

川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响

江仁涛, 李富程, 沈淞涛

(西南科技大学 资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:应用干筛法与湿筛法分析了川西北高寒草地不同退化阶段土壤团聚体组成特征,选取了土壤大团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和团聚体破坏率(PAD)指标,研究了退化过程土壤团聚体稳定性的变化。结果表明:未退化草地土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体组成都以大团聚体(>0.25 mm)为主,而退化草地均以微团聚体(<0.25 mm)为主;随着草地退化程度加剧,大团聚体含量($R_{0.25}$)显著降低,土壤团聚体 MWD 和 GMD 均表现为:未退化 $>$ 轻度退化 $>$ 中度退化 $>$ 重度退化, PAD 呈现相反的变化趋势,其中未退化到轻度退化阶段团聚体稳定性变化最为明显;未退化和轻度退化草地土壤团聚体稳定性由表层向下层递减,而中度和重度退化草地表层(0—10 cm)土壤团聚体稳定性弱于下层(10—40 cm)。这些结果表明随着高寒草地退化的加剧,土壤团聚体稳定性显著降低,轻度退化阶段是土壤结构稳定性下降的关键期,在沙化防治中应予以重视。

关键词:高寒草地; 土壤退化; 土壤团聚体; 稳定性

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0036-07

Effects of Degradation of Alpine Grassland on Soil Aggregates Composition and Stability in Northwestern Sichuan Province

JIANG Rentao, LI Fucheng, SHEN Songtao

(College of Resources & Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: We used dry and wet sieving methods to investigate the composition characteristics of soil in different degraded alpine grasslands in northwestern Sichuan Province. The macro-aggregates content ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and the percentage of aggregate destruction (PAD) of soil aggregates were selected to research the stability of soil aggregates in degradation process. The results showed that soil mechanical-stable aggregates and water-stable aggregates of non-degraded grassland was mainly composed of macro-aggregates (>0.25 mm), while micro-aggregates (<0.25 mm) were found in all degraded grasslands; with the expansion of grassland degradation, the $R_{0.25}$ decreased significantly, MWD and GMD decreased in the order: non-degraded grassland $>$ lightly degraded grassland $>$ moderately degraded grassland $>$ heavily degraded grassland, while PAD showed the opposite of trend of the change, the stability of aggregates was the most obvious in the stage of non-degraded to lightly degraded; the stability of soil aggregates in non-degraded grassland and lightly degraded grassland decreased from soil surface to deep layer, but the soil aggregates in moderately degraded grassland and heavily degraded grassland soil surface (0—10 cm) were weaker than the deeplayer (10—40 cm). These results indicated that stability of aggregates reduced significantly with the degradation of alpine grassland. The lightly degraded grassland was the critical period in the decline of soil structure stability in alpine grassland, and attention should be paid to desertification control.

Keywords: alpine grassland; soil degradation; soil aggregates; stability

土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物等土壤成分在自然物理过程中形成的基本结构单元^[1],其组成状况和稳定性不仅决定着土壤肥力的高低,而且直接或间接地影响着土壤抗侵蚀能力、生物多样性和固碳潜力等^[2]。Soinne 等^[3]研究认为频繁的耕作使黏土团聚体稳定性显著降低。Luna 等^[4]在地中海地区研究表明,不同恢复技术对退化土壤团聚体稳定性和有机碳都有显著影响。郑子成等^[5]认为土地利用方式与土壤团聚体稳定性有较大相关性。宋日等^[6]通过对东北黑土研究显示,随着开垦年限的增加土壤结构不断恶化,土壤有机质含量也随之降低。冯瑞章等^[7]对江河源区不同退化程度高寒草地研究得出, $>0.25\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体随着退化程度的增加显著降低。目前,国内外土壤团聚体相关研究主要集中于红壤、黑土、紫色土等团聚结构较好的土壤,对其团聚体组成及稳定性的各种影响因素开展了广泛研究,但较少涉及团聚结构较差的荒漠土壤,尤其缺乏对高寒草地沙化土壤团聚体稳定性的研究。在全球气候变化和人类活动等作用下,川西北高寒草地退化态势严峻,随着退化程度的加剧,地表植被盖度不断下降,土壤有机质消耗殆尽,土壤结构严重破坏,使得生态恢复难度倍增。目前该区域防沙治沙研究主要集中于土壤养分变化、沙化影响因素和生态治理模式^[8-11],缺乏对土壤团聚体组成及稳定性的关注。因此,本文应用干筛法与湿筛法比较川西北高寒草地不同退化阶段土壤团聚体组成特征,研究草地退化过程土壤团聚体稳定性的变化规律,为深入认识川西北高寒草地退化机制与优化土壤改良措施提供科学依据。

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红原县($31^{\circ}51' - 33^{\circ}19'N, 101^{\circ}51' - 103^{\circ}23'E$),地处青藏高原东缘,境内海拔多在 $3\,600\text{ m}$ 以上,地势呈现东南向西北倾斜,地貌为丘状高原,北部有黑河、白河注入黄河上游,东南为长江水系。气候属高原性大陆寒温带季风气候,年均温 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,干雨季节分明,雨热同期,年均降雨量为 791.9 mm ,集中在 $5 - 10$ 月,而年均蒸发量达 $1\,262.5\text{ mm}$,除 $6 - 8$ 月外,月降水量均小于蒸发量,空气极为干燥。土壤类型以亚高山草甸土为主,部分地区为沼泽土,局部有荒漠土。红原县总人口约 4.5 万人,藏族人口占 83.2% ,牧业人口占总人口 77.8% ,牲畜主要有麦洼牦牛、九龙牦牛、藏绵羊和河曲马等。放牧分为冬夏两季,冬草场适宜载畜量约为 0.97 头/hm^2 ,夏草场约为 1.33 头/hm^2 ,但

是部分草场远超过适宜载畜量,草地优势种逐渐减少,植被盖度迅速降低,加之气候条件的影响,草地趋于退化,呈现斑块状的沙地。

1.2 样品采集

供试土壤于 2016 年 7 月采自红原县瓦切镇,通过实地调查,在地形地貌、成土母质等自然环境条件基本相同的区域内选取了未退化草地、轻度退化草地、中度退化草地、重度退化草地 4 种样地,测定和记录样地基本信息(坐标、海拔、植被盖度),采用 GPS 测定经纬度和海拔。每种样地选择 2 个样方,样方大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,每个样方内随机选取 3 个采样点,按照 $0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40\text{ cm}$ 分层采集土壤团聚体样品,3 个同层土样混合成 1 个土样,装入采样盒以避免挤压破坏团聚体,共 32 个混合土样,用于测定土壤团聚体、有机质和 pH 值。利用环刀采集各层土壤样品,测定土壤容重和含水率。样地基本信息见表 1。

表 1 研究样地描述

退化程度	纬度 N	经度 E	海拔/m	植被盖度/%
未退化	$33^{\circ}10'47.555''$	$102^{\circ}37'34.172''$	3430.69	>95
轻度退化	$33^{\circ}10'45.710''$	$102^{\circ}37'34.016''$	3441.45	$70 \sim 80$
中度退化	$33^{\circ}10'43.667''$	$102^{\circ}37'33.488''$	3436.65	$40 \sim 50$
重度退化	$33^{\circ}10'35.977''$	$102^{\circ}37'27.476''$	3433.13	<10

1.3 样品测定

将土样在室内轻轻掰成直径约 10 mm 的小土块,除去动植物残体、小石块后平铺在室内自然风干。团聚体测定采用干筛法和湿筛法^[12]。干筛法:称取 100 g 风干土置于套筛上,用振筛机振荡 10 min (8411 型;转速 $1\,400\text{ r/min}$),分离出 $>2\text{ mm}, 0.5 \sim 2\text{ mm}, 0.25 \sim 0.5\text{ mm}, <0.25\text{ mm}$ 的土壤机械稳定性团聚体,称重并计算出各级团聚体所占百分比。湿筛法:依据干筛法所得的样品机械稳定性团聚体组成比例配制出 100 g 风干土样,放入团聚体分析仪(TTF-100 型;转速 30 r/min ,上下振幅 40 mm)浸泡 5 min 后振荡 30 min ,分离出 $>2\text{ mm}, 0.5 \sim 2\text{ mm}, 0.25 \sim 0.5\text{ mm}, <0.25\text{ mm}$ 的土壤水稳性团聚体,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干称重后计算出各级团聚体所占百分比。每个样品测定 2 次。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定,土壤 pH 值采用玻璃电极法测定($2.5:1$ 水土比浸提液),土壤含水率采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定。

1.4 计算公式

大团聚体比重($R_{0.25}$)计算公式如下:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} = 1 - \frac{M_{r<0.25}}{M_T} \quad (1)$$

式中: M_i 为各粒级团聚体; M_T 为团聚体总重量。

团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GWD) 计算公式如下^[13]:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3)$$

式中: \bar{R}_i 为某级团聚体平均直径; W_i 为某级团聚体组分的干重。

团聚体破坏率 (PAD) 计算公式如下^[13]:

$$PAD = \frac{W_d - W_w}{W_d} \quad (4)$$

式中: PAD 为团聚体破坏率; W_d 为干筛 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量; W_w 为湿筛 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量。

1.5 数据分析方法

通过单因素方差分析研究不同退化程度、不同土层和不同粒级土壤理化性质及土壤团聚体的差异, 显著性检验采用 LSD 方法, 显著性水平选择 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

不同退化程度草地土壤含水率呈现未退化 $>$ 轻度退化 $>$ 中度退化 $>$ 重度退化的特征, 未退化草地显著高于退化草地 ($p < 0.05$), 除重度退化草地外, 土壤含水率由表层向下层呈递减趋势 (表 2)。退化草地土壤容重显著大于未退化草地 ($p < 0.05$)。不同退化程度草地土壤 pH 值介于 5.73~6.76, 偏酸性, 随着退化程度增加而增大, 土壤垂直方向无显著差异。土壤有机质含量随着沙化程度加剧显著降低 ($p < 0.05$), 未退化、轻度退化和中度退化草地土壤有机质含量由表层向下层显著递减 ($p < 0.05$), 重度退化草地无显著变化。

表 2 土壤理化性质

项目	土层/cm	未退化草地	轻度退化草地	中度退化草地	重度退化草地
含水率/%	0—10	48.14±8.81a	10.53±0.86a	8.77±1.81a	5.39±0.22b
	10—20	39.96±8.89a	9.85±0.35ab	7.22±0.47ab	6.64±0.60a
	20—30	24.81±0.50b	9.46±0.55b	6.73±0.65b	6.71±0.11a
	30—40	20.38±0.69b	8.57±0.77b	6.78±0.39b	7.22±0.11a
容重/(g·cm ⁻³)	0—10	0.68±0.14b	1.32±0.10a	1.32±0.07b	1.40±0.02b
	10—20	0.78±0.08b	1.34±0.07a	1.41±0.01a	1.38±0.08b
	20—30	1.20±0.04b	1.31±0.00a	1.36±0.04ab	1.50±0.02a
	30—40	1.24±0.07a	1.35±0.02a	1.40±0.02a	1.51±0.05a
pH 值	0—10	5.73±0.32a	6.40±0.07a	6.59±0.21a	6.76±0.04a
	10—20	5.68±0.01a	6.50±0.00a	6.64±0.16a	6.72±0.06a
	20—30	6.06±0.02a	6.53±0.18a	6.63±0.06a	6.69±0.04a
	30—40	6.06±0.28a	6.57±0.00a	6.48±0.06a	6.52±0.04a
有机质/(g·kg ⁻¹)	0—10	120.03±5.83a	28.85±1.14a	14.38±2.95a	4.64±1.08a
	10—20	76.16±5.53b	16.83±0.13b	8.95±0.66ab	4.45±0.42a
	20—30	56.17±7.82c	15.74±0.12bc	7.22±2.19b	3.18±0.31a
	30—40	44.66±5.35c	13.74±1.89c	7.25±2.53b	3.83±0.31a

注: 同列不同小写字母表示同一退化程度草地在 $p < 0.05$ 水平上的差异显著。

2.2 土壤团聚体分布特征

2.2.1 土壤机械稳定性团聚体分布特征 不同退化程度草地土壤机械稳定性团聚体分布特征见表 3。未退化草地土壤以 > 2 mm 粒级团聚体居多 (40%~47%), 0.5~2 mm 和 < 0.25 mm 粒级次之, 0.25~0.5 mm 粒级较少; 退化草地土壤团聚体以 < 0.25 mm 粒级为主 (45%~74%), > 2 mm 和 0.25~0.5 mm 粒级次之, 0.5~2 mm 粒级最少 ($< 8\%$)。随着退化程度的加剧, 各土层 > 2 mm 和 0.5~2 mm 粒级团聚体含量显著降低 ($p < 0.05$), 0.25~0.5 mm 和 < 0.25 mm 粒级团聚体含量显著增加 ($p < 0.05$)。0—40 cm 各土层 $R_{0.25}$

由未退化到轻度退化阶段减少 34%~46%, 轻度到中度退化阶段减少 18%~42%, 中度到重度退化阶段减少幅度较小 ($< 17\%$), 可见, 未退化到轻度退化和轻度退化到中度退化阶段是川西北高寒草地土壤大团聚体向微团聚体转变的主要阶段。

2.2.2 土壤水稳性团聚体分布特征 不同退化程度草地水稳性团聚体分布特征见表 4。未退化草地以 > 2 mm 和 < 0.25 mm 粒级团聚体含量较高, 0.5~2 mm 和 0.25~0.5 mm 粒级含量较低; 退化草地均以 < 0.25 mm 粒级团聚体占绝对优势, 高达 59%~94%, 0.5~2 mm 粒级团聚体含量最少 ($< 5\%$)。

对于 0—40 cm 各土层,>2 mm 粒级团聚体含量随着退化程度加剧显著降低($p<0.05$);对于 0.5~2 mm 粒级团聚体,仅 0—10 cm 土层随着退化程度增加显著降低($p<0.05$);0.25~0.5 mm 粒级团聚体含量随着草地退化加剧整体降低,<0.25 mm 粒级团聚体显著增加($p<0.05$)。与干筛结果类似,湿筛法显示 0—40 cm 各土层 $R_{0.25}$ 从未退化到轻度退化(42%~57%)、轻度退化到中度退化(36%~80%)减少幅度较大,而中度退化到重度退化减少幅度相对较小(<27%)。

表 3 不同退化程度草地土壤机械稳定性团聚体分布特征

土层/cm	不同退化程度草地	机械稳定性团聚体/%				$R_{0.25}/\%$
		>2 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	
0—10	未退化	46.38±1.63a	23.32±1.25a	14.09±0.47c	16.21±1.20d	83.79±1.20a
	轻度退化	26.32±0.75b	7.77±1.12b	20.42±1.27b	45.49±0.97c	54.51±0.97b
	中度退化	7.23±1.58c	4.96±1.38c	19.48±1.81b	68.34±0.54b	31.66±0.54c
	重度退化	4.00±0.82d	0.49±0.03d	23.51±0.99a	72.01±1.48a	27.99±1.48d
10—20	未退化	43.13±2.68a	22.81±1.52a	14.12±2.18d	19.47±2.44c	80.05±2.44a
	轻度退化	24.53±1.18b	5.36±1.07b	16.32±0.57c	53.79±2.12b	46.21±2.12b
	中度退化	17.05±0.51c	1.70±0.30c	18.67±0.85b	61.85±0.39a	38.15±0.39c
	重度退化	9.74±1.02d	1.29±0.16c	27.14±1.14a	61.83±1.78a	38.17±1.78c
20—30	未退化	41.47±2.88a	20.04±1.36a	14.81±1.36bc	23.70±1.84c	76.31±1.84a
	轻度退化	23.62±1.55b	5.83±1.20b	14.34±1.42c	56.21±2.73b	43.79±2.73b
	中度退化	15.60±1.32c	1.43±0.32c	17.22±1.75b	65.75±3.16a	34.25±3.16c
	重度退化	10.53±0.66d	0.91±0.21c	20.64±1.86a	67.92±1.38a	32.08±1.38c
30—40	未退化	40.12±1.931a	21.03±2.14a	14.01±1.44bc	24.84±2.90d	75.16±2.90a
	轻度退化	23.10±1.28b	4.86±0.51b	13.05±1.33c	58.99±1.68c	41.01±1.68b
	中度退化	14.54±1.46c	1.85±1.11c	15.96±1.24ab	67.66±2.42b	32.36±2.42c
	重度退化	8.43±1.04d	0.87±0.30c	17.35±1.55a	73.35±2.21a	26.65±2.21d

注:同一列不同小写字母表示相同粒级团聚体在 $p<0.05$ 水平上的差异显著,下表同。

表 4 不同退化程度草地土壤水稳性团聚体分布特征

土层/cm	不同退化程度草地	水稳性团聚体/%				$R_{0.25}/\%$
		>2 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	
0—10	未退化	33.93±1.53a	25.11±0.98a	10.44±0.98b	30.52±1.58c	69.48±1.58a
	轻度退化	21.09±1.08b	4.53±0.66b	14.59±1.33a	59.79±2.39b	40.21±2.39b
	中度退化	1.95±0.13c	1.64±0.24c	4.44±0.43d	91.97±0.49a	8.03±0.49c
	重度退化	0.00±0.00d	0.00±0.00d	6.53±0.88c	93.47±0.88a	6.53±0.88c
10—20	未退化	28.80±1.33a	24.51±1.20a	11.18±1.18a	30.50±1.76d	64.50±1.76a
	轻度退化	16.73±1.18b	3.01±0.52b	10.39±1.77a	69.87±1.40c	30.13±1.40b
	中度退化	10.54±0.84c	2.11±0.24b	6.42±0.42c	80.92±1.03b	19.08±1.03c
	重度退化	5.34±0.36d	2.27±0.38b	8.22±0.85b	84.17±1.45a	15.83±1.45d
20—30	未退化	25.78±1.46a	21.75±1.31a	11.37±0.92a	41.11±2.76d	58.89±2.76a
	轻度退化	15.85±1.48b	2.74±0.28b	9.70±1.19b	71.71±2.45c	28.29±2.45b
	中度退化	8.53±0.92c	2.29±0.33b	5.98±0.72c	83.21±0.47b	16.79±0.47c
	重度退化	3.64±0.72d	1.98±0.39b	6.48±0.84c	87.89±0.64a	12.11±0.64d
30—40	未退化	25.51±2.09a	20.99±1.81a	12.25±1.26a	41.25±2.41d	58.75±2.41a
	轻度退化	14.54±1.32b	2.91±0.51b	8.04±1.06b	74.52±2.54c	25.48±2.54b
	中度退化	8.15±1.28c	2.23±0.59b	4.52±0.61c	85.10±1.22b	14.90±1.22c
	重度退化	3.29±0.77d	1.40±0.56b	5.77±1.26c	89.55±1.44a	10.45±1.44d

2.3 土壤团聚体稳定性分析

2.3.1 团聚体破坏率分析 不同退化程度土壤大团聚体破坏率见图 1。0—40 cm 各土层土壤团聚体破坏率均呈现未退化<轻度退化<中度退化<重度退

化,草地退化使土壤团聚体破坏率显著增大($p<0.05$)。在 0—10 cm 土层,未退化到轻度、轻度到中度、中度到重度退化土壤 PAD 分别增加 53.41%,184.91%,2.62%,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm

土壤 PAD 在各退化阶段增长率基本一致。从土壤剖面(0—40 cm)来看,未退化和轻度退化土壤的 PAD 由表层向下层呈增加趋势,而中度退化和重度退化表层(0—10 cm)土壤 PAD 明显大于下层(10—40 cm)。

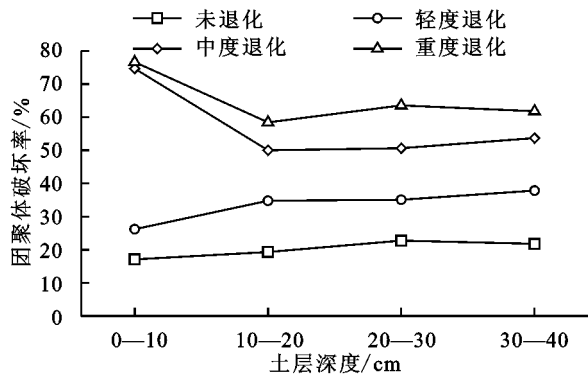
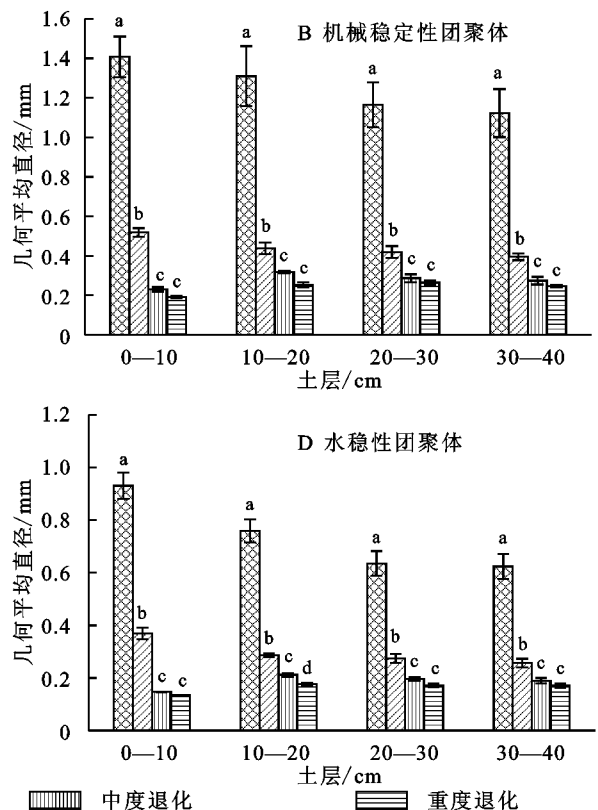
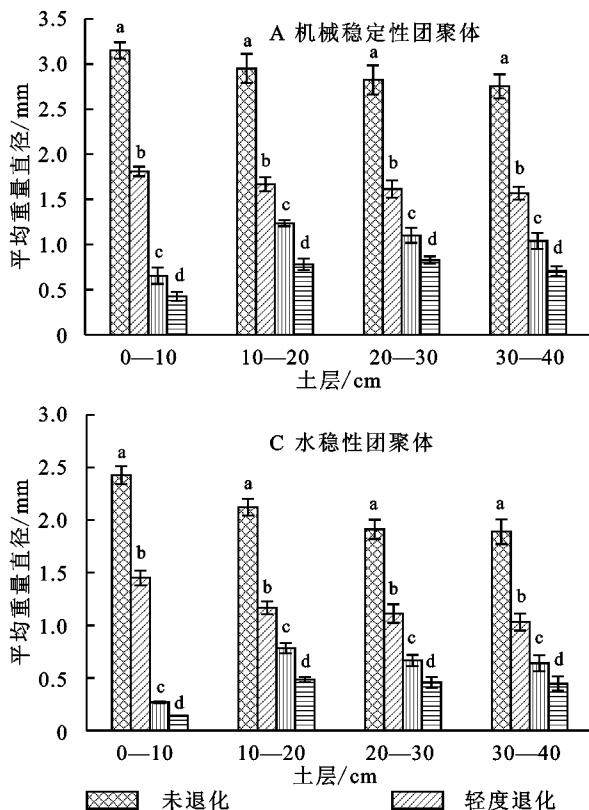


图 1 土壤团聚体破坏率

2.3.2 MWD 和 GMD 分析 对于土壤机械稳定性团聚体,各土层土壤团聚体 MWD 随着退化程度增加

显著减小($p < 0.05$),在 0—10 cm 土层,未退化到轻度、轻度到中度、中度到重度退化阶段 MWD 分别减小 42.58%, 63.86%, 35.13%, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 土层在未退化到轻度退化阶段 MWD 减小幅度最大,均在 43% 左右(图 2A)。土壤团聚体 GMD 与 MWD 变化趋势一致(图 2B),但中度与重度退化草地的 GMD 无显著差异。对于水稳性团聚体,土壤团聚体 MWD 和 GMD 明显小于干筛结果(图 2C 和图 2D),体现水蚀使大团聚体破碎,平均粒径减小。与土壤机械稳定性团聚体类似,土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 随着沙化程度增加也明显减小,且未退化到轻度、轻度到中度退化阶段的减小幅度大于中度到重度退化阶段。干筛和湿筛处理下的土壤团聚体稳定性指标均显示,未退化和轻度退化草地表层(0—10 cm)土壤团聚体 MWD 和 GMD 均明显大于下层(10—40 cm),而中度退化和重度退化草地呈现相反的特征。



注:不同小写字母表示同土层不同退化程度草地土壤团聚体在 $p < 0.05$ 水平上的差异显著。

图 2 不同退化程度草地土壤机械稳定性团聚体、水稳性团聚体的平均重量直径和几何平均直径

3 讨论

本研究结果显示,干筛和湿筛处理下未退化草地土壤都以大团聚体(>0.25 mm)组成为主,而退化草地土壤以微团聚体(<0.25 mm)占绝对优势,随着草地退化程度的加剧,各土层 >2 mm 和 $0.5 \sim 2$ mm 粒级团聚体显著降低($p < 0.05$), $0.25 \sim 0.5$ mm 粒级

团聚体变化不固定, <0.25 mm 粒级团聚体显著增加。冯瑞章等^[7]认为高寒草地退化使 0—30 cm 土层 >0.25 mm 水稳性团聚体显著降低,但大团聚体在不同退化阶段的降低速率低于本研究区。王洋^[14]研究也指出,随着高寒草地退化程度增加, $0.2 \sim 2$ mm 粒级团聚体降低最显著。以上研究均表明高寒草地退化导致大粒级团聚体含量降低,但不同研究区草地

退化对大团聚体的影响程度有所差异,这主要归因于当地不同的环境因子影响所致。在自然和人为因素的作用下,川西北高寒草地植被盖度降低,同时地下根系也不断减少,大团聚体缺乏植物根系的穿插与缠绕容易分散^[15]。有研究表明,小粒级团聚体中有机质以化学保护为主,受外界因素干扰小,变化速率慢,而大粒级团聚体中有机质以物理保护为主,对植被变化和管理措施的影响较为敏感,周转较快^[16],而有机质是团聚体重要的胶结物质,因此,随着草地退化程度加剧,土壤有机质的降低导致大团聚含量也显著下降。

本研究得出,随着高寒草地不断退化,土壤 $R_{0.25}$, MWD 和 GMD 均显著减小, PAD 显著增大,表明土壤团聚体稳定性随着退化程度的加剧而显著降低,这与以往研究类似^[6-7,14]。有研究显示植被减少与土壤退化互为因果,相互作用^[17],本研究区草地在牲畜过度啃食踩踏下,草本植物的生长发育受到抑制,植被盖度减小,植被凋落物减少的同时土壤有机质含量降低,土壤容重增加和持水性能下降,此时,大团聚体崩解,土壤抗侵蚀能力降低,最终导致团聚体稳定性显著下降。本研究仅指出川西北高寒草地土壤团聚体稳定性的变化规律,其影响机理还需进一步探究。

本研究结果显示不同退化程度草地土壤有机质含量由表层向下层降低,未退化和轻度退化草地土壤团聚体稳定性也呈现类似的特征,但中度和重度退化表层(0—10 cm)土壤团聚体稳定性明显低于下层(10—40 cm),表明在草地不同退化阶段,土壤团聚体稳定性与有机质从表层到下层的变化特征并不一致。对于未退化和轻度退化草地,表层(0—10 cm)土壤接受的枯枝落叶多,有机质的富集提供黏合剂,能显著提高大团聚体总量和团粒间的联结度,增加其结构稳定性,所以团聚体稳定性和有机质含量由表层向下层降低。当草地进入中度和重度退化阶段,由于过度放牧,加之鼠类挖掘洞穴使土壤暴露地表,表层土壤缺乏植被保护,频繁的干湿循环导致土壤大团聚体破碎,固碳作用减弱,团聚体稳定性也降低^[18],加之冻融作用的交替收缩与膨胀改变土壤团聚体的结构与组成,加快土壤有机碳的矿化分解速度,降低土壤团聚体的水稳性^[19],进一步促进草地退化,这些作用首先发生在土壤表层 0—10 cm,随着土层深度增加其影响减弱^[20],因此,中度和重度退化草地表层土壤更容易发生退化。

川西北高寒草地土壤团聚体组成和稳定性在未退化到轻度、轻度到中度退化阶段的变化最显著,中

度到重度退化阶段变化较小,表明轻度退化阶段是草地退化的重要转折期。本研究结果与蔡晓布等^[21]对藏北高原草地的研究不同,其认为轻度退化草地土壤团聚体稳定性好于未退化草地,主要在于藏北高原土壤冻结期较长,未退化草地土壤微生物活动微弱,腐殖质难以分解,而一定程度的沙化使土壤微生物活性与功能得到提高,有利于团聚体的形成。本研究区相对于藏北高原,冰冻期稍短,年均气温高 1℃左右,年均降水量 500 mm 左右,在较好的自然条件下土壤微生物活性强,由于自然和人为作用对草地的破坏,在草地退化初期,土壤有机质迅速分解并流失,大团聚体也快速崩解,团聚体稳定性显著降低。当草地进入中度和重度退化阶段,土壤有机质面临枯竭,团聚体稳定性指标变化最小。因此,当川西北高寒草地面临轻度退化时应给予高度重视,及时开展防沙治沙工作。

4 结论

(1) 不同退化程度草地土壤理化指标变化不一致,随着退化程度的加剧,土壤有机质含量显著降低($p < 0.05$);退化草地土壤含水率显著低于未退化草地($p < 0.05$),土壤容重和 pH 值与之相反,但是不同退化草地之间土壤含水率、容重和 pH 值的差异并不显著。

(2) 干筛和湿筛处理下,土壤团聚体变化规律基本一致,未退化草地以大团聚体(>0.25 mm)为主,而退化草地以微团聚体(<0.25 mm)为主;随着退化程度的增加,各土层 >2 mm 和 0.5~2 mm 粒级团聚体显著降低($p < 0.05$),0.25~0.5 mm 粒级变化不固定, <0.25 mm 粒级显著增加($p < 0.05$)。

(3) 随着草地退化程度的加剧, $R_{0.25}$, MWD 和 GMD 显著减小($p < 0.05$),PAD 与之相反,表明草地退化使土壤团聚体稳定性显著降低;未退化和轻度退化土壤团聚体稳定性由表层向下层递减,而中度和重度退化土壤表层低于下层,表明土壤表层比下层退化速度快。

(4) 不同退化草地土壤理化指标、土壤团聚体组成及稳定性的差异表明,轻度退化阶段是草地退化的重要转折期,在沙化防治中应予以重视。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5):1367-1377.
- [3] Soenne H, Hyväluoma J, Ketoja E, et al. Relative impor-

- tance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 1-9.
- [4] Luna L, Miralles I, Andrenelli M C, et al. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region[J]. *Catena*, 2016, 143(8): 256-264.
- [5] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 228-231.
- [6] 宋日, 刘利, 吴春胜, 等. 东北松嫩草原土壤开垦对有机质含量及土壤结构的影响[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(4): 91-95.
- [7] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 263-269.
- [8] 廖雅萍, 王军厚, 付蓉. 川西北阿坝地区沙化土地动态变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 51-54.
- [9] Hu G, Dong Z, Lu J, et al. The developmental trend and influencing factors of aeolian desertification in the Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 275-281.
- [10] 胡玉福, 彭佳佳, 邓良基, 等. 围栏种植红柳对川西北高寒沙地土壤颗粒组成和矿质养分的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1): 54-61.
- [11] 万婷, 涂卫国, 席欢, 等. 川西北不同程度沙化草地植被和土壤特征研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(4): 650-657.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [13] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 等. 土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应[J]. *草业学报*, 2016, 25(10): 40-47.
- [14] 王洋. 不同退化程度下高寒草甸土壤有机碳及团聚体特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [15] 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 & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [16] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2010, 48(2): 412-418.
- [17] 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. *草业学报*, 2005, 14(3): 31-40.
- [18] Denef K, Six J, Paustian K, et al. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 33(15): 2145-2153.
- [19] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1269-1274.
- [20] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J]. *草业学报*, 2010, 19(4): 204-211.
- [21] 蔡晓布, 周进. 退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2639-2645.

~~~~~

(上接第 35 页)

- [5] 李婕玲, 李朝婵, 胡继伟, 等. 典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 54-60.
- [6] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 311-318.
- [7] 王雪梅, 柴仲平, 毛东雷, 等. 不同土地利用方式下渭一库绿洲土壤质量评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(4): 319-323.
- [8] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响: 以河北省遵化市为例[J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 447-455.
- [9] 刘庆新, 吴发启, 刘海斌, 等. 纸坊沟流域土壤酶活性与土壤肥力关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1100-1106.
- [10] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 285-293.
- [11] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 190-196, 204.
- [12] 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, 2000.
- [13] 刘志鹏, 邵明安, 王云强. 区域尺度下黄土高原土壤全钾含量的空间模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 132-140.
- [14] 张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [15] 尹刚强, 田大伦, 方晰, 等. 不同土地利用方式对湘中丘陵区土壤质量的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(8): 9-15.
- [16] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2292-2296.