

不同放牧强度下土壤侵蚀对典型草原土壤有机碳的影响

兰瑞君¹, 郭建英², 尹忠东¹, 李锦荣², 张铁钢²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: 针对典型草原土壤侵蚀区的碳储量及碳流失问题, 采用野外调查取样和人工模拟降雨相结合的方法, 探讨了不同放牧强度下内蒙古大针茅典型草原的土壤侵蚀量、有机碳含量、有机碳流失量的变化情况。结果表明: (1) 放牧强度对表层土壤有机碳的影响较大, 有机碳储量呈先增加后减少的趋势, 表现为轻度放牧>对照>中度放牧>重度放牧, 且不同放牧强度下 0—40 cm 土壤有机碳变化明显, 为明显的垂直递减趋势; (2) 降雨强度对草地土壤侵蚀的影响最大, 其次为坡度, 放牧强度的影响较小; (3) 坡度一定时, 土壤有机碳流失量受降雨强度的影响程度远大于放牧强度, 降雨强度越大, 放牧强度越大, 土壤侵蚀量和土壤有机碳流失量就越大。可见, 控制放牧强度和因地制宜的分区放牧对于控制草地土壤侵蚀十分必要。

关键词: 典型草原; 降雨模拟; 土壤有机碳; 土壤侵蚀

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0172-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.028

Effects of Soil Erosion on the Soil Organic Carbon of Typical Steep Under Different Grazing Intensities

LAN Ruijun¹, GUO Jianying², YIN Zhongdong¹, LI Jinrong², ZHANG Tiegang²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources of China, Hohhot 010020)

Abstract: Carbon storage and carbon loss were the serious issues in the soil erosion region of typical steppe. By field investigation and simulated rainfall, effects of grazing intensities on the soil erosion, soil organic carbon storage and carbon loss of typical steppe in Inner Mongolia were studied. The results showed that: (1) The grazing intensity had a great effect on the surface soil organic carbon, and the organic carbon storage increased firstly and then decreased, the ranking was the light grazing>the no grazing>the moderate grazing>the heavy grazing; the soil organic carbon storage in 0—40 cm soil layer under different grazing intensity changed significantly and showed a vertical decreasing trend. (2) PFTs were most important, followed by N soil, and finally climate the soil erosion was mainly affected by rainfall intensity, followed by slope, and finally grazing intensity. (3) As for the same slope, the rainfall intensity had a greater influence on soil organic carbon loss than the grazing intensity; the soil erosion and soil organic carbon loss increased with the increasing rainfall intensity and grazing intensity. The findings indicate that it is necessary to control grazing intensity for soil erosion for soil erosion in typical steep.

Keywords: typical steppe; simulated rainfall; soil organic carbon; soil erosion

土壤侵蚀是导致土壤有机碳迁移及流失的主要因素^[1-2], 严重的土壤侵蚀会减少土壤有机碳含量, 降低土地生产能力^[3], 影响土壤有机碳的富集^[4]。土壤有机碳含量直接影响草地土壤肥力和草地生产力^[5], 在草地生态系统中, 草地土壤的碳贮量约占草地总碳贮量的 89.4%^[6], 但随着自然因素及人为因素的综合影响, 特别是过度放牧的影响, 我国草地资源退化加剧, 使草原地区出现严重的土壤侵蚀现象^[7], 导致草原土壤有机碳的迁移和流失, 影响草原

生态系统功能发挥。因此研究不同放牧强度下土壤侵蚀对草原土壤有机碳的影响具有重要意义。

目前, 国内关于放牧强度的研究, 主要集中于放牧对草原土壤侵蚀的影响^[7-10]、土壤侵蚀对土壤有机碳的影响^[11-14]及不同放牧强度对土壤有机碳含量影响^[15-17]等方面, 而对放牧强度下土壤侵蚀造成土壤有机碳流失的研究则相对较少。本试验以内蒙古自治区锡林浩特锡林河流域大针茅 (*Stipa grandis* P. Smirn.) 草原为研究对象, 进行不同放牧强度下土壤

侵蚀对土壤有机碳影响的野外模拟人工降雨试验,旨在揭示不同放牧强度下草原土壤侵蚀的变化规律及草原土壤有机碳的变化,探讨不同放牧强度下土壤侵蚀对草原土壤有机碳变化的影响规律,为草原地区土壤侵蚀的防治及草原生态系统的改良和可持续性发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

野外模拟人工降雨试验于 2015 年在内蒙古自治区锡林浩特锡林河流域的大针茅(*Stipa grandis* P. Smirn.)草原(116°13'E,43°44'N)进行。试验地为温带典型草原,以大针茅(*Stipa grandis* P. Smirn.)为建群植物,以羊草(*Leymus chinense* (Trin.) Tzvel.)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)、冰草(*Agropgrom cristatum* (Linn.) Gaertn.)为优势种,有寸苔草(*Carex duriuscula* C. A. Mey.)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum* L.)等为伴生种;属温带半干旱大陆性草原气候,年均降水量约 350 mm;土壤类型为沙质栗钙土,土壤机械组成多表现为砂粒>粉粒>黏粒(表 1)。样地选择在从

2008 年开始自由放牧与围栏封育的草场有代表性的 3 处居民点到附近长期围栏样地之间的区域。依据李博^[18]草地退化分级方法,在样地上布设长为 2 000 m 且微地形大致相同的放射状样线 3 条,沿样线方向每隔 100 m 进行植被样方调查,包括草地植被种类组成及其群落高度、盖度、密度和地上生物量等(表 1),并对其进行聚类分析,定量划分放牧区,分为重度放牧(heavy grazing HG)、中度放牧(moderate grazing MG)、轻度放牧(light grazing LG) 3 个等级,同时选择各居民点围栏封育草场为对照样地(no grazing CK)。

根据放牧区退化特点,在 4 种不同放牧强度下(CK、LG、MG、HG),设计径流小区,开展 3 种坡度(5°,10°,15°)、3 种雨强(20,40,60 mm/h)及降雨历时为 50 min 的试验,分析不同放牧强度下土壤侵蚀对草地土壤有机碳的影响。降雨模拟器为南京南林电子科技有限公司制作的 NLJY-10-02 型大型便携式人工模拟降雨系统,有效降雨面积为 18 m²,降雨高度 4.0~4.5 m,雨强连续变化范围 20~150 mm/h,降雨均匀度系数 0.87~0.93,雨滴大小调控范围 1.7~2.8 mm,降雨测量精度 0.01 mm/h,降雨调节精度 7 mm/h,降雨历时可自行设定。

表 1 样地基本情况

放牧强度	优势种	高度/cm	盖度/%	密度/ (株·m ⁻²)	生物量干重/ (g·m ⁻²)	土壤粒径范围/mm		
						<0.002	0.002~0.02	0.02~2.0
CK	大针茅+糙隐子草+寸苔草	22.22±3.33	22.07±1.80	132.25±23.75	145.03±2.26	4.16±0.40	51.3±1.33	44.48±1.28
LG	大针茅+糙隐子草+羊草	15.85±1.00	28.89±1.40	170.33±9.46	128.78±4.78	3.63±0.31	45.35±2.64	51.02±2.90
MG	大针茅+糙隐子草+冰草	14.02±0.72	27.33±1.73	164.25±5.25	101.75±5.21	4.01±0.11	45.12±0.59	50.87±0.48
HG	大针茅+糙隐子草+灰绿藜	7.93±2.66	23.42±1.02	297.67±17.64	57.05±6.89	4.21±0.36	45.64±3.01	50.15±3.37

1.2 试验过程

每个径流小区坡面面积 10 m²,即倾斜坡长 5 m,宽 2 m,采用彩钢板加钢骨架的方式将两边及上边围起,地下埋入 20 cm,地上露出 20 cm,用锤子夯实,黏土铆缝,在下部不锈钢楔形集流槽的出口处,设置放集流桶的地方,径流由集流槽流到小区外的集流桶中。从模拟降雨器开始降雨后,记录径流起始时间,定时采集径流过程样品,用已经编号的 200 mL 的塑料容器瓶收集泥沙样品,产流后前 20 min 内每 2 min 取样 1 次,20 min 后每隔 4 min 取样 1 次,直到最后关闭降雨器后停止产流的过程样。在每次收集泥沙样后,及时量取集流桶内的径流深度,在径流产生初期当流量较小时用 1 L 的量杯量取径流量,同时为保证径流深度的准确性,在径流桶内放置 HOBO 小型自记水位监测仪(测量精度 2 mm,每分钟记录 1 次数据)。在模拟降雨完成后,根据所量取径流小区集流桶的径流深度,求出径流总体积;所取样品经过静置、过滤后,在烘箱中进行烘干,通过称重法计算径流泥沙的含量。

1.3 样品采集及分析

在不同放牧强度样地上,采用“S”形方法均匀设

置 10 个 1 m×1 m 的样方,分层(0—10,10—20,20—30,30—40 cm)取样 500 g,带回实验室风干、过筛,测试相关指标;采用刈割法调查群落地上生物量,经过 80 ℃恒温烘干至恒重后,求得平均生物量干重(g/m²)。其中,土壤全碳含量使用元素分析仪(Elementar Vario Macro Cube,德国)测定^[16]。

土壤有机碳储量(g/m²)= $C_i \times D_i \times H_i \times (1 - G_i) \times 100$

(1)

砾石含量 $G_i = (>2\text{ mm 砾石干重} / \text{总土干重}) \times 100\%$
式中: i 表示不同土层; C_i 为 i 土层土壤有机碳含量(%); D_i 为土壤容重(g/cm³); H_i 为 i 土层厚度(cm); G_i 为砾石含量;土样采集地点的土壤为沙质栗钙土,砾石含量远小于 10%,因此在计算中忽略 G_i 。

2 结果与分析

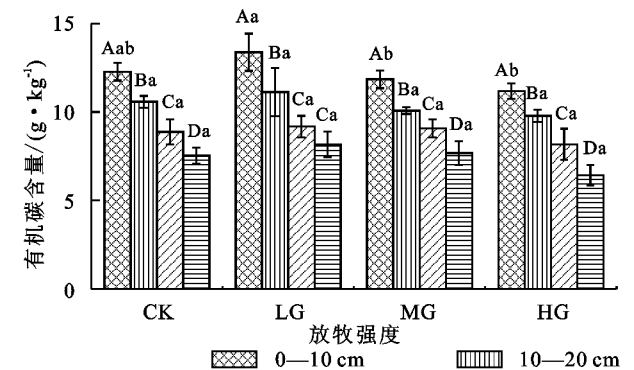
2.1 不同放牧强度下草地土壤侵蚀变化

土壤侵蚀主要是由地面覆盖层、降雨强度和地面坡度之间相互作用和制约造成的^[19]。本研究从放牧强度、降雨强度和草地坡度 3 个方面,分析不同放牧强度下草地土壤侵蚀变化规律。由表 2 可知,在 3 种

雨强、3 种坡度条件下 CK 的土壤侵蚀量均为最小。在同一坡度,不同放牧强度下的侵蚀量随雨强增加而增加,在 5°坡度时,随降雨强度的增加,不同放牧强度下的侵蚀量明显增加,20 mm/h 雨强时 HG 的侵蚀量是 CK 的 2.64 倍,40 mm/h 雨强时 HG 的侵蚀量是 CK 的 2.96 倍,当降雨强度为 60 mm/h 时 HG 的侵蚀量是 CK 的 4.28 倍,说明在坡度较小时,CK 的相对保土能力随雨强的增加而明显增强。在同一雨强下,坡度越大,放牧强度越大,则土壤侵蚀量就越大,这是由于随着坡度的增大,降雨对于地表的冲刷越来越大,致使侵蚀量明显增多,且随着放牧强度的增加,侵蚀量明显增加,当降雨强度为 20 mm/h 时,15°坡度的 CK、LG、MG、HG 的侵蚀量分别为 5°坡度的 5.88、7.13、9.01、10.75 倍。在同一雨强、同一坡度条件下,土壤侵蚀量随着放牧强度的增加而增加,总体上,相同雨强和坡度条件下,下垫面的郁闭度越大及放牧践踏破坏越小,侵蚀量就越小。在不同放牧强度下,降雨强度与土壤侵蚀量相关性均大于坡度与土壤侵蚀量的相关性($0.605>0.592$),表明降雨强度对土壤侵蚀的影响程度大于坡度对土壤侵蚀造成的影响。在 5°坡及 15°坡时,降雨强度与土壤侵蚀量均成幂函数关系,分别为 $y_{\text{(土壤侵蚀量)}}=x_{\text{(降雨强度)}}^{2.205}$ ($r^2=0.839,5^\circ$), $y_{\text{(土壤侵蚀量)}}=x_{\text{(降雨强度)}}^{2.550}$ ($r^2=0.806,15^\circ$);而在 10°坡时,二者未呈现出明显的相关性($r^2<0.8$)。

表 2 不同放牧强度下土壤侵蚀量随降雨强度、坡度变化总体特征

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	土壤侵蚀量/(kg·km ⁻²)			
		CK	LG	MG	HG
20	5	110	160	220	290
	10	510	830	1320	2020
	15	650	1140	1960	3150
40	5	470	630	900	1390
	10	1310	2270	4980	8840
	15	3480	5250	10530	16830
60	5	1030	1780	2380	4410
	10	5140	7090	12200	24020
	15	14740	17410	28570	50670



注:图中不同大写字母表示同一放牧强度下不同土层深度在 0.05 水平上差异显著;不同小写字母表示不同放牧强度下同一土层深度在 0.05 水平上差异显著。

2.2 不同放牧强度下草地土壤有机碳变化

由图 1 可知,不同放牧强度对草地土壤有机碳的含量、储量及其在土壤剖面上的垂直分布具有较大的影响。在 0—40 cm 土层,同一放牧强度下的不同土层有机碳含量呈现出显著的差异性($P<0.05$),CK、LG、MG 和 HG 土壤有机碳含量均随土层加深而呈递减的趋势,其变化范围分别为 12.28~7.53 g/kg (CK),13.38~8.18 g/kg (LG),11.85~7.68 g/kg (MG)和 11.18~6.43 g/kg (HG),表层 0—10 cm 土壤有机碳含量最高,达 30.63%~31.96%,对 0—40 cm 整个土层有机碳含量影响较大。在不同放牧强度下,0—10 cm 土层的土壤有机碳含量有明显的差异性($P<0.05$),放牧对 0—10 cm 土层土壤有机碳含量影响较大,LG 样地最高,从 CK 至 HG 土壤有机碳含量先增加后减少,这将影响着整个土层土壤有机碳变化规律。在 0—40 cm 整个土层,土壤有机碳含量从 CK 至 LG 土壤平均有机碳含量增加(增幅 6.62%),而从 LG 至 HG 土壤平均有机碳含量不断减少(降幅分别为 7.58%,15.05%),随放牧强度的变化趋势表现为 LG>CK>MG>HG。

在 0—40 cm 土层,同一放牧强度下的不同土层有机碳储量差异显著($P<0.05$),CK、LG、MG 和 HG 4 种样地土壤有机碳储量均呈现出随土层加深而递减的趋势,其变化范围分别为 1 814.64~1 213.43 g/m² (CK),2 019.34~1 341.68 g/m² (LG),1 822.55~1 293.44 g/m² (MG)和 1 740.12~1 126.82 g/m² (HG),且表层 0—10 cm 土壤有机碳储量最高,达 29.54%~30.71%。同时,放牧对 0—10 cm 土层土壤有机碳储量也造成较大影响($P<0.05$),且随着放牧强度的增大,土壤有机碳储量也呈现出先增加后减少的趋势,在 LG 样地最高。在 0—40 cm 土层中,有机碳储量变化趋势也表现为 LG>MG>CK>HG, LG 样地固碳能力较强,表明轻度放牧强度下,土壤有机碳含量和储量都相对较高。

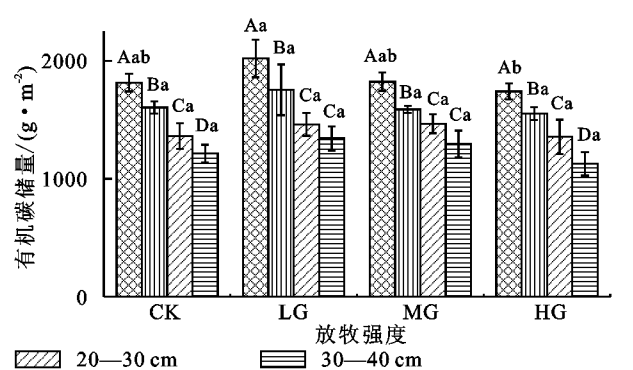


图 1 不同放牧强度下土壤有机碳含量和储量

2.3 土壤侵蚀对草地土壤有机碳的影响

土壤有机碳流失导致土地生产力严重下降,其有机碳流失主要随泥沙流失^[20],最高可达 97.6%^[21],因此,利用 0—10 cm 土壤有机碳含量和模拟降雨结果,对不同立地条件下放牧草地土壤有机碳流失量进行了计算。从表 3 可以看出,降雨强度对土壤有机碳流失程度的影响最显著,降雨强度为 60 mm/h 的有机碳流失量是 20 mm/h 的 8.5~22.7 倍;其次坡度对土壤有机碳流失程度影响也较明显,从 5°~15°坡有机碳流失程度增加了 5.9~11.4 倍;放牧强度相对于降雨强度和坡度对土壤有机碳流失量的影响稍弱,从对照样地到重度放牧有机碳流失量增加了 2.5~4.5 倍。可见土壤有机碳的流失主要受侵蚀强度的影响,侵蚀强度越大,土壤有机碳流失量越大。

草原大部分地区为漫岗区,坡度大多在 5°以下,因此以 5°坡度为例对主要影响有机碳因素的贡献率进行对比研究。分别以对照样地的放牧强度和 20 mm/h 的雨强为基准,通过计算降雨强度与放牧强度对土壤有机碳流失量的贡献率^[22],定量分析降雨强度与放牧强度两个单因素对土壤有机碳流失量的影响大小。由表 4 可知,降雨强度为 40,60 mm/h 时,降雨强度贡献率均远大于放牧强度贡献率,40 mm/h 时贡献率差值为 72.4%~76.9%,60 mm/h 时贡献率差值为 72.7%~90.4%,降雨强度相较于放牧强度对土壤有机碳的影响更大;60 mm/h 雨强时的贡献率大于 40 mm/h 时的贡献率,贡献率差值为 7.9%~9.5%,降雨强度越大,土壤

有机碳的流失量就越大;放牧强度贡献率表现为 CK<LG<HG<MG,从对照样地到中度放牧,放牧强度对土壤有机碳流失量的贡献率,随着放牧强度的增强而增大,增加 3.6%,到重度放牧时,其贡献率略有降低但仍高于轻度放牧时,放牧强度贡献率差值为 0.8%~1.2%。这表明降雨强度越大,放牧强度越强,土壤有机碳流失量就越大。

同时对降雨强度和土壤有机碳流失量进行相关分析结果,表明在 5°及 15°坡度时,降雨强度与土壤有机碳流失量呈幂函数关系,分别为 $y_{(\text{土壤有机碳流失量})} = x_{(\text{降雨强度})}^{2.205} (r^2=0.859, 5^\circ)$, $y_{(\text{土壤有机碳流失量})} = x_{(\text{降雨强度})}^{0.324} (r^2=0.827, 15^\circ)$;而在 10°坡度时,二者未呈现出明显的相关性($r^2<0.8$)。降雨强度与土壤有机碳流失量相关性同其与土壤侵蚀量的相关性一致,土壤有机碳流失量与土壤侵蚀量变化趋势较为一致。

表 3 不同立地条件下放牧草地土壤有机碳流失量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	土壤有机碳流失量/(kg·km ⁻²)			
		CK	LG	MG	HG
20	5	1.32	2.14	2.61	3.24
	10	6.12	11.11	15.64	22.58
	15	7.80	15.25	23.23	35.22
40	5	5.64	8.43	10.67	15.54
	10	15.72	30.37	59.01	98.83
	15	41.76	70.25	124.78	188.16
60	5	12.36	23.82	28.20	49.30
	10	61.68	94.86	144.57	268.54
	15	176.88	232.95	338.55	566.49

表 4 不同放牧强度下放牧强度和降雨强度贡献率

放牧强度	20 mm/h	40 mm/h	60 mm/h	综合增量/kg		综合增量 A/kg		综合增量 B/kg		放牧强度贡献率/%		降雨强度贡献率/%	
	流失量/ kg	流失量/ kg	流失量/ kg	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h
CK	1.32	5.64	12.36	4.32	11.04	0	0	4.32	11.04	0.0	0.0	100.0	100.0
LG	2.14	8.43	23.82	7.11	22.50	0.82	0.82	6.29	21.68	11.5	3.6	88.5	96.4
MG	2.61	10.67	28.20	9.35	26.88	1.29	1.29	8.06	25.59	13.8	4.8	86.2	95.2
HG	3.24	15.54	49.30	14.22	47.98	1.92	1.92	12.30	46.06	13.5	4.0	86.5	96.0

注:表中综合增量 A 为同一雨强下由放牧强度增强引起的土壤有机碳流失量的增加;综合总量 B 为同一放牧强度下由降雨强度增大引起的土壤有机碳流失量的增加。

3 讨论

3.1 不同放牧强度对草地土壤侵蚀的影响

土壤侵蚀是降雨和土壤共同作用的结果,它的产生和发展与地表土壤的理化性质密切相关^[23]。土壤的理化性质影响着土壤的透水性能、土壤强度及土壤结构和紧密程度等,极大影响土壤的抗蚀力^[24]。草原放牧强度越大,土壤侵蚀现象越严重,许志信等^[9-10]对内蒙古东乌旗草甸草原和锡林郭勒盟东乌旗贺斯格乌拉牧场的研究中都得出这一结论,美国林业局在爱达荷州天然草地进行的试验也得出,随着放牧强度的增加,土壤侵蚀越来越严重,与本试验

结论一致。这主要是由于放牧干扰显著影响着草原土壤的理化性质^[25-26],随着放牧强度的增加,牲畜对土壤压实作用不断增强,土壤含水量和土壤孔隙度减少,通气性、渗透性和蓄水能力下降,土壤容重逐渐增大^[26],且土壤颗粒组成^[27]结构发生变化,本研究中土壤黏粒含量随放牧强度增强先降低后增加(HG>CK>MG>LG),使得土壤侵蚀更易发生^[23];牲畜过度采食植物枝叶,影响着草原植被盖度、密度和生物量^[15,28],同时,因土壤物理性质的变化,加速了土壤碳素的流失^[29],土壤有机碳含量和储量下降,影响土壤结构和紧密程度,使得土壤侵蚀极易发生^[23]。因

此,为减少土壤侵蚀的发生,应合理调节草原放牧强度,保护和改善草原植被及草原土壤结构和有机质,这有利于保护和改善草原生态系统,促进草原畜牧业可持续发展。

3.2 不同放牧强度对草地土壤有机碳的影响

土壤有机碳主要受地表植被、土壤理化性质、土地利用方式等影响,主要来源于植被凋落物及植被根系的分泌物、碎屑等^[30],随着土层加深,有机质来源减少且向下迁移量减少^[31],本研究得出,土壤有机碳含量和储量均呈现随土层加深而递减的趋势,表层 0—10 cm 土壤有机碳含量和储量最高。而放牧通过牲畜的踩踏、采食等,降低了群落植被的平均高度、盖度与地上生物量^[15],破坏植物根系,同时会影响到土壤的特性和结构^[32],影响到土壤有机碳的迁移变化,随放牧强度增加,地上植物和凋落物有机碳储量降低^[15],显著影响表层土壤有机碳含量和储量,本研究表明,放牧对 0—10 cm 土层土壤有机碳含量和储量影响较大,随着放牧强度的增大,土壤有机碳含量和储量均呈现出先增加后减少的趋势(LG>CK>MG>HG)。过度放牧显著减少草地生物量,降低了凋落物的积累及其向土壤碳素的输入,使土壤有机碳含量及其储量显著降低^[15],而适度放牧虽然减少了地上植被生物量,但由于地上净初级生产力的补偿性生长,会增加群落的年净初级生产力,一定程度上增加草原植物的年固碳能力^[6,33],并通过牲畜的采食、踩踏、排泄等活动进入到土壤库中^[34]。其他学者也得出,随着土层深度的增加,土壤有机碳含量呈下降趋势;放牧对表层土壤的有机碳含量影响最大(0—20 cm);随着放牧强度的增加,土壤有机碳含量呈下降趋势(LG>MG>HG)^[6,16-17,31]。适度放牧有利于草地生态系统的良性发展,过度放牧对草地生态系统造成严重的破坏,合理的放牧利用有利于退化草地的可持续性恢复。

3.3 土壤侵蚀对草地土壤有机碳的影响

草地土壤有机碳流失主要受侵蚀强度的影响,在黄土丘陵区及华南侵蚀区的研究结果与本研究结果一致^[1],华南侵蚀区研究中得出土壤有机碳流失量与侵蚀强度呈线性正相关关系^[14]。本文从放牧强度、降雨强度、坡度 3 个方面研究侵蚀强度对土壤有机碳流失量的影响程度,结果表明 3 个因素对土壤有机碳流失的影响程度排序为降雨强度>坡度>放牧强度,有的研究得出对土壤有机碳流失的影响因素表现为降雨强度>土壤覆盖度>地面坡度^[4],降雨强度显著影响着土壤有机碳流失量。降雨强度影响着径流产生、径流量及侵蚀产沙过程,影响着土壤侵蚀量,进而

影响着土壤有机碳流失量^[4,35]。在一定条件下,雨强越大,产流所需时间就越短,单位面积单位时间接受的雨量就越大,径流量随之增大,侵蚀产沙率初期急剧增大后迅速下降至稳定速率,导致土壤侵蚀量随着雨强的增大明显增大^[4,35],从而影响着土壤有机碳流失量的变化^[4,35]。土壤有机碳流失量(率)随着降雨强度的增大而增大^[1,4,14,19],二者为正相关性^[4,19],呈现出幂函数关系^[1]、线性关系^[36]。本研究得出在 5°及 15°坡度时,二者呈现明显的幂函数关系,同降雨强度与土壤侵蚀量的相关性一致,也为幂函数关系,土壤有机碳流失量与土壤侵蚀量变化一致。牧草冠层和根系的作用能有效地控制坡面土壤侵蚀^[37],放牧强度对土壤有机碳流失量的影响随着放牧强度的增强而增大。本研究通过对 5°坡度条件下降雨强度与放牧强度两个单因素对土壤有机碳流失量的影响分析结果,表明降雨强度贡献率均远大于放牧强度贡献率,放牧强度对土壤有机碳流失量的贡献率随着放牧强度的增强而增大,降雨强度相较于放牧强度对土壤有机碳的影响更大,降雨强度越大,放牧强度越强,土壤侵蚀量和土壤有机碳流失量就越大。

4 结论

(1)在坡度一定时,不同放牧强度下的侵蚀量随降雨强度增强而增加;降雨强度一定时,坡度越大,放牧强度越大,其土壤侵蚀量就越大,且随着放牧强度的增加,侵蚀量明显增加。

(2)不同放牧强度的土壤有机碳含量均呈现随土层加深而递减的趋势,且放牧强度对表层土壤有机碳的影响较大,随着放牧强度的增大,有机碳储量为先增加后减少的趋势,即 LG>CK>MG>HG,轻度放牧最高,有利于提高草原固碳能力。

(3)坡度一定时,土壤有机碳流失量受降雨强度影响程度远大于放牧强度,降雨强度越大,放牧强度越大,土壤侵蚀量和土壤有机碳流失量就越大,与降雨强度均呈幂函数关系。

参考文献:

- [1] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 30-33.
- [2] Oost K V, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. Science, 2007, 318(5850): 626-629.
- [3] Zhang J, Quine T A, Shijun N I, et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion[J]. Global Change Biology, 2006, 12(10): 1834-1841.
- [4] 王文欣, 庄义琳, 庄家尧, 等. 不同降雨强度下坡地覆盖

- 对土壤有机碳流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 62-66.
- [5] Rattan L. Soil quality and soil erosion[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999: 17-36.
- [6] 王明君, 韩国栋, 赵萌莉, 等. 草甸草原不同放牧强度对土壤有机碳含量的影响[J]. 草业科学, 2007, 24(10): 6-10.
- [7] 张肖林, 李勇, 于寒青, 等. 黄土区退耕草地合理放牧可减少土壤 CO₂ 排放和土壤侵蚀[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 988-997.
- [8] 林慧龙, 龙瑞军, 任继周. 放牧侵蚀研究回顾与展望[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2222-2227.
- [9] 许志信, 李永强. 草地退化对水土流失的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(1): 65-68.
- [10] 许志信, 张晓明, 白飞, 等. 草甸草原植被利用强度对水土流失影响的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 68-73.
- [11] 方海燕, 盛美玲, 孙莉英, 等. ¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb_{ex} 示踪黑土区坡耕地土壤侵蚀对有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1856-1862.
- [12] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 耕作及水蚀影响下坡耕地土壤有机碳动态模拟[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 730-735.
- [13] 喻为, 李忠武, 黄金权, 等. 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 423-430.
- [14] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1266-1273.
- [15] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被—土壤系统有机碳组分储量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4617-4625.
- [16] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度对大针茅草原土壤全土及轻组碳氮储量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 101-106.
- [17] 李春莉, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同放牧压力下荒漠草原土壤有机碳特征及其与植被之间关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 134-138.
- [18] 李博. 我国草地资源现况、问题及对策[J]. 中国科学院院刊, 1997, 12(1): 49-51.
- [19] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 465-473.
- [20] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011(增刊1): 170-176.
- [21] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 900-908.
- [22] 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. 泥沙研究, 2010(6): 48-53.
- [23] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 464-469.
- [24] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1319-1325.
- [25] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4144-4152.
- [26] 安慧, 徐坤. 放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 35-42.
- [27] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J]. 泥沙研究, 2003, 12(5): 64-68.
- [28] 江源, 章异平, 杨艳刚, 等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被—土壤系统耦合的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 837-846.
- [29] 闫玉春, 宋长春, 常瑞英, 等. 长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1388-1393.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [31] 张林, 孙向阳, 乔永, 等. 不同放牧强度下荒漠草原土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 149-153.
- [32] 许志信, 赵萌莉. 过度放牧对草原土壤侵蚀的影响[J]. 中国草地学报, 2001, 23(6): 59-63.
- [33] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 等. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 11-18.
- [34] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应 I. 碳循环的分室模型、碳输入与贮存[J]. 植物学通报, 1998, 15(2): 14-22.
- [35] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.
- [36] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 9-13.
- [37] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2387-2396.