力。土壤氮素作为提升草地生产力的重要元素,对促苗增产、提高草地生产力具有正向效应^[13]。孙小妹等^[14-15]研究表明高寒草甸生产力的积累主要受氮素限制,当氮素添加量 $\geq 10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 时会造成生物多样性的下降,而氮添加量为 $5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 时,对生物多样性的影响不显著,可促进生产力。除氮肥外,微生物菌肥也具有类似的功效。研究发现微生物菌肥(关键菌株:蜡状芽孢杆菌和胶状芽孢杆菌)可提高土壤 N_2O (97.2%) and K_2O (83.9%)含量,增强根系活力(17.2%),刺激植物生长达到增产^[16]。由此可见,添加氮肥或微生物菌肥能起到改善土壤肥力,实现地下一地上再耦合,激发草地生态的自我组织能力。

此外,低温是限制高寒草甸种子萌发的关键因素,存在有效积温不足影响补播种子萌发的问题。若采用覆膜的方式可保水保墒,提高补播种子的萌发率,但是覆膜带来的塑料污染会降低生态效益^[17]。借鉴农业种植模式——起垄,不仅具有保湿保墒的生态效应,还能减少养分的流失,从而改变土壤微环境给予植物上调效应,影响地上植被的长势及生物量积累^[18]。因而,本研究考虑到生境异质性和研究地域的环境因子差异性,在高寒草甸借鉴农业中的起垄模式,结合不同类型的养分添加模式,分析起垄与施肥组合修复措施对土壤理化特性和酶活性特征的影响,

探究加快土壤特性改善的模式,旨在为高寒草甸的快速恢复提供有力依据,丰富退化草地修复的模式方法。

1 材料和方法

1.1 样地概况

2020年6月至2021年9月在甘肃省甘南藏族自治州碌曲县尕海乡加仓镇($34^{\circ}12'04'' \sim 34^{\circ}44'08'' \text{ N}$, $101^{\circ}35'36'' \sim 102^{\circ}58'15'' \text{ E}$)进行。海拔 $3\,400 \sim 4\,000 \text{ m}$,年降水量 $632 \sim 781 \text{ mm}$ (主要集中于5—9月),春秋短促,长冬无夏,灾害性天气频繁。年总日照时数 $2\,357.8 \text{ h}$,年太阳总辐射量 $51\,983.9 \text{ J}/\text{cm}^2$,年均气温 2.3°C ,无绝对无霜期,草地类型主要为高寒草甸。该区域为中度退化区,2012年进行了大面积的补播,补播后有效禁牧2年,后来又用于放牧,因放牧压力等其他因素干扰又形成不同程度的二次退化。

根据《三江源自然保护区“黑土滩”退化草地调查》^[19],参照关键指标——植被盖度、地上生物量等,确定草场的退化程度(表1)。将甘南草原研究区的草地分为:轻度退化(Light degradation, LD)草地,盖度 $75\% \sim 80\%$,优势种有披碱草(*Elymus dahuricus*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*);中度退化(Moderate degradation, MD)草地,盖度 $50\% \sim 75\%$,优势种有披碱草、老鹳草、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserine*);重度退化(Severe degradation, SD)草地,盖度 $20\% \sim 40\%$,优势种有蜜花香薷(*Elsholtzia densa*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)和极度退化(Extreme degradation, ED)草地,盖度 $< 20\%$,优势种为鹅绒委陵菜。

表 1 天然草地退化程度的分级与分级指标

Tab. 1 Grading and grading index of grassland degradation degree

退化程度	草皮状况	MT 影像	原生植被盖度
LD	基本完整	色调灰白、浅灰,纹理均匀	$\geq 60\%$ 的天然草地
MD	开裂,呈不同程度的秃斑状草地	色调灰白,斑状纹理	$40\% \sim 60\%$ 的天然草地
SD	开裂,秃斑状加深	色调灰白,斑点状纹理	$20\% \sim 40\%$ 的天然草地
ED	完全消失	色调近白色,纹理均匀	$< 20\%$ 的天然草地

注:LD,MD,SD,ED分别表示轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化。

1.2 试验设计

1.2.1 肥料及草种选择 施氮肥:尿素, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, $w(\text{N})=46\%$, 使用量为 $5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 施糖蜜发酵复合微生物肥料:选自辽宁三色微谷有限公司生产的三色原菌剂(经光合菌、芽孢菌、乳酸菌等多种有益微生物纯培养后复合而成), 有效活菌数 $\geq 2 \times 10^8 \text{ cfu}/\text{mL}$, 使用量为 $6 \text{ mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。依据当地条件, 经过前期科学筛选, 选出适合该地区的混播草种: 70% 垂穗披碱草 (285 g) + 30% 燕麦混播 (105 g), 面积为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 除草剂选用 24% 唑草·苯磺隆 WP $120 \sim 150 \text{ g}/\text{hm}^2$, 不仅对一年生杂草密花香薹 (*Elsholtzia densa*)、遏蓝菜 (*Thlaspi arvense*) 有良好的防除效果, 还对多年生杂草刺儿菜 (*Cirsium setosum*) 有良好的防效, 30% 苯磺隆·苄嘧磺隆·氯氟吡氧乙酸 WP $600 \text{ mL}/\text{hm}^2$ 对一年生杂草密花香薹和多年生苣荬菜有良好的防除效果。

1.2.2 试验设计 所选样地为极度退化的高寒草甸, 以箭叶橐吾 (*Ligularia sagitta*) 为建群种。2020 年 4 月进行喷洒专性除草剂的前期准备工作。样地采用裂区设计, 小区面积 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 各小区间有 1 m 的缓冲带(缓冲带不施肥), 各区的四边起垄作标记(高度: 20 cm , 宽度: 20 cm)。每种混播方式下均设置垄地和平地样地, 每个样地均设置 4 种不同施肥措施的小区, 共 8 个处理, 每个处理 3 个重复(表 2), 2020 年 6 月进行施肥加补播。

表 2 样地设置

Tab. 2 Sample site settings

垄地	平地
垄地施氮肥(LAY)	平地施氮肥(PAY)
垄地施微生物菌剂(LBY)	平地施微生物菌剂(PBY)
垄地氮肥+微生物菌剂(LCY)	平地氮肥+微生物菌剂(PCY)
垄地不施肥(LCKY)	平地不施肥(PCKY)

1.3 试验方法

1.3.1 土壤采集与处理 土壤样品于 2021 年 8 月(生长盛期)采集。采用五点法取 $0 \sim 30 \text{ cm}$ ($0 \sim 10$, $10 \sim 20$, $20 \sim 30 \text{ cm}$) 土层样品, 共记采集 72 个土样。土样通过筛网过筛, 除去其中的干枯物质以及植物根系等杂质, 然后封存在袋中, 带回实验室, 土样在实验室自然风干后, 使用 1 mm 和 0.25 mm 筛子过筛, 用于测定土壤养分以及土壤酶活性。

1.3.2 土壤样品测定方法 土壤理化性质测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[20]。土壤有机质经过重铬酸钾溶液消煮后, 采用硫酸亚铁滴定法测定; 土壤全氮含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—NaSO}_4\text{:CuSO}_4\text{:Se}$ 催化法消煮, 用半微量凯氏定氮法测定; 土壤全磷含量测定采用钼锑抗法显色法测定; 全钾含量用 NaOH 熔融火焰光度计法测定; 碱解氮的测定方法为碱解扩散法; 速效磷含量采用碳酸氢钠法测定; 速效钾含量采用 $0.5 \text{ mol/L NH}_4\text{OAC—}$ 火焰光度计法测定。脲酶活性采用以尿素为基质的靛酚蓝比色法; 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 碱性磷酸酶活性采用以磷酸苯二钠为基质的比色法^[21]。

1.4 数据处理

方差分析(ANOVA)采用 Duncan 多重比较(Duncan's multiple range tests)法分析不同施肥处理和整地措施对土壤理化性质和酶活性特征, 使用一般线性模型(GLM)分析施肥措施与整地方式两者间的交互效应。以上统计分析都是在 SPSS 26.0 中完成, 应用 Excel 2010 对所得实验数据进行简单记录和处理, 并制作相关图、表。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质的变化

施肥模式下, $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层, 氮肥处理下, 起垄样地中土壤有机质含量较平地样地增加显著 ($P < 0.05$); 氮肥+微生物菌剂处理下, 起垄样地低于平地样地; 不施肥处理下, 起垄样地较平地样地增加显著 ($P < 0.05$)。 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层中, 与平地样地相比, 氮肥处理下中起垄样地土壤有机质增加显著 ($P < 0.05$)(图 1)。

整地模式下, 起垄和平地补播样地均显示, 土壤有机质含量随土层的加深而降低。起垄样地, $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层中, 与不施肥相比, 有机质含量在氮肥+微生物菌剂处理下显著降低 ($P < 0.05$), 氮肥处理较微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理显著增加 ($P < 0.05$)。平地样地, $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层中, 与微生物菌剂、氮肥+微生物菌剂和不施肥处理相比, 有机质在氮肥处理下降低显著 ($P < 0.05$)(图 1)。

2.2 土壤养分的变化

施肥模式下, $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层中, 氮肥、氮肥+微生

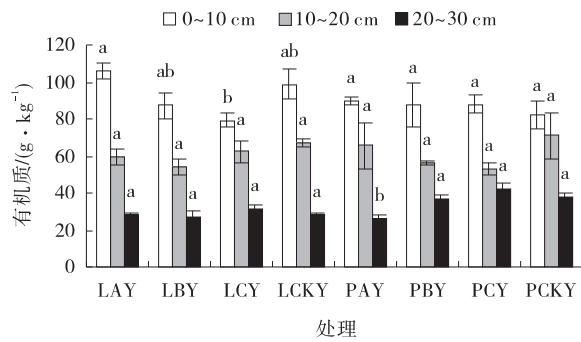


图1 2种模式交互下土壤有机质的变化

Fig. 1 Changes of soil organic matter in artificial grassland construction

注:不同小写字母表示同一时期同一土层不同退化程度之间的差异显著($P < 0.05$)。L、P分别表示垄地补播、平地补播;A、B、C、CK分别代表氮肥、微生物菌剂、氮肥配施微生物菌剂、不施肥;Y代表燕麦+垂穗披碱草,下同。

物菌剂和不施肥处理下,起垄样地的土壤全氮含量高于平地;氮肥、微生物菌剂、氮肥+微生物菌剂处理下,全磷在起垄样地比平地样地显著降低($P < 0.05$);不施肥处理,起垄样地的全磷含量较平地显著增加($P < 0.05$)。20~30 cm土层,各处理下,全氮和全钾在起垄样地低于平地样地;全磷在微生物菌剂处理下,起垄样地较平地显著增加($P < 0.05$)。

整地模式下,土壤全氮和全磷含量均随土层的加深而降低。起垄样地,0~10 cm土层,全磷含量较不施肥相比,在氮肥、微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理下显著降低($P < 0.05$),全钾含量在各施肥处理间均高于不施肥处理;10~20 cm土层中,全磷含量在施肥处理中均高于不施肥处理;20~30 cm土层,全磷含量在氮肥和氮肥+微生物菌剂处理较微生物菌剂处理显著降低,较不施肥处理显著增加($P < 0.05$)。平地样地,0~10 cm和20~30 cm土层,全氮含量在氮肥和微生物菌剂中高于不施肥处理;0~30 cm土层,全钾含量在氮肥+微生物菌剂和不施肥处理中最高(图2-A)。

施肥模式下,0~30 cm土层,各施肥处理组中,土壤碱解氮含量在起垄样地高于平地样地,而速效钾在平地高于起垄样地;除氮肥+微生物菌剂处理外,速效磷含量在其余处理和不施肥处理均表现为起垄样地高于平地样地。0~10 cm土层,氮肥和不施肥处理,碱解氮在起垄样地比平地样地高。

整地模式下,土壤碱解氮和速效钾含量均随土层

的加深而降低。起垄样地,0~10 cm土层中,碱解氮和速效钾含量在施肥处理低于不施肥;10~20 cm土层,碱解氮含量在氮肥处理下较不施肥显著增加($P < 0.05$),较微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理显著增加($P < 0.05$);20~30 cm土层中,与不施肥相比,速效钾含量在氮肥、微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理下显著降低($P < 0.05$)。平地样地,0~30 cm土层,速效钾含量在氮肥处理下较高,碱解氮、速效磷含量在氮肥+微生物菌剂处理间最高(图2-B)。

2.3 土壤酶活性的变化

施肥模式下,0~10 cm土层,土壤脲酶活性在起垄样地低于平地样地,而不施肥表现与其相反;碱性磷酸酶活性在施肥和不施肥处理均表现为起垄样地高于平地,蔗糖酶活性除施氮肥处理外,其余处理均在平地样地最高。10~20 cm土层中,脲酶和蔗糖酶活性在平地样地高于起垄样地;在微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理中,碱性磷酸酶活性在起垄样地增加显著($P < 0.05$)。20~30 cm土层,脲酶和碱性磷酸酶活性均在平地样地较高。

整地模式下,各施肥处理间的土壤脲酶活性随土层的加深而降低。起垄样地,0~10 cm土层,土壤碱性磷酸酶活性在氮肥处理间最高;10~30 cm土层,不施肥处理的碱性磷酸酶活性最高。0~30 cm土层,蔗糖酶活性在各施肥处理均低于不施肥处理。平地样地,脲酶活性在微生物菌剂处理中最高;0~10 cm和20~30 cm土层,碱性磷酸酶活性在氮肥+微生物菌剂处理下高于其他处理,10~20 cm土层,与不施肥相比,碱性磷酸酶活性在微生物菌剂和氮肥+微生物菌剂处理降低显著,氮肥处理显著高于不施肥处理($P < 0.05$)(图3)。

2.4 整地+施肥对土壤理化性质和酶活性的交互效应分析

整地方式和施肥措施两种因素的交互作用对0~10 cm土层土壤全磷含量有显著影响($P < 0.05$),对10~20 cm土层的土壤碱解氮含量有显著影响($P < 0.05$),对20~30 cm土层土壤有机质和全磷含量也有显著影响($P < 0.05$),但0~30 cm土层中,两种因素对土壤全氮、全钾、速效钾含量和土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均无显著影响(表3)。

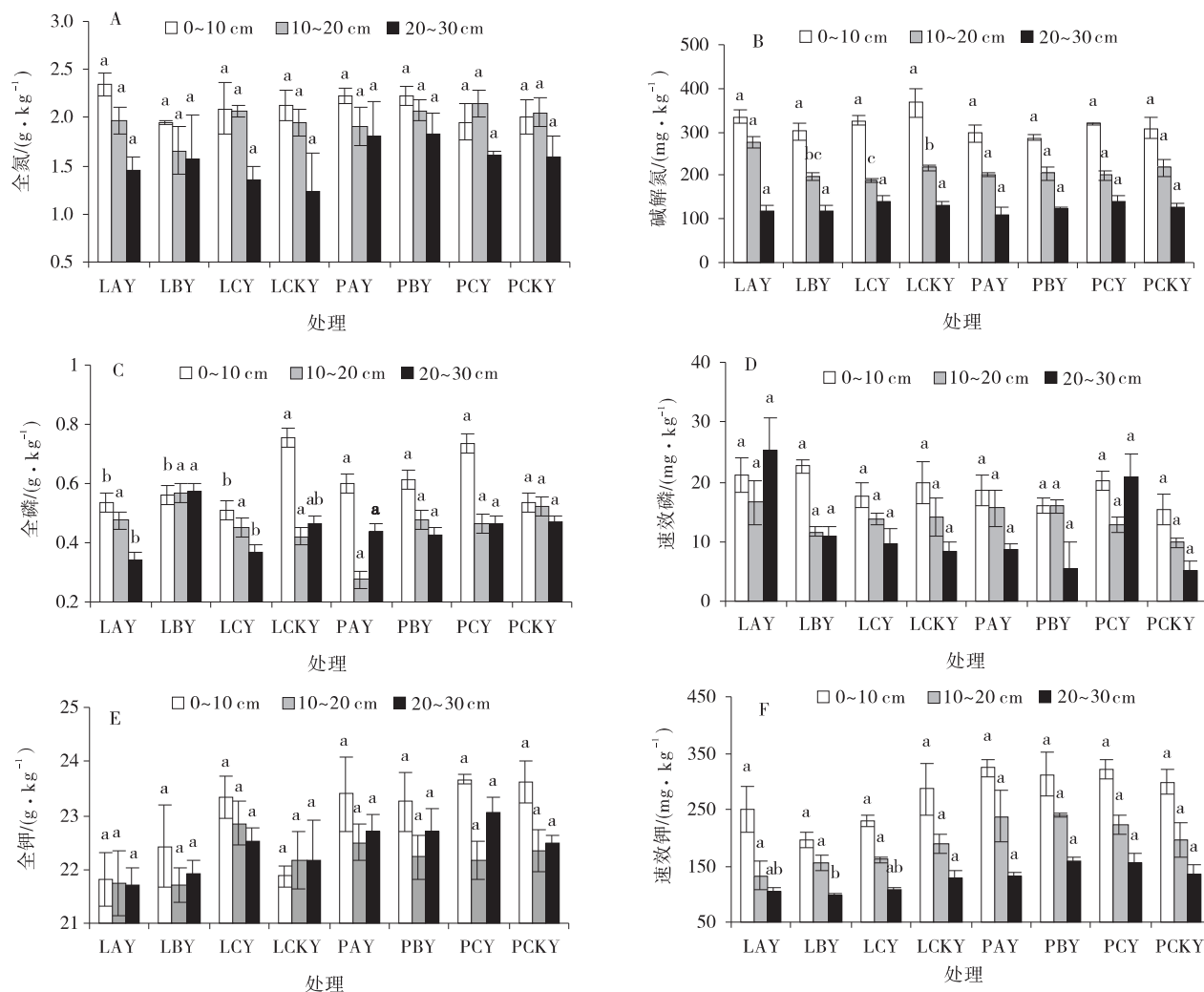


图2 2种模式下交互土壤养分的变化

Fig. 2 Changes of soil nutrients in artificial grassland construction

3 讨论

3.1 整地模式对土壤特性的影响

垄作是一种传统的农耕方式,通过土壤微环境的改变实现土壤理化状况的改善^[22]。例如,起垄使垄沟内土壤含水量增加和土壤养分提高,促进垄上植物种子的萌发和生长^[23]。蔗糖酶是增加土壤中易溶性营养物质和表征碳素循环的关键酶,有利于土壤有机碳的积累^[24]。本研究中,土壤有机质含量绝对值在起垄样地高于平地样地,蔗糖酶活性与土壤有机质的变化相似。因此,土壤有机质含量的增加一方面与土壤蔗糖酶和有机质之间相互影响、协同发展相关^[25],另一方面与起垄补播时将垄沟表层的土壤翻到垄上,致使土壤原始有机质形成新的分配模式有关。本研究中,起垄样地0~20 cm土层的速效磷含量和碱性磷酸酶活性均显著增加。其原因可能是:(1)起垄后土质松

软,较平地撒播相比,肥料易渗入垄内,有利于降低氮肥的损失^[26];(2)土壤施肥导致pH值下降和 NO_3^- 浓度增加,促进了土壤固磷化物的溶解,有利于速效磷的积累^[27]。此外,从土壤养分和酶的分配空间来看,2种整地模式下的土壤养分和酶活性随着土层的加深而降低,这与Taylor JP等^[28]的研究结果一致。其原因可能是高寒草甸试验地主要以禾本科草为主,根部集中分布在土壤表层,因而表层土壤微生物活动比较旺盛,土壤养分和酶活性在土表上层显著高于土表下层。

3.2 施肥方式对土壤特性的影响

土壤养分匮乏是影响植被健康生长的主要因素,而施肥是快速改善土壤状况,维持草地生产效益的有效措施^[29]。研究表明,添加氮肥和微生物菌肥对于土壤理化性质的改善具有促进作用^[30]、抑制效应^[31]或者对其影响不显著^[32],造成以上差异的原因是施入氮肥

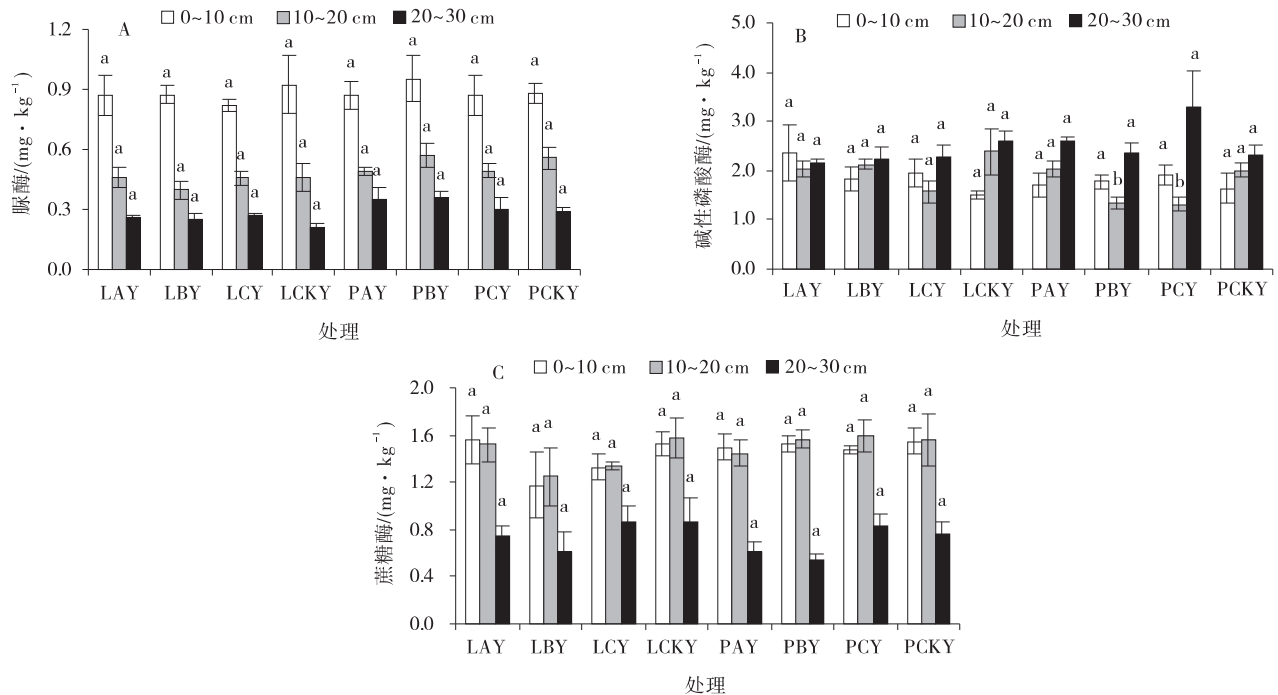


图3 2种模式交互下土壤酶活性的变化

Fig. 3 Changes of soil enzyme activities in artificial grassland

和微生物肥料的种类、配比和本地环境的不同。本研究中,起垄样地施氮肥对全氮和碱解氮含量的影响比施微生物菌剂显著。这可能是因为:(1)氮肥可以增加植物根分泌物,可归还土壤有机氮,提高禾本科植物生长发育时所需的氮素^[33];(2)微生物菌剂仅能分解部分的植物死亡根系,使少量氮素被截留在土壤表层^[32]。再者,与不施肥相比,起垄样地施氮肥、微生物菌剂显著增加了速效磷和速效钾含量。可能是因为土壤氮素被有效菌活化,促进难溶性磷、钾的溶解和释放,能够将土壤营养元素转化为植物可以吸收利用的形态^[34]。郭新送^[35]等研究表明,尿素配施微生物菌剂能提高土壤蔗糖酶活性,从而有利于土壤有机物质的分解转化和有机碳积累。本研究中,起垄样地氮肥较不施肥处理显著提高了0~10 cm土层中有机质的含量,这与前人的研究结果相类似^[36]。可能是因为氮肥的施入,使土壤中有机物C:N比下降促进了有机物分解,使土壤有机质含量增加。

研究发现,施尿素虽可增加土壤养分,促进植被生长,但长期使用会降低氮肥利用率、造成土壤板结等问题^[37],单施微生物肥料(复合微生物菌剂)对土壤有一定的改良效应,能增加土壤微生物活性,但无法满足作物对养分的需求^[35]。本研究中,平地补播样地,氮肥和微生物菌剂单独使用对碱解氮含量和脲酶

活性均不显著,而氮肥+微生物菌剂处理显著增加了碱解氮含量、降低了脲酶活性。主要原因是:本试验施加了尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)和蜜糖发酵复合肥,可以提供直接被植物和微生物吸收利用的 NH_4^+-N ,较低的土壤矿化就可以满足微生物的营养需求,即会降低脲酶的利用率^[35]。脲酶是一种酰胺酶,其活性与土壤有机质、全氮、碱解氮含量和微生物数量等因素相关,通常被用来衡量土壤氮素含量的高低^[38]。其次,平地样地0~10 cm土层,氮肥+微生物菌剂处理中土壤碱性磷酸酶活性与全磷、速效磷含量均显著高于单施氮肥和微生物菌剂处理,表明氮肥与微生物菌剂对改善土壤特性方面具有交互效应。此结果与王灿等^[39]的研究相反,即碱性磷酸酶是一种适应酶,可以指示土壤中磷素含量的高低,当磷素减少时碱性磷酸酶活性增加,故需要进一步验证其变化机理。本研究中,平地样地,20~30 cm土层有机质在氮肥+微生物菌剂处理中含量最高,同时0~10 cm和20~30 cm土层蔗糖酶活性亦相对增加,可能是因为复合微生物菌剂中有益菌群能加速分解土壤的有机化合物,促进有机质的积累^[40],改善土壤微环境,增加土壤通透性和改变土壤结构,进而提高土壤酶活性^[25]。综上所述,起垄样地,施氮肥更有利于养分和酶活性的提高;平地样地,氮肥与微生物菌剂间存在交互效应,其对土壤养分含

表3 2种因素对土壤理化性质和酶活性的交互效应

Table 3 Interaction effect of two factors on soil physical and chemical properties and enzyme activities

土层/cm	指标	因素 A(整地方式)		因素 B(施肥处理)		交互作用(A×B)	
		F	P	F	P	F	P
0~10	有机质	0.597	0.451	0.718	0.556	1.042	0.401
	全氮	0.057	0.814	1.123	0.369	0.879	0.473
	全磷	0.453	0.511	0.632	0.605	4.219	0.022
	全钾	10.417	0.005	1.267	0.319	0.882	0.471
	速效钾	12.687	0.003	0.649	0.595	1.151	0.359
	速效磷	2.955	0.105	0.347	0.792	1.403	0.278
	碱解氮	4.968	0.040	1.862	0.177	0.730	0.549
	脲酶	0.126	0.727	0.224	0.879	0.175	0.912
	磷酸酶	0.560	0.465	0.906	0.460	0.670	0.583
	蔗糖酶	1.280	0.275	0.788	0.518	0.776	0.524
10~20	有机质	0.015	0.904	1.565	0.237	0.471	0.707
	全氮	1.478	0.242	0.824	0.499	0.798	0.513
	全磷	0.773	0.392	1.179	0.349	1.270	0.318
	全钾	0.396	0.538	0.582	0.635	1.056	0.395
	速效钾	15.220	0.001	0.098	0.960	1.609	0.227
	速效磷	0.091	0.767	1.227	0.332	1.303	0.308
	碱解氮	3.238	0.091	5.877	0.007	6.591	0.004
	脲酶	5.706	0.030	0.230	0.874	0.937	0.446
	磷酸酶	5.072	0.039	4.516	0.018	1.083	0.385
	蔗糖酶	1.197	0.290	0.358	0.784	0.761	0.532
20~30	有机质	18.120	0.001	6.252	0.005	3.569	0.038
	全氮	2.398	0.141	0.449	0.721	0.025	0.994
	全磷	0.188	0.670	2.452	0.101	3.517	0.039
	全钾	5.850	0.028	0.899	0.463	0.262	0.852
	速效钾	20.779	0.000	0.572	0.642	2.304	0.116
	速效磷	1.019	0.328	1.210	0.338	1.440	0.268
	碱解氮	0.013	0.909	1.730	0.201	0.179	0.909
	脲酶	9.948	0.006	1.100	0.378	0.491	0.693
	磷酸酶	2.256	0.153	1.014	0.412	1.534	0.244
	蔗糖酶	1.016	0.329	2.054	0.147	0.065	0.978

量及酶活性的影响效果强于单施氮肥或微生物菌剂。

4 结论

- 1) 起垄补播模式较平地补播模式在优化土壤理化性能和土壤酶活性方面更具优势。
- 2) 平地补播样地中施肥与微生物菌剂在提高土壤养分含量方面具有互补效应。
- 3) 采用起垄模式与施肥措施的互补技术可快速提高土壤肥力。

参考文献:

[1] 刘晓东,尹国丽,武均,等. 青藏高原东部高寒草甸草地土壤物理性状对氮元素添加的响应[J]. 草业学报,2015,24(10):12—21.

[2] Dong S K,Shang Z H,Gao J X,*et al.* Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai—Tibetan Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2020,287(1):106—684.

[3] 王德利,王岭,辛晓平,等. 退化草地的系统性恢复:概念、机制与途径[J]. 中国农业科学,2020,53(13):2532—

- 2540.
- [4] Wu G, Ren G, Dong Q M, *et al.* Above- and Below-ground Response along Degradation Gradient in an Alpine Grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. CLEAN – Soil, Air, Water, 2014, 42(3): 319–323.
 - [5] 张骞, 马丽, 张中华, 等. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7441–7451.
 - [6] 武爽, 冯险峰, 孔玲玲, 等. 气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J]. 地理研究, 2021, 40(5): 1265–1279.
 - [7] Bai Y, Wu J, Clark C M, *et al.* Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands[J]. Glob Change Biol, 2010, 16(1): 358–372.
 - [8] 王婷, 花蕊, 楚彬, 等. 高寒草原退化对植物群落及土壤理化性质的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(4): 65–71.
 - [9] 王玉琴, 尹亚丽, 李世雄. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1108–1116.
 - [10] 马源, 张德罡, 周恒, 等. 高寒草甸退化对优势物种根际土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(4): 44–52.
 - [11] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 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[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 8–19.
 - [12] Lu W, Dong S, Li Y, *et al.* Effect of Degradation Intensity on Grassland Ecosystem Services in the Alpine Region of Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Plos One, 2013, 8(3): e58432.
 - [13] Niv D M. Toward a mechanistic understanding of the effects of nitrogen and phosphorus additions on grassland diversity[J]. Perspectives in Plant Ecology Evolution & Systematics, 2018, 58(1), 2441–2449.
 - [14] 孙小妹, 肖美玲, 师瑞玲, 等. 营养元素添加对青藏高原亚高寒草甸物种多度分布格局的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 853–859.
 - [15] 孙小妹, 陈菁菁, 李金霞, 等. 高寒草甸植物化学计量比对磷添加的分层响应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(1): 78–85.
 - [16] 权国玲, 谢开云, 全宗永, 等. 复合微生物肥料对羊草草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 27–36.
 - [17] Zhou L, Jin S, Liu C, *et al.* Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize – soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. Field Crops Research, 2012, 126(1): 181–188.
 - [18] 李洁, 陈翠霞, 聂红民, 等. 减量施肥及起垄对花生产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(11): 26–27.
 - [19] 刘晓玲. 三江源自然保护区“黑土滩”退化草地调查[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2007(1): 93–96.
 - [20] 鲍士旦. 土壤农业分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
 - [21] 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.
 - [22] 关法春, 苗彦军, Tianfang Bernie Fang, 等. 起垄措施对重度盐碱化草地土壤水盐和植被状况的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 763–767.
 - [23] Gao M, Zhang L, Wei C F, *et al.* Study of the changes of the rice yield and soil fertility on the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2004, 24(1): 104–128.
 - [24] Qi R, Li J, Lin Z, *et al.* Temperature effects on soil organic carbon, soil labile organic carbon fractions, and soil enzyme activities under long-term fertilization regimes[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 102(1): 36–45.
 - [25] 薄国栋, 杨斌, 黄广华, 等. 生物有机肥对植烟土壤及烤烟生长发育影响研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(18): 23–25.
 - [26] Zhang H, Huang H, Liu J, *et al.* Recent progress and prospects in the development of ridge tillage cultivation technology in China[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 142(1): 1–7.
 - [27] 王改玲, 陈德立, 李勇. 土壤温度、水分和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 1–6.
 - [28] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(3): 387–401.
 - [29] 马祥, 贾志锋, 刘文辉, 等. 青海地区燕麦“3414”施肥效果及推荐施肥量[J]. 草业科学, 2017, 34(9): 1906–1914.
 - [30] 高志香, 李希来, 张静, 等. 不同施肥处理对高寒矿区渣山改良土酶活性和理化性质的影响[J]. 草地学报,

- 2021,29(8):1748—1756.
- [31] 苏洁琼,李新荣,鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(3):664—670.
- [32] 林丽,张德罡,曹广民,等. 微生物菌肥对高寒草甸土壤养分的影响[J]. 草原与草坪,2015,35(4):12—16.
- [33] 李渊,张清平,王涛,等. 施肥对黄土高原紫花苜蓿草地N₂O通量及生产性能的影响[J]. 草地学报,2022,30(6):1584—1589.
- [34] 宋晓,陈莉,李建芬,等. 增施微生物菌剂对设施土壤理化性质及微生物的影响[J]. 安徽农业科学,2021,49(21):169—171.
- [35] 郭新送,丁方军,陈士更,等. 控释尿素配施微生物菌剂的氮肥利用率及土壤酶活性研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):277—282.
- [36] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, *et al.* Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2006, 143(1):117—125.
- [37] 谷佳林,边秀举,徐凯,等. 不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及氮素挥发的影响[J]. 草业学报,2013,22(2):235—242.
- [38] 周晓兵,张元明,陶冶,等. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应[J]. 生态学报,2011,31(12):3340—3349.
- [39] 符菁,赵远,赵利华,等. 基于光合菌剂的复合微生物菌肥对水稻产量及土壤酶活性的影响[J]. 西南农业学报,2019,32(10):2330—2336.
- [40] 解媛媛,谷洁,高华,等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(2):233—238.

Effects of ridge-fertilization mode on soil physico-chemical properties and enzyme activity of degraded alpine meadow

BAO Duan-hong^{1,2}, WANG Xiao-yan^{1,2}, ZHANG Zhi-ming^{1,2}, SU Jun-hu^{1,2}, LI Jing-xia³, YU Jie-ru³, SUN Xiao-me^{1,2,3*}

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

Abstract: 【Objective】 In order to obtain a rapid soil restoration model for the extremely degraded alpine meadow. 【Method】 a typical extremely degraded alpine meadow in Luqu County, Gannan Tibetan Autonomous Prefecture was elected as the test site. Different soil preparation measures, fertilization treatments and then, mixed sowing of 70% *Elymus nutans* + 30% Oat (*Avena sativa*) were carried out on this meadow. Analysis of its effects on soil properties of extremely degraded alpine meadows was made. 【Result】 The results showed that: 1) The soil organic matter, alkaline hydrolyzed nitrogen, available phosphorus content and alkaline phosphatase activity in the 0~20 cm soil layer in the ridged plot were higher than those in the flat land. And the contents of phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and sucrase activity in the 20~30 cm soil layer in the ridged plot were higher than those of the flat field. 2) Comparing the fertilization modes, the total phosphorus content in nitrogen fertilizer, microbial inoculum and nitrogen fertilizer + microbial inoculant treatment in 0~10 cm soil layer in the ridged

plots, were lower than those with no fertilization treatment. In the 0~10 cm and 20~30 cm soil layers of flat plots, the contents of total phosphorus, total potassium, alkali—hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and the activities of alkaline phosphatase and sucrase in soil treated with nitrogen fertilizer and microbial microbial agent were higher than those treated with nitrogen fertilizer or microbial microbial agent alone. 3) Under the interaction of soil preparation and fertilization mode, the total phosphorus content in 0~10 cm and 20~30 cm soil layers and the content of alkali—hydrolyzed nitrogen and organic matter in 10~20 cm soil layers increased significantly. 【Conclusion】 Ridging mode has more advantages than flat land in optimizing soil organic matter, total phosphorus, alkali—hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and alkaline phosphatase activity. The complementary technology of ridging and nitrogen fertilizer + microbial agent can rapidly increase the content of organic matter, total phosphorus, alkali—hydrolyzed nitrogen and alkaline phosphatase activity.

Key words: extreme degeneration; alpine meadows; ridge up; microbial fertilizers; soil characteristics

(责任编辑 刘建荣)