

DOI: 10.11766/trxb202107290253

陈红, 马文明, 王长庭, 邓增卓玛, 唐思洪, 侯晨. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 151–163.

CHEN Hong, MA Wenming<sup>†</sup>, WANG Changting, DENG Zengzhuoma, TANG Sihong, HOU Chen. Effects of Shrub-encroached Grassland on the Stability of Soil Aggregates and Cementing Materials in Alpine Grassland of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 151–163.

## 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响\*

陈红, 马文明<sup>1</sup>, 王长庭, 邓增卓玛, 唐思洪, 侯晨

(西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041)

**摘要:** 团聚体是土壤有机碳重要的存储单元, 其稳定性直接影响有机碳的固存。为探明草地灌丛化是否影响土壤团聚体稳定性及其胶结物质, 本文以青藏高原东缘 4 种典型灌丛化草地 (高山绣线菊 *Spiraea alpina*、窄叶鲜卑花 *Sibiraea angustata*、小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla*、金露梅 *Potentilla fruticosa*) 为研究对象, 分析土壤团聚体稳定性 (大于 0.25 mm 团聚体含量、平均重量直径 (MWD) 和分形维数及其胶结物质 (团聚体有机碳、铁铝氧化物、钙键和铁铝键结合的有机碳) 的含量, 并分析各胶结物质对团聚体稳定性的影响。结果表明, (1) 小叶锦鸡儿灌丛化显著降低 2~0.25 mm 和小于 0.002 mm 团聚体含量和团聚体稳定性 ( $P < 0.05$ ), 而其他 3 种灌丛化草地对土壤团聚体含量和稳定性影响不显著 ( $P > 0.05$ )。 (2) 小叶锦鸡儿灌丛化和窄叶鲜卑花灌丛化改变了团聚体胶结物质的含量。 (3) 团聚体胶结物质与 MWD 的增强回归树分析结果显示, 高山绣线菊灌丛化草地土壤团聚体稳定性的主要贡献胶结物质为络合态铁 ( $Fe_p$ ) 和无定形态铁铝 ( $Fe_o$ 、 $Al_o$ ), 而其他 3 种灌丛化样地和未灌丛化草地主要贡献因子则为团聚体有机碳 (SAOC) 和游离态铁 ( $Fe_d$ )。灌丛化虽增加了小叶锦鸡儿样地主要胶结物质中小于 0.053 mm 粒径 SAOC 的含量, 但降低了大团聚体、黏粒以及  $Fe_d$  的含量, 从而降低了团聚体稳定性, 这可能不利于其有机碳的固存。本研究可为该区域团聚体稳定性和有机碳库的动态变化提供理论知识。

**关键词:** 高寒灌丛草地; 土壤团聚体稳定性; 团聚体有机碳; 铁铝氧化物; 络合态有机碳

中图分类号: S154.1 文献标志码: A

## Effects of Shrub-encroached Grassland on the Stability of Soil Aggregates and Cementing Materials in Alpine Grassland of Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Hong, MA Wenming<sup>†</sup>, WANG Changting, DENG Zengzhuoma, TANG Sihong, HOU Chen  
(Qinghai-Tibetan Plateau Research Institute, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

\* 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (ZYN2022052) 和国家自然科学基金项目 (31600378 和 U20A2008) 资助 Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. ZYN2022052) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31600378 and U20A2008)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: Mawmtf@swun.edu.cn

作者简介: 陈红 (1990—), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 研究方向为草地土壤生物地球化学循环。E-mail: 450551430@qq.com

收稿日期: 2021-07-29; 收到修改稿日期: 2021-11-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-03-16

**Abstract:** 【Objective】 Soil aggregate is an important storage unit of soil organic carbon, and its stability directly affects the sequestration of organic carbon. This study explored the effects of shrub encroachment on the stability of soil aggregates and their cementing materials in grassland. 【Method】 The content of soil aggregates and their cementing materials (soil aggregate organic carbon, Fe-Al oxides, Ca bond organic carbon, and Fe-Al bond organic carbon) and the stability of aggregates (the content of aggregates >0.25 mm, mean weight diameter/MWD and fractal dimension) were determined at four typical shrub-encroached grasslands (*Spiraea alpina*, *Sibiraea angustata*, *Caragana microphylla*, *Potentilla fruticosa*) in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. 【Result】 The results show that shrub encroachment significantly decreased the aggregate content of 2~0.25 mm and <0.002 mm and aggregate stability in the *Caragana microphylla* plot. However, there was no significant effect on the other three shrub grasslands. Shrub encroachment mainly changed the content of cementing substances in the aggregates of the *Caragana microphylla* and *Sibiraea angustata* plot. The results of boosted regression tree analysis between cementing materials and MWD show that the main contributing factors to the stability of aggregates in *Spiraea alpina* plot were complexed iron ( $Fe_p$ ) and amorphous iron and aluminum ( $Fe_o$ ,  $Al_o$ ). Also, the major contributors to grassland and other shrub plots were soil aggregate organic carbon (SAOC) and free iron oxides ( $Fe_d$ ). 【Conclusion】 Although shrub encroachment increases the content of main cementing material—SAOC in <0.053 mm in *Caragana microphylla* plot, it reduced the content of large aggregates and clay, as well as the content of  $Fe_d$  in the *Caragana microphylla* plot. Thus, the stability of aggregates is reduced, which may be detrimental to the retention of organic carbon. This study provides theoretical knowledge for the stability theory of aggregates and the dynamic change of the organic carbon pool in this region.

**Key words:** Alpine shrub grassland; Soil aggregate stability; Soil aggregate organic carbon; Iron aluminum oxides; Bond organic carbon

以  $CO_2$  为主的温室气体排放增加导致的全球变暖,是人类目前面临的重要生态环境问题之一<sup>[1]</sup>。土壤作为陆地生态系统中最大的碳库,是调节碳排放的重要场所<sup>[2]</sup>。研究表明,释放 1 t 土壤有机碳 (SOC),相当于向大气中排放 3.67 t  $CO_2$ <sup>[3]</sup>。因此,减排增汇是减缓全球变暖的重要措施。植被输入是土壤有机碳的重要来源之一,植被覆盖的改变,将影响土壤碳循环的过程。草地灌丛化是指草地生态系统中木本或灌木植物的密度、盖度和生物量增加,草本植物减少的现象,是草地生态系统中重要的生态现象;它通过改变生境异质性、物种组成、地上生物量和地下有机碳分配,从而影响草地土壤碳循环<sup>[4]</sup>。我国的青藏高原高寒草地土壤储存着大量有机碳,然而,近年来,在气候变化和人类活动的影响下,青藏高原灌丛化现象日益严重<sup>[5]</sup>。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,也是土壤有机碳固存的重要场所,其稳定性直接影响有机碳在土壤中的驻留时间。土壤中的胶结物质是土壤团聚体形成和稳定的基础,可分为有机胶结物质、无机胶结物质和有机无机复合物<sup>[6]</sup>。作为有机胶结物质,有机碳在团聚体内的相对分布,不仅影响团聚体固定和储存有机碳的能力,还影响团聚体的稳定

性<sup>[7]</sup>。铁铝氧化物是团聚体重要的无机胶结物质,其表面活性强,能与有机碳和黏粒结合,形成有机无机复合物,促进团聚体的稳定<sup>[8]</sup>。团聚体的形成实质是有机无机复合的过程,是黏粒通过与钙离子、铁铝离子等多价金属阳离子连接、吸附有机分子的过程<sup>[8]</sup>。钙键和铁铝键与有机质复合是有机无机复合物形成的重要机制,其对团聚体形成和稳定起着重要作用<sup>[9]</sup>。

目前,已有一些关于植被覆盖变化对团聚体胶结物质或团聚体稳定性影响的研究,但主要集中在黄土高原、红壤丘陵区 and 西南岩溶地区,对高寒草地的研究较少。罗晓虹等<sup>[7]</sup>的研究表明,植被覆盖度变化会影响团聚体有机碳的含量,进而影响团聚体稳定性。贾龙<sup>[10]</sup>的研究发现,不同植被影响了铁铝氧化物、钙键和铁铝键结合态有机碳的含量。但关于不同植被覆盖下有机无机复合物或 3 种胶结物质与团聚体稳定性关系的研究较少。同时,前人对灌丛化与团聚体稳定性关系的研究,尚存在争议。有研究发现草地土壤团聚体稳定性高于灌丛<sup>[11]</sup>,也有研究表明灌丛斑块中团聚体稳定性高于草地<sup>[12]</sup>。导致研究结果存在差异的原因除了土壤性质、团聚体稳定性评价方法等外,可能还与团聚体胶结物质

的差异有关。不同植被根系分泌物组成和性质的差异，不仅会影响有机胶结物质的含量，还会影响微生物活动，改变土壤微环境，影响铁铝氧化物含量和形态，进而影响有机无机复合体的形成<sup>[13-14]</sup>，导致团聚体稳定性改变。但是，高寒草地灌丛化后，土壤团聚体胶结物质将如何变化，进而影响团聚体的稳定性尚不清楚。基于此，本研究以青藏高原东缘 4 种典型灌丛草地为研究对象，分析灌丛化对团聚体及其胶结物质含量和团聚体稳定性的影响，探讨各胶结物质对团聚体稳定性的作用，拟为青藏高原高寒草地土壤团聚体稳定性理论及有机碳库的动态管理提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地概况

研究样地位于四川省阿坝州红原县(31°51'N~33°33'N, 101°51'E~103°22'E)，平均海拔 3485 m，该区域地处青藏高原东缘，川西北山地向高原过渡地带，地貌类型主要由浅丘山地和丘间低地构成。该区域气候为大陆性高原气候，年均气温 1.4°C，年均降水量为 791 mm，集中在 5-10 月，年均蒸发量为 648.2 mm。采样区已灌丛化生长 30 年，本研究样地由灌木和草本植物构成，复合群落的总盖度在 70% 左右。无灌丛生长的草地主要物种为禾本科。灌丛样地中优势种分别为高山绣线菊 (*Spiraea alpina*)、窄叶鲜卑花 (*Sibiraea angustata*)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、金露梅 (*Potentilla fruticosa*)。草地植物种类主要包括莎草科的四川嵩草 (*Kobresia setchwanensis*) 和高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)，禾本科的四川剪股颖 (*Agrostis szechuanica*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、早熟禾 (*Poa annua*)、发草 (*Deschampsia caespitosa*) 等。小叶锦鸡儿样地土壤为砂质土，其他样地为高山灌丛草甸土，成土母质以坡积物为主。

### 1.2 样品采集与处理

野外采样于 2019 年 8 月进行，为比较灌丛化和未灌丛化草地团聚体稳定性及其胶结物质的含量变化，选取当地 4 种优势灌丛高山绣线菊、窄叶鲜卑花、小叶锦鸡儿、金露梅生长的草地作为灌丛化样地，各样地灌丛长势相当，盖度相近，每种灌丛分别设置 6 个重复；另选一块无灌丛生长的草地，草

地盖度与各灌丛样地接近，作为对照样地，同样设置 6 个重复。每块样地内按对角线法设置 6 个 50 cm×50 cm 的小样方，进行植物群落调查，用剪刀收集所有地上生物量。群落调查后，用土壤铲挖取 0~10 cm 的原状土，削去边缘受挤压的土壤后，采集 2 kg 团聚体土样，装于硬质塑料盒，另采集一份测量理化性质的土样；同时用环刀采集土样以测量土壤容重。土样经自然风干，期间将大块土沿纹理轻轻地掰成 10~12 mm 小土块，剔除植物残体和砾石，过筛后，用于团聚体分离提取和土壤理化性质分析。

### 1.3 土壤团聚体分级及其稳定性计算

本文中的团聚体均指水稳性团聚体，采用 Cambardella 和 Elliott 的湿筛法和沉降虹吸法将团聚体分为大于 2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、0.053 mm 和小于 0.053 mm 五个粒径<sup>[15]</sup>。团聚体稳定性的计算方法如下：

大于 0.25 mm 团聚体 ( $R_{0.25}$ ) 比例采用以下公式<sup>[16]</sup>计算：

$$R_{0.25/\%} = \frac{W_{r > 0.25}}{W_T} \times 100 \quad (1)$$

式中， $W_T$  代表各粒径团聚体的质量总和，g； $W_{r > 0.25}$  为大于 0.25 mm 团聚体的质量之和，g。

团聚体平均重量直径 (MWD) 采用以下公式计算<sup>[15]</sup>：

$$MWD = \sum_i^n \bar{d} \times m_i \quad (2)$$

式中，MWD 为团聚体平均重量直径，mm； $i$  为第  $i$  级团聚体； $n$  为团聚体总级数， $n=5$ ； $\bar{d}$  为第  $i$  级团聚体颗粒的平均直径，mm； $m_i$  为第  $i$  级团聚体组成，%。

分形维数 ( $D$ ) 采用杨培岭和罗远培<sup>[17]</sup>的公式计算：

$$\lg \left[ \frac{M(r < \bar{x}_i)}{W_T} \right] = (3 - D) \lg \frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_{\max}} \quad (3)$$

式中， $\bar{x}_i$  为第  $i$  级团聚体的平均直径，mm； $M(r < \bar{x}_i)$  为直径小于  $\bar{x}_i$  的团聚体质量，g； $\bar{x}_{\max}$  为团聚体的

最大平均直径, mm。分别以  $\lg \frac{x_i}{\bar{x}_{\max}}$  和  $\lg \left[ \frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right]$  为横、纵坐标进行拟合, 求得拟合曲线斜率, 从而求得  $D$  值。

#### 1.4 土壤理化性质分析方法

土壤 pH 用酸度计测定, 水土比为 2.5: 1, 全土有机碳 (SOC) 采用总有机碳 (TOC) 分析仪 (Elementar Vario TOC, 德国) 测定, 土壤全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定, 土壤容重采用环刀法测定。土壤机械组成采用激光粒度仪 (Mastersizer 2000, Malvern Corp, 英国) 分析。

#### 1.5 团聚体胶结物质的测量方法

团聚体土样经研磨后, 过 0.125 mm 筛子, 用 TOC 分析仪测定团聚体有机胶结物质。团聚体无机胶结物质采用鲁如坤<sup>[18]</sup>的方法, 提取、稀释后, 用分光光度计 (Agilent Cary 60, 德国) 测定。有机无机复合体采用徐建民和侯惠珍<sup>[19]</sup>的方法, 提取、稀释后, 用 TOC 分析仪测定结合态有机碳的含量。

#### 1.6 数据处理

数据分析采用 SPSS 22.0 软件, 显著性分析采用最小显著差异法 (LSD), 增强回归树 (boosted regression tree, BRT) 分析采用 R3.5.0 软件, 作图采用 origin 8.0 软件。

增强回归树是一种以分类回归树算法为基础的

自学习方法, 通过产生多重回归树, 提高模型稳定性和预测精度, 得出自变量与因变量的相互关系及贡献率<sup>[20]</sup>。运用 BRT 模型分析不同胶结物质对土壤团聚体稳定性 (MWD) 的影响。采用树复杂性 (tree complexity) = 5, 学习速率 (learning rate) = 0.005, 袋分数 (bag fraction) = 0.5, 进行生态建模<sup>[21]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 灌丛化草地土壤理化性质

各样地土壤理化性质如表 1 所示。灌丛化后, 各样地 pH 和机械组成变化显著 ( $P < 0.05$ ), 土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC)、全氮 (total nitrogen, TN) 和容重 (bulk density, BD) 均无显著变化 ( $P > 0.05$ )。除金露梅样地外, 其他灌丛样地 pH 均较草地显著增加 ( $P < 0.05$ )。各样地机械组成均以砂粒、粉粒为主, 而小叶锦鸡儿样地砂粒的含量较草地显著增加, 粉粒和黏粒的含量显著降低 ( $P < 0.05$ ); 高山绣线菊和窄叶鲜卑花样地黏粒的含量较草地显著增加 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 灌丛化草地土壤团聚体含量分布

灌丛化后, 小叶锦鸡儿样地团聚体含量显著改变, 其他灌丛样地团聚体含量均无显著变化; 相比草地, 小叶锦鸡儿样地 2~0.25 mm 和小于 0.002 mm 团聚体含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 分别降低了 49.42% 和 48.05% (表 2); 0.25~0.053 mm 团聚体含量显著

表 1 各样地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of different sample sites

样地 Sample sites	容重	土壤机械组成 <sup>1)</sup>			pH	土壤有机碳	土壤全氮
	Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	Soil mechanical composition /%				Soil organic carbon /(g·kg <sup>-1</sup> )	Soil total nitrogen /(g·kg <sup>-1</sup> )
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay			
XX	0.71±0.03A	28.5±1.43 Bb	67.84±1.28Aa	3.67±0.19Ac	5.75±0.09B	64.72±3.71A	1.25±0.09A
ZY	0.65±0.12A	32.64±5.52 Bb	63.95±5.07Aa	3.42±0.47ABc	5.92±0.15A	59.15±8.45A	1.14±0.08A
JJ	0.67±0.21A	74.37±12.04Aa	24.93±11.41Bb	0.70±0.64Cc	5.53±0.14BC	78.84±24.41A	1.31±0.26A
LM	0.60±0.12A	34.92±5.26 Bb	61.96±4.78Aa	3.12±0.55ABc	5.65±0.14CD	76.26±12.94A	1.26±0.11A
CD	0.76±0.09A	31.75±3.39 Bb	65.23±3.14Aa	3.02±0.33Bc	5.42±0.06D	77.32±9.92A	1.29±0.15A

注: 1) 土壤机械组成采用激光粒度仪测定。XX: 高山绣线菊; ZY: 窄叶鲜卑花; JJ: 小叶锦鸡儿; LM: 金露梅; CD: 草地; 同一行不同小写字母代表同一样地间的差异显著, 同一列不同大写字母代表不同样地间的差异显著,  $P < 0.05$ 。每个样地 6 个重复。下同。Note: 1) Soil mechanical composition was measured by laser particle size meter. XX: *Spiraea alpina*; ZY: *Sibiraea angustata*; JJ: *Caragana microphylla*; LM: *Potentilla fruticosa*; CD: Grassland. Different lowercase letters in the same row represent significant differences in the same sample site ( $P < 0.05$ ), and different capital letters in the same column represent significant difference among different sample sites ( $P < 0.05$ ). Each plot consisted of 6 replicates. The same below.

表 2 各样地水稳性土壤团聚体含量分布

Table 2 The percentage of soil water-stable aggregates content in different sample sites

样地 Sample sites	各粒级水稳性团聚体含量 The percentage of different water-stable soil aggregates /%					
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	0.053~0.002 mm	<0.002 mm	>0.25 mm
XX	10.75±1.69Ac	44.83±6.37Aa	25.39±4.19ABb	9.97±2.71Ac	9.05±1.94Ac	55.59±7.41A
ZY	13.20±4.53Ac	48.48±5.15Aa	20.11±3.67ABb	9.86±4.79Ac	8.34±1.75Ac	61.69±5.23A
JJ	11.85±4.44Ab	21.09±10.13Bab	43.84±24.78Aa	18.43±11.30Ab	4.80±2.25Bc	32.94±12.60B
LM	13.83±2.48Abc	44.26±8.63Aa	19.28±6.11ABb	14.13±9.80Abc	8.50±3.91Ac	58.10±9.58A
CD	13.70±6.35Abc	41.70±7.17Aa	15.99±5.89Bbc	19.38±5.60Ab	9.24±2.07Ac	55.40±6.07 A

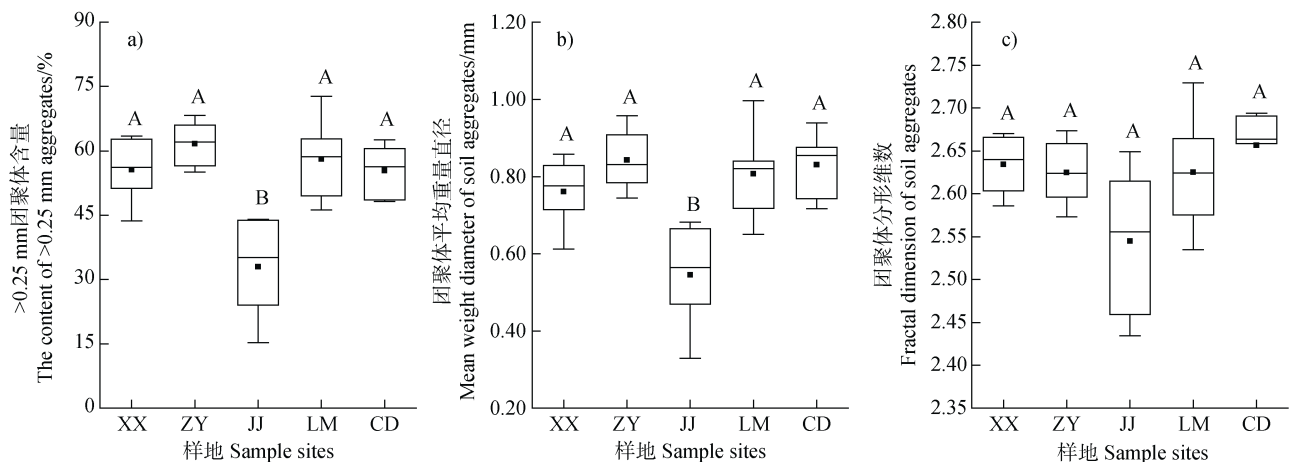
增加 ( $P<0.05$ ),增加了 174.2%;大于 2 mm 和 0.053~0.002 mm 团聚体含量变化不显著 ( $P>0.05$ )。

### 2.3 灌丛化草地土壤团聚体稳定性

本研究中土壤团聚体稳定性通过大于 0.25 mm 粒径团聚体含量 ( $R_{0.25}$ )、平均重量直径 (MWD) 和分形维数 ( $D$ ) 进行评估。各样地中大于 0.25 mm 团聚体含量以小叶锦鸡儿样地中最低,窄叶鲜卑花样地中最高(图 1a)。与草地相比,仅有小叶锦鸡儿样地中大于 0.25 mm 团聚体含量显著降低 40.55%

( $P<0.05$ )。

各样地 MWD 在 0.55~0.84 mm 之间,以小叶锦鸡儿样地中最低,窄叶鲜卑花样地中最高(图 1b)。小叶锦鸡儿样地 MWD 显著低于草地 ( $P<0.05$ ),其他灌丛样地与草地差异不显著 ( $P>0.05$ )。各样地土壤团聚体分形维数  $D$  在 2.54~2.66 之间,总体上表现为草地中最高,小叶锦鸡儿样地中最低的趋势,但草地与各灌丛样地  $D$  值并无显著差异 ( $P>0.05$ ) (图 1c)。



注:不同大写字母代表不同样地团聚体稳定性的差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different capital letters represent significant differences among different sample sites of aggregates stability ( $P<0.05$ ) .

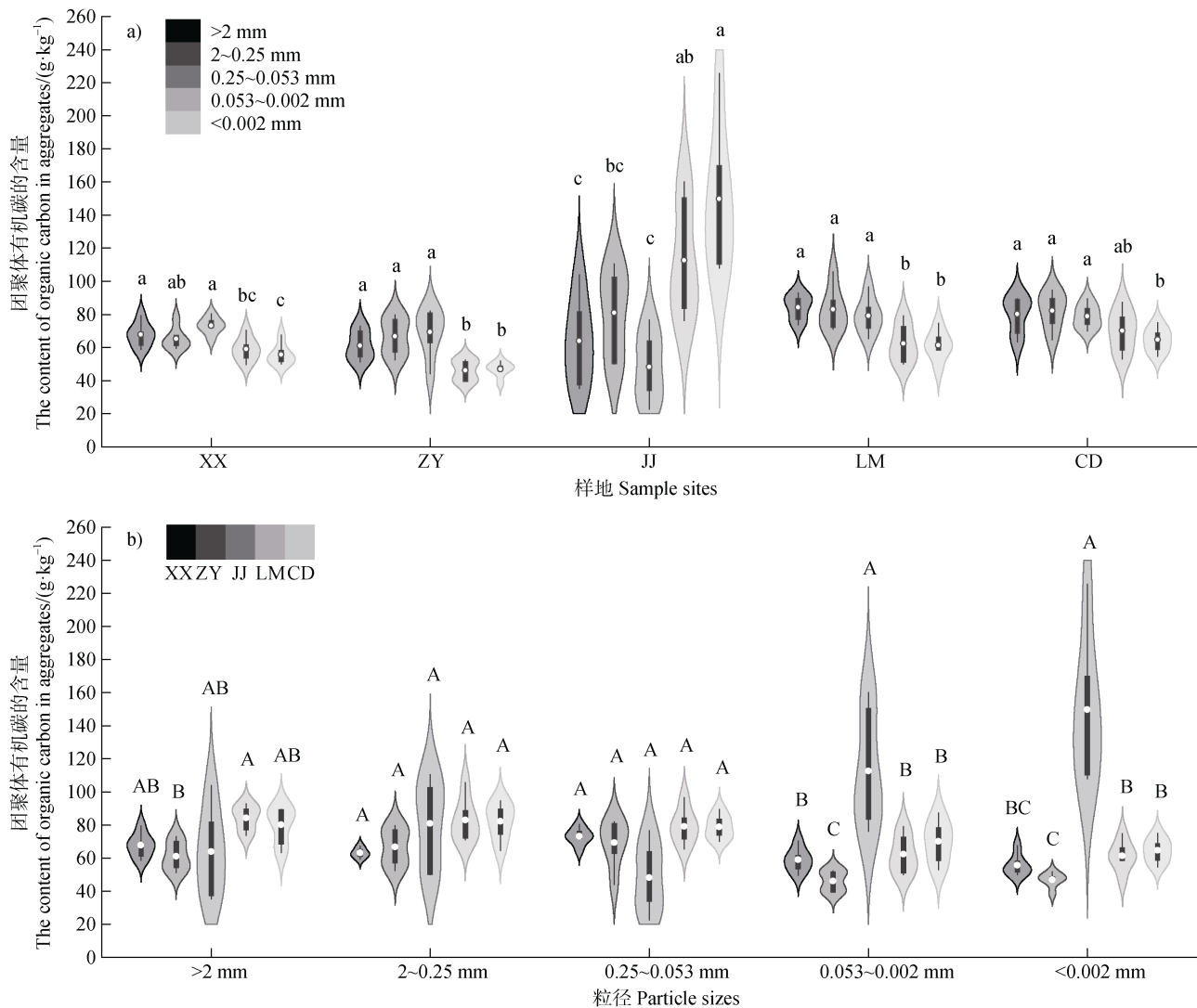
图 1 各样地土壤团聚体稳定性

Fig.1 Stability of soil aggregates in different sample sites

### 2.4 灌丛化草地土壤团聚体胶结物质含量分布

团聚体有机胶结物质——团聚体有机碳 (SASOC) 的含量在灌丛化草地土壤中的分异如图 2a 所示。各样地中 SASOC 的含量在 46.15~149.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间。与草地相比,窄叶鲜卑花样地 0.053~0.002 mm 和小于 0.002 mm 粒径中 SASOC

的含量显著降低 ( $P<0.05$ ),分别降低了 34.03% 和 27.48% (图 2b);小叶锦鸡儿样地 0.053~0.002 mm 和小于 0.002 mm 粒径中 SASOC 的含量显著增加 ( $P<0.05$ ),分别增加了 61.10%和 131.7% (图 2b),其他灌丛与草地相比无显著差异 ( $P>0.05$ )。



注: 不同小写字母代表同一地点不同粒径间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母代表同一粒径不同地点间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。 Note: Different lowercase letters represent the significances of the difference among different particle sizes in the same site, different capital letters represent the significances of the difference between the same particle size among different sample sites. The same below.

图2 各样地土壤团聚体有机碳的含量分布 (a. 不同粒径中的分布, b. 不同样地中的分布)

Fig. 2 Distribution of organic carbon content in soil aggregates among different sample sites (a. Distribution of organic carbon in different particle sizes, b. Distribution of organic carbon in different sample sites)

团聚体无机胶结物质——游离态铁铝 ( $Fe_d$ 、 $Al_d$ )、无定形态铁铝 ( $Fe_o$ 、 $Al_o$ )、络合态铁铝 ( $Fe_p$ 、 $Al_p$ ) 在灌丛化草地土壤中的分异如图3所示。各样地中  $Fe_d$  的含量在  $9.63 \sim 20.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间 (图3a),  $Al_d$  的含量在  $1.03 \sim 3.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间 (图3b), 总体上呈现出草地中各粒径中  $Fe_d$  的含量高于各灌丛样地的趋势。与草地相比, 小叶锦鸡儿样地大于  $2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 、 $0.053 \sim 0.002 \text{ mm}$  粒径中  $Fe_d$  的含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 分别降低  $33.28\%$ 、 $54.01\%$

和  $25.90\%$ ; 各灌丛化样地  $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$  粒径中  $Al_d$  含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 以小叶锦鸡儿样地中降低最多, 降低了  $62.36\%$ ; 窄叶鲜卑花样地各粒径 (除  $0.053 \sim 0.002 \text{ mm}$  粒径外) 中  $Al_d$  的含量显著降低  $48.08\% \sim 54.28\%$  ( $P < 0.05$ ); 小叶锦鸡儿样地小于  $0.002 \text{ mm}$  粒径  $Al_d$  显著增加  $65.72\%$  ( $P < 0.05$ )。

各样地中  $Fe_o$  的含量在  $0.9 \sim 4.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间 (图3c),  $Al_o$  的含量在  $0.52 \sim 1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间 (图3d)。与草地相比, 窄叶鲜卑花、小叶锦鸡儿样地、高山

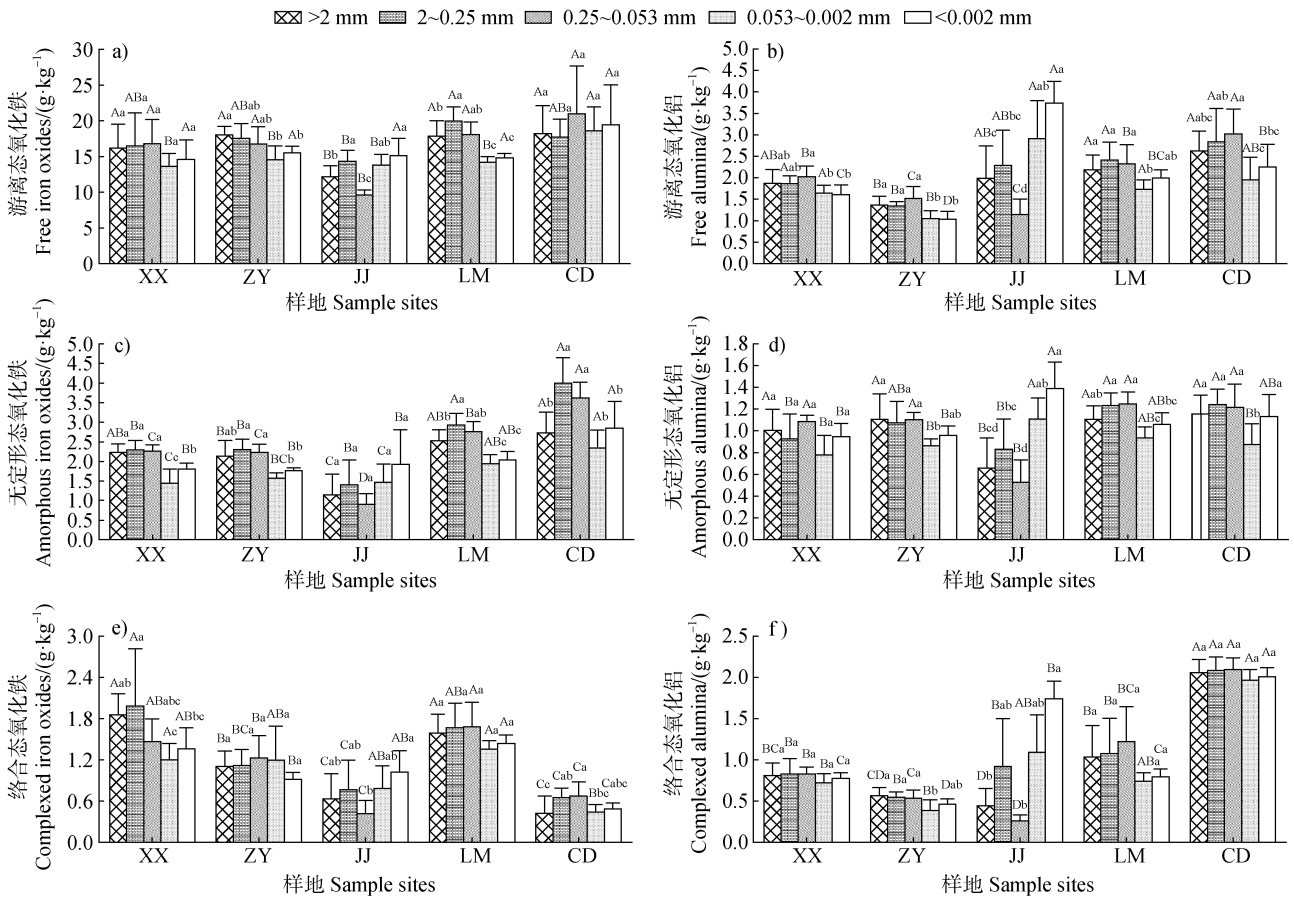


图3 各样地不同粒级团聚体中铁铝氧化物的含量分布 (a. 游离氧化铁的含量, b. 游离氧化铝的含量, c. 无定形态氧化铁的含量, d. 无定形态氧化铝的含量, e. 络合态氧化铁的含量, f. 络合态氧化铝的含量)

Fig. 3 The distribution of Fe-Al oxides in aggregates of different particle sizes (a. The content of free iron oxides, b. The content of free alumina oxides, c. The content of amorphous iron oxides, d. The content of amorphous alumina oxides, e. The content of complexed iron oxides, f. The content of complexed alumina oxides)

绣线菊样地 (大于 2 mm 粒径除外) 各粒径中以及金露梅样地 0.25~0.053 mm 粒径中  $Fe_o$  的含量显著降低 ( $P<0.05$ ); 小叶锦鸡儿样地中大于 2 mm、2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒径中  $Al_o$  的含量显著降低 ( $P<0.05$ )。

各样地中  $Fe_p$  的含量为 0.42~1.99  $g\cdot kg^{-1}$  (图 3e),  $Al_p$  的含量为 0.39~2.09  $g\cdot kg^{-1}$  (图 3f)。就  $Fe_p$  而言, 灌丛化后各样地各粒径中  $Fe_p$  的含量整体表现为增加的趋势。与草地相比, 高山绣线菊、金露梅、窄叶鲜卑花样地 (2~0.25 mm 和 0.053~0.002 mm 粒径除外) 各粒径中  $Fe_p$  的含量均显著增加 ( $P<0.05$ ), 各样地中分别增加了 119.2%~341.1%、156.7%~278.6%和 83.76%~163.7%; 小叶锦鸡儿样地小于 0.002 mm 粒径中  $Fe_p$  的含量显著增加 110.9% ( $P<0.05$ )。灌丛化后各样地各粒径中  $Al_p$  的含量表

现为降低的趋势, 与草地相比, 各灌丛样地所有粒径 (小叶锦鸡儿和金露梅样地 0.053~0.002 mm 粒径除外) 中  $Al_p$  的含量显著降低 ( $P<0.05$ )。

综上, 各样地不同粒径团聚体中 3 种形态铁铝氧化物含量由高到低总体上表现为:  $Fe_d>Al_d>Fe_o>Al_o>Fe_p>Al_p$  (图 3)。灌丛化增加了各样地中  $Fe_p$  和小叶锦鸡儿样地小于 0.053 mm 粒径中  $Al_d$ 、 $Al_o$  的含量, 降低了各样地不同粒径中其余形态铁铝氧化物的含量, 对小叶锦鸡儿样地中 0.25~0.053 mm 粒径中各铁铝氧化物的含量降低比例均最高。

团聚体有机无机复合物——钙结合态有机碳 (Ca-SOC) 和铁铝结合态有机碳 (Fe/Al-SOC) 在灌丛化草地团聚体中的分异如图 4 所示。各样地中 Ca-SOC 的含量在 1.08~1.43  $g\cdot kg^{-1}$  (图 4a), Fe/Al-SOC 的含量在 12.73~24.92  $g\cdot kg^{-1}$  (图 4b)。

与草地相比,高山绣线菊样地 0.25~0.053 mm 粒径中 Ca-SOC 的含量显著增加 33.34% ( $P<0.01$ ); 小叶锦鸡儿样地 0.25~0.053 mm 粒径中 Ca-SOC 的含量显著降低 67.37% ( $P<0.01$ ); 窄叶鲜卑花样地各粒径 Fe/Al-SOC 的含量显著降低 36.75%~51.06%

( $P<0.01$ ); 小叶锦鸡儿样地 2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和金露梅样地 0.053~0.002 mm、小于 0.002 mm 粒径中 Fe/Al-SOC 的含量显著降低 ( $P<0.01$ ), 小叶锦鸡儿样地中小于 0.002 mm 粒径中 Fe/Al-SOC 的含量显著增加 26.56% ( $P<0.01$ )。

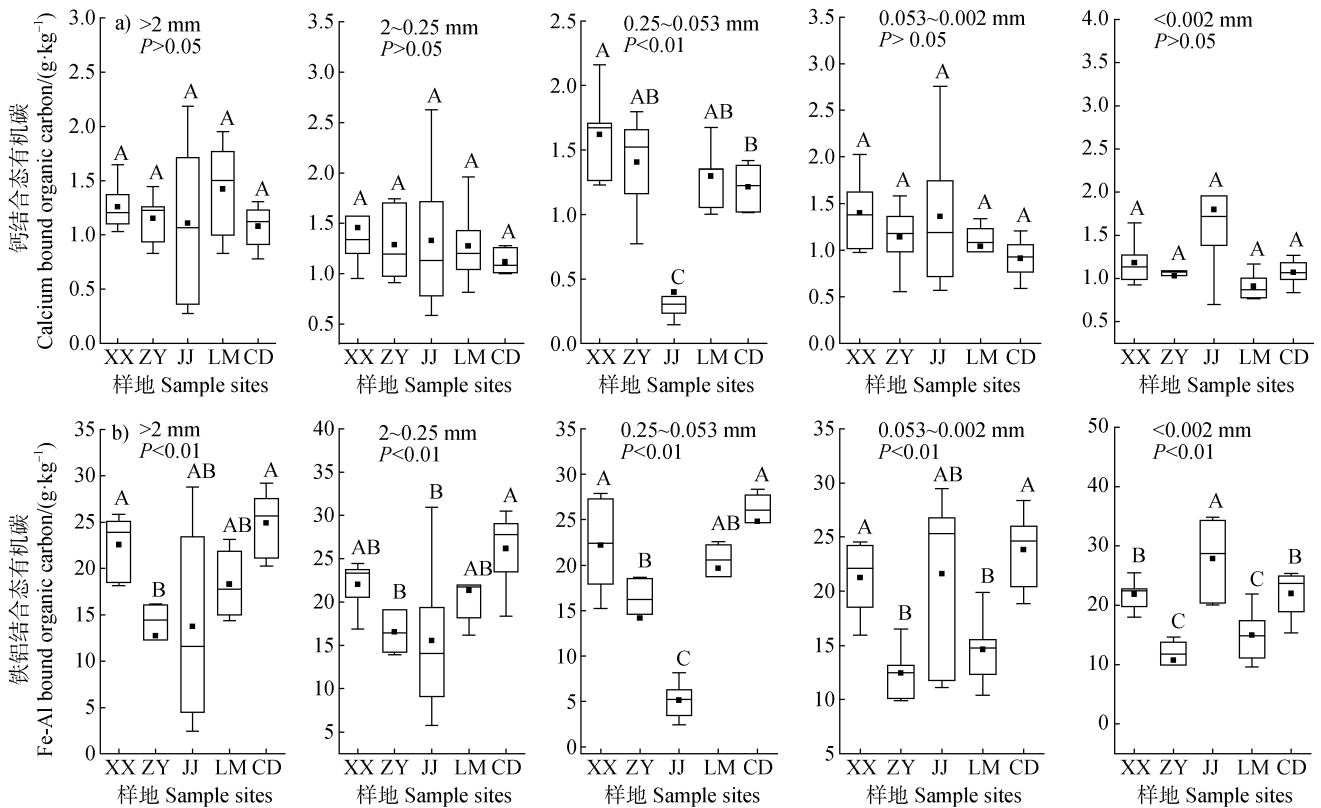


图 4 各样地土壤团聚体中结合态有机碳的含量分布 (a. 钙结合态有机碳的含量, b. 铁铝结合态有机碳的含量)

Fig. 4 Distribution of bounded organic carbon in soil aggregates in different sample sites (a. The content of Calcium bound organic carbon, b. The content of Fe/Al bound organic carbon)

## 2.5 灌丛化草地土壤团聚体各胶结物质对团聚体稳定性的贡献率

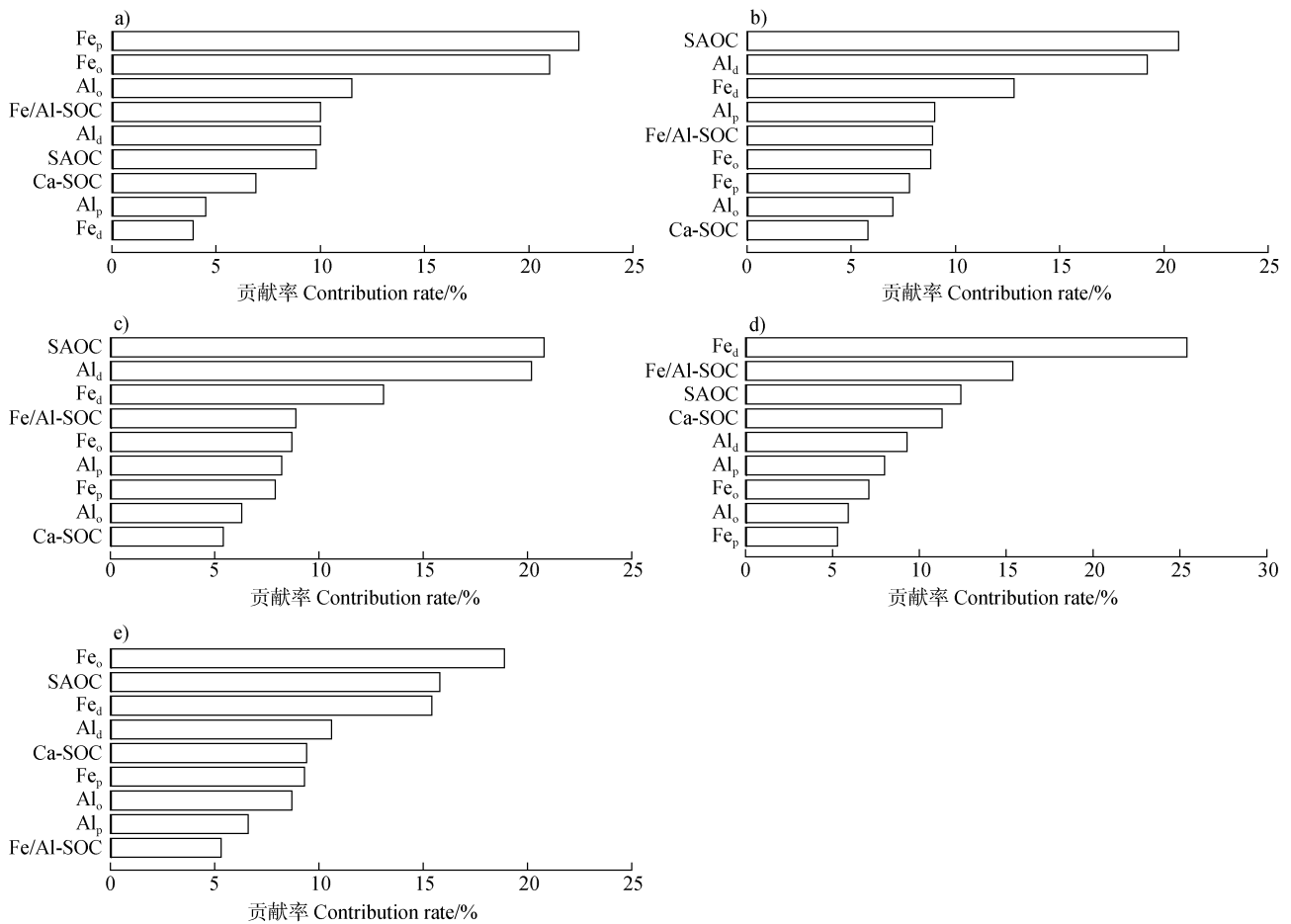
通过 BRT 分析各胶结物质对团聚体稳定性的作用, 由此得出高山绣线菊样地中, 对团聚体稳定性指标(MWD)的贡献最主要的 3 种胶结物质分别为:  $Fe_p$ 、 $Fe_o$  和  $Al_o$ , 前两者贡献率分别为 22.4%和 21% (图 5)。草地和其他灌丛样地中对团聚体稳定性起主要作用是 SAOC、 $Fe_d$ , 贡献率分别在 12.4%~20.8%和 12.8%~25.4%之间 (图 5)。在高山绣线菊样地中以  $Fe_d$  贡献率最低; 窄叶鲜卑花和小叶锦鸡儿样地中, 以 Ca-SOC 贡献率最低; 金露梅样地中, 以  $Fe_p$  贡献率最低; 草地中以 Fe/Al-SOC 贡献率最低。

## 3 讨论

### 3.1 灌丛化对草地土壤团聚体含量及其稳定性的影响

本研究中灌丛化后降低了小叶锦鸡儿样地大团聚体的含量, 增加了其微团聚体的含量 (表 2)。这可能是土壤和植被共同作用的结果, 小叶锦鸡儿样地为砂质土, 导致其团聚体含量主要分布在砂粒范围。其次, 砂质土有利于小叶锦鸡儿灌丛根系的生长和扩张, 促进根系对大团聚体的破坏, 从而增加微团聚体的含量<sup>[22]</sup>。此外, 根系分泌的有机酸成分可解聚团聚体无机胶结物 (如铁铝氧化物), 而且根系吸收水分会加剧土壤的干湿交替, 导致团聚体破





注：Fe<sub>d</sub>：游离态氧化铁；Al<sub>d</sub>：游离态氧化铝；Fe<sub>o</sub>：无定形态氧化铁；Al<sub>o</sub>：无定形态氧化铝；Fe<sub>p</sub>：络合态氧化铁；Al<sub>p</sub>：络合态氧化铝；SAOC：团聚体有机碳；Ca-SOC：钙结合态有机碳；Fe/Al-SOC：铁铝结合态有机碳。Note: Fe<sub>d</sub>: Free iron oxides; Al<sub>d</sub>: Free alumina oxides; Fe<sub>o</sub>: Amorphous iron oxides; Al<sub>o</sub>: Amorphous alumina oxides; Fe<sub>p</sub>: Complexed iron oxides; Al<sub>p</sub>: Complexed alumina oxides; SAOC: Soil aggregate organic carbon; Ca-SOC: Calcium bound organic carbon; Fe/Al-SOC: Fe-Al bound organic carbon.

图 5 各样地团聚体各胶结物质对团聚体平均重量直径 (MWD) 的贡献率 (a. 高山绣线菊样地, b. 窄叶鲜卑花, c. 小叶锦鸡儿样地, d. 金露梅样地, e. 草地)

Fig.5 The contribution rate of each cementing material in different sample sites to the mean weight diameter of aggregates (a. *Spiraea alpine* plot, b. *Sibiraea angustata* plot, c. *Caragana microphylla* plot, d. *Potentilla fruticosa* plot, e. Grassland)

碎，也是微团聚体含量增加的重要因素<sup>[23]</sup>。

$R_{0.25}$ 、MWD、 $D$  是评价团聚体稳定性的重要指标。大于 0.25 mm 团聚体比例越高、团聚体平均重量直径越大，表明团聚体稳定性越强<sup>[24]</sup>。分形维数  $D$  值高，表明土壤结构越紧实； $D$  值低，表明土壤较为疏松，通透性更好<sup>[17]</sup>。本研究中，小叶锦鸡儿样地团聚体稳定性显著低于草地 (图 1)。各样地中团聚体分形维数  $D$  表现为小叶锦鸡儿样地低于草地的趋势，这可能是由于小叶锦鸡儿样地土壤砂粒含量较高，导致其分形维数较低<sup>[17]</sup>。结合小叶锦鸡儿样地中的  $R_{0.25}$ 、MWD、 $D$ ，可以确定灌丛化降低了

小叶锦鸡儿样地土壤团聚体的稳定性。除了土壤结构和根系干扰，小叶锦鸡儿样地中铁铝氧化物的含量总体上低于草地 (图 3)，黏粒含量也比较低 (表 1)，不利于土壤颗粒和有机质结合，这可能是导致其稳定性降低的重要原因。

灌丛化仅显著影响了小叶锦鸡儿样地土壤团聚体稳定性 (图 1) 和团聚体含量 (表 2)，这可能是相比其他样地，小叶锦鸡儿灌丛拦截了大量的砂粒，砂粒中养分含量较低，不利于团聚体的形成和稳定<sup>[25]</sup>。虽然小叶锦鸡儿是豆科灌木，具有固氮的作用，一定程度上降低了碳/氮 (C/N) 比，有利于有机碳

的固存,但在表层土壤中,其有机碳的输入通常以颗粒态有机碳或轻组有机碳为主,容易被微生物分解,从而不利于其对有机碳的固存<sup>[25]</sup>。

### 3.2 灌丛化对团聚体胶结物质的影响

植被类型变化通过改变有机质的输入,影响团聚体内有机胶结物质(SAOC)的含量。本研究发现,灌丛化主要影响了小叶锦鸡儿样地 SAOC 的分布,显著增加了 $<0.053$  mm 微团聚体中 SOC 的含量(图 2),这可能与有机碳输入的数量和质量以及土壤质地有关。小叶锦鸡儿灌丛斑块内凋落物输入较草地丰富,而且小叶锦鸡儿属于豆科灌木,其根系具有固氮功能,可促进有机碳含量增加<sup>[26]</sup>,再加上其根系对团聚体的破坏作用,促进有机碳向微团聚体中富集<sup>[22]</sup>。

植被类型的变化还会引起凋落物、根系及分泌物的改变,进而影响团聚体无机胶结物质(铁铝氧化物)的含量和形态。植物根系会分泌不同的有机酸类物质,影响土壤 pH,从而改变铁铝氧化物的含量和形态。本研究中灌丛化增加了各样地中  $Fe_p$  的含量,降低了  $Al_p$  的含量(图 3e, 图 3f),这可能与根系分泌物的性质和 pH 有关。有机酸对铁铝氧化物的吸附强度与土壤 pH 呈负相关,当 pH 升高时,有机酸对铁铝氧化物的吸附会受到抑制,通过形成有机物与铁铝氧化物的络合物保存于土壤中<sup>[14]</sup>,从而导致络合态铁铝的含量增加。而除小叶锦鸡儿外所有灌丛 pH 较草地均升高(表 1),因此灌丛化草地土壤中  $Fe_p$  得以保留,含量增加。灌丛化降低了各样地中  $Al_p$  的含量,可能是由于草地中有机酸对  $Fe_p$  的吸附作用强于  $Al_p$ 。灌丛化后,小叶锦鸡儿样地除  $Fe_p$  以外的铁铝氧化物含量呈降低趋势(图 3),这可能与小叶锦鸡儿灌丛的有机质质量和土壤质地等因素有关。有研究表明,豆科的小叶锦鸡儿灌木有机碳的输入主要以叶片为主,而草地中以根系和叶片的混合物为主;灌丛化后,低质量凋落物输入增加,有机质化学成分较低,不利于铁铝氧化物的生成和转化<sup>[27]</sup>。此外,较少的黏粒含量(表 1)也限制了铁铝氧化物的吸附能力<sup>[28]</sup>。

植被类型通过影响有机、无机胶结物质的含量和形态,进一步影响有机无机复合体的含量和分布。本研究中灌丛化显著降低了小叶锦鸡儿样地  $0.25\sim 0.053$  mm 粒径中 Ca-SOC 和 Fe/Al-SOC 含量(图 4),

这可能因为该粒径中有机碳含量和铁铝氧化物含量较低。由图 2 可知,该样地  $0.25\sim 0.053$  mm 中团聚体有机碳含量远低于草地中,而该粒径中各铁铝氧化物含量均显著低于草地中(图 3)。灌丛化降低了窄叶鲜卑花样地各粒径团聚体内 Fe/Al-SOC 含量(图 4b),这可能与该样地团聚体有机碳含量较低且所有粒径中  $Fe_o$  以及各形态铝氧化物的含量均显著降低有关(图 2, 图 3)。灌丛和草地之间 Ca-SOC 的含量无显著差异(图 4a),可能是由于研究区是酸性土壤,碳酸盐含量较低,且  $pH<7$  时,碳酸盐含量变化也不明显<sup>[29]</sup>,土壤中缺乏主要的胶结物质,不利于钙结合态有机碳的生成。

### 3.3 团聚体胶结物质与团聚体稳定性的关系

团聚体中有机碳的分布<sup>[7]</sup>、铁铝氧化物的含量和形态<sup>[30]</sup>以及有机无机复合体<sup>[31]</sup>均是形成团聚体的基础,对团聚体的稳定性起着重要作用。本研究中不同样地团聚体胶结物质对团聚体稳定性的 BRT 分析结果显示:高山绣线菊样地对团聚体稳定性起主要作用的 3 种胶结物质分别是  $Fe_p$ 、 $Fe_o$  和  $Al_o$ (图 5a)。有研究表明<sup>[32]</sup>,无定形态铁铝和络合态铁铝与团聚体稳定性的相关性更好,本研究中高山绣线菊样地的 BRT 分析结果与之相似,可能是由于不同的根系分泌物改变了土壤 pH,从而改变了土壤中铁铝氧化物的含量和形态<sup>[14]</sup>,也进一步影响了团聚体稳定性。本研究草地和其他 3 种灌丛样地中,对团聚体稳定性起主要作用的 3 种主要胶结物质中均包括 SAOC 和  $Fe_d$ (图 5),表明团聚体的有机胶结物质和无机胶结物质共同促进团聚体的稳定。这与 Zhao 等<sup>[33]</sup>的研究结果较为一致,其研究发现,土壤有机碳和游离态铁铝对团聚体稳定性起着主要作用。本研究还发现,除金露梅样地中 Fe/Al-SOC 作为团聚体稳定性主要的贡献因子外,其他样地中, Ca-SOC 和 Fe/Al-SOC 均不是最主要的贡献因子(图 5),表明有机无机复合体对团聚体稳定性的贡献可能小于团聚体有机碳和某些铁铝氧化物。一般认为, Fe/Al-SOC 和 Ca-SOC 矿化分解较慢,抗氧化能力较强, Fe/Al-SOC 氧化稳定性强于 Ca-SOC。本研究发现, Fe/Al-SOC 并不是促进团聚体稳定的主要因素之一(图 5),这可能是由于 Fe/Al-SOC 具有一定的活性,当未向更稳定的有机质形态转化时,也会存在明显的矿化;其次是 Fe/Al-SOC 通常

与土壤中非晶型态铁铝氧化物关系密切，当此类铁铝氧化物含量有限，生成较慢时，也会影响 Fe/Al-SOC 的形成；此外，一些紧密结合态有机质与黏土矿物的结合，稳定性明显强于其他组分，从而影响了 Fe/Al-SOC 的累积<sup>[34]</sup>。

植被对团聚体稳定性的作用主要通过凋落物、根系及其分泌物等有机质输入的不同，改变根系环境和微生物活动，引起胶结物质变化而发生<sup>[11, 35]</sup>。胶结物质的含量和性质的改变，通常引起团聚体稳定性的变化。本研究结果显示，草地中团聚体稳定性显著高于小叶锦鸡儿样地（图 1），这可能与草地中团聚体稳定性的主要贡献因子，即各粒径团聚体中  $Fe_o$  的含量和大于 2 mm、0.25~0.053 mm 和 0.053~0.002 mm 粒径中  $Fe_d$  的含量均显著高于小叶锦鸡儿样地中（图 3）有关。草地斑块团聚体中  $Fe_o$  和  $Fe_d$  含量均高于各灌丛斑块（图 3），而它们又对草地团聚体稳定性起主要作用，这可能是由于  $Fe_o$  比表面积较大，是活性羟基的主要贡献者，对团聚体胶结作用较强，因此，它对团聚体稳定性有重要的促进作用<sup>[30]</sup>。而  $Fe_d$  也被认为与黏粒结合非常牢固，不易被分散，有利于形成稳定的团聚体<sup>[36]</sup>。本研究发现，个别微团聚体粒径中团聚体有机碳和铁铝氧化物含量降低，而团聚体稳定性并未显著降低，这可能是由于微团聚体中有机碳与黏粒和铁铝氧化物密切结合，从而有机碳和铁铝氧化物呈现出降低的趋势，但形成了稳定的有机无机复合体，促进了团聚体稳定性的增加<sup>[32]</sup>。此外，根系及微生物分泌的有机酸及适宜的 pH，会促进铁铝氧化物的吸附，引起铁铝氧化物的含量降低，但实际上是形成有机无机复合体<sup>[14, 37]</sup>，增加了团聚体的稳定性。

## 4 结 论

灌丛化降低了小叶锦鸡儿样地中大团聚体和黏粒的含量及团聚体稳定性，对其他 3 种灌丛草地团聚体含量和稳定性影响不显著。灌丛化主要改变了小叶锦鸡儿样地和窄叶鲜卑花样地胶结物质的含量。不同样地中，对团聚体稳定性起主要作用的胶结物质存在差异，高山绣线菊样地中，起主要作用的胶结物质为络合态铁（ $Fe_p$ ）、无定形态铁（ $Fe_o$ ）和无定形态铝（ $Al_o$ ）；草地和其他灌丛样地中主要胶结物质为团聚体有机碳（SAOC）和游离态铁

（ $Fe_d$ ），表明铁铝氧化物和有机碳对团聚体稳定性的作用可能较有机无机复合体更强。灌丛化虽增加了小叶锦鸡儿样地小于 0.053 mm 粒径 SAOC 的含量，但降低了大团聚体、黏粒以及主要胶结物质  $Fe_d$  的含量，从而降低了团聚体稳定性，这可能不利于其有机碳的固存。灌丛化对团聚体稳定性和胶结物质的影响可能与灌木性质、土壤质地等因素有关。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Yoro K O, Daramola M O. CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect[M]// Mohammad R R et al. ed. Advances in carbon capture. Britain: Woodhead Publishing, 2020: 3—28.
- [ 2 ] Wang L, Zeng H, Zhang Y J, et al. A review of research on soil carbon storage and its influencing factors in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38 ( 11 ): 3506—3515. [王荔, 曾辉, 张扬建, 等. 青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38 ( 11 ): 3506—3515.]
- [ 3 ] Baldock J A. Composition and cycling of organic carbon in soil[M]// Marschner P, Rengel Z. ed. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 1—35.
- [ 4 ] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, et al. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: Towards a global synthesis[J]. Ecology Letters, 2011, 14 ( 7 ): 709—722.
- [ 5 ] Geissler K, Fiedler S, Ni J, et al. Combined effects of grazing and climate warming drive shrub dominance on the Tibetan Plateau[J]. The Rangeland Journal, 2020, 41: 425—439.
- [ 6 ] Zhang M K, He Z L. Effect of parent materials on formation of soil aggregates[J]. Soil and Environment Sciences, 1997, 6 ( 3 ): 198—202. [章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[J]. 土壤与环境, 1997, 6 ( 3 ): 198—202.]
- [ 7 ] Luo X H, Wang Z F, Lu C, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. Environmental Science, 2019, 40 ( 8 ): 3816—3824. [罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40 ( 8 ): 3816—3824.]
- [ 8 ] Xu X R, Wang J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48 ( 6 ): 1523—1529. [徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48 ( 6 ): 1523—1529.]
- [ 9 ] Wei C F, Xie D T, Li B G. Progress in resaerch on soil organo-mineral complexes[J]. Advance in Earth

- Sciences, 2003, 18 (2): 221—227. [魏朝富, 谢德体, 李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18 (2): 221—227.]
- [ 10 ] Jia L. Effects of vegetation restoration on microaggregates and cementing substances in degraded red soil[D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2018. [贾龙. 植被恢复对退化红壤微团聚体及其胶结物质的影响[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2018.]
- [ 11 ] Cheng L, Qin J H, Zhang L C, et al. Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability in red soils under different types of vegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 855—866. [程谅, 秦嘉惠, 张利超, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究不同植被类型下红壤团聚体稳定性[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 855—866.]
- [ 12 ] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (11): 3184—3196.
- [ 13 ] Li F Y. Effect of low molecular weight organic acids on the transformation and stability of iron oxides in soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. [李丰义. 低分子量有机酸对土壤氧化铁形成与稳定性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.]
- [ 14 ] Yu Y H, Zhang T L, Li Q M, et al. Adsorption of low molecular weight organic acids by main soil components of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (6): 1144—1150. [喻艳红, 张桃林, 李清曼, 等. 红壤主要土壤组分对低分子量有机酸吸附的研究[J]. 土壤学报, 2010, 47 (6): 1144—1150.]
- [ 15 ] Ma W M, Liu J, Zhou Q P, et al. Stability of soil aggregates and soil organic carbon under shrub encroachment sites in alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (5): 1108—1115. [马文明, 刘军, 周青平, 等. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50 (5): 1108—1115.]
- [ 16 ] Le Bissonnais Y, Prieto I, Roumet C, et al. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: Effect of plant roots and soil characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2018, 424 (1/2): 303—317.
- [ 17 ] Yang P L, Luo Y P. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (20): 1896—1896. [杨培岭, 罗远培. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896—1896.]
- [ 18 ] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.]
- [ 19 ] Xu J M, Hou H Z. Studies on organic-mineral complexes in soil VIII. Sodium sulphate as extractant to separation of calcium-bond organic-mineral complex in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35 (4): 468—474. [徐建民, 侯惠珍. 土壤有机矿质复合体研究: VIII. 分离钙键有机矿质复合体的浸提剂-硫酸钠[J]. 土壤学报, 1998, 35 (4): 468—474.]
- [ 20 ] Wu Y W, Zhang J C, Guo X P, et al. Identification of efficient strain applied to mining rehabilitation and its rock corrosion mechanism: Based on boosted regression tree analysis[J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (1): 283—293. [吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 等. 应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析[J]. 环境科学, 2017, 38 (1): 283—293.]
- [ 21 ] Elith J, Hastie J. A working guide to boosted regression trees-Appendix S1: Explanation of the effect of learning rate on predictive stability in boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77 (4): 802—813.
- [ 22 ] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7—31.
- [ 23 ] Dijkstra F A, Zhu B, Cheng W. Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword[J]. *New Phytologist*, 2021, 230 (1): 60—65.
- [ 24 ] Su J, Zhao S W. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (5): 114—117. [苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29 (5): 114—117.]
- [ 25 ] Li H, Shen H, Zhou L, et al. Shrub encroachment increases soil carbon and nitrogen stocks in temperate grasslands in China[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30 (7): 756—767.
- [ 26 ] Li H, Shen H, Chen L, et al. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1): 28974.
- [ 27 ] Chen J F, He Q, Xu Z Y. A preliminary study on the effect of soil permeability on soil chemical properties[J]. *Soils*, 1980, 12 (5): 169—174. [陈家坊, 何群, 许祖贻. 土壤透水性能对土壤化学性质影响的初步研究[J]. 土壤, 1980, 12 (5): 169—174.]
- [ 28 ] Gu Z Y, Kang L, Luo M J, et al. Factors affecting stability of soil aggregate in eastern Hu'nan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38 (5): 58-63+69. [谷忠元, 康黎, 罗梦娟, 等. 湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, 38 (5): 58-63+69.]
- [ 29 ] Liu Z, Chen D D, Li Q, et al. Effects of different land use patterns on soil inorganic carbon in alpine meadow ecosystem[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36 (5): 73—79. [刘哲, 陈懂懂, 李奇, 等. 土

- 地利用方式对高寒草甸生态系统土壤无机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36 (5): 73—79.]
- [ 30 ] Wang X H, Yang Z J, Liu X F, et al. Effects of different forms of Fe and Al oxides on soil aggregate stability in mid-subtropical mountainous area of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (9): 2588—2596. [王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36 (9): 2588—2596.]
- [ 31 ] [31] Liu W, Wang C Y, Huang L. Combined humus of eroded ultisols and its relationship with water-stable aggregates[J]. *Soils*, 2014, 46 (3): 458—465. [刘威, 王春燕, 黄丽. 侵蚀红壤中结合态腐殖质及其与水稳性团聚体的关系[J]. *土壤*, 2014, 46 (3): 458—465.]
- [ 32 ] Igwe C A, Zarei M, Stahr K. Colloidal stability in some tropical soils of southeastern Nigeria as affected by iron and aluminium oxides[J]. *Catena*, 2009, 77 (3): 232—237.
- [ 33 ] Zhao J, Chen S, Hu R, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 73—79.
- [ 34 ] Wang Q Y, Zhou Y P, Yang Y Z, et al. Effects of long-term straw returning on stability of mineral-complexed organic matter in shajiang black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1108—1117. [王擎运, 周云鹏, 杨远照, 等. 长期秸秆还田对砂姜黑土矿质复合态有机质稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (5): 1108—1117.]
- [ 35 ] Li J, Yuan X, Ge L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [ 36 ] Hu G C, Zhang M K. Mineralogical evidence for strong cementation of soil particles by iron oxides[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (1): 25—27. [胡国成, 章明奎. 氧化铁对土粒强胶结作用的矿物学证据[J]. *土壤通报*, 2002, 33 (1): 25—27.]
- [ 37 ] Xu R K, Ji G L. Effect of low-molecular-weight organic acids on adsorption of aluminum by variable charge soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 144—147. [徐仁扣, 季国亮. 低分子量有机酸对可变电荷土壤中铝吸附的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41 (1): 144—147.]

(责任编辑：陈荣府)