#### DOI: 10.20103/j.stxb.202310292346

黎萱,耿行,高永恒,陈东毅,李良安,王平.川西锦鸡儿灌木扩张对高寒草地土壤有机碳矿化的影响.生态学报,2024,44(16):7150-7159. Li X, Geng H, Gao Y H, Chen D Y, Li L A, Wang P.Effects of *Caragana erinacea* shrub expansion on soil organic carbon mineralization in alpine grassland. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16):7150-7159.

# 川西锦鸡儿灌木扩张对高寒草地土壤有机碳矿化的 影响

黎 萱<sup>1,2</sup>, 耿 行<sup>3</sup>, 高永恒<sup>2</sup>, 陈东毅<sup>1</sup>, 李良安<sup>1,2</sup>, 王 平<sup>1,\*</sup>

1 甘肃农业大学资源与环境学院,兰州 730070

2 中国科学院成都生物研究所,成都 610041

3 贵州省黔西南布依族苗族自治州能源局,兴义 562400

摘要:以川西锦鸡儿(*Caragana erinacea*)灌丛草地为研究对象,分析川西锦鸡儿灌木不同扩张程度下(原生草地、中度灌木扩张 和重度灌木扩张)0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm 土壤理化性质及土壤有机碳(SOC)矿化的变化特征,探究灌木扩张对高寒 草地 SOC 矿化的影响机制。结果表明:(1)灌木扩张对土壤全氮(TN)含量无显著影响,显著增加各土层 SOC 含量,显著增加 10—20 cm 土壤矿物矿质结合态有机碳(MAOC)含量及其占 SOC 比例,显著减小 0—20 cm 土壤含水量(SWC)。重度灌木扩张 显著增加 10—40 cm 土壤微生物生物量碳(MBC)含量,显著减小 0—10 cm 土层 MBC/SOC 和 MAOC/SOC。(2)不同土壤深度 对 SOC 矿化激发效应存在差异,灌木扩张显著降低 0—10 cm 土壤有机碳潜在矿化碳库(*C*<sub>0</sub>),重度灌木扩张显著增加 10—40 cm 土层 *C*<sub>0</sub>。(3)相关性分析表明,SOC 矿化过程与 SWC、SOC、TN、MBC 和 MAOC 显著正相关,与 MAOC/SOC 显著负相关。 逐步回归分析表明,SOC 矿化与 MBC 和 SWC 相关性最强,可以有效解释 *C*<sub>0</sub>变化的 91.1%。由此推断,川西锦鸡儿灌木扩张后 该区域 SOC 矿化的变化,主要是由于灌木扩张影响 MBC 和 SWC 所致,土壤浅表水分减少影响微生物活动使得 SOC 矿化减弱,灌木根系发育土层微生物量增多使得 SOC 矿化增强。

关键词:土壤有机碳矿化;灌木扩张;高寒草地;川西锦鸡儿

# Effects of *Caragana erinacea* shrub expansion on soil organic carbon mineralization in alpine grassland

LI Xuan<sup>1,2</sup>, GENG Hang<sup>3</sup>, GAO Yongheng<sup>2</sup>, CHEN Dongyi<sup>1</sup>, LI Liangan, WANG Ping<sup>1,\*</sup>

1 Resources and Environment College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Energy Bureau of Qianxinan Buyi and Miao Autonomous Prefecture, Guizhou Province, Xingyi 562400, China

Abstract: In this paper, *Caragana erinacea* shrub grassland in western Sichuan was taken as the research object. The changes of soil physical and chemical properties and soil organic carbon (SOC) mineralization in 0—10 cm, 10—20 cm and 20—40 cm under different expansion degrees of *Caragana erinacea* shrub (native grassland, moderate shrub expansion, and heavy shrub expansion) were analyzed, and the influence mechanism of shrub expansion on SOC mineralization in alpine grassland was explored. The results showed that: (1) Shrub expansion had no significant effect on soil total nitrogen (TN) content, significantly increased SOC content in each soil layer, significantly increased mineral mineral-associated organic carbon (MAOC) content and its proportion in SOC in 10—20 cm soil, and significantly

基金项目:国家自然科学基金(32371649);四川省重点研发计划项目(2022YFS0489)

收稿日期:2023-10-29; 网络出版日期:2024-06-18

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wp1826@ 126.com

decreased soil water content (SWC) in 0—20 cm soil. In the stage of heavy shrub expansion, the content of microbial biomass carbon (MBC) in 10—40 cm soil layer was significantly increased, and MBC/SOC and MAOC/SOC in 0—10 cm soil layer were significantly decreased. (2) Shrub expansion significantly reduced the potential mineralized carbon pool  $(C_0)$  of soil organic carbon in 0—10 cm soil layer, and the  $C_0$  in 10—40 cm soil layer was significantly increased in the expansion stage of heavy shrubs. (3) Correlation analysis showed that SOC mineralization process was significantly positively correlated with SWC, SOC, TN, MBC and MAOC, and significantly negatively correlated with MAOC/SOC. Stepwise regression analysis showed that the SOC mineralization had the strongest correlation with MBC and SWC, which could effectively explain 91.1% of the change of  $C_0$ . It can be inferred that the change of SOC mineralization in this area after *Caragana erinacea* shrub expansion is mainly due to the influence of shrub expansion on MBC and SWC. The decrease of soil superficial water affects microbial activity and weakens SOC mineralization, while the increase of microbial biomass in shrub root development layer strengthens SOC mineralization.

Key Words: soil organic carbon mineralization; shrub expansion; alpine grassland; Caragana erinacea

草地灌丛化是一种在全球普遍发生的现象<sup>[1]</sup>,灌木扩张会造成土壤养分在空间上重新流动和二次分 配,<sup>[2-4]</sup>,在空间上形成"沃岛效应"<sup>[5-6]</sup>,对草地土壤有机碳循环产生影响。土壤有机碳矿化是指土壤中的含 碳有机质在微生物作用下分解形成二氧化碳的过程,是土壤碳循环中的重要环节,能够反映土壤有机碳的周 转速度和稳定性。研究表明,土壤有机碳矿化受到温度、湿度等外部环境的影响<sup>[7-8]</sup>,同时也与植被凋落物等 含碳物质输入相关联<sup>[9-10]</sup>,外部诸多因素的改变主要依靠改变土壤微生物活性或者群落结构从而间接对有 机碳矿化产生影响<sup>[11]</sup>。草地灌丛化引起植被类型演替使得地表凋落物、土壤呼吸等发生改变,影响了土壤有 机碳矿化产生影响<sup>[11]</sup>。草地灌丛化引起植被类型演替使得地表凋落物、土壤呼吸等发生改变,影响了土壤有 机碳矿化<sup>[12]</sup>。然而,灌丛化对草地土壤有机碳矿化的影响尚无一致结论。Baer等<sup>[13]</sup>研究发现美国中西部秋 橄榄灌木扩张导致草地表层土壤有机碳矿化作用降低;曹亚鑫等<sup>[14]</sup>研究发现声芽山灌丛土壤有机碳矿化作 用低于草地;而陈彦硕等<sup>[15]</sup>研究了近 30 年荒漠草原向灌丛转变过程发现灌丛增强了土壤呼吸;Chen 等<sup>[16]</sup>研 究发现青藏高原 4 种灌木入侵草地通过增强微生物作用从而增强土壤有机碳矿化作用。造成上述研究结果 差异的原因可能为不同研究区域草地地理气候环境、灌木种类及土壤理化性质的不同,不同种类灌木凋落物 和根系分泌物的数量、成分均不同,使得土壤理化性质及微生物群落结构存在差异,导致土壤有机碳矿化对灌 木扩张响应不一致。目前,对于灌丛化草地土壤有机碳矿化已有不少研究,主要聚焦于季节更替<sup>[17]</sup>、温度敏 感性<sup>[18]</sup>、外源添加<sup>[19]</sup>等方面,但灌木扩张作为灌丛化草地土壤有机碳矿化变化的根本原因,其对土壤有机碳 矿化的影响机制却鲜有报道。

青藏高原草地占我国草地总面积的 40% 以上,是我国重要的有机碳汇区,属于典型的高寒草地,因其高海拔、低气温的独特地理环境,生态系统尤其脆弱,对气候和环境变化极为敏感,过去几十年,青藏高原草地生态系统灌木扩张现象日益凸显<sup>[20]</sup>。因此,研究灌木扩张对青藏高原高寒草地土壤有机碳矿化的影响,对于更好地了解高寒草地生态系统土壤碳循环具有重要意义。基于此,本研究选取了青藏高原东部地区广泛分布且具代表性的川西锦鸡儿(*Caragana erinacea*)灌丛草地作为研究对象,根据川西锦鸡儿灌木的覆盖度将其划分为原生草地、中度灌木扩张和重度灌木扩张 3 个程度,分析不同灌木扩张程度下土壤理化性质及有机碳矿化的变化特征,探究灌木扩张对土壤有机碳矿化的影响机制,以期为该区域灌木扩张对草地 SOC 周转的影响提供数据参考。

# 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的四川省阿坝藏族羌族自治州红原县境内,海拔约 3500 m,地理坐标为 32°41′N,102°21′E,属于大陆性高原寒温带季风气候,年平均气温 1.1 ℃,降水量 752 mm,蒸发量 1263 mm,湿

度 60%—70%,日照时间 2159 h。高寒草地以四川嵩草(Kobresia setchwanensis)、高山嵩草(Kobresia pygmaea)、 木里薹草(Carex muliensis)等为主要优势草本植物,常见灌木种类有川西锦鸡儿(Caragana erinacea)、金露梅 (Potentilla fruticosa)、高山绣线菊(Spiraea alpina)等。

# 1.2 样地设置及样品采集

本研究选取研究区内的川西锦鸡儿灌丛草地作为研究对象,选择的样地位于地势平坦的区域,且为冬季放牧的草地,在生长季(5—10月份)没有放牧活动,样地土壤类型为高山草毡土,在2023年7月份完成土壤样品的采集。依据灌丛的覆盖度(灌木投影所占划定区域草地面积比例)、年龄分布特征和灌丛发育状况(依据灌木地径及冠幅)<sup>[21]</sup>,划分成3个不同灌木扩张程度的样地(图1):原生草地(无灌木生长)、中度灌木扩张(40%<灌木覆盖度 <60%)和重度灌木扩张(60% <灌木覆盖度),样地间距为100m。在样地内选取了3个灌丛发育状况及长势相对一致的10m×10m样方(3个灌木扩张程度各取3个重复,共9个样方),对灌木树冠投影以内的土壤进行采样,采样土壤深度为40cm,将其划分为3个不同的深度层次(0—10cm、10—20cm和20—40cm)。以代表性和平面分布均匀性为原则,在每个样方内,选择灌丛发育状况及长势相对一致的3个灌丛,先用铁铲清除地表的植物枯落物及碎石等,再用直径为4cm土钻进行五点(5钻)取样法,每个灌丛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地以相同的五点取样法进行取样。采集的新鲜土样除去肉眼可见的根系和石块等杂物后,密封、冷藏保存带回实验室。带回实验室土样立即称取部分土样测定土壤含水量,剩余土样分为2份,一份放入4℃保温箱进行鲜样保存,过2.0mm 筛后用于测定土壤有机碳矿化、微生物生物量碳;另一份室内自然风干后,分别过2.0mm和0.15mm土壤筛后备用,过2.0mm筛的土样用于测定土壤矿质结合态有机碳和 pH值,过0.15mm 筛的土样用于测定土壤有机碳和全氮。



图 1 样地照片 Fig.1 Photos of the ploth

# 1.3 测定方法

# 1.3.1 土壤基本理化性质测定

参照鲍士旦<sup>[22]</sup>的方法测定土壤 pH 值、土壤含水量(Soil Water Content,SWC)、土壤有机碳(Soil Organic Carbon,SOC)和全氮(Total nitrogen,TN)。土壤 pH 用 pH 计测定(土水比为1:2.5),SWC 用 105℃烘干法测 定,SOC 用重铬酸钾外加热法测定,TN 用凯氏定氮法测定。微生物生物量碳(Microbial Biomass Carbon,MBC) 用氯仿熏蒸  $K_2SO_4$ 浸提法测定<sup>[23]</sup>。矿质结合态有机碳(Mineral-associated Organic Carbon,MAOC)用六偏磷酸 钠溶液振荡、湿筛、烘干、研磨后,采用总有机碳分析仪测定颗粒态有机碳,再用总有机碳含量进行差减法计算 得到<sup>[24]</sup>。

# 1.3.2 土壤有机碳矿化培养实验

土壤有机碳矿化 CO<sub>2</sub>-C 释放量采用室内恒温培养碱液吸收法测定<sup>[17]</sup>。称取 100 g 过 2 mm 筛新鲜土样, 放入 500 mL 广口瓶中进行培养,同时称取一份土样测定此时土壤水分质量分数用于后续计算。广口瓶内置 装有 20.00 mL 的 NaOH(0.20 mol/L)溶液的小瓶用于吸收土壤有机碳矿化释放的 CO<sub>2</sub>,密封后置于 20 ℃的恒 温培养箱进行培养 48 d,同时在培养箱中设置 2 个不含土样的培养瓶作为空白对照,在第 1、2、3、4、5、8、13、 18、23、28、33、38、43、48 d,将 NaOH 吸收液取出,加入过量的 BaCl<sub>2</sub>(1.0 mol/L)溶液以及 2 滴酚酞指示剂,用 HCl(0.10 mol/L)溶液进行滴定至红色消失,然后换上新的吸收瓶继续培养,分别记录每次滴定所消耗 HCl 用量,用于计算土壤碳矿化 CO<sub>2</sub>释放量。

1.4 数据计算和处理

1.4.1 数据计算

土壤有机碳矿化  $CO_2$ -C 释放量(mg/g)计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$CO_2 - C = \frac{(V_0 - V) \times C_{HCI}}{2} \times 44 \times \frac{22}{44} \times \frac{1}{m(1 - a)}$$
(1)

式中, $V_0$ 为空白对照滴定时消耗的盐酸体积(mL);V为实验样品滴定时消耗的盐酸体积(mL); $C_{HCl}$ 为盐酸浓度(mol/L);m为实验样品土重(g);a为实验样品土壤水分质量分数(%)。

采用一级动力学方程拟合 SOC 矿化模型<sup>[26]</sup>,拟合方程如下:

$$C_{t} = C_{0} \times (1 - e^{-kt}) \tag{2}$$

式中,*t* 表示培养时间; $C_t$ 为培养 *t* 时间内土壤有机碳矿化 CO<sub>2</sub>-C 累计释放量(mg/kg); $C_0$ 表示土壤有机碳潜 在矿化碳库(mg/kg);*k* 表示土壤有机碳矿化速率常数。其中, $C_0$ 值越大、*k* 值越小表示 SOC 矿化作用越强,反 之则越弱<sup>[14]</sup>。

1.4.2 数据处理

采用 SPSS 26 软件进行数据处理,通过方差分析检验不同土层和不同灌木扩张程度下各参数的差异显著性,运用逐步回归分析明确解释 SOC 矿化变化的主要因子。采用 Rstudio 4.3 中的 ggcor 程序包分析 SOC 矿化 与理化性质的相关性并绘制热图。一级动力学方程的非线性回归拟合以及柱状图、点线图的绘制均在 Origin 2022 软件中完成。

#### 2 结果与分析

2.1 土壤理化性质的变化特征

表1展示了原生草地和两种灌木扩张程度下的土壤部分理化性质的分布特征。土壤pH随土壤深度变

Table 1 Characteristics of soil physical and chemical properties under shrub expansion						
因子 Parameters	土壤深度 Soil depth/cm	原生草地 Native grassland	中度灌木扩张 Moderate shrub expansion	重度灌木扩张 Heavy shrub expansion		
pH	0—10	6.12±0.05Ab	6.35±0.12Aa	6.14±0.07Ab		
	10—20	$6.16{\pm}0.05{\rm Ab}$	6.38±0.06Aa	$6.19{\pm}0.07{\rm Ab}$		
	20—40	$6.20{\pm}0.05{\rm Ab}$	6.35±0.05Aa	$6.19 \pm 0.11  \mathrm{Ab}$		
土壤含水量(SWC)	0—10	49.77±1.19Aa	$42.53{\pm}1.08{\rm ABb}$	$41.67{\pm}1.36{\rm Ab}$		
Soil water content/%	10—20	46.41±2.07Aa	$43.58 \pm 0.32 \mathrm{Ab}$	$41.19{\pm}1.16\mathrm{Ab}$		
	20—40	39.94±2.06Ba	39.38±2.64Ba	37.40±1.47Ba		
土壤有机碳含量(SOC)	0—10	67.11±0.33Ab	$66.17{\pm}0.27\mathrm{Ab}$	70.85±1.99Aa		
Soil water content/%	10—20	$50.59{\pm}0.58\mathrm{Bb}$	52.27±0.25Ba	52.92±0.64Ba		
	20—40	$37.59 \pm 0.84 $ Cc	42.84±0.61Ca	$40.01{\pm}0.08{\rm Cb}$		
全氮含量(TN)	0—10	5.55±0.10Aa	5.42±0.20Aa	5.48±0.09Aa		
Total nitrogen content/(g/kg)	10—20	4.46±0.09Ba	4.59±0.08Ba	4.53±0.04Ba		
	20—40	3.42±0.18Ca	3.57±0.12Ca	3.54±0.22Ca		
微生物生物量碳含量(MBC)	0—10	2.79±0.04Aa	$2.51 \pm 0.02 \mathrm{Ab}$	2.62±0.22Aab		
Microbial biomass carbon	10—20	$1.65{\pm}0.11\mathrm{Bb}$	$1.57 \pm 0.05 Bb$	1.86±0.11Ba		
content/(g/kg)	20—40	$1.09 \pm 0.11 $ Cc	$1.36 \pm 0.12 \text{Cb}$	1.72±0.13Ba		
矿质结合态有机碳含量(MAOC)	0—10	$40.62 \pm 0.74$ Aa	39.60±0.69Aa	38.57±1.87Aa		
Mineral-associated organic	10—20	$33.40 \pm 0.45 Bb$	37.28±0.51Ba	37.17±0.610Aa		
carbon content/(g/kg)	20—40	32.89±0.66Ba	33.30±1.07Ca	34.02±0.57Ba		

表1 灌木扩张下的土壤理化性质特征

不同大写字母表示同一扩张程度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扩张程度之间差异显著(P<0.05)

化差异不显著,SWC、SOC含量、TN含量、MBC和MAOC含量均随着土壤深度增加而减小。灌丛化草地土壤TN含量与原生草地无明显差异,中度灌木扩张土壤pH显著大于原生草地(P<0.05)。灌丛化草地SOC显著大于原生草地(P<0.05)。0—10 cm和10—20 cm土层SWC显著小于原生草地(P<0.05)。不同灌木扩张程度下土壤MBC在土壤深度上的变化存在差异,中度灌木扩张0—10 cm土层MBC含量小于原生草地(P<0.05),重度灌木扩张10—20 cm和20—40 cm土层MBC显著高于中度灌木扩张和原生草地(P<0.05)。灌丛化草地10—20 cm土层MAOC含量显著小于原生草地,且中度灌木扩张与重度灌木扩张无显著差异。由此可见灌木扩张一定程度上促进了SOC积累,增加了10—40 cm土层MBC和10—20 cm土层MAOC含量,降低了0—20 cm土层SWC。

灌木扩张对土壤 TN 和 MAOC 的影响尚未达到显著级别(P>0.05),但显著影响了 pH、SWC、SOC 和 MBC (表 2),其中对 SWC 和 MBC 的显著影响较为突出,F 值分别为 24.96 和 12.91(P<0.001)。土壤深度对 SWC、SOC、TN、MBC 和 MAOC 均有显著影响(P<0.001),灌木扩张程度与土壤深度的交互作用显著影响 SWC、SOC、MBC 和 MAOC(P<0.05)。

Table 2 The significant effects of shrub expansion and soil depth on soil physical and chemical properties								
因子 Parameters	pH	SWC	SOC	TN	MBC	MAOC		
SE	9.8 **	24.96 ***	7.12 **	0.245ns	12.91 ***	2.60 ns		
SD	0.11 ns	32.73 ***	1081.19 ***	405.07 ***	286.67 ***	71.98 ***		
SE×SD	0.18 ns	3.81 *	6.91 **	0.906ns	9.63 ***	6.45 ***		

表 2 灌木扩张、土壤深度对土壤理化性质的显著性影响

表中数据为 F 值;SE 表示灌木扩张 Shrub expansion; SD 表示土壤深度 Soil depth; ns 表示 P > 0.05; \* 表示 P < 0.05; \*\* 表示 P < 0.01; \*\*\* 表示 P < 0.001

灌木扩张一定程度改变了 SOC 组分结构, MBC 和 MAOC 占 SOC 的比例受灌木扩张程度与土壤深度的交 互影响显著(图 2)。MBC/SOC 和 MAOC/SOC 的范围分别为 2.63%—4.68%和 53.12%—87.62%。随着土壤 深度的增加, MAOC 占 SOC 比例逐渐增大,即稳定碳占比增大。在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层重度灌木扩 张 MBC 占比显著增大(P<0.001),反映出重度灌木扩张使得该深度范围内分布的土壤微生物量相对增加。 重度灌木扩张草地 0—10 cm 土层 MAOC/SOC 显著小于原生草地(P<0.05),反映出重度灌木扩张使得该深度 范围内土壤稳定碳占比减小。灌木扩张草地 10—20 cm 土层 MAOC/SOC 显著大于原生草地(P<0.05),反映





#### Fig.2 Distribution characteristics of soil MBC/SOC and MAOC/SOC under shrub expansion

MBC/SOC 表示微生物生物量碳与土壤有机碳含量的比值;MAOC/SOC 表示矿质结合态有机碳与土壤有机碳含量的比值;SE 表示灌木扩张 Shrub expansion; SD 表示土壤深度 Soil depth;不同大写字母表示同一扩张程度下不同深度土层之间差异显著(P<0.05),不同小写字母表示 同一土层不同扩张程度之间差异显著(P<0.05)

44 卷

出灌木扩张使得该深度范围内土壤活性碳占比减小。

2.2 SOC 矿化的变化特征

SOC 矿化速率随着培养时间的增加逐渐下降(图 3),到第 28 d 后趋于平缓,SOC 累积矿化量随着培养时间的增加逐渐上升。SOC 矿化速率及累积量均随土壤深度增加而减小,但各土层中不同灌木扩张程度下的 SOC 矿化表现存在差异,在 0—10 cm 土层,表现为原生草地>中度灌木扩张>重度灌木扩张,在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层,均表现为重度灌木扩张>中度灌木扩张>原生草地。



图 3 灌木扩张下土壤有机碳矿化变化 Fig.3 Changes of soil organic carbon mineralization under shrub expansion

采用公式(2)对 SOC 矿化进行拟合,各样本拟合结果均较好( $R^2 > 0.99$ ),土壤有机碳潜在矿化碳库  $C_0$ 和 土壤有机碳潜在矿化率  $C_0$ /SOC 随灌木扩张的变化如图 3 所示, $C_0$ /SOC 可以表征土壤有机碳转化效能和固 碳能力,其值越大,SOC 转化效能越强,土壤固碳能力越弱<sup>[17]</sup>。用灌木扩张样地与原生草地之间的  $C_0$ 差值表 征 SOC 矿化激发效应<sup>[27]</sup>,差值大于 0 为正激发,小于 0 为负激发。 $C_0$ 和  $C_0$ /SOC 均随土壤深度的增加而显著 减小,原生草地 10—20 cm 与 20—40 cm 土层  $C_0$ 分别为 0—10 cm 土层的 28%和 11%,中度灌木扩张下 10— 20 cm 与 20—40 cm 土层  $C_0$ 分别为 0—10 cm 土层的 49%和 20%,重度灌木扩张下 10—20 cm 与 20—40 cm 土 层  $C_0$ 分别为 0—10 cm 土层的 53%和 25%,表明灌木扩张导致 SOC 矿化对土壤深度的响应变弱。0—10 cm 土层灌木扩张下的  $C_0$ 和  $C_0$ /SOC 值均显著低于原生草地(P < 0.01),表明灌木扩张下的  $C_0$ 和  $C_0$ /SOC 值均显著大于 原生草地(P < 0.01),其中  $C_0$ 分别为原生草地的 1.26和 1.54倍,表明重度灌木扩张对 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SOC 矿化具有显著的正激发效应。

土壤深度和灌木扩张程度均对 C<sub>0</sub>和 C<sub>0</sub>/SOC 有显著影响(P<0.01),二者交互作用影响依旧显著(P<0.01)(图 4)。整体来看,灌木扩张使得 0—10 cm 土层 SOC 矿化作用降低,中度灌木扩张时 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SOC 矿化变化不大,重度灌木扩张时 10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SOC 矿化作用增强。



图 4 灌木扩张下土壤潜在矿化碳库变化

Fig.4 Changes of soil potential mineralized carbon pool under shrub expansion

2.3 影响 SOC 矿化的关键因子

SOC 矿化( $C_0$ 和  $C_0$ /SOC)与土壤各理化因子之间的相关关系如图 5 所示。SOC 矿化( $C_0$ 和  $C_0$ /SOC)与土



图 5 土壤理化性质与碳矿化之间的相关性



*pd*:SOC 矿化与理化性质之间的显著性,线的颜色表示显著性水平,pd<0.05表示显著;*rd*:SOC 矿化与理化性质之间的相关性系数,线宽表示相关性系数大小;*r*:土壤各理化性质之间的相关性系数,相关性系数绝对值大于 0.2为弱相关,大于 0.6为强相关;C<sub>0</sub>/SOC 表示土壤有机碳潜在矿化碳库与土壤有机碳的比值;土壤有机碳激发效应表示灌木入侵样地土壤有机碳潜在矿化碳库与原生草地之间的差值

壤 MBC、SOC、TN、MAOC、SWC 和 MBC/SOC 均显著正相关(*pd*<0.05,*rd*>0.4),与土壤深度、MAOC/SOC 均显 著负相关(*pd*<0.001,*rd*<-0.6),与 pH 之间的变化不显著。与 SOC 矿化显著相关的各理化因子之间,MBC 与 MAOC、SOC、SWC 显著正相关(*P*<0.01,*r*>0.7),MAOC/SOC 与 SWC、MBC、SOC、TN 显著负相关(*P*<0.01,*r*<-0.59)。

进一步对与  $C_0$ 显著相关的 MBC、SOC、SWC、MAOC、MAOC/SOC 进行逐步回归分析(表 3),估计各因子对 SOC 矿化的相对解释度。根据回归分析结果可以推断,MBC 的变化可以有效解释  $C_0$ 的 84.9%的变化,MBC 和 SWC 的变化可以有效解释  $C_0$ 的 91.1%的变化,即 MBC 和 SWC 为  $C_0$ 变化的主要解释变量。

Table 3	Stepwise regression model between soil physical and chemic	cal properties and potential min	eralized carbon pool	
序号 Order number	回归方程 Regression equation	$R^2$	重要性排序 Order of importance	
1	$C_0 = -1460.663 + 1377.316 \times MBC$	0.849	MBC>SWC	
2	$C_0 = -3767.029 + 1162.086 \times \text{MBC} + 64.036 \times \text{SWC}$	0.911		

表 3 土壤理化性质与潜在矿化碳库之间的逐步回归模型

#### 3 讨论

土壤理化性质是研究 SOC 循环及其对环境变化响应的关键指标。通常认为,灌木扩张通过改变土壤地 表盖度、凋落物输入、根系发育度和微生物群落等,从而影响土壤理化性质。本研究结果显示,灌木扩张草地 土壤 pH、SWC、SOC、MAOC 和 MBC 含量与原生草地有显著差异。研究表明,SOC 含量取决于植物残体输入 与输出之间的平衡<sup>[28]</sup>。灌木扩张草地 SOC 含量高于原生草地(表1),这与前人的研究<sup>[4]</sup>结论一致,灌木扩张 后土壤凋落物输入增加,有机质转化能力也有所提高,使得 SOC 得到积累。灌木扩张过程伴随着灌木覆盖度 变大以及灌木植株发育,中度灌木扩张处于木本与草本植物的演替中期,灌木抑制了草本植物光合作用[29], 草本植物生物量和根系输送物质随之减少,使得土壤机酸类物质输入减少,因此中度灌木扩张土壤 pH 值略 微增大。随着灌木不断发育,植被在吸收养分时会释放出更多的有机酸类物质,从而使得土壤酸性增强。木 本植物根系有着比草本植物更深的发育深度,李宗超等<sup>[30]</sup>研究发现,草本植物根系主要分布在土壤浅表,而 锦鸡儿灌木根系深度达到 40 cm 土壤深度,可见,灌木扩张将使得草地土壤根系向土壤更深层位发育。MBC 与植被根系发育及分泌物相关联<sup>[31]</sup>,随着灌木扩张程度的加深和灌木植株的不断发育,深层土壤根系发育, 而土壤微生物向根系集聚,因此本研究中重度灌木扩张 10-20 cm 和 20-40 cm 土层 MBC 含量显著高于原 生草地(表1)。MAOC是SOC较为稳定部分,不易被微生物分解利用。本研究发现,10-20 cm 土壤 MAOC 对灌木扩张的响应也比较敏感,表明高寒草地土壤惰性有机碳与 MBC 等 SOC 活性组分对灌木扩张具有相同 的敏感性(图 2)。本研究中,灌木扩张草地 SWC 减小(表 1),与 Gao 等的研究结果相悖<sup>[32]</sup>,但与张东等的研 究相一致[33],可能是由于研究区域川西锦鸡儿灌木扩张后的土壤表面覆盖度降低,形成部分空斑,导致土壤 水蒸发量增加,同时灌木植株根系较长,在浅表分布较少,导致群落固水能力降低,进而导致浅水分层减小。 相关研究<sup>[34]</sup>发现,豆科植被川西锦鸡儿灌丛化会引起土壤 N 元素增加,然而在本研究中,原生草地和灌木扩 张草地土壤 TN 含量并没有明显差异(表1),研究区域川西锦鸡儿灌木扩张对草地土壤 TN 含量的影响并不 显著。

SOC 矿化速率反映土壤矿化释放 CO<sub>2</sub>的快慢,SOC 矿化速率越高则表明土壤中微生物的数量越多,活性 越强。本研究中,培养初期 SOC 矿化速率较快,SOC 矿化速率随培养时间逐渐减小,主要是由于土壤易被氧 化分解有机质逐渐被消耗殆尽所致。本研究发现,SOC 矿化速率随着土壤深度的增加而显著减小(图 3),这 与孙亚荣等<sup>[35]</sup>研究相一致,土壤有机质逐层沉淀特征决定了深层土壤具有贫瘠化、干燥化、低孔隙等特点, MAOC 占 SOC 比例也随土壤深度的增加而增加(图 2),惰性碳的增加使得可碳化的有机碳少于浅层土壤。整 体来看,SOC 矿化对灌木扩张的响应存在土壤深度上的差异,0—10 cm 土层灌木扩张对 SOC 矿化表现为显著 负激发效应,10—40 cm 土层表现为显著正激发效应(图 4),这可能归结于影响 SOC 矿化的土壤因子在土壤 深度的差异。已有研究表明,土壤水分显著影响 SOC 矿化<sup>[36]</sup>,适当的水分增加可以加快可溶性物质溶出促 进 SOC 矿化,而 SOC 矿化变化与土壤活性有机碳呈正相关<sup>[37]</sup>,与惰性有机碳占比呈负相关<sup>[38]</sup>。本研究也发 现,*C*<sub>0</sub>值与 SWC、MBC 和 SOC 显著正相关,与 MAOC/SOC 值显著负相关(图 5)。灌木扩张后 SOC 含量增加, 0—10 cm 土层 MAOC 占 SOC 比例减小(表 1),但灌木扩张并未提高 0—10 cm 土层 SOC 矿化作用(图 4),这 与相关关系的结果相悖。本研究显示,灌木扩张对 SWC 的影响最为突出(表 2),结合此结果本研究认为灌木 扩张导致 0—10 cm 土壤水分减少,进而影响微生物的活动,是造成该深度 SOC 矿化作用降低的主要原因。值得注意的是,10—20 cm 土层 SWC 也显著减少,同时 MAOC 含量及其占 SOC 比例均增大(表 1),但重度灌 木扩张却提高了 10—20 cm 土层 SOC 矿化作用(图 4),这与 0—10 cm 土层变化趋势恰相反。本研究通过逐 步回归分析确定了 SWC 和 MBC 为影响 SOC 矿化的主要土壤因子(表 3),而微生物在已被证明在 SOC 矿化 中发挥重要作用<sup>[16]</sup>,结合 MBC 含量变化特征(表 1),本研究推断重度灌木扩张导致 10—20 cm 和 20—40 cm 土壤微生物量增加,从而增强了该深度 SOC 矿化作用。由次可见,在本次试验中,川西锦鸡儿灌木扩张后引起的土壤水分变化影响微生物活动,以及与根系发育密切相关的微生物量变化是决定 SOC 矿化响应特征的 主要因素。

#### 4 结论

本文探究了川西锦鸡儿灌木扩张对 SOC 矿化的影响机制,土壤理化性质和 SOC 矿化对灌木扩张的响应 在不同土壤深度上表现不一致。各土层 SOC 含量均因灌木扩张显著增加,0—20 cm 土层 SWC 显著降低,重 度灌木扩张 10—40 cm 土层 MBC 含量显著增加。灌木扩张对不同土层 SOC 矿化的激发效应存在差异,0—10 cm 土层表现为负激发,10—40 cm 土层表现为正激发。通过方差分析和回归分析发现,川西锦鸡儿灌木扩张 后 SOC 矿化变化的主要因素是 MBC 和 SWC,土壤浅表水分显著减小限制了微生物活动使得 SOC 矿化减弱, 而灌木根系发育土层微生物量的显著增多使得 SOC 矿化加强。上述研究结果表明,MBC 和 SWC 的变化能够 对 SOC 稳定性产生影响,在对灌木扩张背景下青藏高原高寒草地土壤碳库动态变化进行预测,以及改善土壤 固碳能力时,应充分考虑土壤水分和微生物关键作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 郑欢,聂士瑞,何燕敏,杜忠.草地灌丛化成因及其影响研究综述.四川林业科技,2023,44(2):1-7.
- [2] 刘小龙,胡健,周青平,曹全恒,孙梅玲,陈雪玲,杨丽雪.若尔盖高原典型草地灌丛化对植被特征和土壤养分的影响.草地学报,2022, 30(4):901-908.
- [3] 王采娥. 三江源区山坡退化高寒草甸和灌丛植被、土壤养分空间格局及土壤侵蚀研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [4] 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.
- [5] 李月飞,陈林,李学斌,张义凡,杨新国.荒漠草原灌丛沃岛的结构特征和生态效应.草业科学,2018,35(10):2327-2335.
- [6] 余海龙,樊瑾,牛玉斌,朱湾湾,黄菊莹.灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆"土壤沃岛效应"的影响研究.草地学报,2019,27 (1):1-7.
- [7] 许恩兰,林雪婷,郭剑芬.水分对武夷山不同海拔土壤有机碳矿化的影响.亚热带资源与环境学报, 2019, 14(1): 30-37.
- [8] 郑娇,李东,袁旭东,赵小祥,刘峰,田秋香. 贡嘎山树线过渡带土壤有机碳矿化和温度敏感性. 生态学报, 2023, 43(21): 8704-8715.
- [9] 陈甜, 元方慧, 张琳梅, 胡亚林. 不同化学性质叶凋落物添加对土壤有机碳矿化及激发效应的影响. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2602-2610.
- [10] 魏圆云,崔丽娟,张曼胤,刘魏魏,王大安,杨思,肖红叶.外源碳输入对华北平原农田和湿地土壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响. 中国生态农业学报:中英文, 2019, 27(10): 1463-1471.
- [11] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, Lang B, von Lützow M, Marin-Spiotta E, van Wesemael B, Rabot E, Ließ M, Garcia-Franco N, Wollschläger U, Vogel H J, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma, 2019, 333: 149-162.
- [12] 高丽, 侯向阳, 王珍. 草地生态系统土壤碳矿化研究进展. 中国草地学报, 2023, 45(11): 136-144.

- [13] Baer S G, Church J M, Williard K W J, Groninger J W. Changes in intrasystem N cycling from N<sub>2</sub>-fixing shrub encroachment in grassland: multiple positive feedbacks. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 115(1/4): 174-182.
- [14] 曹亚鑫,程曼,文永莉. 芦芽山不同植被类型下土壤有机碳矿化特征及其对铁添加的响应. 应用与环境生物学报, 2024, 30(1): 18-25.
- [15] 陈彦硕,王红梅,郭天斗,马彦平.荒漠草原灌丛转变过程土壤呼吸动态变化及其影响因素研究.草地学报, 2022, 30(10): 2663-2674.
- [16] Chen J, Jia B, Gang S, Li Y W, Li F C, Mou X M, Kuzyakov Y, Li X G. Decoupling of soil organic carbon and nutrient mineralization across plant communities as affected by microbial stoichiometry. Biology and Fertility of Soils, 2022, 58(6): 693-706.
- [17] 康成芳,宫渊波,车明轩,许蔓菁,吕宸,刘韩.川西高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤有机碳矿化的季节动态.生态学报,2020,40(4): 1367-1375.
- [18] Jia B, Jia L, Mou X M, Chen J, Li F C, Ma Q J, Li X G. Shrubification decreases soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in alpine meadow soils. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 168: 108651.
- [19] 张振华,刘振杰,陈白洁,李以康.枯落物添加对三江源区退化高寒草甸土壤碳矿化的影响.草地学报,2021,29(S1):156-164.
- [20] Lu X M, Liang E Y, Camarero J J, Ellison A M. An unusually high shrubline on the Tibetan Plateau. Ecology, 2021, 102(6): e03310.
- [21] 闫丽娟,李广,吴江琪,马维伟,王海燕.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.生态学报,2019,39(15):5546-5554.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 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.
- [24] 石亚攀,乔璐,陈立新,段文标,张雪,徐非,刘晓锐. 红松针阔混交林林隙土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳的时空异质性. 林业科学,2014,50(6):18-27.
- [25] Liu L, Wang H Y, Dai W. Characteristics of soil organic carbon mineralization and influence factor analysis of natural Larix olgensis forest at different ages. Journal of Forestry Research, 2019, 30(4): 1495-1506.
- [26] Uwituze Y, Nyiraneza J, Jiang Y F, Dessureaut-Rompré J, Fraser T D. Soil C, N and P bioavailability and cycling following amendment with shrub willow chips. Canadian Journal of Soil Science, 2023, 103(3): 428-445.
- [27] Creamer C A, Filley T R, Boutton T W, Oleynik S, Kantola I B. Controls on soil carbon accumulation during woody plant encroachment: evidence from physical fractionation, soil respiration, and δ13C of respired CO<sub>2</sub>. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(8): 1678-1687.
- [28] 张江,袁旻舒,张婧,李函微,王洁仪.近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应.生态学报,2020,40(18): 6269-6281.
- [29] 丁婧祎, 尹彩春, 韩逸, 赵文武. 草原灌丛化对生态系统多功能性的影响. 生态学报, 2023, 43(20): 8257-8267.
- [30] 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. 土壤学报, 2015, 52(1): 242-248.
- [31] 肖颖, 吉使阿微, 赵文学, 田莉华. 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. 中国草地学报, 2022, 44(9): 90-99.
- [32] Gao Z, Hu X, Li X Y.Changes in soil water retention and content during shrub encroachment process in Inner Mongolia, northern China.Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geoecology and Landscape Evolution, 2021(206):206.
- [33] 张东,侯晨,马文明,王长庭,邓增卓玛,张婷.高寒草地不同灌丛化梯度下土壤酶活性研究.草业学报,2023,32(9):79-92.
- [34] 郑欢. 青藏高原草甸灌丛化对植物-土壤-酶生态化学计量特征的影响[D]. 南充: 西华师范大学, 2023.
- [35] 孙亚荣,王亚娟,赵敏,薛文艳,梁思琦,刘乐,刘超,陈云明.黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应.环 境科学,2022,43(10):4648-4657.
- [36] 朱灵,张梦瑶,高永恒.高寒草原土壤有机碳矿化对水氮添加的响应.水土保持通报,2020,40(1):30-37.
- [37] 王永慧,杨殿林,红雨,赵建宁,轩青霞,霍莉莉,谭炳昌,修伟明,王丽丽.不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征.农业环境科学学报, 2019,38(3):590-599.
- [38] 蒋小董,郑嗣蕊,杨咪咪,万家鸣,黄悦,余可,佟小刚.毛乌素沙地固沙林发育过程中土壤有机碳库稳定性特征.应用生态学报,2019, 30(8):2567-2574.