

DOI: 10.11766/trxb202203220004

张东, 刘金秋, 马文明, 王长庭, 邓增卓玛, 张婷. 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, WANG Changting, DENGZENG Zhuoma, ZHANG Ting. Effects of Shrub Encroachment on Soil Organic Carbon Components in Qinghai-Xizang Alpine Grassland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1810–1821.

灌丛化对高寒草地土壤有机碳组分的分异研究*

张 东, 刘金秋, 马文明[†], 王长庭, 邓增卓玛, 张 婷

(西南民族大学, 青藏高原研究院 成都 610041)

摘 要: 草地灌丛化过程中植被优势群落类型的转变会通过凋落物及根系分泌物的数量和性质差异影响土壤有机碳 (SOC) 组分。为探索高寒草地土壤不同活性有机碳组分对灌木侵入的响应, 本研究采用 Stewart 物理-化学联合分组方法, 将青藏高原东缘四种典型灌丛化草地以及未灌丛化草地土壤有机碳分为游离态活性有机碳 (Nonprotected organic carbon, Non-C)、物理保护态有机碳 (Physically-protected organic carbon, Phy-C)、化学保护态有机碳 (Chemically-protected organic carbon, Che-C) 和生物化学保护态有机碳 (Biochemically-protected organic carbon, Bio-C), 分析不同活性有机碳组分含量变化及其影响因素。结果表明: (1) 灌木侵入对高寒草地表层土壤 (0~10 cm) SOC 含量影响不显著 ($P>0.05$), 但不同活性有机碳组分含量有所分异。高山绣线菊 (*Spiraea alpina*) 和窄叶鲜卑花 (*Sibiraea angustata*) 灌木侵入降低了土壤 Non-C 和 Bio-C 组分 ($P<0.05$); 金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌木侵入降低了土壤 Non-C 组分 ($P<0.05$); 小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 灌木侵入降低了土壤 Phy-C 和 Che-C 组分 ($P<0.05$), 而提高了土壤 Bio-C 组分含量 ($P<0.05$)。 (2) 未灌丛化草地和灌丛化样地土壤均以 Non-C 组分为主, 其次是稳定态有机碳库 (Che-C 和 Bio-C), 而 Phy-C 占比最少。 (3) 土壤黏粒和全氮是影响高寒灌丛化草地土壤不同活性有机碳组分的主要因素, 解释度共达 51.2%。高寒草地灌木侵入过程中, 灌木种类对不同活性土壤有机碳组分含量影响不一致, 灌丛化草地和未灌丛化草地土壤表层均以 Non-C 为主, 因此在外界扰动的前提下, 该地区的有机碳库可能成为碳源。

关键词: 青藏高原; 高寒草地; 灌丛化; 土壤有机碳组分; Stewart 物理-化学联合分组方法

中图分类号: S812.2 **文献标志码:** A

Effects of Shrub Encroachment on Soil Organic Carbon Components in Qinghai-Xizang Alpine Grassland

ZHANG Dong, LIU Jinqiu, MA Wenming[†], WANG Changting, DENGZENG Zhuoma, ZHANG Ting

(Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: 【Objective】 Changes in the dominant vegetation community will inevitably affect soil organic carbon (SOC) by altering the quantity of litter and root exudates during shrub encroachment. Thus, this study aimed to explore the response of

* 国家自然科学基金项目 (31600378, U20A2008) 和中央高校 (西南民族大学) 基本科研业务费专项资金项目 (2022NYXXS045, ZYN2022052) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31600378 and U20A2008) and the Fundamental Research Funds of the Central Universities of Southwest Minzu University of China (Nos. 2022NYXXS045 and ZYN2022052)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: Mawmtf@swun.edu.cn

作者简介: 张 东 (1995—), 男, 四川邻水人, 硕士研究生, 研究方向: 草原土壤生物地球化学循环。E-mail: zy995419864@qq.com

收稿日期: 2022-03-22; 收到修改稿日期: 2022-07-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-09-23

different active organic carbon fractions in alpine grassland soils to invasion by different shrub species. 【Method】 Physicochemical fractionation method was used to divide soil organic carbon into non-protected carbon, physically-protected carbon, chemically-protected carbon and biochemically-protected carbon. It was analysed the contents of various organic carbon fractions and factors influencing their contents among four typical shrub-grassland and unshrub-encroached grassland on the east edge of Qinghai-Xizang Plateau. 【Result】 The results showed that (1) Shrub encroachment has no significant effect on the SOC content of the surface soil (0–10 cm) in alpine grassland ($P>0.05$), but the content of organic carbon components was different. After *Spiraea alpina* and *Sibiraea angustata* shrubs encroached the grassland, the non-protected organic carbon and biochemically-protected organic carbon contents were significantly decreased ($P<0.05$) while the non-protected organic carbon content significantly decreased when *Potentilla fruticosa* encroached the grassland. Also, the contents of physically-protected and chemically-protected organic carbon decreased significantly in *Caragana microphylla* encroached grassland ($P<0.05$), while the biochemically-protected organic carbon increased significantly ($P<0.05$). (2) SOC in both grassland and shrub patches soil were dominated by non-protected carbon pool, followed by resistant carbon pool (chemically-protected organic carbon and biochemically-protected organic carbon), while physically-protected organic carbon pool accounted for the least. (3) The contents of soil clay and total nitrogen were the main factors affecting the organic carbon fractions in alpine shrub-encroached grassland, with an explanation degree of 51.2%. 【Conclusion】 The invasion of different shrub species had inconsistent effects on the content of different reactive organic carbon fractions. The soils of both unshrub grassland and shrub sample sites on the Tibetan Plateau were dominated by non-protected carbon. Thus, in the presence of external disturbances, the organic carbon pool in the area may become a source of carbon.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; Alpine grassland; Shrub encroachment; Soil organic carbon fraction; Stewart physico-chemical fractionation

土壤对碳素的固定和释放是影响全球碳循环和气候变化的关键环节。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提出增加土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 的固定及其稳定性是目前减缓温室效应经济可行和环境友好的主要方法^[1], 土壤有机碳含量增加 5%~15%, 大气 CO₂ 浓度将降低 16%~30%^[2]。青藏高原作为北半球气候变化的启动区和调节区, 其土壤碳固持量为 30 Pg~40 Pg (以 C 计, 下同), 是我国重要的碳汇区^[3]。在气候变化和放牧等因子的驱动下, 青藏高原东南麓已有 39% 的高山草甸发生灌丛化^[4]。灌木侵入是影响草地土壤有机碳的重要过程, 研究^[5]表明灌丛化引起的植被群落结构、凋落物和地下的土壤过程发生改变, 从而影响草地土壤有机碳循环, 然而灌丛化草原的碳源/汇功能至今尚无一致结论。熊小刚和韩兴国^[6]研究发现小叶锦鸡儿入侵锡林河流域草原提高灌丛样地 SOC 含量, 何俊龄^[7]在研究金露梅侵入青藏高原高寒草甸对 SOC 含量的影响中也得到相同结论; 而杜慧平等^[8]发现金露梅入侵高寒珠芽蓼草地后 SOC 含量减少了 29%; Hughes 等^[9]对牧豆属灌木入侵温带稀树草

原的研究中发现, 灌木侵入后温带稀树草原表层 SOC 含量无明显变化。上述研究均利用总的 SOC 来衡量灌丛化对草地土壤有机碳含量的影响。然而, 草地 SOC 含量的背景值高, 对外界环境的响应迟钝, 不能及时、准确反映土壤有机碳库的变化, 而不同活性有机碳组分对环境胁迫的响应更为快速、灵敏^[10]。费凯等^[11]研究发现相较于 SOC 含量, 土壤活性有机碳组分 (溶解有机碳 DOC、土壤易氧化有机碳 EOC、土壤微生物量有机碳 MBC) 对高寒草地沙化响应更为敏感, 损失量更高。并且, 不同来源和生物稳定性的碳组分对环境胁迫的响应也不同^[12]。

SOC 分组方法主要包括物理法、化学法、生物学法和联合方法。其中, Stewart 等^[13]提出的物理-化学联合分组方法综合考虑了多种有机碳稳定机制, 将土壤有机碳分为游离态有机碳 (Nonprotected organic carbon, Non-C)、物理保护态有机碳 (Physically-protected organic carbon, Phy-C)、化学保护态有机碳 (Chemically-protected organic carbon, Che-C) 和生物化学保护态有机碳 (Biochemically-protected

organic carbon, Bio-C), 其中, 前两种碳组分分解速度快, 周转时间短, 可作为土壤有机碳库变化的敏感指示指标; 而后两者碳组分属于惰性组分, 对外界环境的变化响应不敏感, 一般作为预测土壤碳饱和的指标^[14], 该方法解决了单一分组方法中出现异质性碳组分重叠的问题。基于此, 本研究采用 Stewart 物理-化学联合分组方法探索高寒草地土壤不同活性有机碳组分对不同种类灌木入侵的响应, 以期评价高寒草地灌丛化土壤碳循环及其碳源/汇功能。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省红原县境内的西南民族大学青藏高原基地旁 (32°49'38"N, 102°34'21"E), 平均海拔 3 485 m, 属于青藏高原向四川盆地过渡的高原区 (图 1a)。地貌类型以浅丘山地和丘间低地为主, 属于大陆性高原季风气候, 年均温 1.4℃, 日温差大, 最冷月平均气温-36℃, 最热月平均温度 26℃。该地干湿季节分明, 年均相对湿度为 60%~70%, 年均降水量 791 mm, 主要集中于 5 月至 8 月, 年蒸发量为 648 mm。土壤类型主要为高山灌丛草甸土, 以坡积物为成土母质。草地植被类型为高寒草甸, 由草

本和灌木植物构成, 复合群落的总盖度约达 70%, 其中灌木的分盖度约 50%, 草本层植物种类和生物量较少, 分盖度约 30%。灌丛化草地植被主要为金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、高山绣线菊 (*Spiraea alpina*)、窄叶鲜卑花 (*Sibiraea angustata*) 和小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)。未灌丛化草地植被主要以发草 (*Deschampsia caespitosa*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 等禾本科和莎草科植物为主。

1.2 样品采集

野外取样工作于 2019 年 8 月进行, 通过卫星遥感影像数据以及实地调查查明川西北地区灌丛的分布状况, 选择该区域典型高山绣线菊、窄叶鲜卑花、金露梅、小叶锦鸡儿灌丛样地和一块未灌丛化草地作为对照, 为保证研究样地的相对一致性, 要求各样地地势平坦、地貌特征相似、受扰动较小以及灌丛草地性状未受破坏。

灌丛化样地设置按图 1 (b) 进行。每块灌丛样地按“Z”字采样法设置 6 个 1 m×1 m 的样方, 用剪刀收集样方内地上植被生物量, 用土壤铲挖取样方内表层 0~10 cm 的原状土, 削去边缘受挤压的土壤后, 用硬质塑料盒采集 2 kg 原状土, 用环刀采集土壤容重样品。未灌丛化样地取样方式同上。植被地上生物量装于纸质信封袋带回实验室立即归类。将所有土样在通风阴凉处自然风干, 去除根茬、残

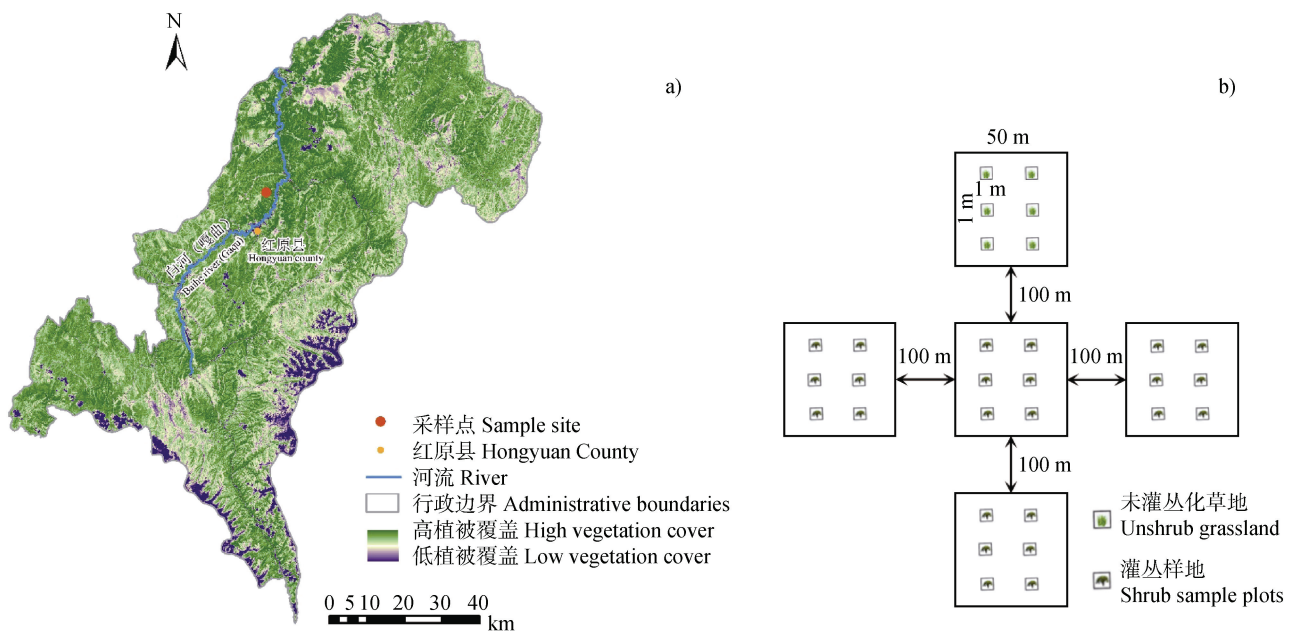


图 1 研究区位置 (a) 与样方设置示意图 (b)

Fig. 1 Location of the study area (a) and diagram of plots design (b)

茬以及石砾等物质。环刀土用于测定容重和土壤含水量。将每一个塑料盒土样分成两份,一份用于土壤理化性质的测定,另一份过 2 mm 筛,用于土壤有机碳分组。样地基本概况如表 1 所示。

1.3 土壤理化性质的测定

土壤 pH 用酸度计测定(水土比为 2.5:1),SOC、全氮(TN)采用元素分析仪(Elementar Variomax CNS Analyser, Elementar Crop., 德国)测定,土壤机械组成利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Crop., 英国)测定,分离出砂粒(2 mm~0.05 mm)、粉粒(0.05 mm~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)三个粒级。

1.4 土壤有机碳分组及计算方法

采用 Stewart 物理-化学联合分组方法,详细步骤可见 Stewart 等^[13]。该方法将土壤有机碳分为游离态活性有机碳(未保护粗颗粒有机碳 cPOC、未保护细颗粒有机碳 fPOC)、物理保护态有机碳(iPOC)、

化学保护态有机碳(水解性游离粉粒 H-dsilt、水解性游离黏粒 H-dclay,水解性闭蓄粉粒 H-usilt、水解性闭蓄黏粒 H-uclay)和生物化学保护态有机碳(水解性闭蓄粉粒 NH-dsilt、水解性闭蓄粉粒 NH-dclay,非水解性游离粉粒 NH-usilt、非水解性游离黏粒 NH-uclay),具体流程见图 2。

不同活性有机碳对总有机碳的贡献率计算方法:

$$C_y = C_1 \div C_0 \times K_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_y 为各组分有机碳对土壤总有机碳的贡献率,%; C_1 为该组分有机碳浓度, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_0 为土壤总有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_1 为该组分的百分含量, %。

$$K_1 = M_1 \div M_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中, M_1 为该组分的质量, g; M_0 为各处理土壤样品总质量, g。

表 1 研究区基本概况

Table 1 General information of the study area

样地类型 Plot type	海拔 Altitude/m	物种数 Species number/	灌丛盖度 Shrub coverage/%	重要值 Important value	主要草本植物 Dominant herb species
高山绣线菊 <i>Spiraea alpina</i>	3 485	33	68	38.6	剪股颖 (<i>Agrostis clavata</i>)、 薹草 (<i>Carex</i>)、 垂穗披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)、 一把伞南星 (<i>Arisaema erubescens</i>)
金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	3 485	16	57	50.3	垂穗披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)、 发草 (<i>Deschampsia cespitosa</i>)、 花锚 (<i>Halenia corniculata</i>)、 矮生蒿草 (<i>Kobresia humilis</i>)
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	3 485	15	63	50.1	棘豆 (<i>Oxytropis yunnanensis</i>)、 花锚 (<i>Halenia corniculata</i>)、 冷蒿 (<i>Artemisia frigida</i>)、 草玉梅 (<i>Anemone rivularis</i>)
未灌丛化草地 Unshrub grassland	3 485	13			薹草 (<i>Carex</i>)、 条叶银莲花 (<i>Anemone coelestina</i> var. <i>linearis</i>)、 剪股颖 (<i>Agrostis clavata</i>)、 鹅绒委陵菜 (<i>Potentilla anserina</i>)

注:表中数值代表各样地具体数据的平均值($n=6$),主要草本植物仅列举各样地排名前 4 的植物。Note: The values in the table represent the mean of each site-specific data ($n=6$) and only the top 4 plants of each site are listed as major herbaceous plants.

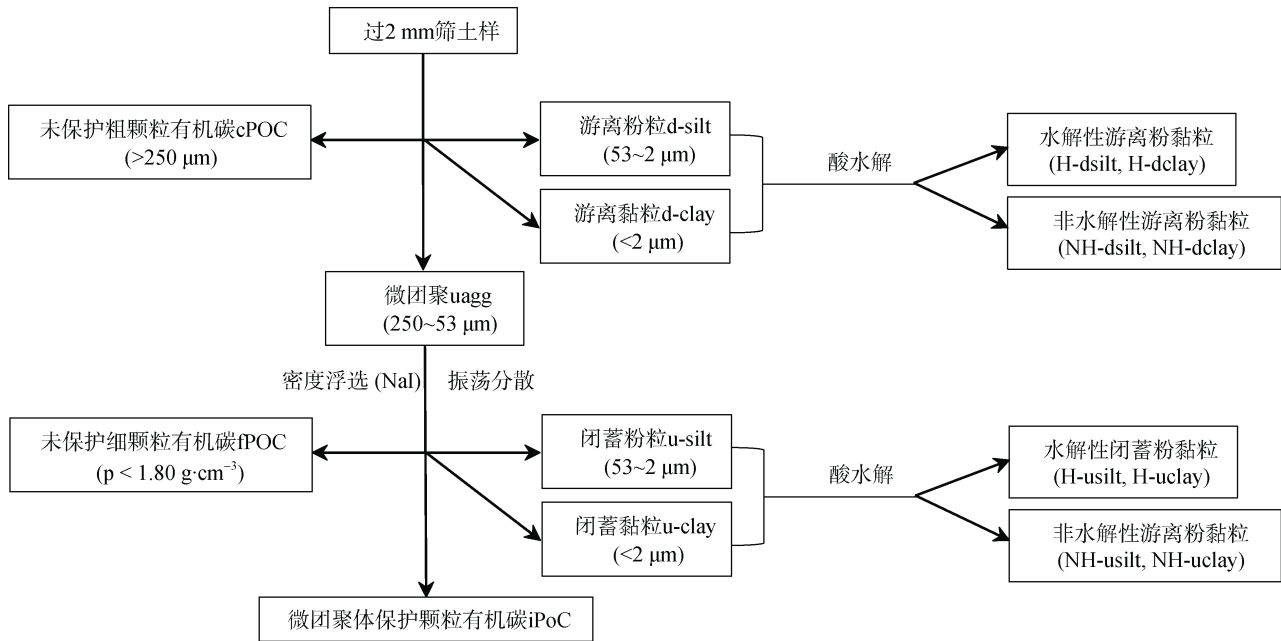


图 2 土壤有机碳物理-化学联合分组方法流程图

Fig. 2 Flow chart of soil organic carbon physicochemical fractionation

1.5 数据处理

所有土样数据计算均以 6 次重复结果的平均值表示。对实验所得数据进行正态检验和方差齐性检验 (软件 SPSS 23.0), 再进行单因素方差分析 (ANOVA)。未灌丛化草地和 4 种灌丛样地之间的差异采用多重比较的最小显著差异法 (LSD) 进行显著性分析, 并使用 Excel 2019、Origin 2019 进行图表制作。利用 Canoco 5.0 对土壤有机碳组分和环境因子之间进行冗余排序分析。

2 结果

2.1 高寒灌丛化草地土壤理化性质

土壤颗粒组成是土壤结构的重要表征。实验结果 (图 3) 表明, 高山绣线菊、窄叶鲜卑和金露梅灌丛样地土壤颗粒含量与未灌丛化草地无显著差异 ($P>0.05$), 均以粉粒为主。而小叶锦鸡儿灌丛样地土壤以砂粒为主 (74.37%), 砂粒含量显著高于草地 ($P<0.05$), 粉黏粒含量显著低于草地 ($P<0.05$)。灌丛样地土壤 pH 均高于未灌丛化草地, 其中高山绣线菊、窄叶鲜卑和小叶锦鸡儿灌丛样地与未灌丛化草地差异显著 ($P<0.05$)。而土壤 TN、含水量、容重在未灌丛化草地和灌丛样地间无显著差异 ($P>0.05$)。

2.2 高寒灌丛化草地土壤不同活性有机碳含量及其贡献率

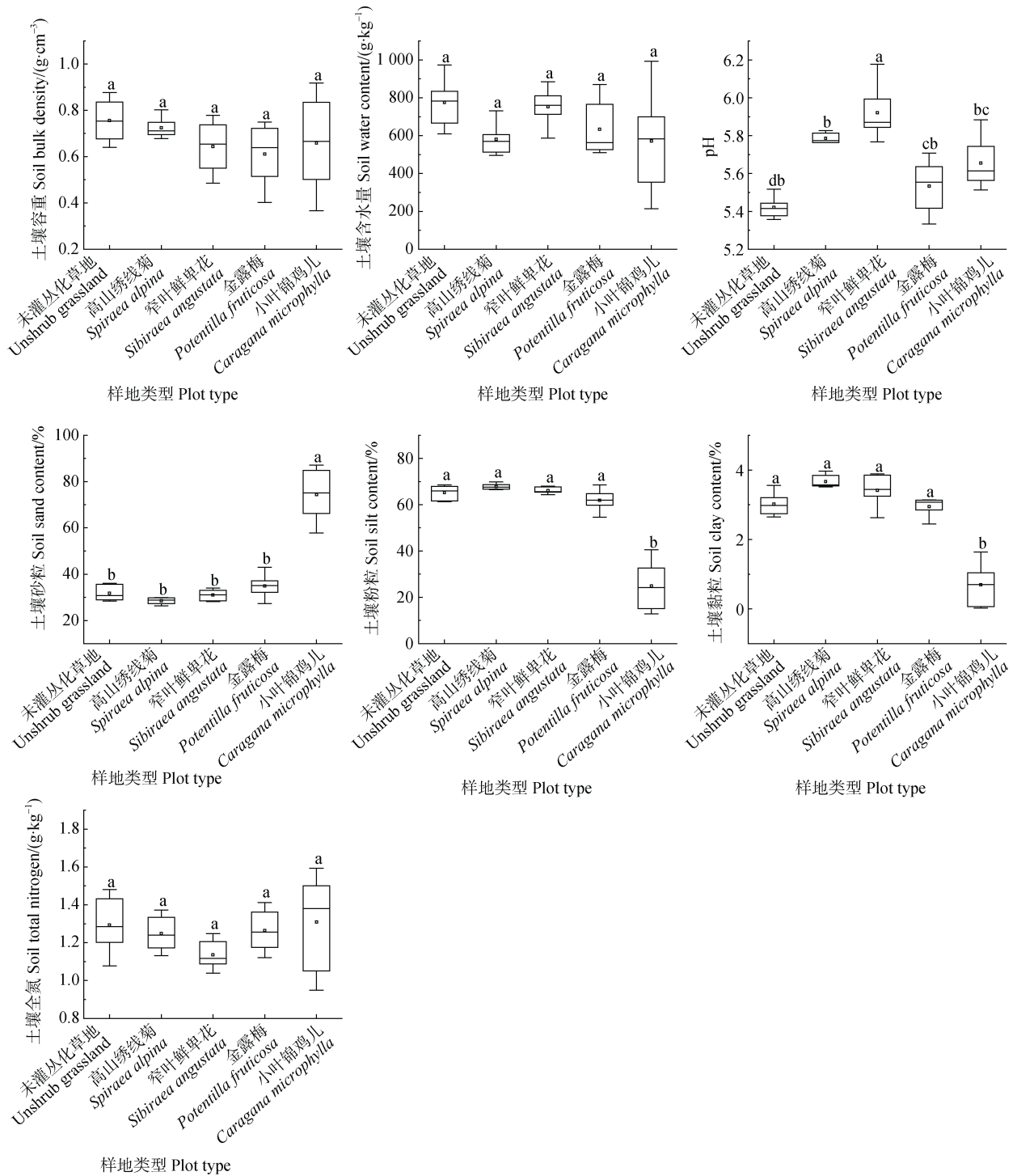
未灌丛化草地和灌丛板块 SOC 含量无显著差异 ($P>0.05$) (图 4), 草地、高山绣线菊、窄叶鲜卑、金露梅以及小叶锦鸡儿灌丛样地土壤平均 SOC 含量分别为 77.32、64.72、64.02、76.26 和 78.84 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

未灌丛化草地和灌丛样地土壤不同活性有机碳含量表现为 Non-C 含量最高, 为 265.8~371.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是 Bio-C 含量, 为 126.7~305.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。各活性有机碳含量在未灌丛化草地和灌丛样地间表现为高山绣线菊、窄叶鲜卑和金露梅灌丛样地土壤 Non-C 含量显著低于与未灌丛化草地 ($P<0.05$), 分别下降了 27.4%、23.7% 和 12.2%; Phy-C 在未灌丛化草地和灌丛样地间表现为小叶锦鸡儿灌丛土壤含量显著低于未灌丛化草地 ($P<0.05$), 降低了 53.1%; Che-C 含量在未灌丛化草地和灌丛样地间表现为小叶锦鸡儿灌丛样地显著低于未灌丛化草地 ($P<0.05$), 降低了 18.9%; Bio-C 含量在未灌丛化草地和灌丛样地间表现为高山绣线菊和窄叶鲜卑灌丛样地显著低于未灌丛化草地 ($P<0.05$), 分别降低了 21.3% 和 36.0%, 小叶锦鸡儿灌丛样地显著高于未灌丛化草地, 增加了 54.6%。

高寒灌丛化草地土壤中游离态活性有机碳含量

占比最高 (图 5), 各活性有机碳对 SOC 的贡献程度关系为: Non-C>Bio-C>Phy-C>Che-C。小叶锦鸡儿灌丛土壤 Non-C/SOC 显著低于未灌丛化草地

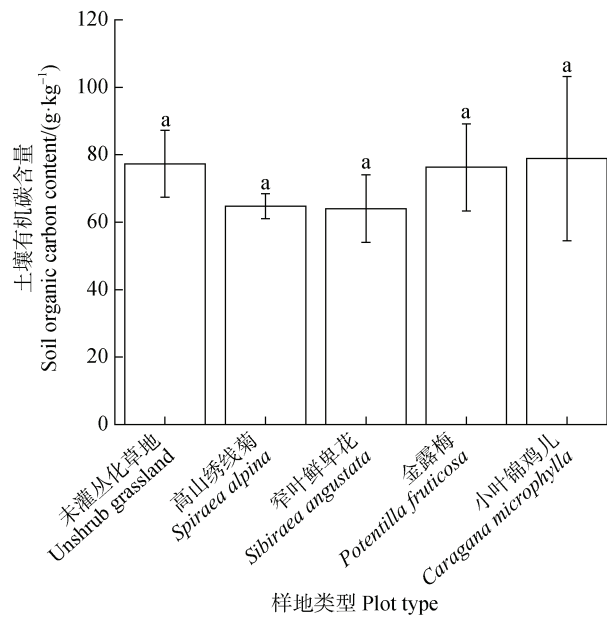
($P<0.05$), 减少了 62.0%。Phy-C/SOC、Che-C/SOC 和 Bio-C/SOC 在未灌丛化草地和灌丛样地间无显著差异 ($P>0.05$)。



注：不同小写字母代表同一组在不同样地间差异显著 ($P<0.05$)。表中数据为平均值 \pm 标准差 ($n=6$)。Note: Lower case letters indicate significant differences ($P<0.05$) between sample plot for the same fraction. Data in the table are means \pm standard deviation ($n=6$).

图 3 未灌丛化草地和灌丛样地土壤理化性质

Fig. 3 Physiochemical properties of the soils under shrub encroachment and unshrub encroachment grassland



注：不同小写字母代表 SOC 含量在不同样地间差异显著 ($P<0.05$)。图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n=6$)。Note: Different lower case letters indicate significant differences in SOC content between sample plot ($P<0.05$). Data in the graph are means \pm standard deviation ($n=6$).

图 4 未灌丛化草地和灌丛样地土壤有机碳含量
Fig. 4 The content of SOC under shrub encroachment and unshrub encroachment grassland

表 2 未灌丛化草地和灌丛样地土壤不同活性有机碳库含量

Table 2 The content of different active organic carbon pools in shrub encroachment and unshrub encroachment grassland soil/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

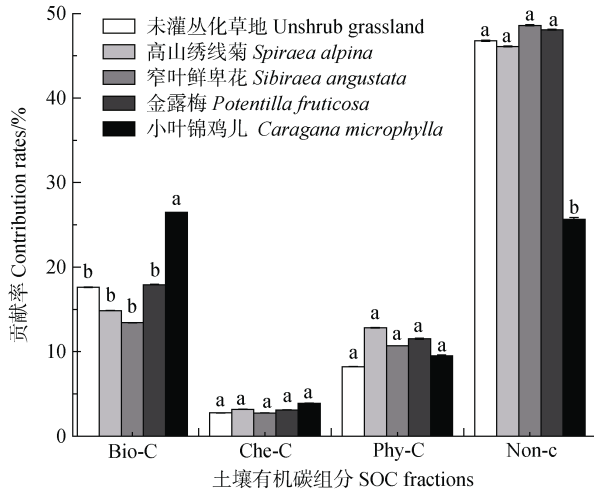
土壤有机碳组分 SOC fraction	未灌丛化草地 Unshrub grassland	高山绣线菊 <i>Spiraea alpina</i>	窄叶鲜卑花 <i>Sibiraea angustata</i>	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>
Non-C	366.10 \pm 20.40a	265.84 \pm 34.30c	279.31 \pm 9.90c	321.27 \pm 23.16b	370.95 \pm 56.38a
Phy-C	91.04 \pm 12.45a	79.69 \pm 5.82a	77.99 \pm 12.70a	95.74 \pm 11.75a	42.67 \pm 37.98b
Che-C	82.20 \pm 8.36a	81.97 \pm 8.02a	85.92 \pm 6.09a	78.65 \pm 12.12a	66.71 \pm 12.13b
Bio-C	197.81 \pm 30.02b	155.74 \pm 13.45c	126.70 \pm 20.40d	182.72 \pm 28.85bc	305.86 \pm 41.35a

注：Non-C, 游离活性有机碳；Phy-C, 物理保护有机碳；Che-C, 化学保护有机碳；Bio-C, 生物化学保护有机碳。同行不同小写字母代表同一有机碳组分不同样地间差异显著 ($P<0.05$)。表中数据为平均值 \pm 标准差 ($n=6$)。下同。Note: Non-C, free active organic carbon; Phy-C, physically protected organic carbon; Che-C, chemically protected organic carbon; Bio-C, biochemically protected organic carbon. Different lower case letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different sample plot for the same organic carbon fraction. Data in the table are means \pm standard deviation ($n=6$). The same as below.

2.3 高寒灌丛化草地土壤有机碳组分变化

以不同活性有机碳含量为响应变量，土壤理化因子指标为解释变量，对未灌丛化草地和灌丛样地土壤表层 (0~10 cm) 不同活性有机碳含量进行冗余分析 (图 6)。第一轴能够解释土壤有机碳组分含量变异量的 39.8%，影响 Phy-C 和 Che-C 含量的主要因素是土壤粉黏粒和含水量。第二轴可解释土壤

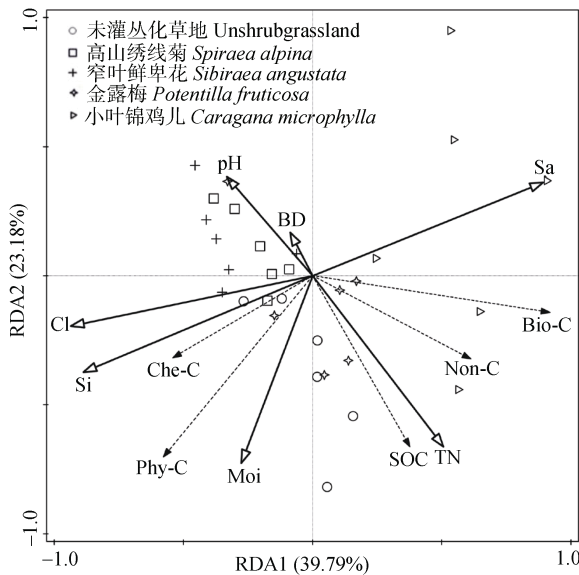
有机碳组分含量变异量的 23.2%，影响 Non-C 和 Bio-C 含量的因素主要是 TN 和砂粒。两轴 TN、pH、土壤含水量、土壤容重以及黏粒和砂粒含量对不同活性土壤有机碳含量变异共能够解释 63% ($F=8.1, P=0.002$)。其中黏粒含量可解释土壤有机碳组分含量变异的 35% ($F=15.1, P=0.002$)，TN 含量可解释土壤有机碳组分含量变异的 16.2% ($F=9, P=0.002$)。



注：不同小写字母代表同一有机碳组分在不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)。表中数据为平均值 \pm 标准差 ($n=6$)。Note: Different lower case letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between sample plot for the same organic carbon fraction. Data in the table are means \pm standard deviation ($n=6$).

图 5 高寒灌丛化草地不同活性有机碳库对总有机碳的贡献率

Fig. 5 Rate of various SOC fractions to total organic carbon in alpine shrub encroachment grassland



注：SOC，土壤有机碳；TN，土壤全氮；BD，土壤容重；Moi，土壤含水量；Sa，土壤砂粒；Si，土壤粉粒；Cl，土壤黏粒。Note: SOC, soil total organic carbon; TN, soil total nitrogen; BD, soil bulk density; Moi, soil water content; Sa, soil sand content; Si, soil silt content; Cl, soil clay content.

图 6 高寒灌丛化草地土壤有机碳组分与土壤理化性质的冗余分析 (RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) between SOC fractions and physio-chemical properties of alpine shrub-encroached grassland

3 讨论

3.1 灌丛化对高寒草地土壤活性有机碳含量的影响

高寒未灌丛化草地和灌丛样地土壤均以 Non-C 含量最高 (表 2)，可能是因为不同活性有机碳之间转换速率差异导致游离态有机碳积累。前人^[15]研究表明，植物残体在微生物的分解作用下可快速转化为游离态活性有机碳，而游离态活性有机碳向缓效性或稳定性碳组分转化的过程较为缓慢。未灌丛化草地和灌丛样地表层土壤 SOC 含量差异不显著，这与 Smith 和 Johnson^[16]在堪萨斯大草原灌木入侵研究结果相似，而与李正青^[17]在灌木入侵高寒草原的研究结果不同。这可能与灌丛化草地的区域干扰历史、土壤物理性质以及气候差异等有关^[9]。Li 等^[18]指出灌丛化对草地 SOC 的影响主要取决于土壤性质，该研究中 SOC 与土壤容重显著正相关，与土壤全氮含量显著负相关。本研究中灌丛样地和未灌丛化草地土壤 TN 和容重差异不显著 (图 3)，这是灌木侵入后土壤 SOC 含量无明显变化的主要原因。虽然 SOC 含量在灌草斑块间无显著差异，但高山绣线菊、窄叶鲜卑和金露梅灌丛样地土壤 SOC 含量呈现出低于未灌丛化草地的趋势 (图 4)，这种降低趋势可能是因为灌木冠幅对光照水分等资源的拦截降低了灌下草本植物生产力和物种丰富度，引起表层土壤有机质 (凋落物和根系分泌物) 输入量减少^[19]。相反，小叶锦鸡儿灌丛样地土壤 SOC 含量呈现出高于草地的趋势 (图 4)，这可能是因为小叶锦鸡儿是豆科灌木，豆科植物与根瘤菌共生体系的固氮作用会导致小叶锦鸡儿灌丛样地地上和地下生物量增加以及枯枝落叶层的 C/N 比降低，最终提高凋落物分解速率和有机质渗入^[20]。并且，豆科植物根系分泌大量糖类低分子量有机物刺激土壤根际微生物群落的生长，改变土壤微生物群落的代谢强度^[21]。

由于土壤有机碳不同活性碳组分所受保护机制的差异，其含量及占比对灌木侵入会有不同的响应。游离态活性有机碳主要源自植物残体和根系残茬，是对表层土壤植物残体积累和根系分布变化响应敏感的活性碳库^[22]。本研究中海山绣线菊、窄叶鲜卑和金露梅灌丛表层土壤 Non-C 含量显著低于未灌丛化草地 (表 2)，这可能与木本和草本植物的

根系分布深度差异以及植物残体内部木质素和单宁酸等难降解性组分的含量有关, 相比于草本植物, 灌木属深根系植物, 根系主要分布于土壤深层, 并且灌木植物残体所含木质素量高于草本植物^[15]。Phy-C 是指受土壤团聚体结构的物理保护使分解者(微生物、酶等)和底物(有机碳)之间形成空间隔离的缓效性碳库^[14]。本研究中小叶锦鸡儿灌丛样地土壤 Phy-C 含量显著低于未灌丛化草地(表 2)的原因可归结于土壤母质差异。小叶锦鸡儿灌丛样地土壤砂粒含量较高(表 2), 良好的透气性促进了微生物和酶对团聚体内作为胶结作用的有机碳的转化分解, 减弱了微团聚体稳定性及其固持有机碳的能力。小叶锦鸡儿灌木耐旱喜砂, 该区域富砂粒的土壤质地促进了小叶锦鸡儿灌木的扩张, 并在两者之间形成正向反馈, 从而影响小叶锦鸡儿灌丛样地土壤有机碳含量^[23]。Che-C 是指被黏土矿物和金属氧化物所紧密吸附的矿物结合态有机碳, 研究表明土壤对有机碳的固持能力与黏粒含量呈正相关, 土壤颗粒越细, 土壤有机碳的抗分解能力越强^[24], 因此, 小叶锦鸡儿灌丛样地土壤 Che-C 含量显著低于未灌丛化草地(表 2)主要归结于小叶锦鸡儿灌丛土壤较低的粉黏粒含量。Bio-C 是指土壤有机物质其自身复杂化学组成的抗降解性有机碳, 同属于矿物结合态有机碳^[24]。高山绣线菊和窄叶鲜卑灌木侵入草地与小叶锦鸡儿灌木侵入草地土壤 Bio-C 含量表现出相反的变化: 高山绣线菊和窄叶鲜卑斑块土壤 Bio-C 含量分别减少 21.3%和 36.0%, 小叶锦鸡儿斑块增加 54.6%(表 2), 这种差异可能归结于不同种类灌木输入碳所含的蛋白质、纤维素和木质素等物质组成比例不同, 即有机碳分子结构和抗降解性的差异所致^[25]。灌木入侵后土壤 Che-C 和 Bio-C 含量的变化还可能与矿物结合态有机碳的形成与分解有关。土壤微生物活动产生的代谢分泌物能促进矿物结合态有机碳的积累, 但真菌菌丝和细菌分泌物也能将矿物结合态有机碳胶结形成颗粒态有机碳, 灌木侵入后植被根系特征及其分泌物的改变会影响土壤微生物群落对矿物结合态有机碳的形成与分解^[26]。

有机碳的相对含量可消除 SOC 含量差异对碳组分的影响, 较绝对含量更能准确地表征有机碳的动态^[27]。植物源芳香族和微生物产物优先与粉黏粒结合形成有机矿物结合体, 因此 Che-C 和 Bio-C 属于土壤中的稳定碳库(Stable-C)^[28]。未灌丛化草地

和灌丛样地土壤均以 Non-C/SOC 最高(17.8%~46.8%), Stable-C/SOC(16.2%~21.1%)次之, Phy-C/SOC(9.5%~12.8%)最低(图 5), 这与何颖楠^[15]研究结果相似。Stewart 等^[13]研究发现 Non-C/SOC 为 9%~56%。Sleutel 等^[29]研究发现 Phy-C/SOC 为 7.3%~12.0%。Tong 等^[30]研究发现 Stable-C/SOC 为 33%~77%。与前人研究相比, 高寒灌丛化草地土壤游离态活性有机碳含量占比偏高, 稳定态碳有机碳库占比偏低, 这可能与青藏高原独特的气候格局有关, 高寒草甸土壤温度和含水量较低, 抑制了土壤微生物群落将活性有机碳库向稳定性碳库转换的速率。本研究中仅小叶锦鸡儿灌丛样地土壤 Non-C/SOC 显著低于草地(图 5), 这是因为多孔透气的土壤质地有利于微生物群落对活性有机碳的利用。灌丛样地土壤 Phy-C/SOC 均高于草地(图 5), 原因可能是灌丛样地土壤微团聚体(250~53 μm)含量均高于草地所致。首先, 灌丛根系扰动和酸性根系分泌物可解聚大团聚体释放微团聚体^[12], 其次, 灌丛样地土壤丰富的微生物代谢分泌物以及庞大复杂的根系系统促进粉黏粒胶结形成微团聚体, 增加了微团聚体在土壤中的数量^[31]。Che-C/SOC 和 Bio-C/SOC 在灌草斑块间无显著差异(图 5), 表明这两种稳定性碳对地上植被类型改变响应不敏感, 这与张丽敏等^[32]的研究结果一致。综上, 灌木侵入改变了草地土壤不同活性有机碳含量及其占比, 影响了草地土壤有机碳组成及其稳定性。

3.2 高寒灌丛化草地土壤有机碳含量变化的影响因素

本研究中高寒灌丛化草地土壤 Non-C 和土壤 SOC 含量与 TN 含量极显著正相关(图 6), 说明 TN 能极大地提高土壤游离态活性有机碳和土壤 SOC 含量, 这与林建美^[33]的研究结果相似。Non-C 主要来源于植物残体, 当植被归还量越大时土壤中游离活性有机碳含量便会相应地提升^[34]。土壤氮元素的提高可促进植株将碳素同化固定至植物根系中, 以增加活性碳含量, 同时, 还提高了土壤微生物群落活性, 促进了植物残体向有机质的转化速率, 有利于活性有机碳的积累^[35]。Phy-C 含量主要受土壤含水量的影响, 土壤含水量通过影响土壤团聚力影响微团聚体的形成, 有研究发现土壤团聚力随着土壤含水率的增加先减少后增加^[36]。Che-C 含量主要受土壤粉黏粒含量的影响, 研究表明黏土矿物是土壤

矿物吸附固定有机碳的主要贡献者之一^[24], 土壤黏粒含量决定了土壤有机碳的固定容量和固定速度, 一般黏粒含量高的土壤能固持更多的有机碳^[37]。Bio-C 含量由输入的植被凋落物化学结构所决定^[38], 而来源于植物或者火衍生的黑炭和木质素等典型芳香族碳主要吸附在粗粒级矿物表面, 其含量占比随土壤粒级的增大而增加, 因此生物化学保护态有机碳含量与砂粒正相关^[39]。该相关性结果与徐梦等^[40]在森林、农田和草地土壤 Bio-C 含量与砂粒含量的相关性结果一致。

4 结 论

青藏高原高寒未灌丛化草地和灌丛样地土壤均以 Non-C 为主。四种灌木入侵对高寒草地表层土壤 SOC 含量均无显著影响 ($P>0.05$), 但高山绣线菊和窄叶鲜卑花灌木侵入草地后土壤 Non-C 和 Bio-C 含量显著降低 ($P<0.05$), 金露梅灌木侵入后仅 Non-C 含量显著降低 ($P<0.05$), 小叶锦鸡儿灌木侵入后土壤 Phy-C 和 Che-C 含量显著降低 ($P<0.05$), Bio-C 含量显著增加 ($P<0.05$)。不同种类灌木的侵入对不同活性有机碳组分含量影响不一致, 这可能归结于不同植被类型凋落物数量、质量和根系分泌物的周转速率不同以及灌下土壤颗粒组成差异。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 12—14.
- [2] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18 (6): 1781—1796.
- [3] Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, et al. Soil organic carbon stocks and CO₂ fluxes in alpine meadows [J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(4): 553—563. [陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量和 CO₂ 通量[J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2007, 37 (4): 553—563.]
- [4] Li L J, You M Y, Shi H A, et al. Soil CO₂ emissions from a cultivated Mollisol: Effects of organic amendments, soil temperature, and moisture[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 83—90.
- [5] Zhang R H, Cai W T, Lai L M, et al. Vegetation dynamics in succession process from *Stipa bungeana* to *Artemisia ordosica* in the Ordos Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24 (2): 200—206. [张瑞红, 蔡文涛, 来利明, 等. 鄂尔多斯高原本氏针茅与油蒿群落过渡过程中的植被动态[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24 (2): 200—206.]
- [6] Xiong X G, Han X G. Spatial heterogeneity in soil carbon and nitrogen resources, caused by *Caragana microphylla* in the thickening of semiarid grassland, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (7): 1678—1683. [熊小刚, 韩兴国. 内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布[J]. *生态学报*, 2005, 25 (7): 1678—1683.]
- [7] He J L. Effects of *Potentilla fruticosa* on vegetation characteristics and soil properties in alpine meadow of Tibetan Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017: 103. [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: 103.]
- [8] Du H P, Zhan Z Y, Li X G. Differences in biological stability of soil organic carbon pools between shrub and *Polygonum vivip* grassland at alpine site[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2007, 42 (3): 91—96. [杜慧平, 展争艳, 李小刚. 高寒灌丛与珠芽蓼草地土壤有机碳的稳定性[J]. *甘肃农业大学学报*, 2007, 42 (3): 91—96.]
- [9] Hughes R F, Archer S R, Asner G P, et al. Changes in aboveground primary production and carbon and nitrogen pools accompanying woody plant encroachment in a temperate savanna[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12 (9): 1733—1747.
- [10] Wang Y N, Xu Z W, Wang S Z. Concentrations of active organic carbon components in soils in Baijianghe natural and drained peat bogs and their influencing factors[J]. *Wetland Science*, 2021, 19 (6): 691—701. [王一诺, 徐志伟, 王升忠. 白江河天然和排水泥炭沼泽土壤活性有机碳组分含量及其影响因素研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19 (6): 691—701.]
- [11] Fei K, Hu Y F, Shu X Y, et al. Effects of desertification on soil active organic carbon fractions in Zoige Alpine-cold grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (5): 327—330, 336. [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, 336.]
- [12] Iqbal J, Hu R, Shan L, Ahamadou B, Feng M. Carbon dioxide emissions from Ultisol under different land uses in mid-subtropical China[J]. *Geoderma*, 2009, 152(1/2): 63—73.
- [13] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (2): 357—366.
- [14] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil*

- Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 1367—1377.
- [15] He Y N. The SOC and components' characteristic under different land utilization patterns in Karst small watershed of Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016: 64. [何颖楠. 贵州喀斯特小流域不同土地利用方式下土壤有机碳及其组分特征[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016: 64.]
- [16] Smith D, Johnson L. Vegetation-mediated changes in microclimate reduce soil respiration as woodlands expand into grasslands[J]. Ecology, 2004, 85(12): 3348—3361.
- [17] Li Z Q. Effects of *Potentilla fruticosa* L. on spatial heterogeneity of soil C, N and P in alpine-cold grassland of Northwest Sichuan[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2019: 63. [李正青. 川西北高寒草地金露梅灌丛对土壤 C、N、P 空间异质性的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2019: 63.]
- [18] Li H, Shen H, Chen L, et al. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28974.
- [19] Liu X L, Hu J, Zhou Q P, et al. Effects of typical shrub-encroached grassland on vegetation characteristics and soil nutrients in the Zoige Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(4): 901—908. [刘小龙, 胡健, 周青平, 等. 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[J]. 草地学报, 2022, 30(4): 901—908.]
- [20] Zhao Y G, Lu G X, Deng Y, et al. Effect of *Rhizobium* seed dressing on growth of two alfalfa and rhizosphere microbial diversity[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(2): 370—378. [赵阳安, 芦光新, 邓晔, 等. 根瘤菌拌种对两种苜蓿生长及根际微生物多样性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 370—378.]
- [21] Dong X D, Gao P, Li T, et al. Effects of soil microbial community on the litter decomposition in mixed *Quercus acutissima* Carruth. and *Robinia pseudoacacia* L. forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2315—2325. [董学德, 高鹏, 李腾, 等. 土壤微生物群落对麻栎-刺槐混交林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2315—2325.]
- [22] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(S1): S53—S62.
- [23] Guo P, Xie L N, Man L, et al. Effects of the expansion of *Caragana* shrubs on forage yield and plant diversity in desert steppe[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1215—1223. [郭璞, 解李娜, 满良, 等. 荒漠化草原锦鸡儿属灌丛扩增对牧草产量和植物多样性的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(5): 1215—1223.]
- [24] Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2642—2650. [刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2642—2650.]
- [25] Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 278—285. [姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278—285.]
- [26] Wang X L, Guo Z, Duan J J, et al. The changes of organic carbon and its fractions in yellow paddy soils under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(23): 4593—4601. [王小利, 郭振, 段建军, 等. 黄壤性水稻土有机碳及其组分对长期施肥的响应及其演变[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4593—4601.]
- [27] Xu J B, Li C L, He Y Q, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 675—682. [徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 675—682.]
- [28] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 52(3): 345—353.
- [29] Sleutel S, Neve S D, Németh T, et al. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 25(3): 280—288.
- [30] Tong X, Xu M, Wang X, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. Catena, 2014, 113: 251—259.
- [31] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141—163.
- [32] Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, et al. Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3817—3825. [张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3817—3825.]
- [33] Lin J M. The characteristic of soil active organic carbon in different forest types in Saihanba[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 59. [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: 59.]
- [34] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618—623. [彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618—623.]
- [35] Zhang Y R, An H, Liu B R, et al. Effects of short-term

- nitrogen and phosphorus addition on soil labile organic carbon in desert grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28 (10): 12—24. [张雅柔, 安慧, 刘秉儒, 等. 短期氮磷添加对荒漠草原土壤活性有机碳的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28 (10): 12—24.]
- [36] Niu H, Luo W Q, Wang J F, et al. Effects of freeze-thaw on the composition and stability of air-dried and water-stable aggregates of black soil in northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51 (4): 841—847. [牛浩, 罗万清, 王晋峰, 等. 冻融对东北黑土风干团聚体与水稳性团聚体组成及稳定性的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51 (4): 841—847.]
- [37] Hassink J, Whitmore A P, Kubát J. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter[J]. *European Journal of Agronomy*, 1997, 7 (1/3): 189—199.
- [38] Yang F. Effects of long-term fertilization on soil organic matter fractions, microbial community structure and enzyme activities in a red upland soil[D]. Linfen, Shanxi: Shanxi Normal University, 2018: 60. [杨帆. 长期施肥对红壤旱地土壤有机质组分、微生物群落结构和酶活性的影响[D]. 山西临汾: 山西师范大学, 2018: 60.]
- [39] Xu J H, Sun Y, Gao L, et al. A review of the factors influencing soil organic carbon stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 (2): 222—230. [徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (2): 222—230.]
- [40] Xu M, Li X L, Cai X B, et al. Impact of land use type on soil organic carbon fractionation and turnover in southeastern Tibet[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (19): 3714—3725. [徐梦, 李晓亮, 蔡晓布, 等. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周转变化特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (19): 3714—3725.]

(责任编辑: 陈荣府)