高寒草甸土壤有机碳活性组分对灌丛化的响应

黎 萱[1,2]，陈东毅[1]，李良安[1,2]，王 平[1]

（1.甘肃农业大学 资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；2.中国科学院 成都生物研究所，四川 成都 610041）

摘　要：［目的］草地灌丛化过程的植被群落演替会影响土壤有机碳库，而土壤有机碳（SOC）活性组分能够敏捷反映土壤有机碳库变化。分析灌丛化对高寒草甸 SOC 活性组分的影响，为全球气候变化背景下青藏高原草地土壤有机碳库变化和固碳研究提供数据支撑。［方法］以青藏高原川西锦鸡儿（*Caragana erinacea*）灌丛草甸为研究对象，分析不同灌丛化阶段（未灌丛化、中度灌丛化和重度灌丛化草甸）0—10，10—20，20—40 cm 土壤理化性质、碳转化酶活性和 SOC 活性组分特征。［结果］①灌丛化使得 0—20 cm 土壤含水量（SWC）显著减小，各土层 SOC 含量均在重度灌丛化草甸最大，中度灌丛化草甸土壤 pH 值显著增大。②中度灌丛化草甸土壤淀粉酶活性（SAA）显著低于未灌丛化草甸，10—40 cm 土壤蔗糖酶活性（SSA）也显著较低，SSA 在重度灌丛化阶段显著强于未灌丛化草甸。③与未灌丛化草甸相比，中度灌丛化草甸 0—10，10—20，20—40 cm 易氧化有机碳（ROOC）含量分别显著减少 16.79%，21.73%和31.11%，0—10 cm 土壤可溶性有机碳（DOC）和微生物生物量碳（MBC）含量也显著减少；重度灌丛化草甸 0—10 cm 土壤颗粒态有机碳（POC）和 ROOC 含量分别显著增大 24.37%和 29.54%，10—20 cm 土壤 MBC 和 DOC 分别显著增大 12.96%和 10.38%，20—40 cm 土壤 MBC 和 DOC 分别显著增大 57.62%和 22.10%。④土壤有机碳活性组分均与 TN，SWC，SOC 以及碳转化酶活性显著正相关，ROOC 与 pH 值显著负相关。［结论］研究区域川西锦鸡儿灌丛化初期土壤有机碳活性组分含量降低，而灌丛化后期土壤有机碳及其各活性组分均得到积累，可能对该区域土壤有机碳积累和土壤质量提升产生积极效应。

关键词：土壤有机碳活性组分；高寒草甸；灌丛化；川西锦鸡儿

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2024)03-0000-00　　**中图分类号：**S812.2

文献参数：黎萱，陈东毅，李良安，等.高寒草甸土壤有机碳活性组分对灌丛化的响应[J].水土保持通报，2024，44(3)：-. Li Xuan，Chen Dongyi，Li Liangan，et al. Response of soil organic carbon active components to shrub encroachment in alpine meadows [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3)：-.

Response of Soil Organic Carbon Active Components to Shrub Encroachment in Alpine Meadows

Li Xuan[1,2]，Chen Dongyi[1]，Li Liangan[1,2]，Wang Ping[1]

（1.*Resources and Environment College*，*Gansu Agricultural University*，*Lanzhou*，*Gansu* 730070，*China*；2.*Chengdu Institute of Biology*，*Chinese Academy of Sciences*，*Chengdu*，*Sichuan* 610041，*China*）

Abstract：［Objective］The succession of vegetation communities in the process of grassland encroachment by shrubs affects the soil organic carbon（SOC）pool，and these changes are quickly reflected by the active components of SOC. The effect of shrub encroachment on the active components of SOC in an alpine meadow was analysed to provide data support for the study of changes in the SOC pool and carbon sequestration in grasslands of the Qinghai-Xizang Plateau against the backdrop of global climate change. ［Methods］Taking the *Caragana erinacea* shrub meadow in the Qinghai-Xizang Plateau as the research target，changes in the soil physical and chemical properties，carbon cycle enzyme activities，and SOC active components in the 0—10，10—20 cm，and 20—40 cm soil layers at different shrub encroachment stages（non-shrub，moderate-

收稿日期：2023-12-20　　**修回日期：**2024-04-01

资助项目：四川省重点研发计划项目“川西北高寒草地植物多样性对灌丛化的响应及管理对策研究”（2022YFS0489）；四川省自然科学基金“气候变化背景下植物残体海绵效应在若尔盖高寒泥炭沼泽土壤碳动态中的作用”（2022NSFSC0984）

第一作者：黎萱（1994—），女（彝族），贵州省兴义市人，硕士研究生，研究方向为高寒灌丛草地碳组分。Email：1019390255@qq.com。

通信作者：王平（1966—），男（汉族），甘肃省成县人，博士，教授，主要从事农业生态学和植物营养与施肥研究。Email：wp1826@126.com。

shrub, and heavy-shrub meadow) were analysed. [Results] ① The soil water content (SWC) in the 0—20 cm layer decreased significantly by shrublading. Moreover, the SOC content in all soil layers was the highest in the heavy-shrub meadow. Additionally, the soil pH increased significantly in the moderate-shrub meadow. ② The soil amylase activity (SAA) in the moderate-shrub meadow was significantly lower than that in the non-shrub meadow, and the soil sucrase activity (SSA) in the 10—40 cm soil layer was also significantly lower. SSA in the heavy-shrub meadow was significantly higher than that in the non-shrub meadow. ③ The readily oxidizable organic carbon (ROOC) contents in the 0—10, 10—20 cm, and 20—40 cm layers in the moderate-shrub meadow were 16.79 %, 21.73 %, and 31.11 % lower than those in the non-shrub meadow, respectively. The dissolved organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC) contents in the 0—10 cm layer also decreased significantly. The particulate organic carbon (POC) and ROOC contents in the 0—10 cm layer were 24.37 % and 29.54 % higher than those in the non-shrub meadow, respectively. The MBC and DOC contents in the 10—20 cm layer were 12.96 % and 10.38 % higher than those in the non-shrub meadow, respectively. The MBC and DOC contents in the 20—40 cm layer were 57.62 % and 22.10 % higher than those in the non-shrub meadow, respectively. ④ SOC active components were significantly positively correlated with TN, SWC, SOC, and carbon cycle enzyme activity, and ROOC was strongly negatively correlated with pH value. [Conclusion] The content of SOC active components decreased during the early stage of *C. erinacea* shrub encroachment in the study area, whereas SOC and its active components underwent accumulation during the later stage of shrub encroachment. This may have a positive effect on the accumulation of SOC and the improvement of soil quality in this area.

Keywords: active components of soil organic carbon; alpine meadow; shrub encroachment; *Caragana erinacea*

土壤有机碳是全球最大的碳源,其固定和释放影响全球碳循环和气候变化,是当下土壤学、生态学等科学研究热点。青藏高原是中国重要的碳汇区,对于中国生态安全具有重要意义[1],在全球气候变化和人为等因素驱动下,青藏高原草地灌丛化现象日益凸显[2]。研究表明,灌木侵入将引起原本的植物类型、生物结构等发生变化,从而影响了土壤有机碳库[3],但目前关于灌丛化对土壤有机碳的影响并未形成统一结论。Li He 等[4]分析了全球142项灌丛化的相关研究中发现,灌木扩张后土壤有机碳含量有增有减,变化范围为-50%到+300%,土壤有机碳含量的变化与植物类型、降水、温度等因素相关。一些研究发现青藏高原草地灌丛化对于土壤有机碳的积累具有积极效应,如 Zhao Jingxue 等[5]研究发现青藏高原中部高山草原灌丛化增加了土壤有机碳含量,何俊龄等[6]研究发现青藏高原高寒草甸受金露梅灌木侵入后土壤有机碳含量有所增加。也有研究结论显示青藏高原高寒草地灌丛化后土壤有机碳含量无明显变化,如索南吉等[7]试验结果显示高寒草甸与高寒灌丛草甸土壤有机碳含量无明显差异。上述研究中均采用总有机碳含量来表征灌丛化对草地土壤有机碳的影响,但往往土壤有机碳对外界变化的响应较为迟钝,可能存在响应不明显的情况。土壤有机碳活性组分属于土壤有机碳中的不稳定部分[8],对外界变化响应更为迅速。张东等[9]研究发现,灌丛化对高寒草地表层土壤有机碳含量影响不显著,但显著影响土壤有机碳活性组分含量。费凯等[10]研究发现,与土壤有机碳含量相比,土壤活性有机碳组分对高寒草地沙化响应更敏感。当总有机碳含量变化甚微,不能有效反映灌丛化草地土壤有机碳变化过程时,采用土壤有机碳活性组分更有利于描述灌丛化草地土壤有机碳的动态变化。

土壤有机碳活性组分主要包括微生物生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、轻组有机碳、颗粒态有机碳等,可作为土壤碳库变化的特征指标[11],与土壤酶活性显著相关[12]。草地灌丛化土壤有机碳活性组分如何变化对于科学系统认识青藏高原土壤有机碳循环尤为重要。目前对于土壤有机碳活性组分的研究主要聚焦于土地利用方式[13]、植被沉积物[14]、植被恢复[15]、外源添加[16]等方面,单独针对草地灌丛化对土壤有机碳活性组分影响的研究相对较为缺乏。而灌丛化现象在中国高寒草地较为普遍,且灌木侵入草地后植被演替周期较长,土壤有机碳库将随着植被演替而变化,不同灌木侵入梯度下土壤有机碳活性组分含量如何变化尚不可知,因此研究高寒草地土壤有机碳活性组分在不同灌丛化阶段的响应尤为必要。基于此,本研究选取了青藏高原广泛分布且具代表性的川西锦鸡儿灌丛草甸作为研究对象,分析不同灌丛化阶段土壤部分理化性质、碳转化酶活性和土壤有机碳活性组分特征,探究青藏高原高寒草甸土壤有机碳

活性组分对川西锦鸡儿灌丛化的响应,以期为青藏高原草地土壤有机碳库变化和固碳研究提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于青藏高原东部边缘、四川省西北部、阿坝藏族羌族自治州中部的红原县境内,海拔约3500 m,地理坐标为 32°41′N,102°21′E,该区域属于典型的大陆高原寒温带季风气候,日温差大。年平均气温 1.1 ℃,年平均降水量 752 mm,降水主要集中在5—9 月,占到全年降水的 86%左右,年均蒸发量1263 mm,年均湿度 60%—70%,在生长季(5—10月)无放牧活动。以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)等为主要优势草本植物,常见灌丛化灌木种类有川西锦鸡儿(*Caragana erinacea*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、杯腺柳(*Salix cupularis*)、鲜卑花(*Sibiraea laevigata*)等,草本植物根系主要深度分布在 0—10 cm。草地土壤类型为高山草毡土,植被类型为高寒草甸。

1.2　样地选择及样品采集

本试验采样点位于红原县安曲镇,样地选择为地势平坦且均为冬季放牧的川西锦鸡儿灌丛草甸。本次试验于 2023 年 7 月采集土壤样品,根据灌木覆盖度(灌木投影所占划定区域草甸面积比例),划分为不同灌丛化阶段的 3 块样地:未灌丛化草甸(无灌木生长)、中度灌丛化草甸(40%＜灌木覆盖度≤60%)和重度灌丛化草甸(灌木覆盖度＞60%)[17-18]。在样地内选取 3 个灌丛发育状况及长势相对一致的 10 m×10 m 样方(3 个灌丛化阶段各取 3 个重复,共 9 个样方),在每个样方内,选择发育状况及年龄分布特征相对一致的 3 个灌丛,先用铁铲清除地表的植物枯落物及碎石等(灌木树冠投影以内),用直径为 4 cm 土钻进行五点取样法取样,采集 0—10,10—20,20—40 cm 共 3 个不同深度层次土壤样品,每个样方下的相同土层样品作为一个复合样并充分混合均匀,在无灌木生长的原生草甸以相同取样法取样作为未灌丛化草甸对照组。

采集的新鲜土样除去根系和石块等杂物后,密封、冷藏保存带回实验室,在实验室将土样分为 2 份,一份放入 4 ℃保温箱进行鲜样保存,过 2.0 mm 筛后用于测定土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳及酶活性等;另一份室内自然风干后,分别过 2.0 mm 和0.15 mm土壤筛后备用,过 2.0 mm 筛的土样用于测定土壤颗粒态有机碳和 pH 值,过 0.15 mm 筛的土样用于测定土壤易氧化有机碳和全氮。

1.3　测定方法

1.3.1　土壤基本理化性质测定　土壤 pH 值用电位法测定(土水比为 1∶2.5),土壤含水量(soil water content, SWC)用烘干法测定,土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮(total nitrogen, TN)用凯氏定氮法测定[19]。

1.3.2　土壤活性有机碳测定　可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)用冷水浸提法测定,微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)用氯仿熏蒸 K_2SO_4浸提法测定,易氧化有机碳(readily oxidizable organic carbon, ROOC)用高锰酸钾比色法测定,颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)用六偏磷酸钠溶液振荡湿筛后,经烘干称重研磨后采用总有机碳分析仪测定[20]。

1.3.3　土壤酶活性测定　土壤蔗糖酶活性(soil sucrase activity, SSA)、土壤纤维素酶活性(soil cellulase activity, SCA)和土壤淀粉酶活性(soil amylase activity, SAA)均用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定[21]。

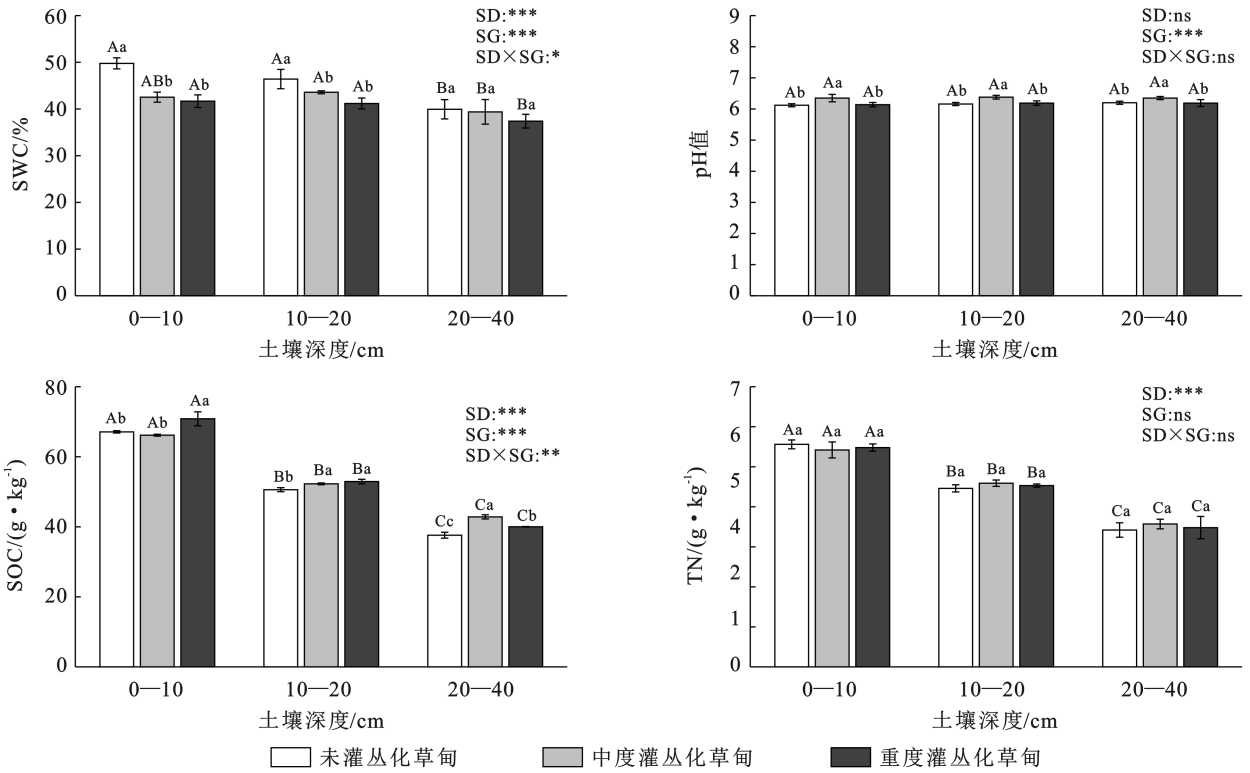
1.4　数据处理

数据整理在 Excel 2019 软件中进行,柱状图在Origin 2022 软件中绘制,采用 RStudio 4.3 软件 corrplot 程序包绘制相关性热图。基于 SPSS 26.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分别检验 3 个土层不同灌丛化阶段土壤理化指标的显著性,采用 LSD 多重比较检验不同灌丛化阶段土壤理化指标的差异程度,采用双因素方差分析(two-way ANOVA)土层深度与灌丛化阶段是否存在交互效应。

2　结果与分析

2.1　土壤部分理化性质对灌丛化的响应

除土壤 pH 值外,土壤 TN 含量、SOC 含量和SWC 均受到土层深度的显著影响(图 1),均随土层深度的增加显著减小($p<0.05$)。灌丛化对土壤 TN 含量影响不显著($p>0.05$),土壤 pH 值在中度灌丛化草甸显著增大($p<0.05$),重度灌丛化草甸 pH 值恢复至与未灌丛化草甸相近。灌丛化显著提高了各土层 SOC 含量($p<0.05$),与未灌丛化草甸相比,重度灌丛化草甸 0—10,10—20,20—40 cm 土层 SOC 平均含量分别增大 5.57%(3.74 g/kg),4.62%(2.34 g/kg)和 6.41%(2.41 g/kg)。灌丛化显著减小了 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SWC($p<0.05$),重度灌丛化草甸平均比未灌丛化草甸分别减小 16.28%和 11.25%。



注:①图中不同大写字母表示同一样地类型下不同深度土层之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一土层不同样地类型之间差异显著($p<0.05$);②SD 表示土层深度;SG 表示灌木发育程度;③ns 表示影响不显著($p>0.05$);* 表示在 $p<0.05$ 水平上影响显著;* * 表示在 $p<0.01$ 水平上影响显著,* * * 表示在 $p<0.001$ 水平上影响显著。下同。

图 1 土壤理化性质分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil physical and chemical properties

2.2 土壤碳转化酶活性对灌丛化的响应

灌丛化和土层深度均显著影响了 SAA,SSA 和 SCA($p<0.05$),灌丛化和土层深度的交互作用除显著影响 SSA 外($p<0.05$),对 SAA 和 SCA 影响均不明显($p>0.05$)(图 2)。SAA,SSA 和 SCA 均随土层深度的增加显著减小($p<0.05$)。3 块样地各土层 SCA均无显著差异($p>0.05$)。与未灌丛化草甸相比,中度灌丛化阶段各土层 SAA 显著降低($p<0.05$),同时 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SSA 以及 0—10 cm 土层 SCA 也显著降低($p<0.05$),0—10 cm 土层 SSA 显著增大($p<0.05$)。重度灌丛化阶段 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SAA 显著降低($p<0.05$),平均分别降低 10.66%和 8.66%,各土层 SSA 均显著增大($p<0.05$),0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层平均分别增大 10.24%,23.39%和 14.08%。

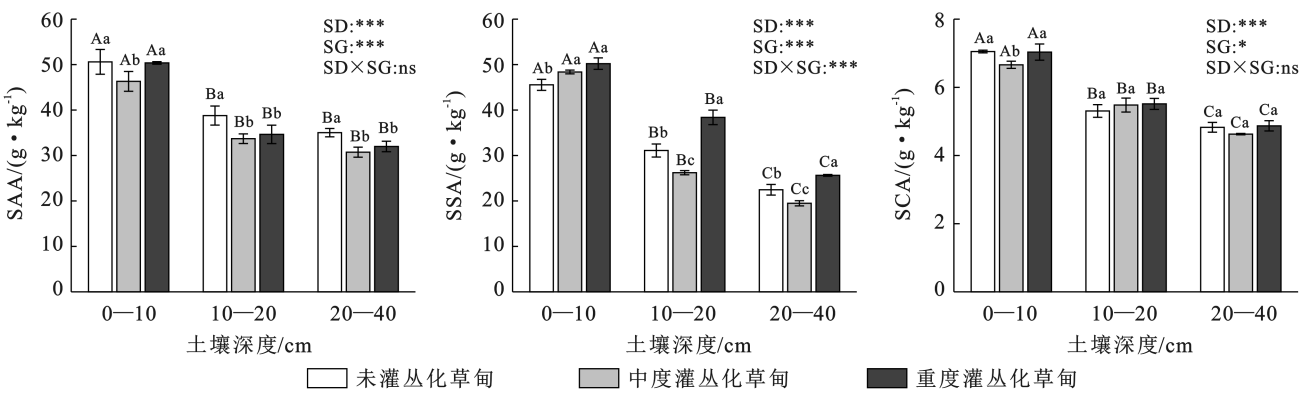


图 2 土壤酶活性分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil enzyme activity

2.3　土壤有机碳活性组分含量及其占比对灌丛化的响应

各样地 POC 和 ROOC 含量均远大于 MBC 和 DOC 含量(图 3)。灌丛化和土层深度均显著影响了 POC,DOC,ROOC,MBC 含量($p<0.05$),二者交互作用影响仍显著($p<0.05$)。各样地土壤 POC,ROOC,MBC 含量均随土层深度的增加而显著减小($p<0.05$),未灌丛化草甸土壤 DOC 含量随土层深度的增加而显著减小($p<0.05$),灌丛化后土壤 DOC 含量在各土层上无明显变化($p>0.05$)。与未灌丛化草甸相比,中度灌丛化阶段 0—10 cm 土层 DOC 和 MBC 含量分别平均减小 10.27%和 10.04%,ROOC 含量在 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 分别平均减小 31.9%(10.88 g/kg),21.73%(6.42 g/kg)和 10.44%(3.99 g/kg);重度灌丛化阶段 0—10 cm 土层 POC 和 ROOC 含量分别平均显著增大 24.37%(6.45 g/kg)和 29.54%(10.68 g/kg),DOC 和 MBC 含量无明显变化($p>0.05$);重度灌丛化阶段 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 MBC 含量分别平均显著增大 12.96%(0.21 g/kg)和 57.62%(0.63 g/kg),DOC 含量分别平均显著增大 10.38%(0.07 g/kg)和 22.10%(0.13 g/kg),POC 和 ROOC 含量无明显变化($p>0.05$)。

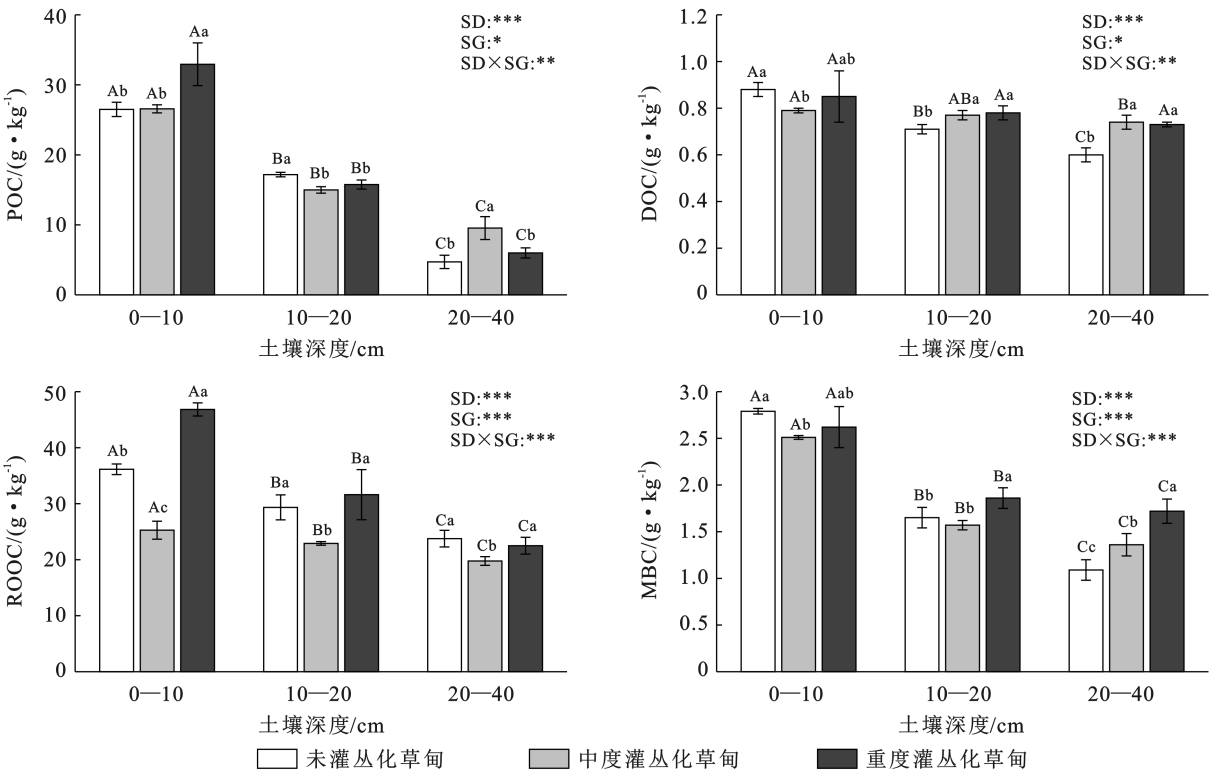


图 3　土壤有机碳活性组分分布特征

Fig.3　Distribution characteristics of soil organic carbon active components

土层深度除对 ROOC 占比影响不显著之外(图 4),对 POC,DOC 和 MBC 占比影响均显著($p<0.05$),POC/SOC 随土层深度增加而显著减小($p<0.05$),DOC/SOC 随土层深度增加而显著增大($p<0.05$)。灌丛化显著影响土壤有机碳各活性组分占比,在 0—10 cm 土层,中度灌丛化显著降低 ROOC 和 MBC 占 SOC 比例($p<0.05$),重度灌丛化显著提高 POC 和 ROOC 占 SOC 比例($p<0.05$),显著减小 MBC 占 SOC 比例($p<0.05$)。在 10—20 cm 土层,中度灌丛化显著降低 POC 和 ROOC 占 SOC 比例($p<0.05$),重度灌丛化减小 POC 占 SOC 比例($p<0.05$)。在 20—40 cm 土层,中度灌丛化显著降低 ROOC 占 SOC 比例($p<0.05$),显著增大 POC 占 SOC 比例($p<0.05$),而重度灌丛化显著提高了 DOC 和 MBC 占 SOC 比例($p<0.05$)。

2.4　土壤有机碳活性组分与其他土壤因子相关关系

土壤有机碳活性组分(MBC,DOC,ROOC,POC)均与碳转化酶活性(SAA,SSA,SCA)、TN,SOC 均呈极显著正相关($p<0.01$,$r>0.6$)(图 5),MBC,POC 均与 SWC 呈极显著正相关($p<0.01$,$r>0.5$),DOC,ROOC 均与 SWC 呈显著正相关($p<0.05$,$r>0.39$),pH 与 ROOC 呈极显著负相关($p<0.01$,$r=-0.59$),pH 值与 MBC,DOC,POC 均无显著相关性($p>0.05$)。

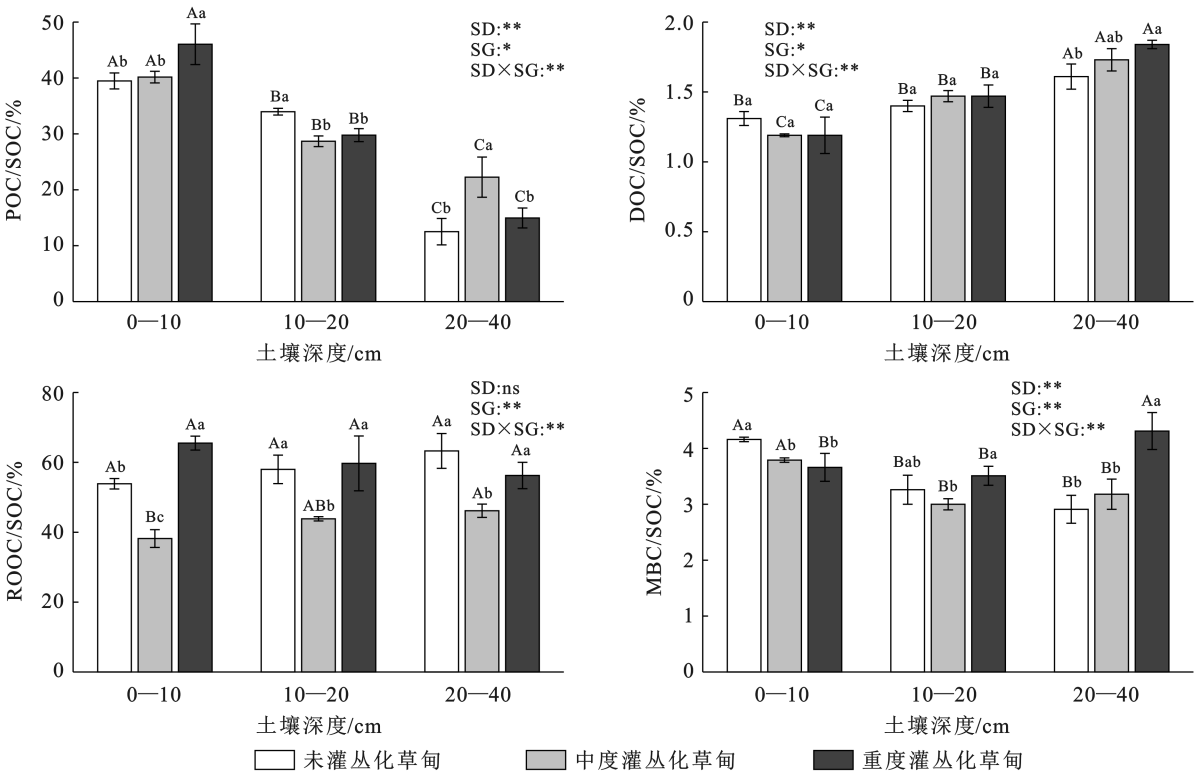


图 4 土壤有机碳活性组分占有机碳比例分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of proportion of soil organic carbon active components to organic carbon

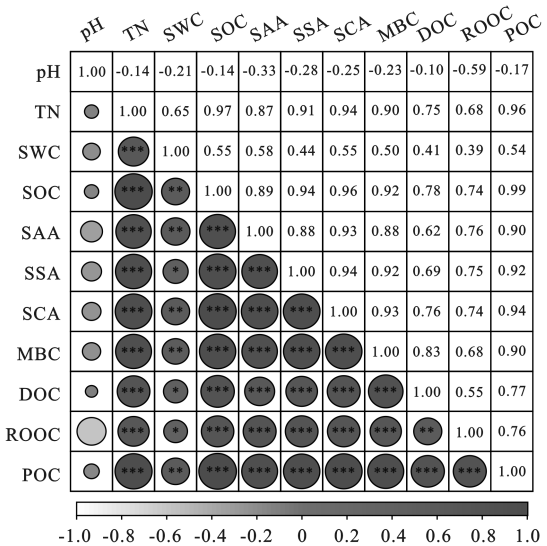


图 5 土壤各因子的相关性热图

Fig.5 Correlation heat map of soil factors

3 讨 论

3.1 灌丛化对土壤理化性质和碳转化酶活性的影响

灌丛化对土壤理化性质的演化有着重要影响，Zhang 等人[22]认为，灌丛化可以改善土壤理化性质，尤其对于深层土壤的改善更为显著。本研究发现，与未灌丛化草甸相比，重度灌丛化草甸 0—10 cm，10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SOC 平均含量分别增大 5.57%，4.62%和 6.41%，SOC 的增大幅度与土层深度呈正相关，这可能与样地植被根系发育深度相关。李宗超等[23]研究发现草地土壤根系主要分布在 0—5 cm 深度，锦鸡儿灌丛土壤根系在 0—40 cm 深度上均有分布，且总孔隙度及大孔隙度在 35—38 cm 深度均分布相对较多，说明灌丛化改变了原有生态植被根系体系，由浅根植被根系体系向深根植被根系体系转变。高寒草地土壤有机碳含量与根系特征呈正相关[24]，因此根系的发育一定程度上促进了土壤有机碳积累。本研究中灌丛化后土壤有机碳含量增加值并不大，可能是由于灌丛化后土壤 TN 无显著变化所致(图 1)，这与张东等[9]的分析结果相一致。不同植被类型根系影响土壤水分空间分布特征[25]，本研究中 SWC 随着灌丛化的发育而减小，可能是由于灌丛化草甸地表盖度减小，土壤根系发育增大了土壤孔隙度，同时取样时正值夏季，土壤水分蒸发加剧，从而使得 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SWC 显著减小。

土壤酶主要来源于植被的根系分泌、动植物残体和微生物作用等，能迅速对外界环境变化作出响应，其活性的高低可反映土壤微生物活性的强弱和土壤质量[26]。蔗糖酶、纤维素酶、淀粉酶等与土壤有机碳的转化紧密相关[27]，与土壤微生物一同对土壤有机碳及其活性组分的合成与分解过程进行调节和控制。灌丛化过程地表覆盖变化和植被类型演替将引起土壤酶活性的改变[28]。土壤纤维素酶主要源于植物残

体和微生物,在本研究中灌丛化草甸 SCA(图 2)没有发生明显变化,可能是由于灌丛化后虽然草本植物残体减少,但灌木凋落物增加使得整体群落植被残体输入并没有明显变化。土壤淀粉酶主要分解难溶于水的淀粉组分,本研究中灌丛化一定程度上降低了 SAA(图 2),与未灌丛化草甸相比,重度灌丛化使得 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SAA 平均分别降低 0.44%,10.66%和 8.66%,这与 SWC 的变化趋势基本相符,水是土壤淀粉酶反应的主要溶剂,说明灌丛化引起土壤水分的减少一定程度抑制了 SAA。土壤蔗糖酶对土壤中易溶性营养物质的催化分解起着重要的作用,与土壤肥力息息相关。相关研究发现,锦鸡儿灌丛化将抑制多年生草本植物发育[29],一/二年生草本植物生物量增加[30],新老草本植株更替期将使得地表凋落物增加,同时一/二年生草本植物有着更高生产力,这可能是导致土壤表层(0—10 cm 土层)SSA 增强的原因。本研究中 SSA 随灌丛化整体上呈现先降低后增强的趋势,与为灌丛化草甸相比,中度灌丛化阶段 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SSA 显著降低,重度灌丛化时 0—10 cm,10—20 cm 和20—40 cm 土层 SSA 含量平均分别增强 10.24%,23.39%和 14.08%(图 2),非表层 SSA 的增强可能与土壤根系发育相关联。整体来看,灌丛化初期 SSA 减弱,土壤肥力整体降低,但随着灌丛化程度不断加深,SSA 显著增强,土壤肥力得到显著改善。

3.2　灌丛化对土壤有机碳活性组分的影响

灌丛草地土壤表层有机碳主要源于植物残体[31],植物残体中的有机质可在土壤微生物的作用下分解为稳定性有机碳和活性有机碳,同时土壤微生物还能将活性有机碳缓慢转化为稳定性有机碳。POC 和 ROOC 属于 SOC 中分解相对较快的部分,可作为土壤肥力和土壤质量评价的有效指标[32]。本研究中,未灌丛化草甸和灌丛化草甸 POC 和 ROOC 含量均随土层深度的增加而减小,这是由于表层土壤存在着大量植物残体,因而表层土壤 POC 和 ROOC 含量始终维持在较高的状态。中度灌丛化阶段 ROOC 含量在 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 分别平均含量显著减小 31.11%,21.90%和 16.79%(图 3),说明土壤易氧化分解有机碳含量是有所减小的。而在重度灌丛化阶段,0—10 cm 土层 POC 和 ROOC 含量均显著大于未灌丛化草甸相比,可见在灌丛化后期表层土壤易氧化分解有机碳得到了积累。

DOC 主要源于植被根系分泌物以及微生物的代谢,极不稳定,在土壤中周转速率快,容易矿化流失,与土壤微生物和酶活性息息相关[27]。本研究中,DOC 含量与 MBC 含量随灌丛化的变化趋势基本一致,0—10 cm 土层 DOC 和 MBC 含量均随灌丛发育程度的加深先减小后增大,中度灌丛化阶段 DOC 含量平均显著减小 10.27%,MBC 含量平均减小 10.04%,说明灌丛化初期表层土壤微生物发育一定程度上受到了抑制。而重度灌丛化阶段表层土壤 DOC 和 MBC 含量恢复至未灌丛化草甸状态,表明随着灌丛不断发育,表层土壤微生物赋存环境逐步得到改善,这可能与地表盖度的变化相关联。重度灌丛化阶段,10—40 cm 土层 MBC 含量均显著大于未灌丛化草甸,这可能是由于灌木的根系有着更深的发育深度[23],灌丛化后土壤深层根系逐渐发育,土壤微生物大量向植被根系逐步聚集,根系分泌物经微生物分解为 DOC 等物质,因而 DOC 与 MBC 均得到积累。重度灌丛化阶段 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 MBC 含量分别平均增大 12.96%和 57.62%,其中 20—40 cm 土层 MBC 在各有机碳活性组分中变化幅度最大,与锦鸡儿灌木的主要根系深度相一致,这表明 MBC 含量显著受灌木根系的发育深度所影响,而 20—40 cm 土层 MBC 含量在中度灌丛化阶段就已经得到积累也说明了这一点。

本研究发现,未灌丛化草甸与重度灌丛化草甸 ROOC 占土壤有机碳比例均超过 50%,说明 ROOC 为主要的有机碳活性组分,与未灌丛化草甸相比,中度灌丛化阶段 ROOC 含量显著减少 16.79%～31.11%,可见在灌木入侵初期有机碳活性组分含量整体呈降低趋势。但随着灌木丛的不断发育,地表覆盖改善,凋落物输入增加,同时土壤根系也逐渐发育,重度灌丛化阶段土壤有机碳各活性组分含量均比未灌丛化草甸在不同土层深度上均呈现不同程度的增加,具体表现为与地表盖度更相关的土壤浅表 POC 和 ROOC 含量显著增大,而与灌木根系发育更相关的 10—40 cm 土层土壤 DOC 和 MBC 含量显著增大,可见灌木入侵后期土壤活性有机碳组分含量均得到积累。同时也反映出就土壤有机碳活性组分对于灌丛化的响应而言,0—10 cm 土层 ROOC 和 POC 的响应更为敏感,10—40 cm 土层 DOC 和 MBC 的响应更为敏感。

4　结 论

高寒草甸土壤有机碳活性组分对川西锦鸡儿灌丛化的响应显著,与土壤碳转化酶活性密切相关,不同灌丛化阶段响应特征存在差异。中度灌丛化阶段土壤淀粉酶和蔗糖酶活性显著降低,作为土壤有机碳主要活性组分的 ROOC 含量显著减少。重度灌丛化阶段土壤蔗糖酶活性显著增强,土壤有机碳及其各活

性组分均得到积累，0—10 cm 土壤 POC 和 ROOC 以及 10—40 cm 土壤 MBC 和 DOC 含量均显著增多。土壤有机碳各活性组分对灌丛化的响应在不同土层深度上表现不一致，这可能归结于土壤有机碳各活性组分的来源因凋落物输入和根系发育等因素在土层深度的差异。研究表明，川西锦鸡儿灌丛化初期土壤有机碳活性组分含量出现降低，但随着灌丛化程度不断加深，会促进研究区域土壤有机碳及其活性组分的积累。

参考文献(References)

[1] 李洋，王毅，韩国栋，等.青藏高原高寒草地土壤微生物量碳氮含量特征及其控制要素[J].草业学报，2022，31(6)：50-60.
Li Yang, Wang Yi, Han Guodong, et al. Soil microbial biomass carbon and nitrogen levels and their controlling factors in alpine grassland, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(6):50-60.

[2] 丁婧祎，尹彩春，韩逸，等.草原灌丛化对生态系统多功能性的影响[J].生态学报，2023，43(20)：8257-8267.
Ding Jingyi, Yin Caichun, Han Yi, et al. Research progress and perspectives on the impact of shrub encroachment on ecosystem multifunctionality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(20):8257-8267.

[3] 闫宝龙，吕世杰，王忠武，等.草地灌丛化成因及其对生态系统的影响研究进展[J].中国草地学报，2019，41(2)：95-101.
Yan Baolong, Lv Shijie, Wang Zhongwu, et al. The advance of shrub encroachment in grassland and its impact on ecosystem [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(2):95-101.

[4] Li He, Shen Haihua, Chen Leiyi, et al. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands [J]. Scientific Reports, 2016,6:28974.

[5] Zhao Jingxue, Yang Wen, Ji Shi Awei, et al. Shrub encroachment increases soil carbon and nitrogen stocks in alpine grassland ecosystems of the central Tibetan Plateau [J]. Geoderma, 2023,433.

[6] 何俊龄.金露梅对青藏高原高寒草甸植被特征和土壤性质的影响[D].兰州：兰州大学，2017.
He Junjie . Effects of Golden dew on vegetation characteristics and soil properties of alpine meadow in Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[7] 索南吉，谈嫣蓉，朱炜歆，等.青藏高原东缘不同草地类型土壤酶活性研究[J].草业学报，2012，21(4)：10-15.
Suo Nanji, Tan Yanrong, Zhu Weixin, et al. A study on soil enzyme activity in four different grasslands of the eastern Tibetan Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012,21(4):10-15.

[8] 杨淑琪，唐芬，杨桦，等.滇南地区桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[J].生态学报，2023，43(1)：290-303.
Yang Shuqi, Tang Fen, Yang Hua, et al. Effects of peach tree planting patterns on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in southern Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(1):290-303.

[9] 张东，刘金秋，马文明，等.灌丛化对高寒草地土壤有机碳组分的分异研究[J].土壤学报，2023，60(6)：1810-1821.
Zhang Dong, Liu Jinqiu, Ma Wenming, et al. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon components in qinghai-Xizang alpine grassland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(6):1810-1821.

[10] 费凯，胡玉福，舒向阳，等.若尔盖高寒草地沙化对土壤活性有机碳组分的影响[J].水土保持学报，2016，30(5)：327-330.
Fei Kai, Hu Yufu, Shu Xiangyang, et al. Effects of desertification on soil ActiveOrganic carbon fractions in ZoigeAlpine-cold grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(5):327-330.

[11] 闫丽娟，李广，吴江琪，等.黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报，2019，39(15)：5546-5554.
Yan Lijuan, Li Guang, Wu Jiangqi, et al. Effects of four typical vegetations on soil active organic carbon and soil carbon in Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(15):5546-5554.

[12] 肖华翠，李雪，盛浩，等.湘西北天然林转换对土壤活性有机碳与酶活性的影响[J].水土保持通报，2023，43(5)：411-418.
Xiao Huacui, Li Xue, Sheng Hao, et al. Effects of native forest conversion on soil labile organic carbon and enzyme activity in northwestern Hunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):411-418.

[13] 胡尧，李懿，侯雨乐.岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J].生态环境学报，2018，27(9)：1617-1624.
Hu Yao, Li Yi, Hou Yule. The variation of soil organic carbon fractions and soil enzyme activity of different land use types in Minjiang River valley [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(9):1617-1624.

[14] 陈小花，陈宗铸，雷金睿，等.清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征[J].生态学报，2022，42(11)：4572-4581.
Chen Xiaohua, Chen Zongzhu, Lei Jinrui, et al. Distribution characteristics of active organic carbon components in sediments of typical community types of mangrove wetland in Qinglan Port [J]. Acta Ecologica Sini-

ca, 2022,42(11):4572-4581.

[15] 罗娜娜,盛茂银,王霖娇,等.长期植被恢复对中国西南喀斯特石漠化土壤活性有机碳组分含量和酶活性的影响[J].植物生态学报,2023,47(6):867-881.
Luo Nana, Sheng Maoyin, Wang Linjiao, et al. Effects of long-term vegetation restoration on soil active organic carbon fractions content and enzyme activities in Karst rocky desertification ecosystem of southwest China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023,47(6):867-881.

[16] 秦嗣军,张阔,齐边斌,等.外源碳对苹果根区土壤活性有机碳及植株生长的影响[J].园艺学报,2023,50(6):1295-1304.
Qin Sijun, Zhang Kuo, Qi Bianbin, et al. Effects of exogenous glucose on soil active organic carbon pool in apple root zone and plant growth and development [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023,50(6):1295-1304.

[17] 尹霞,李冬梅,李易,等.灌丛化对高寒草甸土壤水力性质的影响[J].水土保持学报,2022,36(5):121-129.
Yin Xia, Li Dongmei, Li Yi, et al. Effects of shrub encroachment on soil hydraulic properties in alpine meadow [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):121-129.

[18] 张东,侯晨,马文明,等.高寒草地不同灌丛化梯度下土壤酶活性研究[J].草业学报,2023,32(9):79-92.
Zhang Dong, Hou Chen, Ma Wenming, et al. Study on soil enzyme activities under shrub encroachment gradients in alpine grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(9):79-92.

[19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil agrochemical analysis [M]. The third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[20] 林建美.塞罕坝不同林分类型土壤活性有机碳特征研究[D].北京:北京林业大学,2020.
Lin Jianmei. Characteristics of soil active organic carbon in different stand types in Saihanba [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[21] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京: 农业出版社, 1986.
Guan Songyin. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[22] Zhang Zhihua, Li Xiaoyan, Yang Xitian, et al. Changes in soil properties following shrub encroachment in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2020,66(2):369-378.

[23] 李宗超,胡霞.小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J].土壤学报,2015,52(1):242-248.
Li Zongchao, Hu Xia. Effects of shrub(caragana microphylla lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(1):242-248.

[24] 李露航,类延宝,陈秋捷,等.若尔盖高寒沙化草地恢复过程中土壤全碳和植物根系特征的变化[J].生态学杂志,2023,42(2):282-290.
Li Luhang, Lei Yanbao, Chen Qiujie, et al. Changes of soil total carbon and plant root characteristics during restoration of Zoige alpine desertified grassland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(2):282-290.

[25] 陈钰馨,郑博福,傅赫,等.不同植被类型根系对土壤水分分布的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(1):37-46.
Chen Yuxin, Zheng Bofu, Fu He, et al. Effects of roots in different vegetation types on soil water distribution [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(1):37-46.

[26] 许文文,赵燕翘,王楠,等.人工蓝藻结皮对沙区表层土壤酶活性及其恢复速率的影响[J].生态学报,2023,43(7):2856-2864.
Xu Wenwen, Zhao Yanqiao, Wang Nan, et al. Effects of artificial cyanobacterial crusts on enzyme activities and recovery rate of surface soil in sandy areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2856-2864.

[27] 肖颖,吉使阿微,赵文学,等.青藏高原东缘不同人工草地土壤养分、酶活性及微生物生物量特征[J].中国草地学报,2022,44(9):90-99.
Xiao Ying, Ji Shi'awei, Zhao Wenxue, et al. Soil nutrients,enzyme activities and microbial biomass characteristics of different artificial grasslands in the eastern margin of the qinghai-tibetan plateau [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(9):90-99.

[28] 王梅,晏梓然,赵子文,等.黄土高原植被演替过程中相对土壤酶活性的变化特征[J].水土保持学报,2021,35(5):181-187.
Wang Mei, Yan Ziran, Zhao Ziwen, et al. Variation characteristics of specific soil enzyme activities during vegetation succession on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):181-187.

[29] 丁威,王玉冰,向官海,等.小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响[J].植物生态学报,2020,44(1):33-43.
Ding Wei, Wang Yubing, Xiang Guanhai, et al. Effects of Caragana microphylla encroachment on community structure and ecosystem function of a typical steppe [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020,44(1):33-43.

[30] 张敬敏,珠娜,蔡育蓉,等.小叶锦鸡儿灌丛对草本群落

特征的影响[J].生态学报,2023,43(21):8830-8839.
Zhang Jingmin, Zhu Na, Cai Yurong, et al. Efeets of Caregane microphyiaonheraceous cornrnuinity characteristics. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(21):8830-8839.

[31] Chen Yongliang, Xu Tianle, Fu Wei, et al. Soil organic carbon and total nitrogen predict large-scale distribution of soil fungal communities in temperate and alpine shrub ecosystems [J]. European Journal of Soil Biology, 2021,102:103270.

[32] 赵元,张伟,胡培雷,等.桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征[J].生态学报,2021,41(21):8535-8544.
Zhao Yuan, Zhang Wei, Hu Peilei, et al. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical Karst depression [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(21):8535-8544.