

DOI:10.11686/cyxb2025079

<http://cyxb.magtech.com.cn>

王静, 李旭东, 韩天虎, 等. 高寒草甸不同草地微斑块土壤团聚体分布及其与有机碳矿化的关系. 草业学报, 2026, 35(2): 15—27.

WANG Jing, LI Xu-dong, HAN Tian-hu, *et al.* Distribution of soil aggregates in different vegetation micro-patches in alpine meadows and the relationship with organic carbon mineralization. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 15—27.

高寒草甸不同草地微斑块土壤团聚体分布 及其与有机碳矿化的关系

王静^{1,2}, 李旭东¹, 韩天虎^{1,4}, 牛得草¹, 白春利³, 郭丁^{1*}

(1. 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 兰州大学阿拉善荒漠-绿洲草地野外科学观测研究站, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010030; 3. 内蒙古自治区农牧业科学院草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010031; 4. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 草地微斑块化是逆行演替中一个重要的过程, 土壤团聚体受到草地植被斑块的影响产生变化, 进而影响土壤有机碳矿化。本研究通过湿筛法将土壤团聚体分为大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)、微团聚体($53\sim250\ \mu\text{m}$)和粘粉粒团聚体($<53\ \mu\text{m}$)3个粒径, 同时采用室内培养法测定了土壤有机碳累积矿化量, 分析了青藏高原草地植被斑块中土壤团聚体的分布特征和稳定性, 以及土壤团聚体对土壤有机碳矿化的影响。结果表明: 各植被微斑块中均为大团聚体占比最高, 为55.31%~74.01%, 与原生植被相比, 其他植被微斑块大团聚体含量、团聚体稳定性均有不同程度的降低, 但仅裸地变化显著($P<0.05$), 降低了25.27%。原生植被(CK)、金露梅(PF)和珠芽蓼(PV)微斑块各粒径土壤有机碳含量均显著高于黄帚橐吾(LV)和裸地(BA)。LV斑块土壤有机碳累积矿化量最高, 为 $12.38\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; BA斑块最低, 为 $8.26\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而土壤有机碳累积矿化率LV和BA斑块显著高于其他斑块($P<0.05$)。土壤有机碳累积矿化量与大团聚体含量和团聚体的稳定性呈显著正相关($P<0.05$), 累积矿化率与团聚体稳定性和团聚体碳氮比均成极显著负相关($P<0.01$)。因此, 研究斑块化过程中团聚体的组成、稳定性及其矿化速率可以为青藏高原草地生态系统的可持续发展和气候变化的准确预测提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 土壤粒级分布; 土壤有机碳; 矿化速率

Distribution of soil aggregates in different vegetation micro-patches in alpine meadows and the relationship with organic carbon mineralization

WANG Jing^{1,2}, LI Xu-dong¹, HAN Tian-hu^{1,4}, NIU De-cao¹, BAI Chun-li³, GUO Ding^{1*}

1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University Alashan Desert-Oasis Grassland Field of Scientific Observing Stations, Lanzhou University, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou 730020, China; 2. Inner Mongolia University, School of Ecology and Environment, Hohhot 010030, China; 3. Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Grassland Research Institute, Hohhot 010031, China; 4. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730030, China

Abstract: Micro-vegetation patchification is a critical process during the retrogressive succession of grasslands. This study explored how vegetation patches influence soil aggregate distribution and stability, and the subsequent effects on soil organic carbon (SOC) mineralization in the Qinghai—Tibet Plateau. Soil aggregates were fractionated using

收稿日期: 2025-03-11; 改回日期: 2025-05-06

基金项目: 甘肃省林业和草原局(QYRZ-GSLC2023-009), 国家自然科学基金(31502010), 青藏高原环境与生态教育部重点实验室开放基金(2018-QHS-K07)和甘肃省自然科学基金重点项目(22JR5RA400)资助。

作者简介: 王静(1995—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 在读博士。E-mail: nmgwjing@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: guod@lzu.edu.cn

the wet-sieving method into three size classes: macro-aggregates ($>250\ \mu\text{m}$), micro-aggregates ($53\text{--}250\ \mu\text{m}$), and silt-clay fractions ($<53\ \mu\text{m}$). SOC mineralization was quantified through indoor incubation experiments. It was found that macro-aggregates dominated all vegetation patches ($55.31\%\text{--}74.01\%$), but their content and aggregate stability significantly decreased in non-native patches compared to the native vegetation (CK). Notably, macro-aggregate loss was as high as 25.27% in bare areas (BA) ($P<0.05$). SOC content in macro-, micro-, and silt-clay fractions was highest in CK, *Potentilla fruticosa*, and *Polygonum viviparum* patches, followed by *Ligularia virgaurea* (LV) and BA. SOC cumulative mineralization quantity peaked in LV patches ($12.38\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and was lowest in BA ($8.26\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Additionally, cumulative mineralization rate was significantly higher in LV and BA than in other patches ($P<0.05$). Positive correlations were observed between SOC cumulative mineralization quantity and macro-aggregate content as well as aggregate stability ($P<0.05$). Conversely, cumulative mineralization rate was negatively correlated with aggregate stability and C/N ratio ($P<0.01$). These findings suggest that analyzing aggregate composition, stability, and mineralization dynamics during patchification processes can provide scientific insights for sustainable grassland management and accurate climate change assessments in the Qinghai—Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; soil particle size distribution; soil organic carbon (SOC); mineralization rate

土壤作为陆地生态系统最大的有机碳库,储存着约1550 Pg有机碳,其分别约为大气碳库和生物碳库的2和3倍^[1]。因此,土壤有机碳库微小的变化都可能会导致大气中 CO_2 浓度急剧增加或降低,从而影响全球气候变化^[2]。土壤有机碳矿化是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,与全球气候变化息息相关,同时也关系到土壤养分的释放与供应^[3]。土壤团聚体在有机质的分解过程中起关键作用^[4],Christensen^[5]指出影响土壤团聚体形成特别是影响团聚体粒径变化的因素也影响着有机碳的矿化作用。此外,土壤团聚体含量和有机碳分布特征被整合到许多环境模型中,用来预测土壤的侵蚀、土壤保水量以及有机碳固存^[6]。因此,深入研究土壤团聚体分布特征和稳定性对准确地预测未来土壤有机碳的动态具有重要的意义。

土壤团聚体是土壤的基本结构单元,其控制着土壤抗侵蚀性、土壤和大气间气体交换、养分可利用性和水渗透性^[7]。在许多研究中根据团聚体的粒径大小将团聚体分为大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)、微团聚体($53\text{--}250\ \mu\text{m}$)和粘粉粒团聚体($<53\ \mu\text{m}$)^[8]。不同粒径的土壤团聚体对有机碳的物理保护能力不同^[9]。此外,不同粒径团聚体所结合的有机碳分子结构也不同^[9]。研究表明,粘粉粒团聚体是由粘土颗粒、多价金属和有机金属络合物形成,它们游离在土壤中与腐殖质有机物、多价金属阳离子络合物、氧化物和高度无序的硅酸盐结合形成微团聚体,这些微团聚体与新鲜的有机质(例如植物根、根系分泌物和真菌菌丝)胶结才形成大团聚体^[9-10]。普遍认为大团聚体主要有助于新输入的有机物质的暂时性储存,而微团聚体有助于有机碳的长期稳定^[11-12]。因此,土壤中团聚体的分布不同会使土壤有机碳的变化产生差异,分析土壤团聚体的分布特征,有助于更深入地阐述团聚体对土壤有机碳的稳定机制。

土壤团聚体的形成和稳定是一个复杂的过程,其受到土壤性质(如土壤有机质、土壤质地和微生物活性等)和植被特征(如植被的类型、植物的根系等)相关的多种非生物和生物因子的影响^[13-15]。土壤有机碳作为团聚体的主要胶结剂之一,有助于团聚体的形成^[16];在团聚体形成之后,团聚体就会对土壤有机碳产生物理保护,使土壤有机碳不易被微生物分解^[9]。因此,团聚体的形成与土壤有机碳固存之间存在着正向关系。然而,也有研究表明有机碳含量高的粘质土壤其团聚体结构仍易被破坏,土壤有机质与团聚体之间的关系并不是简单的相关关系,其受到众多因素的影响^[17]。另外,植物根系通过穿插、挤压和缠绕等生长活动以及提供根系分泌物作为土壤颗粒粘合剂,影响土壤团聚体形成和稳定^[18]。一些研究表明根系生物量与团聚体的稳定性呈显著的正相关关系^[19-20],然而,Kumar等^[21]研究表明根系的生长可能导致大团聚体的破碎,从而降低团聚体稳定性。因此,不同植被类型造成根系的分布、凋落物输入和土壤理化性状等影响因素的差异强烈影响着团聚体的形成和稳定性。

草地微斑块是由于草地破碎化,以不同植物物种或裸露地面为主形成的一种小尺度空间结构单元,镶嵌在草原上^[22]。青藏高原高寒草地由于家畜的践踏和采食、鼠类活动以及自然微环境的差异等因素,形成了不同类型的植被微斑块^[23]。草地微斑块的类型以草本植物为主,也包括退化裸地斑块^[24]。这些草地微斑块常见分布于青藏高原中部干旱区或低洼地,或因冻融作用导致斑块呈网状分布^[25]。草地微斑块的聚集分布会使土壤局部的物质添加、元素迁移和微生物活性等发生改变,强烈影响着土壤结构和性状,形成更加明显的空间异质性^[26-27]。目前对于青藏高原高寒草地微斑块的研究主要集中在植物群落结构特征和土壤理化性状等方面^[22,28],而青藏高原地区植被微斑块团聚体的分布特征以及其对土壤有机碳矿化的影响还未见报道。基于此,本研究以青藏高原不同类型草地植被微斑块为研究对象,深入探讨土壤团聚体分布特征及其对土壤有机碳矿化的影响。研究结果为认识和理解青藏高原草地植被斑块化对土壤性质的影响,以及阐述斑块化影响土壤碳循环过程提供了理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘南藏族自治州玛曲县县城以西 10 km 处的高寒草甸(33°50' N, 102°05' E), 平均海拔为 3500 m。该区属于典型的高寒半湿润气候区, 具有明显的高原气候特征; 年均温度 1.5 °C; 年降水量 600~800 mm, 主要集中于 6—9 月; 年蒸发量约为 1364 mm, 全年日照时数为 2290 h 左右。主要的植物有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、禾叶嵩草(*Kobresia graminifolia*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等。土壤类型为亚高山草甸土。

试验样地位于面积约为 18 hm² 的围封草地上, 草地地势平坦, 具有典型的混合斑块景观^[28]。基于长期的调查和分析, 试验草地群落以高山嵩草为优势物种(即为原生植被, CK), 其中有裸露的土壤斑块(bare area, BA)和 3 种不同的植被斑块, 分别为金露梅(*Potentilla fruticosa*)、珠芽蓼和黃帚橐吾(*Ligularia virgaurea*), 共 5 种植被斑块, 大小不一且不规则地分布在草地上(图 1)。随机选择每种斑块类型的 4 个孤立和均质斑块作为重复, 在植物生长峰值期进行调查取样, 研究植物生物量和土壤理化生特性^[28-30]。

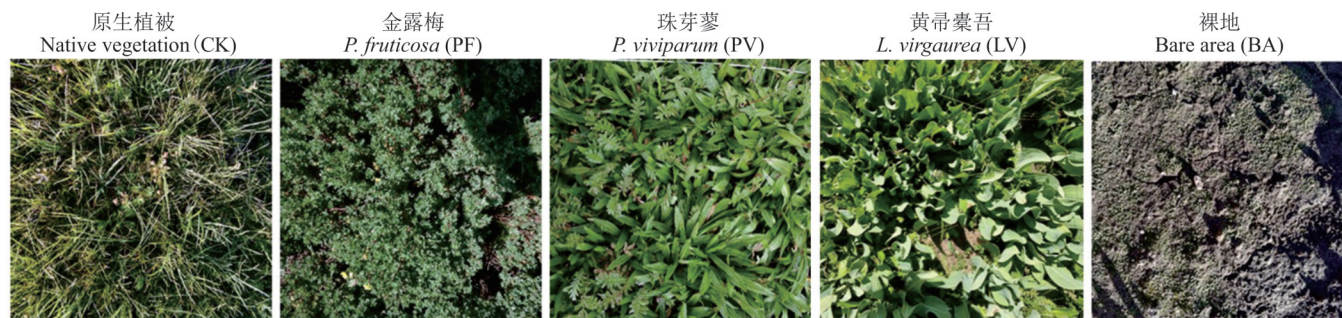


图 1 草地植被微斑块样地

Fig. 1 Micro-vegetation patchification in grassland

1.2 样品采集与分析

2018 年 8 月初, 在每种草地微斑块上随机设置 4 个 2 m×2 m 样方用以调查植被特征和土壤性状。在每个样方内采用对角线方法设置 5 个采样点, 用土钻采取 0~10 cm 土层土壤样品, 5 个采样点的土样混合为 1 个样品, 去除石砾和植物根系, 充分混匀后用四分法取一部分土样带回实验室备用, 同时取部分土样过 2 mm 筛, 放入冰盒中, 用以测定土壤有机碳矿化。每个草地微斑块样方内设置 0.5 m×0.5 m 的小样方, 手工收集小样方中的凋落物, 齐地剪下小样方内的地上植物封装入袋用作地上生物量测定, 在土壤剖面整株分区挖掘, 获取根系用作地下生物量, 其中裸地的地下生物量为残留根系, 均带回实验室(表 1)。

带回实验室的土样在室内风干后, 取一部分土样研磨过 0.147 mm 筛, 用以测定土壤有机碳和全氮含量; 剩余土样过 2 mm 筛用以测定土壤理化性质和团聚体组成^[31-32]。土壤质地用激光粒度仪(Master Size 2000, 马尔

文,英国)进行测量;土壤pH使用pH计(PHS-3C,雷磁,中国)测定;土壤团聚体组成采用湿筛法^[33],应用土壤团聚体分析仪(DM200-Ⅲ,德玛,中国)进行分析,采用孔径分别为2、0.25和0.053 mm的土壤套筛获取各粒级[大团聚体(>250 μm, macroaggregates, macro)、微团聚体(53~250 μm, microaggregates, micro)和粘粉粒团聚体(<53 μm, silt and clay aggregates, S&C)]土壤团聚体组分;土壤有机碳含量和团聚体碳含量用浓硫酸—重铬酸钾氧化法测定^[34];土壤全氮含量和团聚体氮含量用凯式定氮法测定^[35]。

土壤有机碳矿化测定采用碱液吸收法,共计培养357 d^[36-37];称取相当于80 g干土的新鲜土壤样品,将土壤含水量调节至田间持水量的50%,放置于1 L的密闭培养瓶中,将培养瓶放置于25℃恒温培养箱,同时培养瓶中放入分别装有NaOH溶液和蒸馏水的烧杯,用以吸收土壤有机碳分解释放的CO₂和保持土壤水分,每隔一定时间,取出NaOH烧杯用HCl滴定,然后计算CO₂矿化量,土壤含水量测定采用105℃下烘干法^[7]。

1.3 数据分析

1)土壤团聚体各粒径含量计算公式如下^[38]:

$$w_i = \frac{W_0}{100} \times 100\%$$

式中: w_i 为*i*粒级团聚体重量占土壤样品干重的比例, W_0 为*i*粒级土壤团聚体重量。

2)土壤团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)计算公式如下^[39-40]:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中: $\bar{x}_i$ 为*i*粒径范围团聚体的平均直径。

3)土壤团聚体贡献率计算公式如下(不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响):

$$\text{土壤团聚体贡献率} = \frac{\text{该级团聚体有机碳含量} \times \text{该级团聚体比例}}{\text{土壤有机碳含量}} \times 100\%$$

4)土壤有机碳矿化率的计算公式如下:

$$\text{有机碳矿化量比率} = \frac{\sum \text{间隔时间矿化量} \times \text{间隔天数}}{\text{土壤有机碳含量}}$$

式中:间隔时间矿化量是培养土壤的357 d中间隔一定时间的土壤有机碳矿化量,采用碱液吸收法进行测定。间隔天数是每次测定间隔的时间。

采用Excel 2010和IBM Statistics SPSS 20.0软件对草地斑块的土壤理化性状、团聚体含量、团聚体有机碳、团聚体全氮、团聚体有机碳贡献率、团聚体碳氮比进行单因素方差分析和双侧相关性分析。采用SigmaPlot 14.0对数据进行作图。

表1 各草地微斑块植被生物量

Table 1 Vegetation biomass of each grassland micro-patches (g·m⁻²)

样地 Site	地下生物量 Underground biomass	地上生物量 Aboveground biomass
原生植被 Native vegetation (CK)	2841.68±498.94ab	401.80±13.61b
金露梅 <i>P. fruticosa</i> (PF)	3422.30±214.85a	10085.97±469.62a
珠芽蓼 <i>P. viviparum</i> (PV)	2394.29±379.01b	650.36±159.00b
黄帚橐吾 <i>L. virgaurea</i> (LV)	2312.15±499.89b	465.53±26.65b
裸地 Bare area (BA)	563.36±31.36c	

注:不同字母表示各样地间差异显著($P<0.05$)。数据为标准值±标准误差。

Note: Different letters indicate significant differences among the five sites ($P<0.05$). The data is mean±standard error. The same below.

2 结果与分析

2.1 草地微斑块的土壤理化性质

如表 2 所示,高寒草甸草地微斑块化显著影响土壤理化性状。原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块的土壤含水量显著高于黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$)。各草地微斑块的土壤质地均以粉粒含量为主,粉粒含量为 49.24%~71.57%;原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块显著高于黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$),且黄帚橐吾斑块显著高于裸地斑块($P<0.05$)。砂粒含量为 19.41%~43.39%;裸地斑块最高,黄帚橐吾斑块其次,原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块较低。粘粒含量为 7.37%~9.52%,其变化趋势为原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块>黄帚橐吾斑块>裸地斑块。

表 2 草地微斑块的土壤理化性状

Table 2 Soil physicochemical traits of grass micro-patches

样地	土壤含水量	砂粒含量	粉粒含量	粘粒含量	pH	土壤有机碳	土壤全氮	碳氮比
Site	Soil water content (SWC, %)	Sand content (%)	Silt content (%)	Clay content (%)		Soil organic carbon (SOC, g·kg ⁻¹)	Total nitrogen (TN, g·kg ⁻¹)	C:N
CK	83.36±2.53a	20.92±2.15c	69.56±2.44a	9.52±0.48a	6.87±0.18ab	142.20±10.34a	9.42±0.43a	15.09±0.77a
PF	76.82±2.18a	24.05±2.86c	67.17±2.76a	8.78±0.22ab	6.60±0.13b	141.75±8.70a	9.54±0.03a	14.86±0.92a
PV	84.41±5.75a	19.41±0.70c	71.57±0.65a	9.02±0.13a	6.80±0.38ab	124.16±4.09b	9.08±0.83a	13.73±0.99a
LV	56.66±8.66b	33.75±0.86b	58.11±1.29b	8.14±0.51bc	6.67±0.48b	81.39±6.21c	7.41±1.19b	11.30±2.65b
BA	60.44±4.61b	43.39±3.85a	49.24±4.10c	7.37±0.33c	7.44±0.16a	56.75±3.26d	7.11±0.62b	8.04±1.05c

草地微斑块土壤 pH 为 6.60~7.44,裸地斑块的土壤 pH 显著高于金露梅和黄帚橐吾斑块($P<0.05$);原生植被、金露梅、珠芽蓼和黄帚橐吾斑块间土壤 pH 无显著差异(表 2)。原生植被和金露梅微斑块的土壤有机碳含量较高,分别为 142.20 和 141.75 g·kg⁻¹;其变化趋势为原生植被和金露梅斑块>珠芽蓼斑块>黄帚橐吾斑块>裸地斑块($P<0.05$)。原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块的土壤全氮含量和土壤碳氮比均显著高于黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$),且黄帚橐吾斑块的土壤碳氮比显著高于裸地斑块($P<0.05$,表 2)。

2.2 草地微斑块土壤团聚体组成和稳定性特征

由图 2 可知,各草地微斑块影响下均以大团聚体占绝对优势,占团聚体总量的 55.31%~74.01%;粘粉粒团聚体含量最少,占团聚体总量的 3.43%~15.80%。不同草地微斑块间团聚体组成存在差异性,原生植被改变会导致大团聚体含量均降低,但仅裸地斑块大团聚体含量显著低于原生植被斑块($P<0.05$),且原生植被、金露梅、珠芽蓼和黄帚橐吾斑块间无显著差异;裸地斑块的微团聚体和粘粉粒团聚体含量均最高,分别为 28.89% 和 15.80%,均显著高于原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块($P<0.05$)。

草地微斑块土壤 MWD 和 GMD 的变化范围分别为 0.67~0.87 mm 和 0.63~0.82 mm。与原生植被斑块相比,各草地微斑块下 MWD 和 GMD 均有不同程度的降低,但仅裸地斑块和其余 4 种草地微斑块间有显著差异($P<0.05$),原生植被、金露梅、珠芽蓼和黄帚橐吾间无显著差异(表 3)。

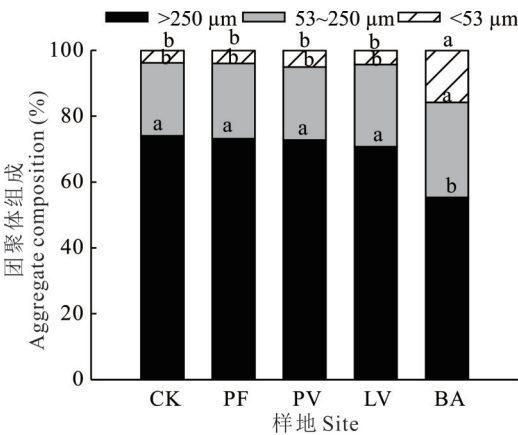


图 2 草地微斑块土壤团聚体组成

Fig. 2 Soil aggregate composition of grass micro-patches

不同字母表示各样地间差异显著($P<0.05$)。下同。Different letters indicate significant differences among the five sites ($P<0.05$). The same below.

2.3 草地微斑块土壤团聚体有机碳、全氮含量及碳氮比

原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块大团聚体有机碳含量显著高于黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$),且黄帚橐吾斑块大团聚体有机碳含量显著高于裸地斑块($P<0.05$)。除黄帚橐吾斑块微团聚体有机碳含量和裸地斑块间无显著差异外,其他草地微斑块间微团聚体和粘粉粒团聚体有机碳含量均有显著差异($P<0.05$,图3a)。

表3 草地微斑块土壤团聚体稳定性
Table 3 Soil aggregates stability of grassland micro-patches (mm)

样地 Site	平均重量直径 Mean weight diameter, MWD	几何平均直径 Geometric mean diameter, GMD
CK	0.87±0.00a	0.82±0.01a
PF	0.86±0.01a	0.81±0.01a
PV	0.85±0.01a	0.80±0.00a
LV	0.83±0.01a	0.79±0.01a
BA	0.67±0.05b	0.63±0.03b

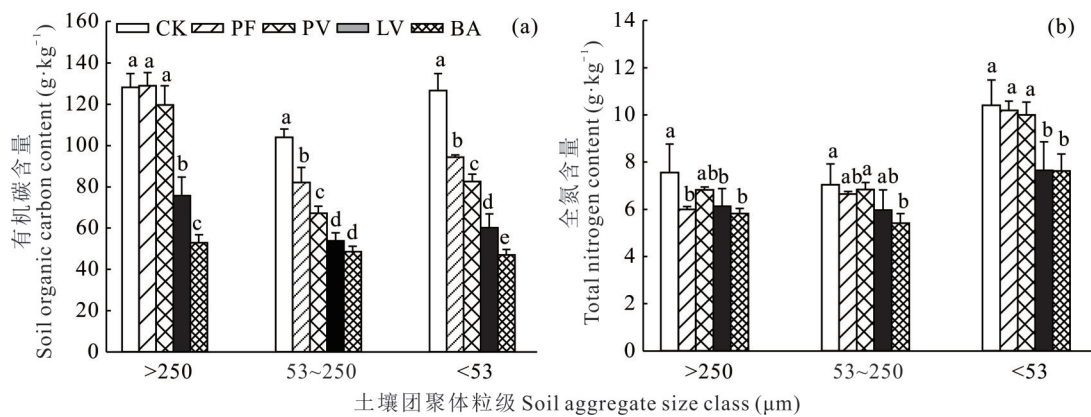


图3 草地微斑块各粒径土壤团聚体有机碳和全氮含量
Fig. 3 Soil organic carbon and total nitrogen content in different aggregate size of grassland micro-patches

原生植被土壤大团聚体的全氮含量显著高于金露梅、黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$),且金露梅、珠芽蓼、黄帚橐吾和裸地斑块间无显著差异。原生植被和珠芽蓼斑块土壤微团聚体的全氮含量显著高于裸地斑块($P<0.05$),原生植被、金露梅、珠芽蓼和黄帚橐吾斑块间无显著差异。原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块粘粉粒团聚体的土壤全氮含量显著高于黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$,图3b)。

如表4所示,总体上草地微斑块大团聚体的碳氮比最高,微团聚体次之,粘粉粒团聚体最低。高寒草地微斑块化显著影响了土壤团聚体中碳氮比的变化。草地微斑块土壤大团聚体碳氮比变化趋势为金露梅>原生植被和珠芽蓼斑块>黄帚橐吾和裸地($P<0.05$)。原生植被和金露梅斑块土壤微团聚体碳氮比显著高于黄帚橐吾和裸地斑块($P<0.05$)。原生植被斑块的粘粉粒团聚体中碳氮比显著高于其余样地,金露梅斑块仅次于原生植被斑块,显著高于裸地斑块($P<0.05$)。

表4 草地微斑块土壤团聚体有机碳贡献率和团聚体碳氮比
Table 4 Percentage of soil C and C:N in each aggregate size of grassland micro-patches

样地 Site	团聚体碳贡献率 Percentage of soil C in each aggregate size (%)			碳氮比 C:N		
	>250 μm	53~250 μm	<53 μm	>250 μm	53~250 μm	<53 μm
CK	66.84±3.42a	16.31±1.44bc	3.37±0.65b	17.21±2.36b	14.95±2.02a	12.24±1.30a
PF	66.61±3.58a	13.30±1.49bc	2.63±0.50b	21.50±0.80a	12.36±1.26ab	9.26±0.25b
PV	70.22±7.23a	12.00±0.56c	3.36±0.38b	17.52±1.36b	9.82±0.42bc	8.29±0.74bc
LV	66.19±10.98a	16.74±3.15b	3.14±0.55b	12.58±2.79c	9.14±1.45c	8.02±1.86bc
BA	51.48±4.45b	24.47±2.66a	13.12±1.33a	9.10±0.77c	9.01±0.86c	6.19±0.67c

各草地微斑块均为大团聚体碳贡献率最高,微团聚体和粘粉粒团聚体碳贡献率依次降低(表 4)。裸地斑块大团聚体碳贡献率显著低于其余斑块($P<0.05$),其余斑块间均无显著差异。裸地斑块微团聚体碳贡献率显著高于其余样地,黄帚橐吾斑块仅次于裸地斑块,显著高于珠芽蓼斑块($P<0.05$)。裸地斑块粘粉粒团聚体碳贡献率显著高于其余斑块($P<0.05$),其余斑块间均无显著差异(表 4)。

2.4 草地微斑块土壤有机碳累积矿化量

经过 357 d 的矿化培养,土壤有机碳累积矿化量为 $8.12\sim12.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4a)。不同草地微斑块下土壤累积矿化量差异显著,黄帚橐吾斑块的有机碳累积矿化量最高,其次为珠芽蓼、原生植被和金露梅斑块,裸地斑块的有机碳累积矿化量最低。土壤有机碳累积矿化率为 $68.2\sim152.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ soc}$,不同草地微斑块下有机碳累积矿化率存在显著差异(图 4b)。土壤有机碳累积矿化量率均呈逐渐增加趋势,黄帚橐吾和裸地斑块的有机碳累积矿化率高于原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块(图 5, $P<0.05$)。

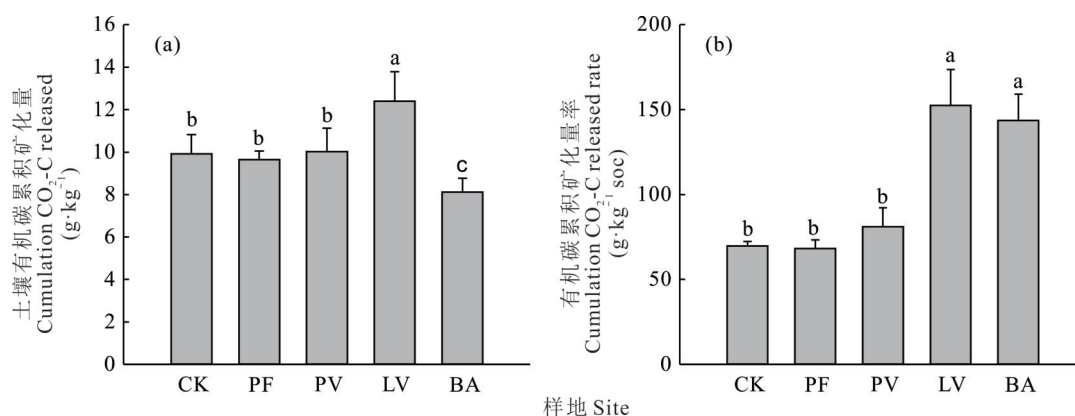


图 4 草地微斑块土壤有机碳累积矿化量和累积矿化量率

Fig. 4 Cumulative CO₂-C released and their ratios to SOC in grassland micro-patches

2.5 土壤有机碳累积矿化量和累积矿化率与土壤团聚体指标之间的关系

通过相关性和冗余分析,有机碳累积矿化量与大团聚体含量和团聚体的稳定性呈正相关,而与粘粉粒团聚体的含量和碳贡献率呈负相关($P<0.05$)。有机碳累积矿化量率与团聚体稳定性和团聚体碳氮比均呈负相关($P<0.01$)。有机碳累积矿化量率会随着大团聚体含量的增加而降低,而随着微团聚体和粘粉粒团聚体的含量和碳贡献率的增加而增加($P<0.05$,表 5,图 5)。

3 讨论

3.1 草地微斑块土壤团聚体的分布特征

土壤团聚体的含量和分布决定了土壤团聚体的稳定性和对养分的保护能力^[41]。本研究中,随着原生植被转变为单一植被斑块,大团聚体含量下降,微团聚体和粘粉粒团聚体含量上升(图 2),这可能与植被改变导致进入土壤的植物残体和植物根系分泌物等有机物存在差异有关。金露梅植物残体和根系分泌物的输入能够促进大团聚体形成,植物残体进入土壤可以为微生物生长提供充足的碳源,提高微生物的活性,从而使土壤有机物质转化成腐殖质成为土壤团聚体形成的基础^[42],而且植物的根系能够分泌大分子黏质,胶结土壤颗粒,促进土壤大团聚体的形成^[18]。因此,通常植物凋落物量和地上地下生物量和土壤大团聚体含量呈正相关^[18,43],本研究结果与其一

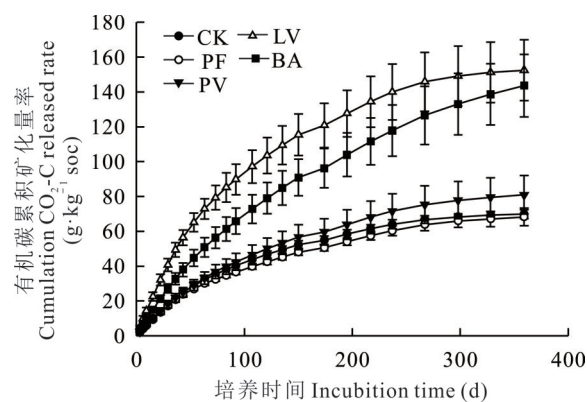


图 5 草地微斑块土壤有机碳的时间动态累积矿化量率

Fig. 5 Temporal dynamics of cumulative CO₂-C released ratios to SOC of grassland micro-patches

表5 草地植物微斑块团聚体与有机碳累积矿化量和累积矿化率的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of grassland micro-patches aggregates with cumulative mineralization and its rate

项目 Item	有机碳累积矿化量 Cumulation CO ₂ -C released	有机碳累积矿化量率 Cumulation CO ₂ -C released rate
大团聚体含量 Macro content	0.509*	-0.564**
微团聚体含量 Micro content	-0.325	0.480*
粘粉粒团聚体含量 S&C content	-0.563**	0.536*
平均重量直径 Mean weight diameter (MWD)	0.516*	-0.565**
几何平均直径 Geometric mean diameter (GMD)	0.527*	-0.577**
大团聚体碳含量 Carbon content in macro	0.137	-0.873**
微团聚体碳含量 Carbon content in micro	-0.143	-0.703**
粘粉粒团聚体碳含量 Carbon content in S&C	-0.679**	0.171
大团聚体碳贡献率 Percentage of soil C in macro	0.394	-0.345
微团聚体碳贡献率 Percentage of soil C in micro	-0.404	0.605**
粘粉粒团聚体碳贡献率 Percentage of soil C in S&C	-0.549*	0.554*
大团聚体碳氮比 C:N with macro	0.036	-0.799**
微团聚体碳氮比 C:N with micro	-0.047	-0.606**
粘粉粒团聚体碳氮比 C:N with S&C	0.195	-0.599**
有机碳含量 Soil organic carbon content	0.083	-0.916**

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

致,相关性分析表明地下生物量与大团聚体含量有显著的正相关关系(图6, $R^2=0.70$, $P<0.01$)。金露梅和珠芽蓼根系发达,其根系穿插土壤的过程能物理性破碎土壤颗粒,并通过根系分泌物中的羧酸类物质增强黏土颗粒表面负电荷,促进形成更稳定的微团聚体^[44]。黄帚橐吾根系分泌的有机酸(如草酸、柠檬酸)和酚类物质可溶解土壤矿物表面的钙、镁离子,促进黏土颗粒分散并与其他有机胶体结合,形成微团聚体^[45]。本研究中,除了金露梅斑块外,原生植被改变后土壤有机碳含量显著降低了12.69%~60.09%,导致了土壤大团聚体含量降低。毛艳玲等^[46]研究也表明土壤有机碳含量与大团聚体含量呈正相关。土壤质地是影响土壤团聚体形成及分布的另一重要因素,胡宁等^[47]研究表明粘粒是大粒径团聚体形成过程中的主要胶结物质。原生植被改变后土壤大团聚体含量降低也可能与其粘粒含量相对较低有关。

MWD和GMD是土壤团聚体稳定性评价的重要指标,土壤MWD和GMD值越大,团聚体稳定性越强^[48-49]。本研究发现,原生植被转向单一植被,土壤团聚体稳定性均有不同程度的降低,但仅与裸地斑块有显著的差异,这与大团聚体含量的变化趋势一致。一般认为,大团聚体含量与土壤稳定性成正比^[49-50],本研究也得到相同的结果。这表明草地微斑块化后更多的大团聚体被破坏分解释放向粒径小的团聚体转变,且团聚体稳定性下降,微团聚体胶结形成的大团聚体数量减少^[51]。这可能是由于随着原生植被的改变,植被的生物量和多样性下

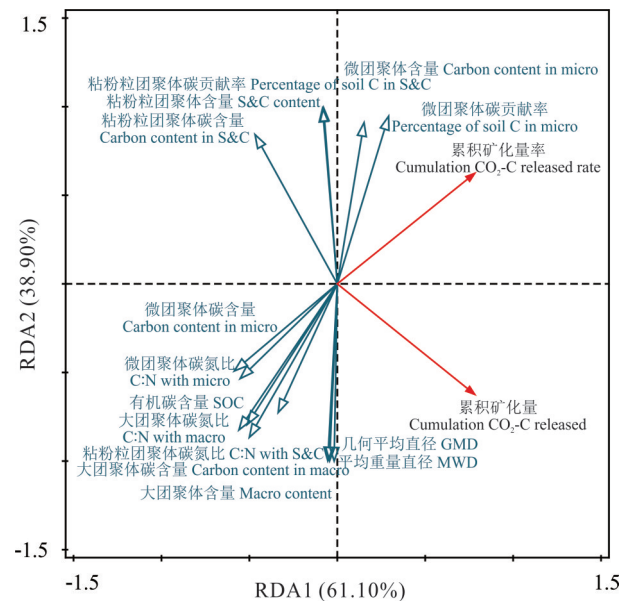


图6 草地植物微斑块团聚体与有机碳累积矿化量和累积矿化率的RDA分析

Fig. 6 RDA analysis of grassland micro-patches aggregates with cumulative mineralization and its rate

降,土壤有机碳含量减少(表 1 和表 2),有机碳作为团聚体形成的关键因素,有机碳含量的减少降低了土壤大团聚体含量,进而使团聚体的稳定性降低^[16,52]。

3.2 草地微斑块土壤团聚体的有机碳变化特征

团聚体对有机碳有保护作用,可以作为土壤有机碳的调节中心,不同粒径团聚体的有机碳含量、碳贡献率和碳氮比是反映土壤质量变化的重要指标,可较为准确地阐述不同植被变化对有机碳库的影响^[53-55]。本研究表明随着土壤团聚体粒径的减小,团聚体有机碳浓度呈现“V”型分布(图 3a),这与前人的研究结果一致^[8,42]。这可能是由于大团聚体能够将被有机质胶结的微团聚体和处于分解状态的根系和菌丝都包裹在内,提高了大团聚体中有机碳的含量^[56],而粘粉粒团聚体由有机和无机胶体与固持碳紧密结合形成,不易被微生物分解^[8],同时与粘粉粒结合的有机碳多为高度腐殖化的难分解碳^[57],因此粘粉粒团聚体有机碳含量较高。

原生植被微斑块的改变,会使土壤各粒径团聚体碳含量降低(图 3a),仅金露梅斑块大团聚体有机碳含量略高于原生植被,这可能是由于金露梅是落叶灌木,存在“沃岛效应”,金露梅斑块地上和地下生物量最高(表 1),碳输入土壤的含量较高,从而增加土壤团聚体中碳含量^[58]。本研究中各粒级团聚体碳含量均呈现珠芽蓼>黄帚橐吾>裸地。土壤有机质提高主要依靠有机残体的输入和有机残体的腐化,珠芽蓼斑块地上和地下生物量依次高于黄帚橐吾和裸地斑块(表 1),输入的有机碳在团聚体中积累^[59]。裸地斑块的团聚体有机碳含量显著最低,是由于裸地斑块的有机碳含量显著最低(表 2),裸地斑块的地下和地上生物量稀少(表 1),无任何外源碳投入会影响有机碳固存,土壤有机碳的匮乏也会造成团聚体中有机碳含量下降^[60]。

团聚体有机碳贡献率是团聚体碳占土壤有机碳的比重^[55],反映了土壤中团聚体对有机碳的固定和保护作用^[54]。本研究表明,随着粒径的减小团聚体碳贡献率降低(表 4)。这可能由于团聚体含量分布导致了团聚体碳贡献率随粒径由大到小逐渐降低,各植被微斑块均为大团聚体含量最高,粘粉粒团聚体含量最低。研究表明,团聚体含量是团聚体碳贡献率的关键影响因素,团聚体含量越高团聚体碳贡献率也越高^[18]。随着原生植被的改变,地下生物量随之减少,团聚体稳定性降低(表 1 和表 3),大团聚体向小粒径团聚体转变^[61],大团聚体中有机碳被释放,大团聚体碳贡献率降低,而大团聚体的破裂会使微团聚体和粘粉粒团聚体含量增加^[51],从而增加了微团聚体和粘粉粒团聚体的碳贡献率。本研究也表明各团聚体碳贡献率与其团聚体含量呈显著正相关关系(图 6)。

3.3 不同草地微斑块有机碳矿化特征及其影响因素

土壤有机碳矿化是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,其关系到植物营养元素的供应以及 CO₂向大气中的释放,与全球气候变化息息相关。土壤有机碳累积矿化率即土壤有机碳累积矿化量占土壤有机碳的比率,其更能反映土壤有机碳的稳定性及土壤的固碳能力^[62]。本研究中黄帚橐吾斑块和裸地斑块土壤有机碳累积矿化率显著高于其余 3 种斑块(图 4b),说明黄帚橐吾和裸地斑块土壤有机碳活性较高,而原生植被、金露梅和珠芽蓼斑块土壤有机碳更为稳定。这可能是由于原生植被转变为黄帚橐吾和裸地斑块,大团聚体被破坏,使原先被大团聚体保护的有机碳释放,从而增加了黄帚橐吾和裸地斑块有机碳累积矿化率。相关分析也表明土壤有机碳累积矿化率与大团聚含量以及土壤 MWD 和 GMD 显著负相关(表 5)。此外,黄帚橐吾和裸地微斑块较低的碳氮比也可能导致其累积矿化率较高,土壤碳氮比能反映土壤有机碳的质量,影响微生物活性,控制土壤有机物质的分解^[63],土壤碳氮比越低表明氮的可利用性越高,土壤有机物质分解越快^[30],本研究的相关性分析结果与其一致,各粒径团聚体碳氮比与累积矿化率呈显著负相关关系(表 5)。

4 结论

本研究结果表明:1)青藏高原草地微斑块化会使土壤大团聚体含量下降 11.08%~25.27%,微团聚体和粘粉粒团聚体含量上升,土壤团聚体稳定性(MWD 和 GMD)均有不同程度的降低。2)黄帚橐吾斑块土壤有机碳累积矿化量最高,为 12.38 g·kg⁻¹;裸地斑块最低,为 8.26 g·kg⁻¹;而土壤有机碳累积矿化率黄帚橐吾和裸地斑块显著高于其他斑块($P<0.05$)。草地微斑块中土壤团聚体的差异使土壤有机碳矿化改变,原生植被的改变使有机碳累积矿化量率在不同斑块中有不同程度的升高。3)大团聚体含量、团聚体稳定性、团聚体碳氮比和微团聚体碳贡献率是影响有机碳矿化的关键因素。本研究深入探讨了团聚体调控有机碳的作用机制,为准确地评估草地植被

变化对陆地生态系统碳循环产生的影响提供了科学依据。

参考文献 References:

- [1] Smith P. Soils as carbon sinks: The global context. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 25–36.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7–20.
- [3] He Y, Trumbore S E, Torn M S, *et al.* Radiocarbon constraints imply reduced carbon uptake by soils during the 21st century. *Science*, 2016, 353(6306): 1419–1424.
- [4] Jia J, Yu D P, Zhou W M, *et al.* Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 15–23.
- [5] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 345–353.
- [6] Rivera J I, Bonilla C A. Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. *Catena*, 2020, 187(2): 104–111.
- [7] Jiang L M, Bai G F, Lv G H, *et al.* Effects of different management modes on soil aggregate stability and physicochemical properties of grassland in arid area. *Journal of Agricultural Research in Arid Areas*, 2018, 36(4): 15–21, 39.
蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对于干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 15–21, 39.
- [8] Wang J Y, Zhang F H. Distribution of soil aggregates and aggregate-associated organic carbon from typical halophyte community in arid region. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 600–607.
王静娅, 张凤华. 干旱区典型盐生植物群落土壤团聚体组成及有机碳分布. *生态学报*, 2016, 36(3): 600–607.
- [9] 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. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31.
- [10] Li J Y, Yuan X L, Ge L, *et al.* Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 304(5): 28–36.
- [11] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595–605.
- [12] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 801–807.
- [13] Song L P, Luo Z Z, Li L L, *et al.* Effect of lucerne-crop rotations on soil physical properties in the semi-arid Loess Plateau of Central Gansu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(7): 12–20.
宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿—作物轮作对土壤物理性质的影响. *草业学报*, 2015, 24(7): 12–20.
- [14] Wang R Z, Chen Y, Li T, *et al.* Root distribution characteristics of *Vetiveria zizanioides* and *Digitaria sanguinalis* and their effects on the anti-erodibility of purple soil in slopeland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(7): 45–54.
王润泽, 湛芸, 李铁, 等. 香根草和马唐的根系特征及对坡地紫色土抗侵蚀性的影响. *草业学报*, 2017, 26(7): 45–54.
- [15] Luo N, Shu Y G, Chen M J, *et al.* Soil structure and fractal characteristics of different land categories in a karst rocky desertification area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(7): 11–22.
罗楠, 舒英格, 陈梦军, 等. 喀斯特山区不同草地土壤结构及分形特征. *草业学报*, 2020, 29(7): 11–22.
- [16] Luo Y J, Zhao G, Gao M, *et al.* Organic carbon distribution in aggregates and soil organic carbon mineralization in different vegetation covering. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 117–122.
罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 117–122.
- [17] Amelung W, Zech W. Organic species in ped surface and core fractions along a climosequence in the prairie, North America. *Geoderma*, 1996, 74(3/4): 193–206.
- [18] Song R, Liu L, Ma L Y, *et al.* Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(3): 93–97.
宋日, 刘利, 马丽艳, 等. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响. *南京农业大学学报*, 2009, 32(3): 93–97.
- [19] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, *et al.* Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate

- stability and shear strength. *Catena*, 2011, 87(1): 60–69.
- [20] Gould I J, Quinton J N, Weigelt A, *et al.* Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1140–1149.
- [21] Kumar A, Dorodnikov M, Splettstosser T, *et al.* Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil. *Geoderma*, 2017, 306(3): 50–57.
- [22] Wang Y. Study on quantity characteristics and species composition of three vegetation patches in alpine meadow on the Northeast Range of Tibet Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
王莹. 青藏高原东北缘高寒草甸三种植被斑块数量特征及物种构成研究. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [23] Zhang W G, Huang W B, Yang Z Y. The study on the relationship between mini-patch and degradation of pasture. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 5(3): 44–50.
张卫国, 黄文冰, 杨振宇. 草地微斑块与草地退化关系的研究. *草业学报*, 2003, 5(3): 44–50.
- [24] Lin L, Cao G M, Fan B, *et al.* Effects of grazing on mini-patch and their component characteristics in alpine grassland. *Grassland and Turf*, 2021, 41(4): 143–153.
林丽, 曹广民, 樊博, 等. 放牧对高寒草地微尺度斑块及其构件特征的影响. *草原与草坪*, 2021, 41(4): 143–153.
- [25] Huo J J, Zhu J F, Song M H, *et al.* Characteristics of vegetation patches in the process of degradation succession in an alpine meadow on Tibet Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3113–3118.
霍佳娟, 朱珏妃, 宋明华, 等. 青藏高原高寒草甸退化演替进程中植被斑块特征. *草地学报*, 2022, 30(11): 3113–3118.
- [26] Du Y X, Kang Y M, Niu Y B, *et al.* Soil microflora characteristics under different vegetation patches in a desert steppe of Ningxia, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3057–3065.
杜雅仙, 康扬眉, 牛玉斌, 等. 宁夏荒漠草原不同植物群落微斑块内土壤微生物区系特征. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3057–3065.
- [27] Wu Y N, Luo W T, Huo G W, *et al.* Micro-scale spatial heterogeneity of vegetation community and soil organic matter under different grazing intensities. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4): 972–979.
乌云娜, 雒文涛, 霍光伟, 等. 微生境尺度上放牧退化草原群落特征与土壤有机质的空间分异性. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 972–979.
- [28] Shi M M, Zhang Y C, Zhang D Y, *et al.* Plant traits and soil properties in pasture mini-patches in an alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(9): 197–205.
石明明, 张永超, 张典业, 等. 高寒草甸草地微斑块植物特征及其土壤性质的研究. *草业学报*, 2015, 24(9): 197–205.
- [29] Wang Y, Niu D, Yuan X B, *et al.* Dominant plant species alter stoichiometric imbalances between soil microbes and their resources in an alpine grassland: Implications for soil microbial respiration. *Geoderma*, 2023, 431(3): 116336–116350.
- [30] Xu X, Shi Z, Li D J, *et al.* Soil properties control decomposition of soil organic carbon: Results from data-assimilation analysis. *Geoderma*, 2016, 262: 235–242.
- [31] Cui Y T, Wang C Y, Yao J H, *et al.* Effects of different screening methods on soil aggregates and soil microbial communities. *Chinese Journal of Soil and Fertilizer*, 2024, 5(1): 37–42.
崔炎田, 王呈玉, 姚俊红, 等. 不同筛分方式对土壤团聚体及土壤微生物群落的影响. *中国土壤与肥料*, 2024, 5(1): 37–42.
- [32] Liu X, Wu H Y, Yang S, *et al.* Formation of soil aggregates and distribution of soil nutrients in rhizosphere of salt-tolerant trees in coastal polder reclamation. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1270–1279.
刘星, 吴华勇, 杨升, 等. 海涂围垦区不同耐盐树种根际土壤团聚体形成及养分分布特征. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1270–1279.
- [33] Wang X Y, Gao X F, Liu H P, *et al.* Review of analytical methods for aggregate size distribution and water-stability of soil macro-aggregates. *Chinese Journal of Water and Soil Conservation*, 2011, 9(3): 106–113.
王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 106–113.
- [34] Nelson D W, Sommers L E, Sparks D L, *et al.* Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of Soil Analysis*, 1996, 9: 961–1010.
- [35] Bremer D J, Ham J M, Owensby C E, *et al.* Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(6): 1539–1548.
- [36] Li Y H, Shahbaz M, Zhu Z K, *et al.* Oxygen availability determines key regulators in soil organic carbon mineralisation in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153(5): 108–117.

- [37] Muhammad N A, Gao J, Wu L, *et al.* Soil microbial biomass and extracellular enzyme-mediated mineralization potentials of carbon and nitrogen under long-term fertilization (>30 years) in a rice-rice cropping system. Springer Nature Link, 2021, 21(13): 3789–3800.
- [38] Beare M H, Hendrix P F, Coleman D C. Water-stable aggregates and organic-matter fractions in conventional-tillage and no-tillage soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 777–786.
- [39] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. Soil & Tillage Research, 1988, 11(3/4): 199–238.
- [40] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. Soil & Tillage Research, 1998, 49(3): 173–183.
- [41] Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 364–372.
邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布. 生态学报, 2006, 26(2): 364–372.
- [42] Ma R P, An S S, Dang T H, *et al.* Soil organic carbon and enzymatic activity in aggregates of soil under different plant communities in Hilly-Gully regions of Loess Plateau. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 104–113.
马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究. 土壤学报, 2014, 51(1): 104–113.
- [43] Luo Y J, Wei C F, Li Y, *et al.* Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 257–266.
罗友进, 魏朝富, 李渝, 等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响. 生态学报, 2011, 31(1): 257–266.
- [44] Su Y Z, Chang X X, He Z B, *et al.* Changes in vegetative patches and characteristics in soil properties in the valleys of Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2008(1): 212–219.
苏永中, 常学向, 何志斌, 等. 祁连山典型流域谷地植被斑块演变与土壤性状. 生态学报, 2008(1): 212–219.
- [45] Wang Y Q. Study on relationship between the patch density of *Ligularia virgaurea* and vegetation and soil in alpine meadow. Xining: Qinghai University, 2023.
王玉琴. 黄帚橐吾斑块密度与高寒草甸植被和土壤的关系研究. 西宁: 青海大学, 2023.
- [46] Mao Y L, Yang Y S, Zou S Q, *et al.* Effects of land use on soil organic carbon in aggregates of Hilly Red soil in Subtropical China. Journal of Mountain Science, 2007, 25(6): 706–713.
毛艳玲, 杨玉盛, 邹双全, 等. 土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响. 山地学报, 2007, 25(6): 706–713.
- [47] Hu N, Ma Z M, Lan J C, *et al.* Nitrogen fraction distributions and impacts on soil nitrogen mineralization in different vegetation restorations of karst rocky desertification. Environmental Science, 2015, 36(9): 3411–3421.
胡宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究. 环境科学, 2015, 36(9): 3411–3421.
- [48] Ma X J, Guo Y J, Zhang J Y, *et al.* Size distribution of soil aggregates in different grassland desertification categories in Yanchi County, Ningxia. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(3): 27–37.
马晓静, 郭艳菊, 张嘉玉, 等. 宁夏盐池县沙化草地土壤团聚体分异特征. 草业学报, 2020, 29(3): 27–37.
- [49] Su J, Zhao S W. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability. Journal 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. 水土保持通报, 2009, 29(5): 114–117.
- [50] Huang Z, Tian F P, Liu Y, *et al.* Effects of different grassland types on particle size distribution and stability of water stable aggregate on the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(11): 216–221.
黄泽, 田福平, 刘玉, 等. 黄土高原不同草地类型对水稳性团聚体粒径分布及稳定性的影响. 草业学报, 2017, 26(11): 216–221.
- [51] Zhang X R, Zhang W Q. Research progress of soil aggregates. Northern Horticulture, 2020, 2(21): 131–137.
张旭冉, 张卫青. 土壤团聚体研究进展. 北方园艺, 2020, 2(21): 131–137.
- [52] Chen S, Sun T. Research of soil aggregate stability in different degradation stages of Songnen grassland. Pratacultural Science, 2017, 34(2): 217–223.
陈帅, 孙涛. 松嫩草地不同退化阶段的土壤团聚体稳定性. 草业科学, 2017, 34(2): 217–223.
- [53] Jiang L M, Yang X D, Yang J J, *et al.* Effects of different management strategies on soil organic carbon and nitrogen pools in arid areas and their influencing factors. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(12): 22–33.

- 蒋腊梅, 杨晓东, 杨建军, 等. 不同管理模式对干旱区草地土壤有机碳氮库的影响及其影响因素探究. 草业学报, 2018, 27(12): 22—33.
- [54] Xu D M, Xu X Z, Wang G H, *et al.* Variations in soil organic carbon content and distribution during natural restoration succession on the desert steppe in Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8): 35—42.
- 许冬梅, 许新忠, 王国会, 等. 宁夏荒漠草原自然恢复演替过程中土壤有机碳及其分布的变化. 草业学报, 2017, 26(8): 35—42.
- [55] Zhang S, Wang L C, Du J, *et al.* Effects of different crops and straw mulching on soil aggregate and carbon sequestration potential in the dryland, triple cropping systems of Southwest China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(1): 98—107.
- 张赛, 王龙昌, 杜娟, 等. 西南“旱三熟”区不同作物和秸秆覆盖对土壤团聚体及固碳潜力的影响. 草业学报, 2016, 25(1): 98—107.
- [56] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 702—709.
- 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 702—709.
- [57] Li N, Zhang Y H, Han X Z, *et al.* Effects of long-term vegetation cover changes on the organic carbon fractions in soil aggregates of mollisols. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(7): 624—634.
- 李娜, 张一鹤, 韩晓增, 等. 长期不同植被覆盖对黑土团聚体内有机碳组分的影响. 植物生态学报, 2019, 43(7): 624—634.
- [58] Peng C J, Song M H, Zhou C L, *et al.* Relationship between leaf functional traits of herbaceous plants and soil factors in different coverage gradients of *potentilla fruticosa* shrub under grazing. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(5): 870—881.
- 朋措吉, 宋明华, 周春丽, 等. 放牧影响下不同盖度金露梅灌丛草本植物叶功能性状与土壤因子的关系. 西北植物学报, 2020, 40(5): 870—881.
- [59] Liu Q, Li Y H, Li Z, *et al.* Characteristics of paddy soil organic carbon mineralization and influencing factors under different water conditions and microbial biomass levels. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2440—2448.
- 刘琪, 李宇虹, 李哲, 等. 不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征. 环境科学, 2021, 42(5): 2440—2448.
- [60] Wang C T, Long R J, Ding L M. Characteristics of clonal growth of *Ligularia virgaurea* to different elevation gradient on alpine meadow. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 5(10): 1805—1809.
- 王长庭, 龙瑞军, 丁路明. 高寒草甸不同海拔梯度下多年生黄帚橐吾的克隆生长特征. 西北植物学报, 2004, 5(10): 1805—1809.
- [61] Qi Z C, Chang P J, Li Y S, *et al.* Effects of grazing intensity on soil aggregates composition, stability, nutrients and C/N in desert shrubland. *Arid Zone Research*, 2021, 38(1): 87—94.
- 祁正超, 常佩静, 李永善, 等. 放牧对荒漠灌丛草地土壤团聚体组成及其稳定性的影响. 干旱区研究, 2021, 38(1): 87—94.
- [62] Miao S J, Zhou L R, Qiao Y F, *et al.* Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregate as affected by long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1068—1075.
- 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响. 土壤学报, 2009, 46(6): 1068—1075.
- [63] Chen J, Zhou X, Wang J, *et al.* Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a meadow grassland on the Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(3): 675—687.