

DOI: 10.5846/stxb202011132940

宋小艳, 王长庭, 胡雷, 刘丹, 陈科宇, 唐国. 若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳的变化. 生态学报, 2022, 42(4): 1538-1548.

Song X Y, Wang C T, Hu L, Liu D, Chen K Y, Tang G. Changes in soil aggregate-associated organic carbon of degraded alpine meadow in the Zoigê Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1538-1548.

若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳的变化

宋小艳, 王长庭*, 胡 雷, 刘 丹, 陈科宇, 唐 国

西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

摘要:选取若尔盖沼泽化草甸及其不同退化程度为研究对象,利用湿筛法进行团聚体分级,并测定各组分有机碳含量,研究了高寒草甸退化对土壤有机碳(SOC, Soil Organic Carbon)、团聚体以及团聚体结合有机碳(OC, Organic Carbon)的影响,旨在从土壤团聚体及其内部组成的角度去解析SOC的变化特征及机制。结果显示:1)退化使大团聚体比例降低且内部组成改变,团聚体稳定性降低。2)退化使各粒级团聚体及大团聚体内部组分结合OC含量均显著降低。3)大团聚体及其内部粗颗粒有机质中OC储量减少是退化中土壤有机碳流失的主要形式,微团聚体、闭蓄态微团聚体和闭蓄态黏粉粒中OC储量随退化增加。4)退化显著降低了高寒草甸SOC含量和储量,表层(0—10 cm)SOC含量变化主要决定于微团聚体和大团聚体OC含量,亚表层(10—20 cm)SOC含量主要受大团聚体OC含量和团聚体平均重量直径(MWD)影响;对于SOC储量,团聚体MWD是表层SOC储量的最重要影响因素,而亚表层SOC储量取决于团聚体组成、土壤理化性质和大团聚体OC含量的综合作用。研究结果表明,改善土壤团聚体组成和稳定性,增加大团聚体有机碳可能是提高土壤养分供应,提升土壤有机碳水平,从而恢复退化草地生产力和功能的重要途径。

关键词:草地退化;退化草地恢复;土壤团聚体稳定性;团聚体结合有机碳;若尔盖湿地

Changes in soil aggregate-associated organic carbon of degraded alpine meadow in the Zoigê Plateau

SONG Xiaoyan, WANG Changting*, HU Lei, LIU Dan, CHEN Keyu, TANG Guo

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

Abstract: Soil aggregate is a basic unit of soil structure. The physical isolation of soil aggregate is the most important mechanism for soil to protect organic carbon from being decomposed by microorganisms. The effects of soil aggregates to maintain the stability of soil organic carbon even exceed the decomposability of organic carbon itself. Meanwhile, the distribution of organic carbon in soil aggregates and the stability of soil aggregate are closely related to the magnitude and stability of soil organic carbon pool, thus they can explain the change in soil organic carbon pool under the changing environment. Zoigê wetland, the most typical plateau wetland in the world, is the birthplace of the Yangtze and Yellow Rivers and stores a large of soil organic carbon. Since the 1960s, the Zoigê wetland has undergone extensive degradation which led to the decomposition of peat and the acceleration of carbon release. However, there are few research on the changes in organic carbon distribution in soil aggregates and its relationship with the changed soil organic carbon pool under alpine meadow degradation. Therefore, we investigated the soil organic carbon (SOC), soil aggregate, and aggregate-associated organic carbon in an alpine meadow and its adjacent degraded sites under the degree of light degradation (LD), moderate degradation (MD), severe degradation (SD), and extreme degradation (ED) in the Zoigê Plateau to explain the

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC0507701);国家自然科学基金(U20A2008, 31870407);西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2020NYBPY06)

收稿日期:2020-11-13; 网络出版日期:2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangct@swun.edu.cn

mechanism of soil organic carbon pool change and support for the restoration and management of alpine meadow. Wet sieving was used to analyze soil aggregate. The results showed that 1) the aggregate stability and the mass proportion and internal composition of the macroaggregate decreased with degradation, 2) the OC concentration of all size aggregate particles and internal fractions of macroaggregate also decreased with degradation, 3) although the OC stocks in free microaggregate, occluded microaggregate and occluded silt and clay increased with degradation, the decreased SOC was mainly resulted from the decrease of OC stocks in macroaggregate and coarse particulate organic matter, 4) in the surface soil (0—10 cm), the decreased SOC concentration was mainly due to the changes of OC concentration of microaggregate and macroaggregate, while it was the OC concentration of macroaggregate and the aggregate mean weight diameter (MWD) dominating the changes of SOC concentration in the subsurface soil (10—20 cm). Moreover, the SOC stocks in the 0—10 cm soil depth was largely affected by aggregate MWD, but that in the 10—20 cm soil depth was the result of the combination of aggregate structure, soil physicochemical properties and OC concentration of macroaggregate. Overall, improving the composition and stability of soil aggregates and increasing the macroaggregate-associated OC could increase the nutrient supply for plants and the SOC stocks, and ultimately could restore the productivity and function of the degraded alpine meadow.

Key Words: grassland degradation; restoration of degraded grassland; soil aggregate stability; aggregate-associated carbon; Zoigê wetland

草地生态系统是我国面积最大的陆地生态系统类型,占我国国土面积的 40%^[1]。然而,受过度放牧和气候变化的影响,我国草地生态系统正面临面积减少、生产力降低、退化程度加剧等一系列严重生态问题^[2-4]。面对严峻的草地退化形势,草地恢复已迫在眉睫,这就要求我们对草地退化的过程和机制进行深入探索,为草地恢复提供理论支撑。

土壤有机碳在草地退化过程中流失严重,成为制约草地恢复的重要因子^[5-7]。作为土壤中稳定而长效的碳源物质,土壤有机碳对土壤肥力保持起着重要作用,是土壤质量的重要组成部分,具有维持生态系统生产力和稳定性的重要功能^[8-9]。同时,全球土壤碳库达 1500—2400 Pg,超过大气碳库的 2 倍,对全球气候变化起着重要调节作用^[10]。由于草地生态系统 96.6%的碳储存于土壤中,土壤是草地生态系统碳库的最主要载体^[11],土壤有机碳库对于草地生态系统的生态意义尤其关键。土壤有机碳的分解或保存与分解者和胞外酶与有机碳的可接触性有关,由有机碳在土壤基质中的空间分布(团聚体分布)决定^[12]。团聚体作为土壤结构的基本单元,是土壤保护有机碳不被微生物分解,维持土壤有机碳稳定性的最重要机制,甚至超过有机碳本身可分解性的影响^[12]。因此,土壤团聚体稳定性以及有机碳的团聚体分布与土壤有机碳库大小及稳定性密切相关^[8, 13],从而可以解释土壤有机碳库的变化特征及可能机制。虽然,已有研究关注草地退化过程中土壤有机碳及其组分^[14-15]、团聚体稳定性^[16-17]以及团聚体结合有机碳^[8, 18]的变化,但仍缺乏从团聚体有机碳及其内部组成的角度去解析土壤有机碳流失特征及其机制的研究。

位于青藏高原东缘的若尔盖湿地是世界上最典型的高原湿地,不仅是长江、黄河的发源地和我国的重要生态屏障,土壤有机碳储量巨大^[5],还是重要的畜牧业基地。但自 20 世纪 60 年代以来,若尔盖湿地已发生大面积退化,泥炭分解和碳释放加速^[19]。而关于若尔盖高寒草甸退化的研究主要集中在退化原因的探讨^[20-21],退化高寒草甸的恢复^[22-23],土壤有机碳及其组分含量、储量及其分布特征^[24],鲜有关于高寒草甸退化下土壤团聚体有机碳变化及其与土壤有机碳库关系的研究报道。因此,本文以若尔盖湿地上发育的沼泽化草甸及其不同退化程度为研究对象,从团聚体有机碳及其内部组成的角度去解析草甸退化过程中土壤有机碳流失特征及其机制,以期为高寒草甸的恢复和科学管理提供理论支持,同时,本研究结果可为基于分组的土壤有机碳周转模型提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州若尔盖县境内,地处青藏高原东北边缘。若尔盖县地理位置为东经 102°08′—103°39′,北纬 32°56′—39°19′,平均海拔 3500 m。气候属于高原大陆性气候,长冬无夏,春秋短促。年平均气温为 0.6—1.2℃,1 月最冷月的多年平均气温为-10.6℃,7 月最热月的多年平均气温为 10.8℃。多年平均年降水量 600—750 mm,多集中于 5 月下旬至 7 月中旬。年日照时数约为 2389 h,年平均蒸发量约为 1232 mm,相对湿度约为 71%。高寒草甸是若尔盖县最主要的草地类型,占可利用草地面积的 65.5%^[25]。

1.2 样地设置与采样

于 2019 年 8 月下旬,在若尔盖县境内选取高寒沼泽化草甸,作为未退化(Undegraded meadow, UD)样地,然后参照许鹏^[26]、李春秀和孙海松^[27]有关沼泽化草甸退化等级的划分方法,根据植物的群落组成、盖度和地上生物量的变化(表 1),分别选取轻度退化(Light degradation, LD)、中度退化(Moderate degradation, MD)、重度退化(Severe degradation, SD)和极度退化(Extreme degradation, ED)样地,样地面积 10 m×10 m。以同样的标准在若尔盖县境内选取这样的退化系列 3 个,即 3 个重复。

表 1 各样地植被特征和土壤理化性质

Table 1 Plant characteristics and soil physicochemical properties of the study sites

项目 Item	UD	LD	MD	SD	ED
植物种类 Number of species/种	12±2a	12±1a	8±1a	3±1b	3±1b
地上生物量 Aboveground biomass/(g/0.25m ²)	88.89±17.56a	46.08±9.08ab	54.16±6.46ab	30.58±2.66bc	19.94±2.23c
盖度 Coverage/%	97±1a	94±2ab	94±2ab	43±9bc	32±9c
禾本科盖度 Coverage of grass/%	8±2bc	6±1bc	45±5a	4±3c	17±2ab
莎草科盖度 Coverage of sedge/%	65±5a	60±3a	24±19ab	0±0b	3±3b
杂类草盖度 Coverage of forbs/%	53±9ab	56±9a	46±7ab	45±10ab	14±8b
土壤 含水量 Water content/(g/g)	3.00±0.29a	1.66±0.09b	0.70±0.01c	0.34±0.02c	0.13±0.02c
0—10 cm 土壤密度 Bulk density/(g/cm ³)	0.43±0.06d	0.68±0.07cd	1.10±0.05c	2.10±0.15b	2.61±0.12a
pH	6.64±0.02c	6.77±0.16c	6.97±0.14bc	7.33±0.03b	8.66±0.07a
土壤有机碳含量 Soil organic carbon concentration/(g/kg)	282.57±6.58a	166.60±28.14b	68.93±5.53bc	48.30±1.44c	10.00±0.23d
土壤有机碳储量 Soil organic carbon stocks/(kg/m ²)	12.02±1.42a	11.15±1.47ab	7.52±0.30bc	10.11±0.44ab	2.61±0.16c
全氮含量 Total nitrogen concentration/(g/kg)	19.37±0.30a	12.07±2.09b	4.83±0.50bc	3.13±0.23c	0.20±0.00d
碳氮比 C/N ratio	14.59±0.19b	13.71±0.04b	14.33±0.35b	14.91±0.20b	50.00±1.15a
土壤 含水量 Water content/%	3.06±0.49a	1.26±0.02ab	0.34±0.02bc	0.32±0.04bc	0.18±0.04c
10—20 cm 土壤密度 Bulk density/(g/cm ³)	0.49±0.08d	0.94±0.05c	1.86±0.07b	2.15±0.09b	2.62±0.03a
pH	6.64±0.04d	6.82±0.12cd	7.22±0.13bc	7.50±0.04b	8.60±0.09a
土壤有机碳含量 Soil organic carbon concentration/(g/kg)	224.97±22.10a	49.20±10.65b	44.93±4.85b	27.37±1.34b	11.77±0.65b
土壤有机碳储量 Soil organic carbon stocks/(kg/m ²)	10.89±1.62a	4.53±0.84bc	8.30±0.55ab	5.91±0.53bc	3.08±0.20c
全氮含量 Total nitrogen concentration/(g/kg)	15.90±1.33a	3.13±0.72b	2.77±0.20b	1.73±0.09bc	0.33±0.03c
碳氮比 C/N ratio	14.11±0.25c	15.86±0.38ab	15.61±0.16bc	15.79±0.25abc	35.61±1.70a

UD: 未退化样地 Undegraded meadow; LD: 轻度退化 Light degradation; MD: 中度退化 Moderate degradation; SD: 重度退化 Severe degradation; ED: 极度退化 Extreme degradation; 不同字母表示不同退化程度间差异显著 ($P<0.05$); 表中数据为平均值±标准差 ($n=3$)

未退化的沼泽化草甸植被以西藏嵩草(*Kobresia tibetica*)占绝对优势,并伴生草地早熟禾(*Poa pratensis*)、川西剪股颖(*Agrostis hugoniana* var. *aristata*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等禾草以及鹅绒委陵菜(*Potentilla*

anserina)、驴蹄草(*Caltha palustris*)、美丽风毛菊(*Saussurea pulchra*)等杂类草,植被生长茂密,盖度 85%—95%,土壤为高寒沼泽土。轻度退化下,植被盖度及组成基本正常,伴生植物成分变化不明显,草地无积水或趋于消失。中度退化下,植被盖度变化不明显但伴生植物成分出现变化,矮生蒿草(*Kobresia humilis*)和禾本科植物呈增加趋势,土壤含水量降低。重度退化下,植被盖度显著降低,地上生物量显著下降,伴生植物成分变化明显,西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)、密花香薷(*Elsholtzia densa*)、草玉梅(*Anemone rivularis*)、鹅绒委陵菜等杂类草明显增加。极度退化下,群落盖度急剧下降(不足 45%)且植物种类非常少,地上生物量最低,土壤沙化现象明显。不同退化梯度下具体植被和土壤概况见表 1。

在每个样地内,“S”形布置 5 个 50 cm×50 cm 的样方。首先对样方内植被进行群落调查,用收获法测定地上生物量。然后分土层(0—10 cm, 10—20 cm)采集原状土样。原状土放入塑料盒内小心保存和运输,防止挤压和碰撞对土壤结构的影响。带回实验室后,立即去掉根系和杂质,沿土样自身的缝隙轻轻掰成小块(<8 mm),然后将每个样地中采集的 5 个原状土等量混合,自然风干。

1.3 室内测试

称取 100 g 风干土样,首先采用湿筛法将土样筛分为:大团聚体(>0.25 mm),微团聚体(0.053—0.25 mm)和黏粉粒(<0.053 mm)。然后,将得到的大团聚体组分进行进一步地筛分,获得粗颗粒有机质(cPOM;>0.250 mm),闭蓄态微团聚体(0.053—0.25 mm)以及闭蓄态黏粉粒(<0.053 mm)。所有组分 50℃ 烘干并称量。最后,将所有组分研磨过 0.053 mm 筛,采用 2400II CHNS/O 元素分析仪测定其有机碳和全氮含量。具体做法参考 Del Galdo 等^[28]。

1.4 数据分析

采用平均重量直径(MWD)和平均几何直径(MGD)来评价团聚体稳定性。其计算公式如下^[29]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i$$

$$MGD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right)$$

式中, w_i 表示第 i 粒径团聚体组分的质量占土壤总质量的重量百分比(%); x_i 表示第 i 粒径团聚体组分的平均直径(mm)。

土壤总有机碳储量(SOC-stock, kg/m²)计算如下^[30]:

$$SOC\text{-stock} = \frac{D \times BD \times SOC\text{-con}}{100}$$

式中, D 表示土层深度(cm); BD 和 $SOC\text{-con}$ 表示土壤密度(g/cm³)和土壤有机碳含量(g/kg)。

土壤各团聚体组分有机碳储量(Stock of OC_i , g/m²)计算如下^[30]:

$$Stock\ of\ OC_i = \frac{D \times BD \times w_i \times OC_i}{10}$$

式中, D 表示土层深度(cm); BD 表示土壤密度(g/cm³); w_i 表示第 i 粒径团聚体组分的质量占土壤总质量的重量百分比(%); OC_i 表示第 i 粒径团聚体组分测定得到的有机碳含量(g/kg aggregate)。

数据分析在 SPSS 23.0 中进行。采用单因素方差分析(one way-ANOVA)检验不同退化程度下植被地上生物量、盖度、土壤含水量、土壤密度、pH、全氮含量、C/N、团聚体组分重量百分比、MWD、MGD、总有机碳含量和储量以及各团聚体组分有机碳含量和储量的差异。采用逐步回归(stepwise regression;当 $F \leq 0.05$ 时进入, $F \geq 0.10$ 时去除)检验草甸退化过程中土壤总有机碳含量和储量变化与地上生物量、土壤理化性质、团聚体组成、MWD 及各组分有机碳含量变化间的关系。在逐步回归分析之前,采用主成分分析(PCA)对各团聚体组分重量百分比进行降维,取第一主成分代表团聚体组成(Fraction),对土壤 pH、BD 和土壤含水量进行降维,取第一主成分代表土壤理化性质(Soil)。相关图表制作在 Origin 9.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸退化对土壤团聚体组成的影响

如图 1 所示,未退化高寒草甸土壤团聚体组成中,以大团聚体占绝对优势(78%—89%),其次为微团聚体。随着高寒草甸的退化,大团聚体比例不断降低。在未退化草甸,cPOM 是构成大团聚体的主体,其次为闭蓄态微团聚体,剩下部分为闭蓄态黏粉粒。草地退化显著影响大团聚体内部组成,其中粗颗粒有机质显著降低,闭蓄态微团聚体显著增加。未退化草甸具有最大的平均重量直径(MWD)和平均几何直径(MGD),土壤团聚体稳定性最高(图 2)。草甸退化显著影响 MWD 和 MGD。随着退化加剧,MWD 和 MGD 不断降低,在极度退化下呈极低水平(0.15—0.16),团聚体组成巨变。

就土层而言,亚表层(10—20 cm)土壤团聚体分布、大团聚内部组成以及团聚体稳定性(MWD 和 MGD)对草甸退化的响应比表层(0—10 cm)更加敏感。轻度退化下亚表层土壤大团聚体比例就显著低于未退化草甸,且内部组成发生突变(cPOM 显著低于未退化草甸,闭蓄态微团聚体显著高于未退化草甸),同时,MWD 和 MGD 显著低于未退化草甸。

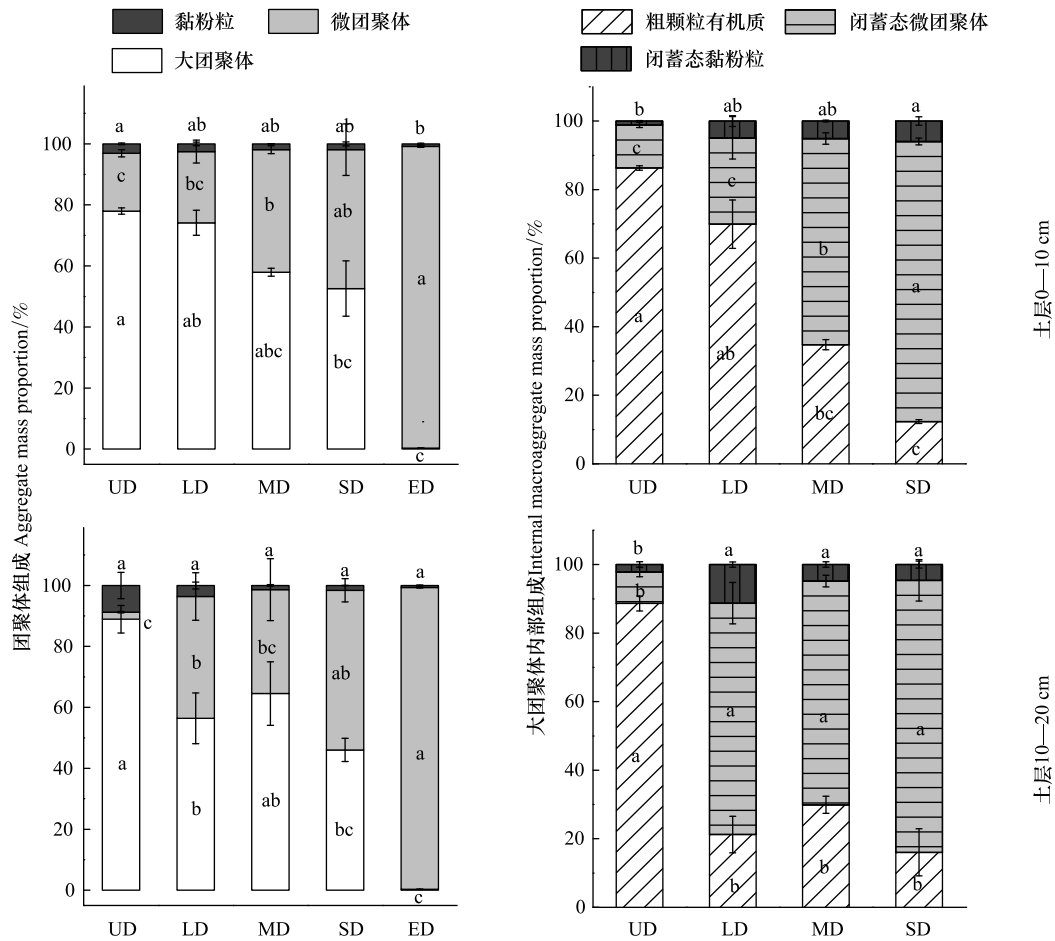


图 1 若尔盖不同退化程度高寒草甸土壤团聚体组成及大团聚体内部组成

Fig.1 Mass proportion of the soil aggregate and the internal macroaggregate of the alpine meadow under different degradation stages in Zoigê

不同字母表示不同退化程度间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$); UD: 未退化样地 Undegraded meadow; LD: 轻度退化 Light degradation; MD: 中度退化 Moderate degradation; SD: 重度退化 Severe degradation

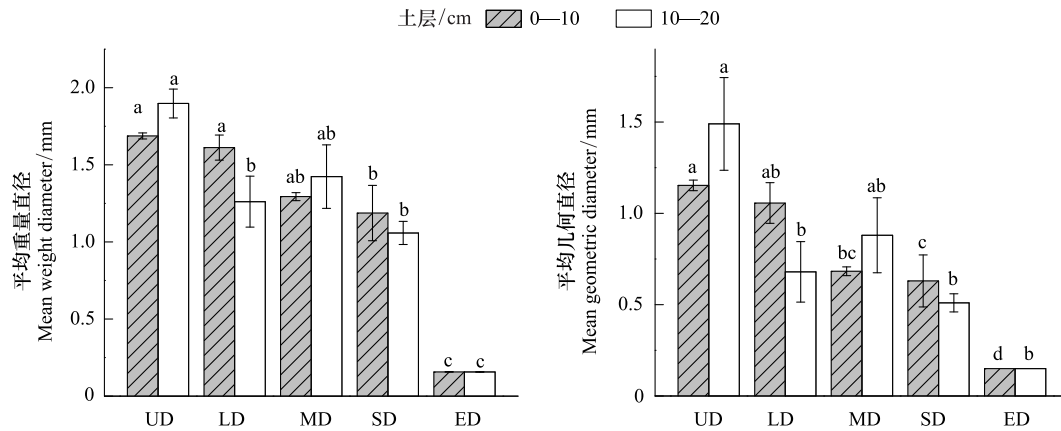


图 2 若尔盖不同退化程度高寒草甸土壤团聚体平均重量直径和平均几何直径

Fig.2 Soil aggregate mean weight diameter (MWD) and mean geometric diameter (MGD) of the alpine meadow under different degree of degradation in Zoigê

不同字母表示不同退化程度间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)

2.2 高寒草甸退化对团聚体结合有机碳的影响

如图 3 所示,高寒草甸土壤大团聚体、微团聚体与黏粉粒中结合 OC 含量,以及大团聚体内部各组分结合 OC 含量均对退化响应敏感,轻度退化下即显著降低 ($P < 0.05$)。相较于亚表层,表层土壤团聚体组分 OC 含量更高,二者均对退化响应敏感。对于表层土壤大团聚体 OC 含量,轻度、中度、重度、极度退化分别使其较未退化草甸显著降低 42%、78%、82%、85%。亚表层土壤大团聚体 OC 含量在轻度、中度、重度、极度退化下分别较

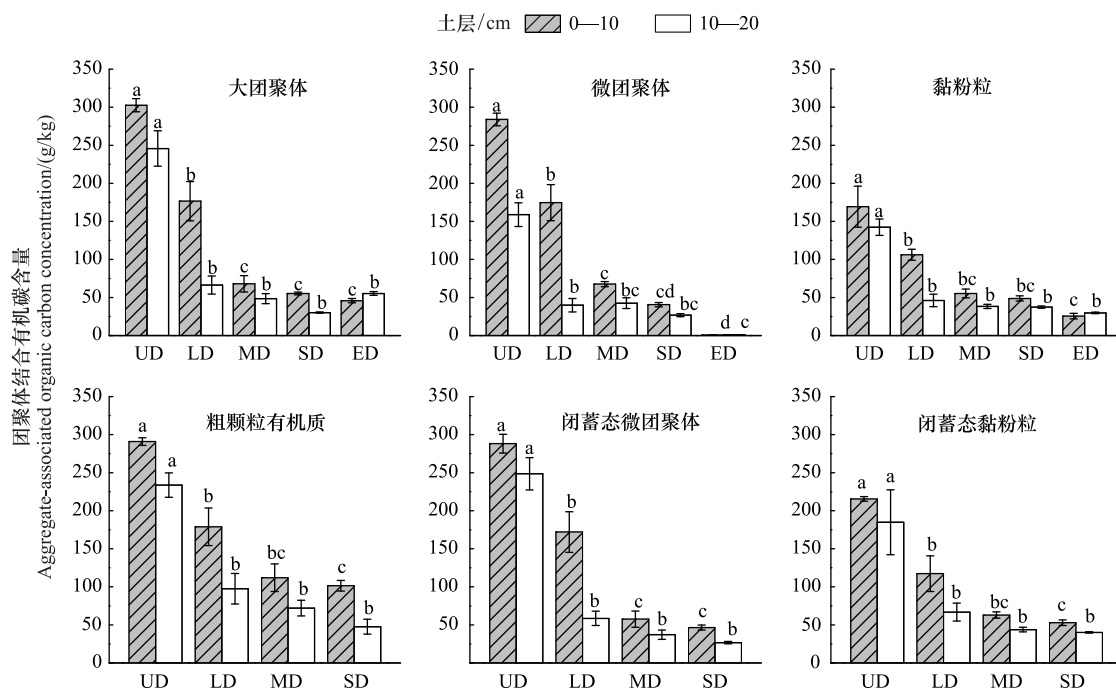


图 3 若尔盖不同退化程度高寒草甸土壤团聚体结合有机碳含量

Fig.3 Soil aggregate-associated organic carbon concentration of the alpine meadow under different degree of degradation in Zoigê

不同字母表示不同退化程度间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)

未退化草甸降低 73%、80%、88% 和 78%。草地退化引发大团聚体结合有机碳含量降低主要源于其内部组分中 OC 含量相对较高的 cPOM 占比降低。对于微团聚体和黏粉粒结合 OC 含量,草甸退化对其的影响与大团聚体结合 OC 含量类似。

如图 4 所示,大团聚体 OC 是未退化高寒草甸 SOC 储量的主体,其在土壤表层和亚表层 SOC 储量中分别占 80% 和 92%。草甸退化引发大团聚体 OC 储量降低,大团聚体 OC 储量在 SOC 储量中占比也相应下降,其占比在极度退化下仅为 13% (表层) 和 12% (亚表层)。同时,草甸退化还改变了大团聚体 OC 储量在其内部各组分间的分布情况:cPOM 中 OC 储量显著下降,闭蓄态微团聚体和闭蓄态黏粉粒中 OC 储量呈升高趋势 (土壤表层显著)。对于微团聚体 OC 储量,随退化程度加重 (未退化到重度退化) 先呈增加趋势,但在极度退化时显著降低。黏粉粒结合 OC 储量在 SOC 储量中占比较低,且受退化影响较小,仅极度退化下的表层土壤黏粉粒 OC 储量显著低于未退化草甸。

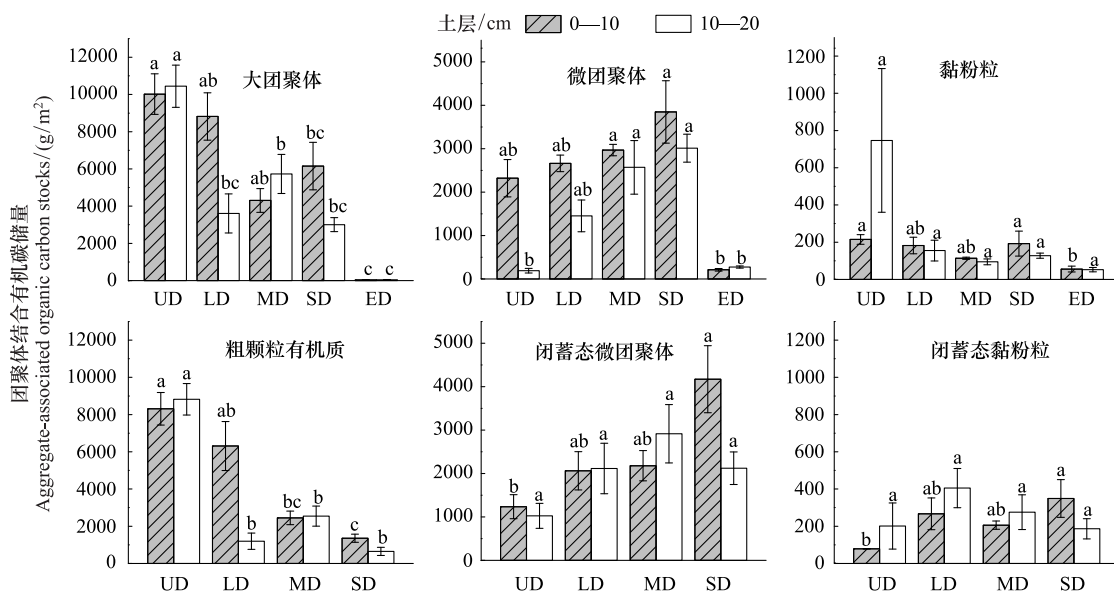


图 4 若尔盖不同退化程度高寒草甸土壤团聚体结合有机碳储量

Fig. 4 Soil aggregate-associated organic carbon stocks of the alpine meadow under different degree of degradation in Zoigê

不同字母表示不同退化程度间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)

2.3 高寒草甸退化下土壤有机碳的变化及其与植被、土壤性质和团聚体的关系

本研究中,退化显著降低了高寒草甸 SOC 含量,且随退化程度加剧 (表 1)。轻度、中度、重度和极度退化下表层 SOC 含量较未退化草甸分别下降 41%、76%、82% 和 96%;亚表层 SOC 含量分别下降 78%、80%、88% 和 95% (表 1)。相似地,退化使高寒草甸 SOC 储量也呈降低趋势,但退化程度间 SOC 储量的变化更为复杂 (表 1)。在土壤表层,中度和极度退化 SOC 储量显著低于未退化草甸,轻度和重度退化 SOC 储量与未退化草甸差异不显著 (表 1)。在土壤亚表层,轻度、重度和极度退化 SOC 储量显著低于未退化草甸,中度退化 SOC 储量与未退化草甸无显著差异 (表 1)。

通过 SOC 含量和 SOC 储量与地上生物量、土壤理化性质、团聚体组成、MWD 及各组分 OC 含量间的逐步回归分析 (表 2),结果表明:微团聚体 OC 含量和大团聚体 OC 含量是表层 SOC 含量变化的最重要影响因子 (校正 $R^2 = 0.997$),而亚表层 SOC 含量主要决定于大团聚体 OC 含量和团聚体 MWD (校正 $R^2 = 0.991$)。对于 SOC 储量,团聚体 MWD 是表层 SOC 储量的最重要影响因素 (校正 $R^2 = 0.779$),而亚表层 SOC 储量取决于团聚体组成、土壤理化性质和大团聚体 OC 含量的综合作用 (校正 $R^2 = 0.883$)。

表 2 土壤有机碳含量和储量与地上生物量、土壤理化性质、团聚体组成、平均重量直径及团聚体组分有机碳含量间的关系

Table 2 Regressions between the soil organic carbon concentration (and stocks) and aboveground biomass, soil physicochemical properties, aggregate structure, mean weight diameter, and aggregate fraction organic carbon concentration

土层/cm Soil layer	回归方程 Equation	解释变量(标准化系数) Explanatory variables (standardized coefficient)	df	校正 R^2 Adjusted R^2	F	P
0—10	SOC-con = 0.762 OC-con _{Fmicro} + 0.208 OC-con _{Macro} + 1.839	OC-con _{Fmicro} (0.793), OC-con _{Macro} (0.208)	14	0.997	2166.831	0.000
	SOC-stocks = 5.774 MWD + 1.826	MWD (0.891)	14	0.779	50.244	0.000
10—20	SOC-con = 0.842 OC-con _{Macro} + 27.266 MWD - 35.074	OC-con _{Macro} (0.859), MWD (0.207)	14	0.991	768.146	0.000
	SOC-stocks = 4.367 Fraction + 3.027 Soil + 0.017 OC-con _{Macro} - 0.155	Fraction (1.386), Soil (0.961), OC-con _{Macro} (0.451)	14	0.883	36.203	0.000

SOC-con, 土壤有机碳含量, soil organic carbon concentration (g/kg); SOC-stocks, 土壤有机碳储量, soil organic carbon stocks (g/m²); OC-con_{Fmicro}, 微团聚体有机碳含量, free microaggregate organic carbon concentration (g/kg); OC-con_{Macro}, 大团聚体有机碳含量, macroaggregate organic carbon concentration (g/kg); MWD, 团聚体平均重量直径, aggregate mean weight diameter; Fraction, 团聚体组成(对各团聚体组分重量百分比进行降维后的第一主成分, 第一主成分的解释率为83.9% (0—10 cm) 和 78.0% (10—20 cm)); Soil, 土壤理化性质(对土壤 pH、土壤密度和土壤含水量进行 PCA 降维后的第一主成分, 第一主成分的解释为 87.4% (0—10 cm) 和 87.3% (10—20 cm))

3 讨论

3.1 高寒草甸退化过程中土壤团聚体结合有机碳变化特征

团聚体是土壤结构的基本单元,其对有机碳的保护作用是土壤有机碳形成和稳定的重要机制^[12, 31—32]。因此,对团聚体分布及其有机碳变化特征的了解,有利于揭示土壤有机碳的变化过程及机制^[8, 13]。本研究中,大团聚体结合有机碳储量是土壤有机碳储量的主体,其在未退化高寒草甸表层和亚表层土壤有机碳储量中分别占 80% 和 92%。当草甸发生退化,大团聚体结合有机碳储量显著减少,成为土壤有机碳流失的主要形式(图 4)。大团聚体结合有机碳与土壤有机碳变化的紧密联系符合层级理论(即较大团聚体是由较小团聚体与有机胶结物质组成的^[33]),已在诸多历史研究中被发现^[30, 34—36]。草甸退化后大团聚体占比及其结合有机碳含量减少是大团聚体有机碳储量减少的主要原因,虽然 Dong 等^[8]发现退化草地具有更高的大团聚体有机碳含量。当草甸发生退化,降低的土壤含水量利于土壤有机质分解,导致对有机碳的保护性最弱的大团聚体结合有机碳首先被分解^[35];同时,退化导致的地上生物量下降减少了有机残体的输入,可能通过制约大团聚体形成中粗颗粒有机质的供应,使大团聚体形成受阻,从而导致大团聚体有机碳储量的显著减少^[31, 37]。根据大团聚内部组成变化,退化草甸土壤大团聚体内部 cPOM 比例显著降低(图 1),且 cPOM 有机碳储量与大团聚体有机碳储量随退化的变化趋势高度一致(图 4),验证了草甸退化后粗颗粒有机质供应对大团聚体形成的制约作用。

对于微团聚体有机碳储量,随着草甸退化程度加剧(未退化到重度退化)先呈增加趋势,但在极度退化时显著降低(图 4),这与退化过程中团聚体组成的变化紧密相关。尽管微团聚体结合有机碳含量随退化程度降低,随退化程度显著增加的微团聚体比例使得微团聚体有机碳储量呈增加趋势(图 1)。这是由于草甸退化造成大团聚体的破坏,导致微团聚体的释放,使得微团聚体比例增加^[38]。而对于土壤有机碳储量中占比较小的黏粉粒结合有机碳储量,受草甸退化影响较小,仅极度退化下的表层土壤黏粉粒有机碳储量显著低于未退化草甸。

综上,粗颗粒有机质的缺乏对大团聚体形成的制约可能是高寒草甸退化过程中团聚体组成改变和有机碳流失的重要原因,在退化早期人为补充有机残体,增加大团聚体的形成,增强土壤团聚体稳定性,可能是减缓草甸土壤退化的有效途径^[6, 13, 39]。苑亚茹等^[37]对农田恢复为草地后土壤有机碳变化的研究表明,总粗颗粒有机碳的增加是土壤有机碳积累的主要来源。King 等^[13]研究表明,土壤有机碳的增加,83% 来源于大团聚体

有机碳的增加。本研究中,轻度、中度和重度退化程度土壤仍保持一定的团聚体结构,在这些退化程度下,可以通过维持较高的土壤含水量来抑制有机碳分解和保育原生植被^[40],通过补植、降低牧压、牲畜粪便回归来提高有机残体输入^[41],以及通过施用真菌菌剂和增加根系等方式来增加大团聚体的形成和稳定^[31,42],从而减缓和治理该地区的草甸退化^[6]。当草甸已处于极度退化状态,土壤团聚体结构崩塌,沙化严重,此阶段植物的生长受到土壤条件的严重制约,其治理和恢复将更加困难和漫长^[43-44]。

3.2 高寒草甸退化过程中土壤有机碳的团聚体稳定机制变化

土壤有机碳的稳定机制主要包括:与黏粉粒结合的化学稳定机制,与微团聚体结合的物理保护机制,与有机质本身化学成分有关的生物化学稳定机制^[28,32,45]。化学稳定机制是土壤矿物和有机物质之间通过化学/物理键的相互作用形成的一种稳定机制。由于黏粉粒结合有机碳的化学稳定性主要决定于黏粒含量及其表面性质、黏土矿物组成(蒙脱石、高岭石、伊利石等)以及土壤中的金属氧化物(氧化铁、氧化铝、钙镁盐等)等不易改变的土壤性质,因此,受草甸退化影响小^[45],随草甸退化(除极度退化)变化不显著。对于极度退化下的表层土壤,由于土壤黏粉粒含量显著低于未退化草甸(图1),黏粉粒结合有机碳储量显著降低(图4)。

微团聚体结合有机碳具有更难分解的化学特性,被更好地物理化学保护,因此,其具有更长的周转时间,表现出更强的有机碳稳定性^[35]。王奥博^[24]研究发现,未退化湿地土壤团聚体固定有机碳以大团聚体包裹的物理机制为主,随着退化的加剧,转变为以微团聚体的物理化学机制为主。与王奥博^[24]研究结果一致,本研究发现随着高寒草甸退化加剧(除极度退化),微团聚体结合有机碳储量和占比均增加(图4),微团聚体对有机碳的物理化学保护随草甸退化增强。从大团聚体内部组成来看,闭蓄态微团聚体有机碳储量和闭蓄态黏粉粒有机碳储量随草甸退化增加(除极度退化),也体现出土壤有机碳的物理化学保护随退化增强。由于微团聚体结合有机碳周转慢,这预示着退化草甸土壤有机碳周转更慢,从而可能影响土壤养分供应,制约植物的生长^[38]。因此,在退化草甸的治理中,通过适当的施肥措施,有利于植物生长,从而可以在一定程度缓解和治理草甸退化^[6],本研究丰富了适当施肥能够缓解草地退化的理论依据。

3.3 高寒草甸退化过程中团聚体及其有机碳变化对土壤有机碳的贡献

高寒草甸土壤是重要的有机碳贮存库,但其有机碳含量和储量受草甸退化强烈影响^[18,24]。轻度退化即可导致土壤有机碳含量降低41%(表层)和78%(亚表层),且随退化程度不断加剧,极度退化可使土壤有机碳含量降低96%(表层)和95%(亚表层)。逐步回归分析结果表明,草甸退化中,表层土壤有机碳含量的变化主要受微团聚体有机碳含量(0.793)和大团聚体有机碳含量(0.208)的影响,而亚表层土壤有机碳含量的变化主要决定于大团聚体有机碳含量(0.859)和团聚体MWD(0.207)的变化(表2)。由于微团聚体有机碳主要是微生物周转残留的碳^[46],而大团聚体结合有机碳主要来源于植物残体输入^[41],说明草甸退化过程中土壤微生物的碳周转效率对表层土壤有机碳含量的变化起着关键作用^[46],而亚表层土壤有机碳含量的降低主要来源于植物残体有机碳输入的减少和团聚体稳定性的下降。

退化使高寒草甸土壤有机碳储量也呈降低趋势,但不同退化程度间土壤有机碳储量的变化更为复杂(表1)。在土壤表层,中度和极度退化土壤有机碳储量显著低于未退化草甸,轻度和重度退化SOC储量与未退化草甸差异不显著(表1)。其原因是轻度退化下土壤有机碳储量的损失与未退化草甸相比还未达到显著差异水平,而重度退化下,土壤密度的大幅度升高,掩盖了土壤有机碳含量的降低幅度,使得土壤有机碳储量与未退化草甸间差异不显著,甚至小于中度退化土壤有机碳储量与未退化草甸之间的差异。与此类似,在土壤亚表层,轻度到中度退化土壤密度增加了98%,而有机碳含量降低了9%,导致土壤有机碳储量的相对增加,使得中度退化有机碳储量与未退化草甸间差异不显著,小于轻度退化与未退化草甸之间的差异。逐步回归分析结果表明,对于表层土壤,团聚体MWD(0.891)是影响土壤有机碳储量的最重要因子,因此,在退化草甸的治理中,恢复和提高土壤团聚体稳定性是提升土壤有机碳储量的关键途径^[24]。而对于亚表层土壤,其有机碳储量取决于团聚体组成(1.386)、土壤理化性质(0.961)和大团聚体有机碳含量(0.451)的综合作用。

4 结论

大团聚体结合有机碳减少是退化过程中有机碳流失的主要形式,粗颗粒有机质缺乏对大团聚体形成和团聚体稳定性的限制可能是重要原因;同时,随退化加剧,有机碳的减少及团聚体分布的改变导致土壤有机碳周转变慢,可能限制养分供应,反馈于植被生长。因此,恢复土壤团聚体组成和稳定性,增加大团聚体有机碳,是增加土壤养分供应,提升土壤有机碳水平,从而改善退化草地生产力和生态系统功能的重要途径。

致谢:西南民族大学化学与环境学院马威和王鑫同学帮助室内分析。

参考文献 (References):

- [1] Ren J Z, Hu Z Z, Zhao J, Zhang D G, Hou F J, Lin H L, Mu X D. A grassland classification system and its application in China. *The Rangeland Journal*, 2008, 30(2): 199-209.
- [2] 伏洋, 李凤霞, 张国胜, 杨琼, 曾晓青. 青海省天然草地退化及其环境影响分析. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 525-535.
- [3] 胡志超, 李政海, 周延林, 鲍雅静, 张靖, 黄朔, 元征征, 洪光宇, 张文海. 呼伦贝尔草原退化分级评价及时空格局分析. *中国草地学报*, 2014, 36(5): 12-18.
- [4] Zhang W J, Xue X, Peng F, You Q G, Hao A H. Meta-analysis of the effects of grassland degradation on plant and soil properties in the alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20: e00774.
- [5] 蔡倩倩. 若尔盖高寒高草甸湿地土壤碳储量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [6] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, Boone R B. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106684.
- [7] Liu S B, Zamanian K, Schless P M, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 93-104.
- [8] Dong S K, Zhang J, Li Y Y, Liu S L, Dong Q M, Zhou H K, Yeomans J, Li Y, Li S, Gao X X. Effect of grassland degradation on aggregate-associated soil organic carbon of alpine grassland ecosystems in the Qinghai-Tibetan Plateau. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(1): 69-79.
- [9] 宋小艳, 张丹桔, 张健, 李建平, 邓长春, 邓超. 马尾松人工林林窗对土壤团聚体及有机碳分布的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3083-3090.
- [10] IPCC. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [11] 方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566-576.
- [12] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, Whitmore A P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [13] King A E, Congreves K A, Deen B, Dunfield K E, Voroney R P, Wagner-Riddle C. Quantifying the relationships between soil fraction mass, fraction carbon, and total soil carbon to assess mechanisms of physical protection. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 95-107.
- [14] 蔡晓布, 于宝政, 彭岳林, 刘合满. 高寒草原土壤有机碳及土壤碳库管理指数的变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7748-7755.
- [15] 刘淑丽, 林丽, 张法伟, 杜岩功, 李以康, 郭小伟, 欧阳经政, 曹广民. 放牧季节及退化程度对高寒草甸土壤有机碳的影响. *草业科学*, 2016, 33(1): 11-18.
- [16] 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.
- [17] 江仁涛, 李富程, 沈淞涛. 川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 36-42.
- [18] 蔡晓布, 彭岳林. 西藏退化高寒草原土壤团聚体有机碳的变化特征. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 310-319.
- [19] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 王庆改, 陈辉. 近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化. *生态学报*, 2008, 28(5): 2245-2252.
- [20] 刘敏, 孙经国, 徐兴良. 土壤元素失衡是导致高寒草甸退化的重要诱因. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2574-2580.
- [21] 杨永兴. 若尔盖高原生态环境恶化与沼泽退化及其形成机制. *山地学报*, 1999, 17(4): 318-323.
- [22] 仁青吉, 罗燕江, 王海洋, 刘金梅. 青藏高原典型高寒草甸退化草地的恢复——施肥刈割对草地质量的影响. *草业学报*, 2004, 13(2): 43-49.
- [23] 王建兵, 张德罡, 曹广民, 田青. 青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征. *草业学报*, 2013, 22(2): 1-10.
- [24] 王奥博. 若尔盖湿地退化对土壤团聚体有机碳及其组分的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.

- [25] 董昭林, 张天双. 若尔盖县草原生态现状及保护措施效益分析. 草业与畜牧, 2012, (8): 30-32, 53-53.
- [26] 许鹏. 草地资源调查规划学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 94-95.
- [27] 李春秀, 孙海松. 青海省西藏嵩草沼泽化草甸资源及保护. 草业科学, 2009, 26(9): 77-83.
- [28] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, Francesca Cotrufo M. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 2003, 9(8): 1204-1213.
- [29] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution//Klute A, ed. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 837-871.
- [30] Qiu L P, Wei X R, Gao J L, Zhang X C. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chronosequence. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2): 237-251.
- [31] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1495-1498.
- [32] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [33] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [34] Six J, Paustian K, Elliott E T, Combrink C. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [35] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [36] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 1081-1088.
- [37] 苑亚茹, 李娜, 邹文秀, 尤孟阳, 韩晓增, 马大龙. 典型黑土区不同生态系统土壤团聚体有机碳分布特征. *生态学报*, 2018, 38(17): 6025-6032.
- [38] Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, Guggenberger G, Klump E, Knief C, Lehdorff E, Mikutta R, Peth S, Prechtel A, Ray N, Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(1): 104-136.
- [39] Zhao H L, Shar A G, Li S, Chen Y L, Shi J L, Zhang X Y, Tian X H. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [40] 李珂, 杨永兴, 杨杨, 韩大勇. 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子. *生态学报*, 2011, 31(20): 5956-5969.
- [41] Mizuta K, Taguchi S, Sato S. Soil aggregate formation and stability induced by starch and cellulose. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87: 90-96.
- [42] Rillig M C, Aguilar-Trigueros C A, Bergmann J, Verbruggen E, Veresoglou S D, Lehmann A. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytologist*, 2015, 205(4): 1385-1388.
- [43] 唐小强, 朱欣伟, 杨华, 罗于贵, 左林, 任君芳. 川西北若尔盖县沙化草地综合治理模式探讨. *四川林业科技*, 2013, 34(5): 47-50.
- [44] 胡金娇, 周青平, 吕一河, 胡健, 陈有军, 苟小林. 青藏高原东缘半湿润沙地典型生态恢复模式的效果比较研究. *生态学报*, 2020, 40(20): 7410-7418.
- [45] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1523-1529.
- [46] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6): 815-828.